

Regelungsstrategien für permanentmagnetische Direktantriebe mit mehreren Freiheitsgraden

Von der Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik der
Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen zur
Erlangung des akademischen Grades eines Doktors der
Ingenieurwissenschaften genehmigte Dissertation

vorgelegt von

Diplom-Ingenieur
Klemens Kahlen
aus Aachen

Berichter: Universitätsprofessor Dr. Rik De Doncker
 Universitätsprofessor Dr.-Ing. Dr. h.c. Gerhard Henneberger

Tag der mündlichen Prüfung: 15. Februar 2002

Diese Dissertation ist auf den Internetseiten der Hochschulbibliothek verfügbar

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Assistent am Institut für Stromrichtertechnik und Elektrische Antriebe (ISEA) der RWTH Aachen. In einem Gemeinschaftsprojekt zwischen dem WZL (Laboratorium für Werkzeugmaschinen und Betriebslehre), dem IEM (Institut für Elektrische Maschinen) und dem ISEA, welches durch die VW-Stiftung finanzielle Unterstützung erfuhr, wurde der in dieser Arbeit beschriebene Flächenmotor und Kugelmotor entwickelt und aufgebaut.

Dem Institutsleiter Herrn Professor De Doncker möchte ich ganz herzlich für die Betreuung der wissenschaftlichen Arbeit danken. Er hat ein freies Forschen und Arbeiten ermöglicht und gefördert. In vielen interessanten technischen Diskussionen gab es zahlreiche Anregungen, die in diese Arbeit mit eingeflossen sind. Herrn Professor Henneberger möchte ich für die Übernahme des Korreferates danken. Durch die vielen Projekttreffen war er in die Problematik des Kugelmotor involviert und hat dabei die Entwicklungsschritte meiner Arbeit mit unterstützt.

Den Herren Thomas Reinartz und Thomas Busch möchte ich für die gute Zusammenarbeit an dem gemeinschaftlichen Kugelmotorprojekt danken. Ein besonderer Dank gebührt meinem ehemaligen Bürokollegen Claus-Ulrich Karipidis. Neben der fachlichen Zusammenarbeit an der ISEADSP-Karte war es auch in persönlicher Hinsicht eine schöne Zeit in "Büro 19".

Das gesamte Projekt des Kugelmotors und damit auch die entstandene Dissertation wäre nicht ohne die Hilfe von vielen fleißigen Händen möglich gewesen. Besonders "meine" vielen Diplomanden, Studienarbeiter, WiHis und HiWis haben nicht nur kräftig mit angepackt, sondern mich durch viele Diskussionen auf neue Ideen gebracht. Auch die Unterstützung durch die Angestellten des Instituts (Assistentenkollegen, Sekretariat, Netzwerkbetreuung, elektrische und mechanische Werkstatt) und die gute Arbeitsatmosphäre haben zum Gelingen der Arbeit beigetragen.

Bei meinen Eltern möchte ich mich bedanken, dass sie bei mir das Interesse an der Technik geweckt und mir das Studium der Elektrotechnik ermöglicht haben. Ein ganz besonderer Dank gilt meiner Frau Uta Rodler-Kahlen. Sie hat mir in vielen Tagen den Rücken frei gehalten, sich dabei um unsere Tochter Lena gekümmert und mich immer wieder aufgemuntert, so dass ich (auch in vielen Nachtschichten), dieses "Werk" fertig stellen konnte.

Zusammenfassung

Regelungsstrategien für permanentmagnetische Direktantriebe mit mehreren Freiheitsgraden

Mehrdimensionale Bewegungen, wie sie bei Robotern und Werkzeugmaschinen vorkommen, werden meist durch die Verkettung von mehreren rotatorischen oder linearen Antriebselementen mit jeweils einem Freiheitsgrad realisiert. In der vorliegenden Arbeit wird ein neuartiges Antriebskonzept für permanentmagnetische Direktantriebe mit mehreren Freiheitsgraden am Beispiel eines Flächenmotors und eines Kugelmotors vorgestellt.

Es wird ein neu entwickeltes Verfahren für die innere Kraft- und Momentensteuerung präsentiert, welches aus den vorgegebenen Sollgrößen die notwendigen Ströme der Motorwicklungen berechnet. Aufgrund des variablen Polteilungsverhältnisses muss dabei im Betrieb jede Statorspulenwicklung individuell angesteuert werden. Die vorgestellten Vektorregelverfahren ermöglichen dabei, eine Lösung des überbestimmten Systems innerhalb eines vorgegebenen Regeltaktes zu finden.

Für dieses spezielle Antriebssystem war es notwendig, neuartige Komponenten zu entwickeln. Dazu gehören u.a. ein Verbund von mehreren Regelungskarten (ISEADSP) mit digitalen Signalprozessoren und ein modular aufgebauter Stromrichter für insgesamt 96 Kanäle. Neben dem Aufbau der Prüfstände und deren Komponenten sind Simulationen und Experimente von mehrdimensionalen Bewegungen der Antriebe dokumentiert.

Abstract

Control strategies for permanent magnet direct drives with multiple degrees of freedom

Multi-dimensional motion control in robots and machine tools are often realized by connecting several rotational or linear one-dimensional drives in series. This thesis describes a new electrical drive concept for permanent magnet direct drives with multiple degrees of freedom. As an example, a planar and a spherical motor is presented.

A new developed method for the force and torque control is presented, which calculates the stator currents on basis of the command signals. During operation each stator pole has to be controlled individually because of the variable pole pitch. Different vector control algorithms are developed to compute a solution for the over-determined system within a limited control cycle time.

The developed algorithms were tested in simulations and implemented in test benches for verification. New components were designed for this special drive concept, e.g. a cluster of several control boards (ISEADSP) with digital signal processors and a modular power converter which has 96 channels. Not only the setup of the test benches and its components but also simulations and experiments of the multi-dimensional motion are presented in this work.

Inhaltsverzeichnis

| | | |
|----------|---|----------|
| 1 | EINLEITUNG | 7 |
| 2 | ANTRIEBSSYSTEME MIT MEHREREN FREIHEITSGRADEN | 9 |
| 2.1 | Anforderungen an Mehrkoordinatenantriebe | 9 |
| 2.2 | Direktantriebe mit mehreren Freiheitsgraden | 12 |
| 2.3 | Planare Direktantriebe..... | 12 |
| 2.3.1 | Planare Antriebe nach dem Induktionsprinzip..... | 12 |
| 2.3.2 | Reluktanz- und Hybridschrittantriebe | 13 |
| 2.3.3 | Planare Antriebe mit permanentmagnetischer Erregung | 15 |
| 2.3.4 | Weitere planare Antriebe | 17 |
| 2.4 | Funktionsprinzipien von sphärische Direktantrieben | 17 |
| 2.4.1 | Sphärische Antriebe nach dem Induktionsprinzip | 17 |
| 2.4.2 | Reluktanz- und Hybridschrittmotoren | 19 |
| 2.4.3 | Sphärische Antriebe mit permanentmagnetischer Erregung..... | 20 |
| 2.4.4 | Weitere sphärische Antriebe | 22 |
| 2.5 | Zusammenfassung..... | 22 |
| 3 | PERMANENTERREGTER DIREKTANTRIEB MIT VARIABLER POLTEILUNG... 25 | |
| 3.1 | Betrachtung des Gesamtsystems | 25 |
| 3.2 | Elektromagnetische Kraftbildung und Motorauslegung | 26 |
| 3.3 | Der Flächenmotor | 36 |
| 3.4 | Der Kugelmotor | 38 |
| 3.5 | Zusammenfassung..... | 40 |
| 4 | REGELUNGSKONZEPTE FÜR MEHRDIMENSIONALE DIREKTANTRIEBE..... 41 | |
| 4.1 | Entwurf der Regelung | 41 |
| 4.2 | Allgemeine Darstellung des Regelkreises..... | 44 |
| 4.2.1 | Grundlagen zum Motormodell..... | 47 |
| 4.2.2 | Grundlagen zum Stellglied | 48 |
| 4.3 | Regelungskonzepte für den Flächenmotor..... | 49 |
| 4.3.1 | Die Modellbildung des Flächenmotors | 50 |
| 4.3.2 | Das Stellglied des Flächenmotors | 53 |
| 4.3.3 | Positions- und Geschwindigkeitsregelung des Flächenmotors..... | 58 |
| 4.3.4 | Bewegung entlang von Bahnkurven | 59 |
| 4.4 | Regelungskonzepte für den Kugelmotor..... | 62 |
| 4.4.1 | Koordinatensysteme..... | 62 |
| 4.4.2 | Das Modell des Kugelmotors..... | 65 |
| 4.4.3 | Stellglieder des Kugelmotors | 69 |
| 4.4.4 | Positionsregelung des Kugelmotors..... | 74 |
| 4.4.5 | Bewegung entlang von Bahnkurven | 78 |
| 4.5 | Zusammenfassung..... | 78 |

| | | |
|----------|--|------------|
| 5 | ANTRIEBSKOMPONENTEN DER MEHRDIMENSIONALEN DIREKTANTRIEBE | 81 |
| 5.1 | Die Regelungshardware | 81 |
| 5.1.1 | Die ISEADSP-Regelungskarte | 83 |
| 5.1.2 | Die Schnittstellenkarten | 87 |
| 5.2 | Leistungselektronik zur Ansteuerung des Kugelmotors | 88 |
| 5.2.1 | Konzept und Aufbau des Stromrichters für den Kugelmotor | 89 |
| 5.2.2 | Beschreibung der Stromrichterkanäle | 91 |
| 5.2.3 | Beschreibung des Gesamtsystems | 92 |
| 5.3 | Betriebsverhalten des Stromrichters | 93 |
| 5.3.1 | Rückspeisung von Energie in den Zwischenkreis | 94 |
| 5.3.2 | Vergleich von synchroner und asynchroner Taktung | 95 |
| 5.3.3 | Vergleich von variabler und fester Phasenbeziehung | 96 |
| 5.3.4 | Messtechnische Untersuchungen | 103 |
| 5.4 | Zusammenfassung | 107 |
| 6 | SIMULATIONEN UND EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNGEN | 109 |
| 6.1 | Entwicklungsschritte und Arbeitsumgebung | 109 |
| 6.2 | Regelung des Flächenmotors | 111 |
| 6.2.1 | Stellglieder für die Kraftregelung | 112 |
| 6.2.2 | Positionsregelung und Bahnkurvensteuerung | 112 |
| 6.2.3 | Weitere experimentelle Beobachtungen | 116 |
| 6.3 | Regelung des Kugelmotors | 117 |
| 6.3.1 | Untersuchung der Stellglieder | 119 |
| 6.3.2 | Mehrdimensionale Positions- und Geschwindigkeitsregelung | 121 |
| 6.3.3 | Weitere experimentelle Beobachtungen | 125 |
| 6.4 | Ausblick und Optimierungsansätze für den Kugelmotorantrieb | 125 |
| 6.5 | Zusammenfassung | 128 |
| 7 | ZUSAMMENFASSUNG | 129 |
| | ANHANG A LITERATURVERZEICHNIS | 131 |
| | ANHANG B VERZEICHNIS DER VERWENDETEN FORMELZEICHEN | 137 |
| | ANHANG C KENNDATEN UND BILDER DER MOTOREN | 143 |
| C 1 | Maße und Kenndaten des Flächenmotorprüfstandes | 143 |
| C 2 | Bilder des Flächenmotorprüfstandes | 144 |
| C 3 | Maße und Kenndaten des Kugelmotors | 145 |
| C 4 | Skizzen und Bilder des Kugelmotorprüfstandes | 147 |
| | ANHANG D KENNDATEN UND BILDER DER ANTRIEBSKOMPONENTEN | 151 |
| D 1 | Kenndaten der Leistungselektronik | 151 |
| D 2 | Skizzen und Fotos der Leistungselektronik | 152 |
| D 3 | Die Regelungshardware | 154 |

1 Einleitung

Heutige Werkzeugmaschinen und Handhabungsroboter benötigen bis zu sechs Freiheitsgrade in der Bewegung. Diese werden meist durch offene kinematische Ketten realisiert, bei denen rotatorische oder lineare Antriebe miteinander gekoppelt sind. Diese konventionellen Antriebe besitzen allerdings jeweils nur einen Freiheitsgrad in der Bewegung. Bei den seriellen und parallelen kinematischen Systemen gibt es aufgrund der Hebelarme und Gelenke Einschränkungen in der Positioniergenauigkeit und Steifigkeit. Weiterhin ist die Bewegungsfreiheit infolge der mechanischen Anordnung und der elektrischen Zuleitungen teilweise eingeschränkt.

In dieser Arbeit werden verschiedene Regelstrategien für mehrdimensionale Direktantriebe mit permanentmagnetischer Erregung entwickelt und verglichen, mit denen die Nachteile der gekoppelten Antriebssysteme vermieden werden können. Am Beispiel eines Kugelmotors [1], der drei Freiheitsgrade in der Bewegung besitzt, wird das mehrstufige Konzept zur Regelung des Momentes, der Geschwindigkeit und der Position dargestellt. Durch die Anordnung der großen Anzahl an Stator- und Rotorpolen besitzt der Motor ein variables Polteilungsverhältnis. Aus diesem Grund müssen die Wicklungen der Statorpole individuell angesteuert werden. Durch das spezielle Maschinenkonzept werden daher besondere Anforderungen an die Antriebskomponenten gestellt. Die Leistungsdaten der vorgestellten Antriebe orientieren sich an den Anforderungen von Handhabungsgeräten, Robotern und Werkzeugmaschinen.

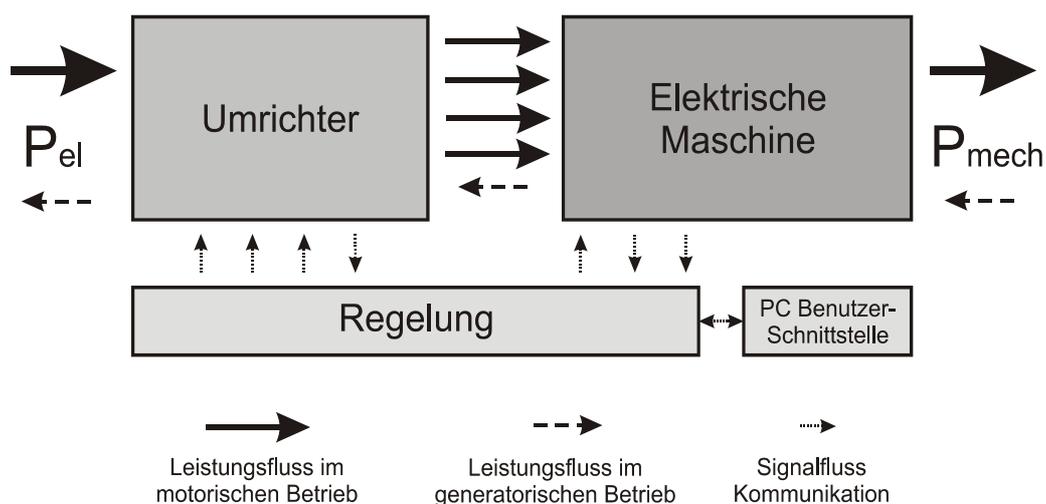


Bild 1.1 Hauptkomponenten des mehrdimensionalen elektrischen Direktantriebes

Die wichtigsten Komponenten des Antriebes sind in Bild 1.1 dargestellt. Da der Antrieb als Positionier- und Stellantrieb eingesetzt wird, liegt überwiegend ein motorischer Betrieb vor.

Lediglich beim Abbremsen der bewegten Masse wird Energie zurückgespeist. Abhängig von der aktuellen Ist-Position und einer gewünschten Soll-Position muss die Regelungshardware die Steuersignale für den Stromrichter generieren. Dazu müssen komplexe Regelungsalgorithmen auf einem Signalprozessor berechnet werden. Der Benutzer kann über einen PC entsprechende Vorgaben machen und das Systemverhalten beobachten.

Bei der Entwicklung eines Kugelmotors als mehrdimensionaler Antrieb, sowie eines Flächenmotors als planare Vorstudie, war die interdisziplinäre Zusammenarbeit von drei Instituten der RWTH Aachen notwendig. Am Institut für Elektrische Maschinen (IEM) und am Laboratorium für Werkzeugmaschinen (WZL-WM) wurden die elektrischen Maschinen (Flächen- und Kugelmotor) ausgelegt, konstruiert und gefertigt. Am Institut für Stromrichtertechnik und Elektrische Antriebe (ISEA) wurde im Rahmen dieser Arbeit die benötigte Leistungselektronik und Regelungshardware entwickelt sowie unterschiedliche Regelungsstrategien und -algorithmen für die Bewegung der mehrdimensionalen Motoren entworfen. Nicht die einzelnen Komponenten des Antriebes müssen für sich optimal ausgelegt sein, sondern gerade das Zusammenspiel aller Teilbereiche entscheidet über die Leistungsfähigkeit, z.B. die Positioniergenauigkeit und Steifigkeit, des gesamten Systems.

Im folgenden Kapitel wird ein kurzer Überblick über verschiedene mehrdimensionale planare und sphärische Direktantriebe gegeben. Die Antriebe werden auf ihre Leistungsfähigkeit und Bewegungsfreiheit hin untersucht. Nachfolgend wird das neuartige Funktionsprinzip des mehrdimensionalen Direktantriebes mit variabler Polteilung am Beispiel eines Flächen- und eines Kugelmotors vorgestellt. Die Darstellung der Kraft- und Momentenerzeugung erfolgt insoweit, wie sie für das Verständnis der später beschriebenen Regelungskonzepte notwendig ist.

Der Schwerpunkt der Arbeit liegt auf dem Entwurf und dem Vergleich verschiedener Regelungsstrategien. Zunächst wird die Modellbildung des Systems als Grundlage für die numerischen Simulationen erläutert. Nach einer Darstellung des gesamten Regelkreises und der Kraft- und Positionsregelung im kartesischen Koordinatensystem des Flächenmotors erfolgt die Beschreibung verschiedener Momentensteuerverfahren sowie einer übergeordneten Positions- und Geschwindigkeitsregelung für den dreidimensionalen Fall des Kugelmotors.

Durch den speziellen Aufbau der Maschine ergeben sich bestimmte Anforderungen an die Regelungshardware und den Stromrichter, wobei keine Standardlösung verwendet werden kann. Die auf das System abgestimmte Auslegung mit modularen Komponenten wird detailliert beschrieben und mit Messungen am Laboraufbau dokumentiert.

Simulationen und Experimente des Gesamtsystems verdeutlichen am Ende dieser Arbeit die Leistungsfähigkeit der Direktantriebe sowie der vorgestellten Regelstrategien. Abschließend werden im Anhang die einzelnen Komponenten des Versuchsaufbaus mit Skizzen und Fotos dargestellt. Darüber hinaus sind die spezifischen Kenndaten der Antriebskomponenten zusammengefasst.

2 Antriebssysteme mit mehreren Freiheitsgraden

In diesem Kapitel erfolgt ein grundlegender Überblick über planare und sphärische Mehrkoordinatenantriebe. Dabei wird zunächst kurz auf die klassische Realisierung mit gekoppelten Antrieben eingegangen. Die grundlegenden Funktionsprinzipien von konventionellen Motoren und Antrieben mit einem Freiheitsgrad sind von Henneberger und De Doncker beschrieben worden [2][3]. Im weiteren Verlauf werden Direktantriebe vorgestellt, die mehrere Freiheitsgrade in der Bewegung in einem einzigen Motor vereinen. Der Schwerpunkt liegt auf den konstruktiven und funktionellen Prinzipien der Maschinen. Für einen elektrischen Antrieb ist neben dem Motor auch dessen Ansteuerung für das Betriebsverhalten von entscheidender Bedeutung. Die moderne Leistungselektronik mit ihren Bauelementen hat dabei einen entscheidenden Einfluss u.a. auf die Einsatzgebiete, die Leistungsfähigkeit und den Wirkungsgrad des Antriebes. Genauso bedeutend ist die Entwicklung der Regelungstechnik. Neuartige Steuerverfahren sind durch den Einsatz von leistungsfähigen Mikrorechnersystemen ermöglicht worden. Bei den hier vorgestellten Antrieben werden auch die Komponenten bestehend aus Leistungselektronik, Regelungshardware und Software erläutert, soweit sie veröffentlicht sind und sich von den Prinzipien der rotatorischen Antriebe unterscheiden. Neben den theoretischen Betrachtungen werden außerdem die Einsatzgebiete und praktische Erfahrungen vorgestellt.

2.1 Anforderungen an Mehrkoordinatenantriebe

Die Anforderungen an einen Antrieb ergeben sich aus der Anwendung und der Einbindung in das Gesamtsystem. Dabei müssen bestimmte Kriterien zwingend eingehalten werden, wie z.B. die Positioniergenauigkeit. Andere dürfen in gewissen Bereichen schwanken, z.B. der Wirkungsgrad. Oftmals werden Anforderungen gestellt, die sich nicht gleichzeitig optimal erfüllen lassen. Der Anwender muss die Prioritäten jeweils nach seinen Kriterien festlegen.

Die Einsatzgebiete von Mehrkoordinatensystemen liegen unter anderem im Werkzeugmaschinenbau und in der Handhabungsrobotik. Die Anforderungskriterien sind teilweise ähnlich, je nach Anwendung aber auch unterschiedlich. Die folgende Zusammenstellung gibt einen kurzen Überblick über verschiedene Anforderungskriterien.

- **Freiheitsgrade und Bewegungsraum:** Bei industriellen Fertigungsprozessen werden bis zu sechs Freiheitsgrade zur Bewegung in allen Raumrichtungen benötigt. Je nach Anwendung müssen kleinere oder größere Verfahrswege bewältigt werden. Durch den konstruktiven Aufbau soll es möglichst keine Einschränkungen im Bewegungsraum geben.

- **Positionier- und Wiederholgenauigkeit:** Besonders bei Werkzeugmaschinen müssen sehr enge Toleranzen eingehalten werden, damit die produzierten Werkstücke eine gleichbleibend gute Qualität besitzen. Dabei hängen die Genauigkeiten sowohl von der Maschine selbst als auch vom verwendeten Messsystem ab. Ist kein absolutes Messsystem vorhanden, so müssen Referenzmarken vorhanden sein, auf die das System zu Beginn, bzw. im Betrieb, seine relative Position beziehen kann.
- **Kräfte und Momente:** Die Antriebssysteme müssen in der Lage sein, die geforderten Mindestkräfte und -momente zu erzeugen. Dabei müssen nicht nur statische Kräfte sondern auch dynamische Vorgaben mit berücksichtigt werden. Für das dynamische Verhalten spielt neben dem eigenen Trägheitsmoment auch die Größe des Lastmoments eine entscheidende Rolle. So werden bei Werkzeugmaschinen hohe Kräfte und Momente gefordert, wogegen bei Bestückungsautomaten die bewegten Massen sehr gering sind.
- **Steifigkeit:** Sowohl bekannte externe Beeinflussungen als auch unvorhergesehene Störeinflüsse dürfen sich auf das System nicht negativ auswirken. Dies bedeutet, dass z.B. bei Werkzeugmaschinen der Verfahrweg bei der Werkstückbearbeitung nur minimal verlassen werden darf. Die Antriebsdynamik ist für die Steifigkeit in der Bewegungsrichtung verantwortlich. Zusätzlich müssen passive Gelenke und Hebelarme berücksichtigt werden, die Spiel und Verbiegungen aufweisen.
- **Einsatzbereitschaft:** Gerade im industriellen Bereich dürfen Systeme nur sehr geringe Standzeiten haben. Dies bedingt, dass die Ausfallwahrscheinlichkeiten aller Antriebskomponenten nur sehr klein sein dürfen. Der Verschleiß der Systeme darf nur minimal sein und der Wartungsaufwand muss möglichst gering gehalten werden. Äußere Umwelteinflüsse dürfen dabei keine negative Auswirkungen haben. Berührungslose Systeme bieten Vorteile, da es keine Reibung gibt, die einen Materialverschleiß bewirken.
- **Handhabung:** Das System sollte möglichst einfach aufgebaut sein und für den Nutzer mit möglichst wenig Einschränkungen in der Bedienung und im Gebrauch belegt sein.
- **Kosten:** Sowohl bei den Investitionskosten als auch bei den laufenden Kosten im Betrieb möchte der Kunde ein preisgünstiges System haben. Eine Analyse der life-cycle-costs zeigt, inwieweit höhere Anschaffungskosten bei einer besseren Effizienz gerechtfertigt sind.

Die große Vielzahl von kommerziell erhältlichen Systemen zeigt, dass es sehr unterschiedliche Anwendungsgebiete mit unterschiedlichen Anforderungen gibt. Neben den elektrischen Systemen existieren auch pneumatische und hydraulische Konzepte, welche in der vorliegenden Arbeit jedoch nicht berücksichtigt werden. Auf die oben aufgeführten Anforderungskriterien wird zur Beurteilung der später vorgestellten Direktantriebe zurückgegriffen.

Der Aufbau der konventionellen Mehrkoordinatenantriebe ist durch die Verkettung von mehreren Antrieben gekennzeichnet. Dabei werden die einzelnen Motoren, welche nur einen einzigen Freiheitsgrad besitzen, seriell oder parallel miteinander gekoppelt. Beispiele hierfür sind z.B. Werkzeugmaschinen mit gekreuzten Linearachsen, Manipulatorarme mit mehreren rotatorischen Maschinen und Hexapode mit parallelen Stellantrieben. Zur Erläuterung der Vor- und Nachteile solcher gekoppelten Systeme dient der Aufbau eines Montageroboters mit mehreren Antriebsachsen.

Der große Vorteil der gekoppelten Systeme liegt in der Verwendung von handelsüblichen und damit kostengünstigen einzelnen Antriebseinheiten (Bild 2.1). Diese sind für sich schon weitgehend optimiert und haben in den unterschiedlichen Einsatzgebieten ihre Leistungsfähigkeit bewiesen. Sie sind kompakt gebaut und weisen eine hohe Kraftdichte auf. Durch ihren guten Wirkungsgrad gibt es keine Kühlproblematik, was wiederum für eine hohe Lebensdauer spricht. Nachteilig bei den offenen kinematischen Ketten ist eine recht unterschiedliche Belastung der einzelnen bewegten Achsen. Hinzu kommt ein hoher Verkabelungsaufwand, da jeder einzelne Motor an die entsprechenden Leistungs- und Signalleitungen angeschlossen werden muss. Durch die Kabelbäume ergibt sich ein eingeschränkter Aktionsradius. Eine Möglichkeit zur Realisierung von mehrfachen Drehungen um die eigene Achse sind berührungsfreie Drehübertrager, die mittels induktiver Kopplung Energie und Signale übertragen können [4]. Daneben braucht jeder einzelne Antrieb die Vorgaben von einer übergeordneten Steuerung. Die räumliche Bewegung mit mehreren Freiheitsgraden stellt dabei ein sehr komplexes System dar. Unerlaubte Querbeschleunigungen in einzelnen Achsen sowie singuläre Punkte, in denen keine oder nur geringe Kräfte erzielbar sind, können Probleme bereiten. Aus diesem Grund werden vielen Handhabungsrobotern vor ihrem Einsatz in einem Lernmodus ihre Bewegungskurven einprogrammiert, was eine gewisse Einschränkung der Flexibilität darstellt. Ein Nachteil der gekoppelten Antriebe ist, dass sich schon sehr kleine Positionierfehler eines einzelnen Motors über alle weiteren Gelenke und Hebelarme fortpflanzen bzw. vergrößern. Außerdem vermindern sich je nach Stellung der Hebelarme die Steifigkeiten des Systems. Besonders bei großen Verfahrenswegen, die mit langen Hebelarmen realisiert werden, nimmt die Steifigkeit rapide ab.



Bild 2.1 Roboter mit mehreren Freiheitsgraden (Bild: KUKA)

Aufgrund der unterschiedlichen Anwendungsgebiete von Robotern und Werkzeugmaschinen gibt es verschiedene Ausführungen der Mehrkoordinatenantriebe, die auf die speziellen Problemstellungen abgestimmt sind. Neben konstruktiven Anpassungen und Optimierungen sind auch andere Systemkonzepte möglich. So kann z.B. die Anzahl der Freiheitsgrade eines Bearbeitungsroboters kleiner gewählt werden, wenn das zu bearbeitende Werkstück ebenfalls

beweglich ist und positioniert werden kann. Die große Komplexität dieses Themenbereiches kann an dieser Stelle nur angedeutet werden. Es verdeutlicht aber, in welchem weitem Einsatzbereich das Themengebiet der Direktantriebe, die im Folgenden beschrieben werden, einzuordnen ist.

2.2 Direktantriebe mit mehreren Freiheitsgraden

Bei der Vielzahl von Antrieben gibt es unterschiedliche Möglichkeiten, diese in bestimmte Gruppen einzuordnen. In dieser Arbeit wird ein Flächenmotor für planare Bewegungen und ein Kugelmotor für sphärische Bewegungen vorgestellt. Daher erfolgt eine Unterteilung in diese zwei Kategorien. Zunächst werden die unterschiedlichen Konzepte aufgrund der Art ihrer Krafterzeugung unterschieden. Diese beruhen auf den gleichen Grundprinzipien, wie sie von rotatorischen und linearen Antrieben bekannt sind. Die in Kapitel 2.1 genannten Anforderungskriterien sollen bei den hier genannten Direktantrieben mit betrachtet werden.

Die meisten der vorgestellten Konzepte befinden sich im Forschungsstadium. Teilweise sind konkrete Anwendungen und Einsatzgebiete in den Publikationen geplant, in den anderen Fällen werden nur Grundkonzepte vorgestellt. Prinzipiell ist auch eine Verkettung von mehreren mehrdimensionalen Antriebssystemen möglich. Dies kann bestimmte Vorteile bei der Regelung von räumlichen Bewegungen bieten, wie sie von Murakami beschrieben werden [5]. Die folgende Zusammenstellung der Direktantriebe beschränkt sich allerdings auf die Beschreibung der einzelnen Direktantriebe.

2.3 Planare Direktantriebe

Als planare Antriebe werden diejenigen Systeme bezeichnet, die mindestens zwei Freiheitsgrade haben und damit eine Bewegung in einer ebenen Fläche ermöglichen. Diese Direktantriebe sollen Antriebe mit kinematischen Ketten, wie sie z.B. mit Kreuztischen realisiert sind, ersetzen.

2.3.1 Planare Antriebe nach dem Induktionsprinzip

Ein Aufbau nach dem Induktionsprinzip wurde bisher bei planaren Antrieben nur in Ansätzen untersucht. Bei Mendrela gibt es den Vorschlag, über einer elektrisch leitenden Platte einen Läufer mit mehreren Spulenwicklungen zu positionieren [6]. Durch gezielte Bestromung können wandernde Felder erzeugt werden, die Kräfte in zwei Richtungen erzeugen und für eine Bewegung in der Ebene genutzt werden können. Einen weiteren Ansatz für den Bereich von Mikromotoren gibt es von Fernandez [7]. Allerdings werden mit dem von ihm vorgestellten planaren Scheibengeometrien nur sehr geringe Kräfte von wenigen μNm erzielt.

2.3.2 Reluktanz- und Hybridschrittantriebe

Planare Motoren die das Reluktanzprinzip ausnutzen, haben heute einen hohen Entwicklungsstand und sind kommerziell verfügbar. Die grundlegende Idee geht auf ein Patent von Sawyer zurück, wobei mehrere lineare Schrittmotoren in einem Antrieb kombiniert werden, um eine Bewegung in zwei unabhängigen Richtungen zu ermöglichen [8]. Bild 2.2 zeigt die Funktionsweise eines Schrittmotorelementes. Der Stator besteht aus einem magnetisch leitendem Material mit ausgeprägten Statorzähnen, die sich periodisch wiederholen. Der Läufer besteht aus mehreren Eisenjochen, die miteinander mechanisch verbunden, aber nicht magnetisch gekoppelt sind. Die einzelnen Joche sind, in Abhängigkeit von der Nutenteilung des Stators, räumlich zueinander versetzt. Jedes Läuferisenjoch besitzt eine Spulenwicklung, die einzeln bestromt werden kann. Durch gezielte Ansteuerung der einzelnen Phasen (A,B,C) kann eine Vorschubkraft in die gewünschte Richtung erzeugt werden.

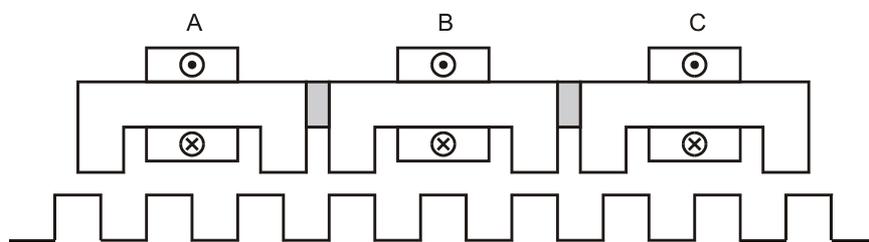


Bild 2.2 Aufbau eines linearen Schrittmotors

Neben den horizontalen Kräften, die eine Vorschubbewegung erzeugen, entstehen auch anziehende Kräfte in vertikaler Richtung. Diese müssen durch eine entsprechende Lagerung kompensiert werden.

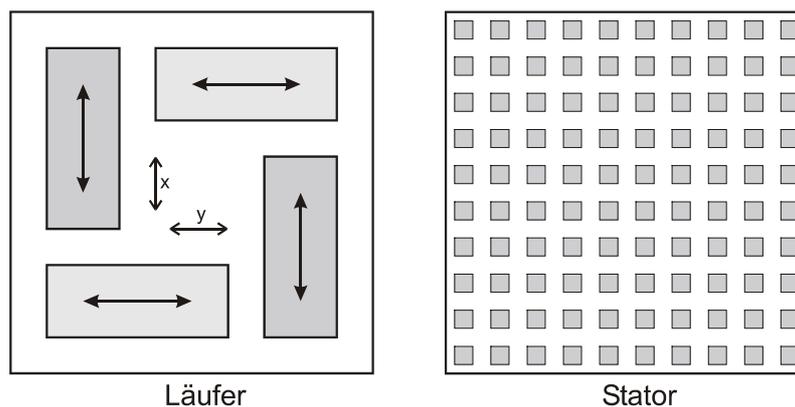


Bild 2.3 Läufer mit Kombination von vier Einzelelementen und Stator mit Nuten

Durch Kombination mehrerer solcher linearen Schrittmotoren kann das System für eine planare Bewegung erweitert werden. Bild 2.3 verdeutlicht die orthogonale Anordnung der Antriebselemente für jeweils zwei Richtungen. Bei geeigneter Ansteuerung kann neben einer gradlinigen Bewegung auch eine Drehung erzielt werden, d.h. es ist eine Regelung eines

dritten Freiheitsgrades möglich. Der Stator besteht aus einem magnetisch leitenden Material, in dem Nuten in Reihen und Spalten vorhanden sind. Diese werden bei der Herstellung entweder mechanisch geschnitten oder bei feineren Strukturen chemisch geätzt und mit magnetisch nicht leitendem Material (z.B. Epoxid) gefüllt [9]. Die Statorplatte kann entsprechend in der Ebene erweitert werden, so dass es keine Einschränkung in der räumlichen Ausdehnung gibt. Lediglich die Zuleitungen zur Energieversorgung der Läuferwicklungen müssen mitgeführt werden.

Eine Erweiterung des beschriebenen Systems zu einem Hybridschrittmotor erfolgt mit Permanentmagneten [10]. Die Anordnung der Spulenwicklungen und der Permanentmagnete ist in Bild 2.4 vereinfacht dargestellt. Der Aufbau des Stators mit Nuten in einem magnetisch leitenden Material ist identisch mit der oben beschriebenen Anordnung. Durch die Vormagnetisierung wird eine konstante Haltekraft erzielt, d.h. der Motor rastet in bestimmten Positionen ein und die Spulenwicklungen müssen nicht bestromt werden, um den Motor fest zu halten.

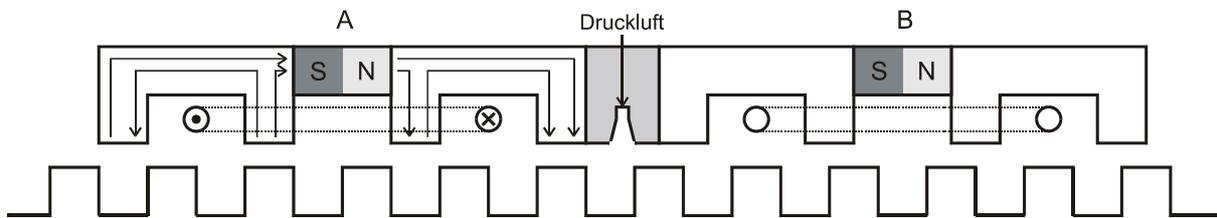


Bild 2.4 Aufbau eines Hybridschrittmotors

Die planare Anordnung kann, wie in Bild 2.3, beschrieben erfolgen. Durch die Permanentmagnete liegt eine ständig anziehende Kraft zwischen der Läuferanordnung und der Statorplatte vor. Dies ermöglicht auch eine „über Kopf“ Montage des Motors an der Decke, da die anziehenden Kräfte sehr groß und zur Lagerung nutzbar sind. Damit sich Läufer- und Statorplatte nicht berühren, werden solche planare Anordnungen meist mit einer Luftlagerung versehen, um einen berührungsfreien Betrieb zu gewährleisten. Dafür ist es notwendig, dass die Statorplatte sehr plan gefertigt wird.

Die Leistungsfähigkeit von planaren Hybridschrittmotoren hängt von einer Vielzahl an Faktoren ab. Dazu gehören unter anderem die Stärke der Permanentmagnete, die maximale Stromstärke und die Größe des Luftspaltes. Weiterhin ist die Anzahl der einzelnen Elemente in der gemeinsamen Arbeitsplattform entscheidend für die erreichbaren Vorschubkräfte. Die notwendige Leistungselektronik kann ähnlich wie bei rotatorischen Schrittmotoren aufgebaut werden. Die Generierung der Ansteuersignale ist relativ einfach, da jeweils nur die Windungen ausgewählt werden müssen, die für den nächsten Schritt zuständig sind. In [8] wird dies über diskrete logische Bausteine realisiert. Antriebe, bei denen auch kleine Verdrehungen möglich sind, verwenden für die aufwendigen Berechnungen Mikroprozessoren, um die entsprechenden Winkelabhängigkeiten zu berücksichtigen.

Heutige planare Antriebe kommen unter anderem in der Halbleiterindustrie bei der Positionierung der Siliziumscheiben für photolithographische Zwecke und bei Bestückungsautomaten zum Einsatz. Dabei ist die Zuladung meist sehr gering, so dass nur die eigene Masse bei der Bewegung berücksichtigt werden muss. Über den gesamten Arbeitsbereich werden dadurch hohe Beschleunigungen (30 m/s^2), schnelle Geschwindigkeiten ($1,5 \text{ m/s}$) und eine hohe Positioniergenauigkeit ($2 \mu\text{m}$ mit Mikroschrittsteuerung) erreicht [11]. Andere kommerzielle Hybridschrittmotoren besitzen ein ähnliches Leistungsspektrum. Für viele Anwendungen ist eine hohe Positioniergenauigkeit notwendig. Eine offene Steuerung ohne Rückführung ist insofern nicht zuverlässig. Positionssensoren, die auf magnetische oder kapazitive Methoden zurückgreifen, haben sich als störanfällig erwiesen. Optische Verfahren, die eine Zahnteilung des Stators berücksichtigen, haben in Experimenten unter idealen Bedingungen gute Ergebnisse geliefert. Aber auch bei Störungen, z.B. durch Schmutz, gibt es Messmethoden, mit denen eine Genauigkeit im μm Bereich erzielt werden kann [12].

Durch das Prinzip des Schrittmotors muss das Verhältnis der Statorjochlänge zur der Läuferjochlänge annähernd konstant bleiben. Dadurch ist bei der beschriebenen planaren Anordnung nur eine minimale Drehung von wenigen Winkelgraden um die eigene Achse möglich. Bei einer größeren Drehung ändert sich das Längenverhältnis, wobei es dann Positionen gibt, in denen keine Vorschubkräfte mehr erzeugt werden können. Außerdem sind durch die Positionsmesssysteme keine größeren Verdrehwinkel erlaubt.

Werden weitere Freiheitsgrade in einem größeren Arbeitsbereich benötigt, so können mehrere Elemente miteinander gekoppelt werden. Von Kuhlbusch wird ein Tripod beschrieben, bei dem drei einzelne Antriebseinheiten miteinander gekoppelt sind, und so sechs Freiheitsgrade in der Bewegung ermöglichen [13]. Allerdings erfolgt die Kopplung über mechanische Gelenke, welche die bekannten Nachteile von gekoppelten Systemen aufweisen.

2.3.3 Planare Antriebe mit permanentmagnetischer Erregung

Permanenterregte planare Antriebe basieren auf dem Prinzip der elektromagnetischen Krafterzeugung, bei dem durch stromdurchflossene Leiter eine wechselwirkende Kraft mit Permanentmagneten entsteht. Anordnungen, bei denen der Stator aus Permanentmagneten besteht und der Läufer die Spulenwicklungen zur Krafterzeugung beinhaltet [14], haben den Nachteil, dass die Verbindungsleitungen zum bewegten Teil mitgeführt werden müssen und es dadurch Einschränkungen in der Bewegungsfreiheit gibt. Zusätzlich muss bei einer größeren räumlichen Ausdehnung die Statorplatte mit den Permanentmagneten verbreitert werden, was sehr kostenintensiv ist.

Eine sehr einfache Struktur eines Läufers mit nur zwei Permanentmagneten, die mechanisch verbunden sind, wird von Filho vorgestellt [15]. Der Stator besteht aus Wicklungssträngen, die in Reihen und Spalten angeordnet sind. Insgesamt können pro Richtung 12 unabhängige Windungen angesteuert werden. Eine Acrylplatte zwischen Stator und Rotor sorgt für einen konstanten Abstand. Die Vorschubkräfte betragen 48 N , wobei die Normalkräfte in derselben Größenordnung liegen und dabei eine hohe Reibkraft erzeugen. Eine alternative

kontaktbehaftete Lagerung wird von Nakazawa vorgeschlagen, wobei mit Hilfe einer Polyamid- und einer Diamantschicht versucht wird, die Reibung möglichst gering zu halten [16]. Bei der vorgestellten Anordnung handelt es sich um einen Mikromotor, der mit einem speziellen Fertigungsverfahren hergestellt wird. Die Spulenwicklungen sind planar ausgeführt und haben eine Fläche von 1 mm^2 . Die Vorschubkräfte sind dementsprechend gering (40 mNm).

Berührungslose Lager werden eingesetzt, da ein mechanischer Kontakt neben den hohen Reibkräften auch zu einem Materialverschleiß führt. Saffert verwendet eine Luftlagerung, um die anziehenden Kräfte senkrecht zur Bewegungsebene zu kompensieren [17]. Bei dieser Anordnung sind flache längliche Antriebsspulen vorhanden, die jeweils für die x - und die y -Richtung getrennt angesteuert werden. Demgegenüber sind mehrere Permanentmagnetkreise auf dem Läufer angebracht (Bild 2.5). Diese sind so positioniert, dass sich mit einer Bewegung zwar der Deckungsgrad der einzelnen Spulen-Magnet-Paare ändert, aber für die gesamte Anordnung annähernd gleich bleibt.

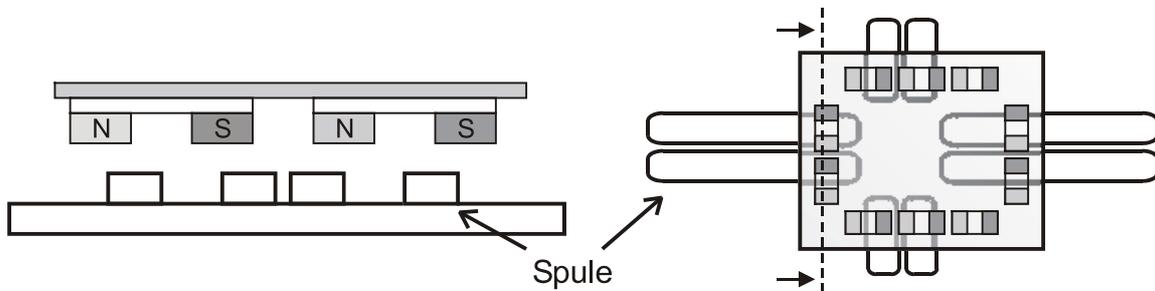


Bild 2.5 Permanentmagnetisch erregter Planarmotor nach [17]

Für die Positionsmessung wird ein inkrementelles Auflichtmesssystem verwendet, bei dem ein feiner Kreuzrastermaßstab abgetastet wird. Neben dem konstruktivem Aufbau des Motors kann auch durch das Messsystem nur eine kleine Drehung erfolgen ($< 1^\circ$). Bei einer hohen Vorschubkraft (bis 70 Nm) und Geschwindigkeiten von bis zu 6 m/s konnte in Versuchen eine Positioniergenauigkeit von $0,2 \mu\text{m}$ erreicht werden.

Eine besondere Bauform eines planaren Motors wird von Kim beschrieben, der sechs Freiheitsgrade in der Bewegung besitzt [18]. Allerdings sind einige Freiheitsgrade nur in eingeschränktem Umfang nutzbar, z.B. sind nur sehr kleine Verdrehwinkel möglich. Der Stator besteht dabei aus vier einzelnen Modulen, die mit ihren Windungen jeweils um 90° zueinander verdreht sind. Jedes Modul kann eine (laterale) Vorschubkraft und eine (vertikale) Tragkraft generieren. Dadurch sind insgesamt unabhängig 8 Kraftkomponenten regelbar. In der Läuferplattform sind vier Halbach-Magnet-Gitter vorhanden, die jeweils den vier Statorwicklungen (Modulen) gegenüberstehen und zur Krafterzeugung beitragen. Durch die spezielle Geometrie und Größe ist nur eine begrenzte räumliche Bewegung möglich, die aber für die geplante Anwendung (Fokussierung bei Belichtung von Siliziumscheiben) ausreichend ist. Es wird eine sehr hohe Positionsgenauigkeit im Nanometer-Bereich erzielt.

2.3.4 Weitere planare Antriebe

Neben den vorgestellten Motoren, gibt es eine ganze Reihe an weiteren Prinzipien, die leichte Abwandlungen bzw. Kombinationen der vorgestellten Antriebe darstellen. Diese können mit einer elektromagnetischen Lagerung kombiniert werden [19]. Andere Konzepte von Antrieben, die über eine kontaktbehaftete Krafterzeugungen wie beim Wanderwellenmotor (Piezoeffekt) [20] oder eine elektrostatische Kraftgenerierung [21] verfügen, werden im Rahmen dieser Arbeit nicht weiter betrachtet.

2.4 Funktionsprinzipien von sphärische Direktantrieben

Die vorgestellten unterschiedlichen Konzepte von planaren Antrieben lassen sich nur bedingt auf sphärische Anordnungen übertragen. Das Grundprinzip der Krafterzeugung ist generell adaptierbar, aber oftmals durch fertigungstechnische Problemstellungen gekennzeichnet. Bei der Herstellung gelten weitaus höhere Anforderungen an die Produktionsgenauigkeit als bei rotatorischen Antrieben. Aufgrund der räumlichen Geometrie können konventionelle Ansteuereinheiten (Umrichtertopologien mit Verkettung von mehreren Phasen) nur bedingt verwendet werden. Der regelungstechnische Aufwand zur Ansteuerung ist wesentlich schwieriger, da die mehrdimensionale Positionsänderung, und damit auch die Ansteuerung der entsprechenden Leiterschleifen zur Krafterzeugung, berücksichtigt werden muss.

Als sphärische Antriebe werden im Folgenden Antriebe beschrieben, die sich über einen weiten Aktionsradius im Raum bewegen können. Gemeinsam ist bei ihnen, dass es einen Mittelpunkt gibt, um den sich die Anordnung jeweils drehen kann. Einschränkungen in der Bewegungsfreiheit sind teilweise konzeptionell aber auch fertigungstechnisch bedingt.

2.4.1 Sphärische Antriebe nach dem Induktionsprinzip

Die Idee, einen Kugelmotor nach dem Induktionsprinzip aufzubauen, kam schon zu Beginn des 20. Jahrhunderts auf. Das Ziel zunächst war es, eine Drehung auch außerhalb der sonst starren Antriebsachse zu ermöglichen. Von Stewart und von Williams wurde versucht, mit speziellen Wicklungen auf dem Rotor und Stator ein Moment auch bei verkippter Rotorachse zu erzielen [22] [23]. Eine Umkehrung des motorischen Prinzips wird von Bers beschrieben, wobei die sphärische Anordnung zur Bestimmung von mehrdimensionalen Winkeländerungen benutzt wird [24]. Von Bolenz wird die elektrische und mechanische Auslegung eines Kugelmotors als Pumpenantrieb beschrieben, wobei eine bevorzugte Drehrichtung vorgegeben ist, d.h. der Motor kann in verkippter Lage Drehmomente um eine Achse erzeugen, aber aufgrund der speziellen Statorwicklungen und des Käfigläufers ist kein gezieltes Moment in die Verkipprichtungen möglich [25].

Von Purczynski und von Davey wird ein sphärischer Induktionsmotor beschrieben, dessen Rotor nicht aus diskreten Windungen, sondern aus einer leitfähigen Schicht auf der Kugeloberfläche besteht, in denen ein Stromfluss, ähnlich wie bei einer konventionellen Asynchronmaschine, induziert werden kann [26][27]. Im Stator sind einzelne Windungen

bzw. leitfähige Schichten gegeben, die aufgrund ihrer räumlichen Anordnung Momente in unterschiedlichen Richtungen erzeugen können.

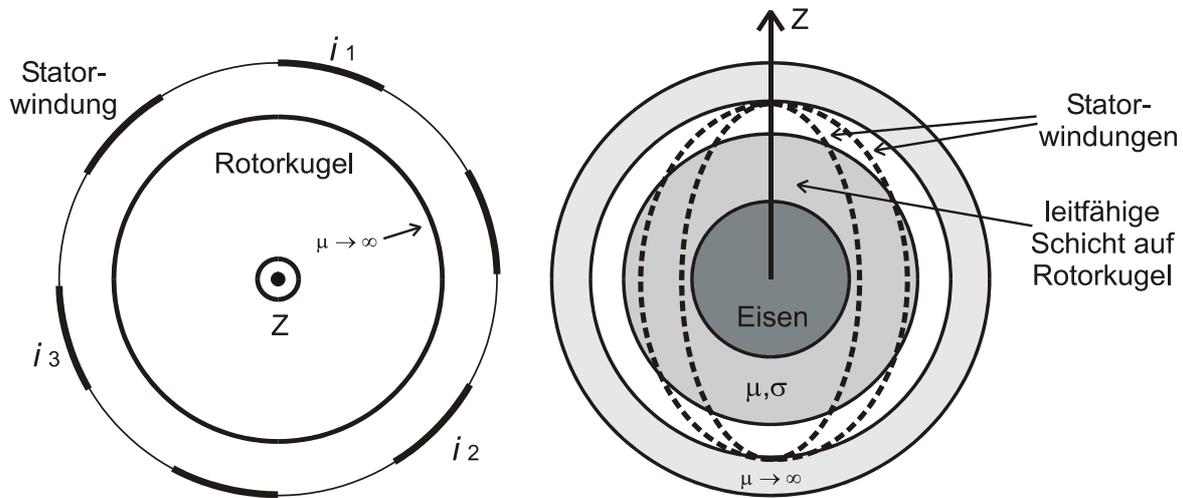


Bild 2.6 Aufbau der sphärischen Induktionsmotoren nach Purczynski [26] (links) und Davey [27] (rechts)

Die in den Veröffentlichungen beschriebenen Untersuchungen beziehen sich hauptsächlich auf die elektromagnetischen Felder und deren räumlich und zeitliche Verteilung. Es wird gezeigt, dass die Größe der erzielbaren Momente sehr stark von den geometrischen Maßen abhängt, z.B. Radius und Dicke der leitfähigen Schicht. Neben einigen idealisierten Bedingungen, wie z.B. unendlich großen Leitfähigkeiten, wird bei der Statorgeometrie eine ideale Kugelform angenommen. Dadurch lässt sich kein Kraftantrieb realisieren, da keine Öffnung für einen Flansch gegeben ist. Weiterhin sind nur geringe Momente erreichbar, die stark von der Drehzahl abhängen. Die Anordnungen sollen als Gyroskope eingesetzt werden, mit denen Verkippungen im Raum detektiert werden können. Werden größer Momente für einen Antrieb gefordert, so müssen mehrere Wicklungsstränge mit vielen Windungen im Stator implementiert werden, was fertigungstechnisch sehr aufwendig ist. Außerdem treten im Rotor in der Oberfläche Wirbelströme auf, die z.B. durch geeignete Laminierungen vermindert werden müssen.

Wird keine volle Kugelsymmetrie gefordert, sondern nur ein sphärischer Teilausschnitt, so stellt dies eine wesentliche Vereinfachung für die Fertigung dar. Von Lordo wird ein Aufbau vorgeschlagen, der als Flugsimulator dient, aber in dem Bewegungsradius seiner Freiheitsgrade durch die mechanische Anordnung in seinen Schwenkbereich stark eingeschränkt ist [28]. Durch die Verwendung von vielen Leiterschleifen, die in ein sphärisches Feld von einzelnen Polzähnen eingebettet sind, können sehr hohe Momente erzielt werden.

2.4.2 Reluktanz- und Hybridschrittmotoren

Die Grundlagen für sphärische Schrittmotoren und Reluktanzantriebe wurden von Lee gelegt [29]. Die Krafterzeugung geschieht durch Statorpolwicklungen, die durch Bestromung auf die Permanentmagnete im Rotor eine Kraft ausüben.

Bild 2.7 zeigt die einfache Anordnung, mit der die ersten Versuche durchgeführt wurden. Weitere Untersuchungen beschäftigen sich mit geeigneten Anordnungen für eine größere Anzahl an Statorwicklungen [30]. Bei der räumlichen Anordnung gibt es keine Regelmäßigkeiten und Symmetrien, wie sie bei der planaren Anordnung vorkommen (Kapitel 2.3.2). Versucht man die diskreten Pole auf den Flächen von platonischen Körpern anzuordnen, so ist man auf eine maximale Anzahl von 20 beschränkt, da es keine regelmäßigen Körper mit gleichen Flächen mit einer größeren Anzahl gibt.

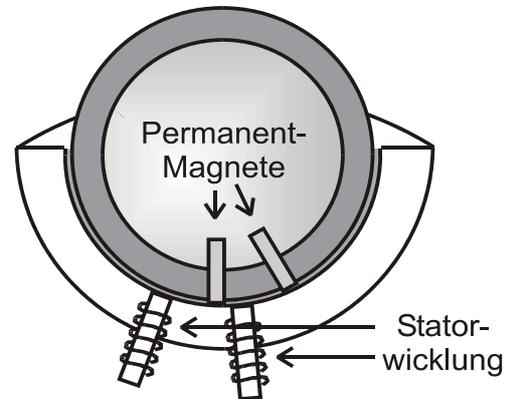


Bild 2.7 Schrittmotor mit Permanentmagneten [29]

Bei der Momentenerzeugung zur gezielten Bewegung in eine Richtung, werden bei diesen Schrittmotoren jeweils mehrere Spulen und Magnete berücksichtigt. Wird nur eine Spulenwicklung bestromt, so ist die Rotorkugel in einem Punkt fixiert und kann um diesen gedreht werden. Eine zweite Spulenwicklung kann nun die notwendige Kraft zur Drehung erzeugen. Abhängig von der jeweiligen Position und der gewünschten Drehrichtung müssen die entsprechenden Spulenpaare ausgewählt werden. Die entsprechenden Schaltmuster wurden in ersten Entwürfen in einem EPROM abgelegt. Über diskrete digitale Schaltungslogik wurden dann die entsprechenden Verstärker für die Spulenwicklungen angesteuert. Inzwischen ist die Rechenleistung von Mikroprozessoren so gestiegen, dass diese eine gezielte Ansteuerung berechnen können. Neben der Massenträgheit der Rotorkugel und möglichen extern angreifenden Momenten müssen (Rast-)Kräfte bzw. Momente berücksichtigt werden, die durch die Magnetanordnung und den magnetischen Rückschluss auftreten. Die auftretenden Kräfte in radialer Richtung können z.B. durch Luftlager kompensiert werden.

Bei experimentellen Untersuchungen wurden tangentielle Kräfte von bis zu 7 N gemessen. Dabei können Rastkräfte von bis zu 3 N auftreten, die aufgrund des magnetischen Rückschlusses entstehen. Die erzeugten Kräfte sind abhängig von der Stromgröße durch die Windungen, wobei bei Strömen größer von 4 A keine Kraftsteigerung mehr zu beobachten ist, was auf Sättigungseffekte zurückzuführen ist. Der Rotordurchmesser des Laborprototypen beträgt 125 mm. Bei der Regelung der Bewegung werden Tabellen verwendet, aus denen, abhängig von der Drehrichtung, die entsprechenden Spulen ausgewählt werden. Eine magnetische Lagerung zur Reduzierung der Reibungsverluste der mechanischen Lagerung wird mit berücksichtigt [31]. Die Positionsmessung erfolgt über ein extern angebrachtes Bügelmesssystem. Ein alternatives System zur optischen Positionsauswertung wird von Lee

vorgeschlagen [32]. Dazu wird ein auf der Kugeloberfläche aufgetragenes Muster aus Längen- und Breitengraden mit einer Kamera gescannt und über die Schnittwinkel die entsprechende Position bestimmt.

Von Chirikjian wurde ein sphärischer Motor nach gleichem Funktionsprinzip aufgebaut [33]. Es sind eine Vielzahl von Magneten auf dem Rotor und Wicklungen auf den Statorpolen mit unterschiedlichen Abständen zueinander vorhanden. Dadurch ergibt sich eine Struktur mit vielen Symmetrien. Die Anordnung dient allerdings nur zur Demonstration des Regelungsalgorithmus, da kein Flansch vorhanden ist, über den ein Kraftabtrieb an eine externe Last erfolgen könnte.

2.4.3 Sphärische Antriebe mit permanentmagnetischer Erregung

Durch die Verwendung von Permanentmagneten kann eine sehr hohe Kraftdichte erzielt werden. Wie schon bei den planaren Antrieben erläutert (Kapitel 2.3.3), ist es sinnvoll, dass auf dem beweglichen Rotor die Permanentmagnete aufgebracht sind, damit keine Leitungen mitgeführt werden müssen, welche eine Einschränkung in der Bewegungsfreiheit zur Folge haben.

Bei Kaneko wird ein System mit drei Statorleiterschleifen beschrieben, mit denen ein variables räumliches Magnetfeld erzeugt werden kann [34]. Mit diesem wird eine Kraft auf eine Scheibe mit vier symmetrisch angeordneten Permanentmagneten ausgeübt. Die Magnetscheibe ist an einer kardanischen Aufhängung gelagert, womit eine Bewegung im Raum möglich ist. Bei einer kontinuierlichen Verdrehung um die eigene Achse können Verkippwinkel bis zu 15° erreicht werden. In den Kardanischen Gelenken sind Winkelsensoren zur Positionsbestimmung vorhanden. Neben sehr geringen Momenten (<1 Nm), die außerdem stark von der Richtung abhängen, werden Abweichungen bei der Positionsregelung auf einer Bahnkurve von einigen Grad angegeben.

Ein Aufbau mit einer Vollkugel als Rotor wird von Bederson und von Wang vorgestellt [35][36][37]. Die Rotorkugel besitzt eine einzelne ausgeprägte Magnetisierungsrichtung (Bild 2.8 a). Dadurch kann sie, durch ein von außen angelegtes Magnetfeld, im Raum ausgerichtet werden. Bild 2.8 b) zeigt die Statorwicklungen, durch die das räumliche Magnetfeld erzeugt wird. Die Rotorkugel besitzt zwei Freiheitsgrade in der Bewegung, die geregelt werden können. Eine aktive Drehung um die eigene Magnetachse ist nicht möglich. Mit einer Verdoppelung der Magnetisierungsrichtungen des Rotors (Bild 2.8 c) und einer erweiterten Anordnung von Statorwindungen (Bild 2.8 d) ist es möglich, den Motor in drei Freiheitsgraden zu bewegen. Zum Abtrieb einer Kraft ist ein Flansch an die Rotorkugel befestigt, dessen Verkippwinkel durch die Öffnung des Stators auf $\pm 45^\circ$ begrenzt ist. Die Positionserfassung geschieht mittels Hall-Sensoren, die in das Statorgehäuse eingelassen sind. Abhängig von den gemessenen induzierten Spannungen und den Einflüssen der Statorwicklungen kann die aktuelle Position des Rotors berechnet werden. Die Positionsdaten werden als rückgekoppelte Größe für eine übergeordnete PD Positionsregelung verwendet.

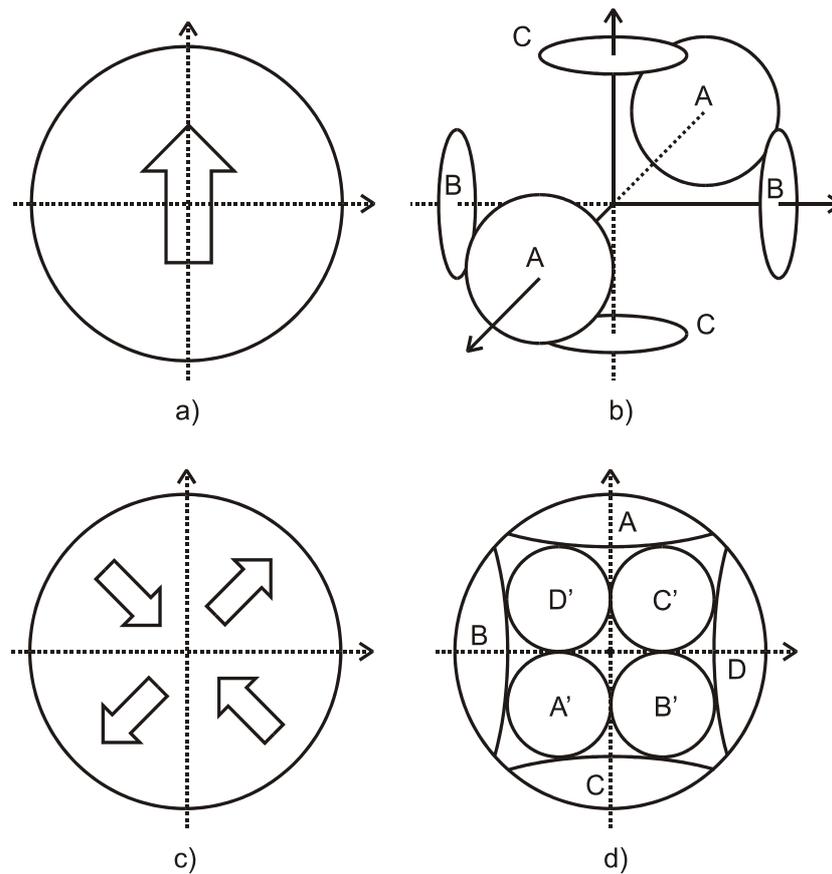


Bild 2.8 Permanentmagnetische Antriebe nach Wang [37] mit zwei Freiheitsgraden (Rotor(a) und Stator(b)) und drei Freiheitsgraden (Rotor(c) und Stator(d))

Der Motor mit drei (zwei) Freiheitsgraden kann ein maximales Drehmoment von 0,6 Nm (0,4 Nm) bei einem Rotordurchmesser von 3,1 cm (2,4 cm) erzeugen. Die geringe Größe des Momentes resultiert unter anderem dadurch, dass kein magnetisches Rückschlussmaterial im Stator vorhanden ist. Dies hat zwar den Vorteil, dass im stromlosen Fall keine Positionen existieren, in denen der Motor einrastet, allerdings ergeben sich im Betrieb deutliche Verluste durch die Streufelder und mögliche negative Auswirkungen auf Objekte im Umkreis. Als Einsatzgebiet des Motors werden Positionieraufgaben von elektronischen Miniaturkameras angegeben, wobei ein maximales Gewicht von 50 g angegeben wird.

Eine Anordnung für sphärische Bewegungen mit einem sehr hohen Drehmoment wird bei [38] beschrieben. Der Antrieb wird als Stellmotor in einem fliegenden Observatorium zur Positionierung eines Teleskopspiegels eingesetzt. Vergleicht man die Anordnung mit einer Balkenwaage, so befindet sich der Teleskopspiegel auf der einen Seite und die Beobachtungsinstrumente auf der anderen Seite. In der Mitte ist eine Anordnung aus gekrümmten Linearmotoren vorhanden, die eine Bewegung in drei Freiheitsgrade zulassen, und damit den Spiegel drehen und verkippen können. Allerdings ist die Bewegung auf einen sehr kleinen Bereich eingeschränkt (max. $3,5^\circ$).

2.4.4 Weitere sphärische Antriebe

Es existieren weiterhin eine ganze Reihe an sphärischen Antriebskonzepten, die eine Abwandlung der beschriebenen Systeme darstellen. Systeme, die elektrostatische Kräfte ausnutzen, können keine großen Kräfte erzielen und werden von daher nur zur Bewegungsdetektierung in Gyroskopen eingesetzt [39].

Weiterhin gibt es eine Reihe von unterschiedlichen Antriebskonzepten, die den piezoelektrischen Effekt ausnutzen [40][41][42]. Trotz der unterschiedlichen Geometrien und Anordnungen haben alle gemeinsam, dass über eine reibungsbehaftete Abtriebskraft eine Richtungsänderung bewirkt. Aufgrund der mechanischen Kraftgenerierung durch eine Art wandernde Welle, kann die Kraft nur in einem kleinen Bereich auf eine Kugelgeometrie übertragen werden, d.h. eine maximale Ausnutzung der Kugeloberfläche ist nicht möglich.

2.5 Zusammenfassung

Es wurde ein Überblick über unterschiedliche Funktionsweisen und Aufbauten von planaren und sphärischen Antrieben gegeben, die mehrere Freiheitsgrade in der Bewegung besitzen. Einige planare Systeme haben einen sehr hohen Entwicklungsstand und werden bei verschiedenen Positionieraufgaben in kommerziellen Bereichen eingesetzt. Konstruktionsbedingt sind dabei meist nur zwei Freiheitsgrade in der Ebene nutzbar. Weitere Freiheitsgrade (z.B. die Drehung um die eigene Achse) können, aufgrund des mechanischen Aufbaus, nur eingeschränkt genutzt werden. Die Erweiterung der planaren Systeme auf sphärische Geometrien und im Idealfall auf eine Kugel ist nur zum Teil möglich. Durch die mechanische Struktur und das Prinzip der elektromagnetischen Kraftbildung sind bei einer Vielzahl der Antriebe Einschränkungen in einigen Freiheitsgraden der Bewegung gegeben. Teilweise ist auch die Kraftdichte von der Position und der Bewegungsrichtung abhängig.

In der historischen Entwicklung der sphärische Antriebe wurde schon zu Beginn des 20. Jahrhunderts die Nutzung des Induktionsprinzips untersucht. Die Aufbauten lehnten sich stark an konventionelle rotatorische Maschinen an. Die Regelung wurde mit Modifikationen der bekannten Steuerverfahren durchgeführt, wobei die Bewegungsrichtung vornehmlich um die Kraftabtriebsachse erfolgte. Spätere Entwürfe mit symmetrischen Anordnungen, die Drehungen in allen Richtungen zulassen, haben sich aufgrund der komplizierten mechanischen Fertigung und einem schlechten Wirkungsgrad nicht durchgesetzt. Um eine hohe Kraftdichte, und damit ein kleines Bauvolumen zu erreichen, wurden sphärische Antriebe entwickelt, die Permanentmagnete beinhalten. Dabei standen zunächst die Prinzipien der Reluktanz- und Schrittmotoren im Vordergrund. Die ersten Entwürfe hatten wenige diskrete Pole, und haben den Vorteil einer recht einfachen Ansteuerung. Anordnungen mit einer großen Anzahl von Stator- und Rotorpolen haben allerdings das Problem, dass es keine gleichmäßig symmetrische Anordnung gibt. Dadurch werden Regelverfahren entsprechend aufwendiger. Erst mit der rasanten Entwicklung der Mikro- und Signalprozessoren war es möglich, sphärische Antriebe mit permanentmagnetischer Erregung zu steuern. Berechnungen von komplexen trigonometrischen Funktionen sind dazu in Echtzeit notwendig. Andere

Funktionsprinzipien, die nach dem elektrostatischen oder piezoelektrischen Effekt arbeiten, wurden nicht weiter betrachtet.

Insgesamt lässt sich feststellen, dass es viele wissenschaftliche Untersuchungen auf dem Gebiet der sphärischen Antriebe gibt. Allerdings mangelt es an der kommerziellen Umsetzung. Zum einen spielen dabei fertigungstechnische Probleme eine Rolle, die eine Produktion recht aufwendig und teuer machen. Zum anderen werden bei vielen industriellen Anwendungen nicht alle Freiheitsgrade der Bewegung benötigt, so dass eine vereinfachte Anordnung mit konventionellen Antrieben gewählt wird.

3 Permanenterregter Direktantrieb mit variabler Polteilung

Elektrische Direktantriebe mit mehreren Freiheitsgraden in der Bewegung, wie sie im vorherigen Kapitel beschrieben wurden, sind durch ihre systembedingten Eigenschaften im Betrieb gewissen Einschränkungen unterworfen. Im Folgenden wird ein neues Systemkonzept für mehrdimensionale Direktantriebe beschrieben, welches besonderen Anforderungen an Drehmoment, Positioniergenauigkeit und Steifigkeit gerecht wird.

Zunächst wird ein Flächenmotor vorgestellt, der als Vorstudie und Versuchsträger dient. Neben dem Test von mechanischen Bearbeitungsprozessen und der Erprobung von Teilkomponenten, unter anderem auch der Leistungselektronik und der Regelungshardware, können mit ihm Regelungsstrategien und -verfahren untersucht werden. Aufbauend auf den daraus resultierenden Erkenntnissen wird ein Kugelmotor mit drei Freiheitsgraden in der Bewegung, großer Positioniergenauigkeit und hohem Drehmoment entwickelt. Die Leistungsdaten orientieren sich dabei an konventionellen Werkzeugmaschinen und Handhabungsrobotern. Einschränkungen, die durch die sphärische Anordnung des Kugelmotors gegeben sind, wurden ebenso beim Flächenmotor berücksichtigt.

Nach der übergeordneten Betrachtung des Gesamtsystems erfolgt im Weiteren eine kurze Einführung über die Grundprinzipien der Kraft- und Momentenbildung, welche bei beiden vorgestellten Motortypen angewandt wird. Schließlich werden die beiden Antriebe in ihrer Funktionsweise und ihrem Aufbau beschrieben. Die Erläuterungen beschränken sich dabei auf die Bereiche, die für das Grundverständnis und für die späteren Regelstrategien notwendig sind.

3.1 Betrachtung des Gesamtsystems

Die Grundidee der neuartigen Systeme besteht darin, dass drei Freiheitsgrade in der Bewegung in einem Direktantrieb ohne grundlegende Einschränkungen gegeben sind. Dadurch werden Achsen und Gelenke, wie sie bei Antrieben mit kinematischen Ketten vorkommen, eingespart. Ziel ist es, eine hohe Positioniergenauigkeit und eine große Kraft bzw. ein hohes Moment zu erreichen.

Die beiden vorgestellten Antriebe arbeiten nach dem Prinzip der elektromagnetischen Krafterzeugung, wobei der bewegliche Teil (im Folgenden Läufer oder Rotor genannt) mit Permanentmagneten bestückt ist, und der feststehende Teil (Stator) Spulenwicklungen zur elektromagnetischen Krafterzeugung besitzt. Durch diese Anordnung wird vermieden, dass bei einer Bewegung Leitungen zum beweglichen Teil mitgeführt werden müssen. Zuleitungen auf den bewegten Teilen würden außerdem eine Einschränkung in der Bewegungsfreiheit

darstellen, da dann eine Drehung um die eigene Läufer- bzw. Rotorachse nur in einem beschränkten Bereich möglich ist. Über den Läufer bzw. Rotor erfolgt dann der Kraftabtrieb, d.h. anwendungsspezifisch wird hier ein Werkzeug oder Werkstück befestigt, welches im Raum bewegt werden kann.

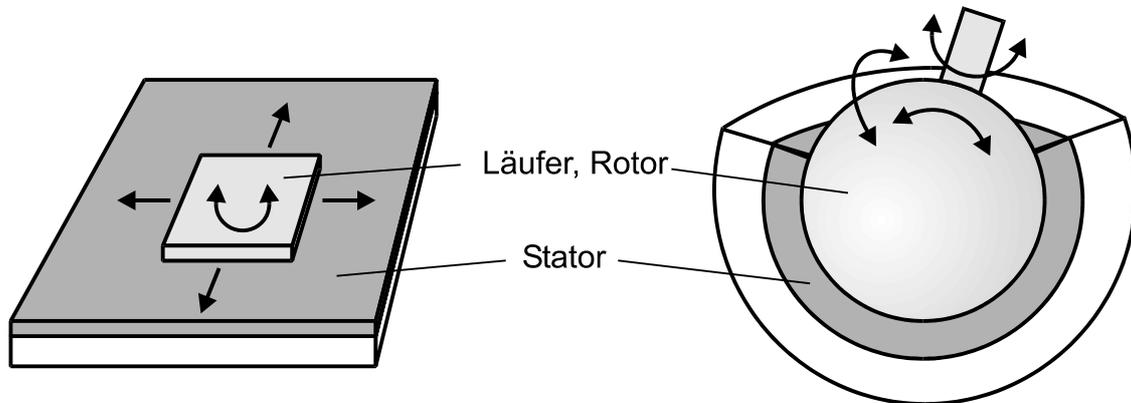


Bild 3.1 Drei Freiheitsgrade der Bewegung in der Ebene und im Raum

In Bild 3.1 sind die drei Freiheitsgrade der Bewegung angedeutet. Beim planaren Antrieb sind dies lineare Bewegungen in den zwei Richtungen einer Ebene und eine Drehung um die eigene Achse des Läufers. Beim sphärischen Motor ist es eine Drehung um die Rotorhochachse und die Verkippung um zwei unterschiedliche Drehachsen. Bei beiden Anordnungen ist eine Bewegung in jedem Freiheitsgrad einzeln oder in jeder gewünschten Linearkombination möglich. Die Regelung der weiteren Freiheitsgrade ist prinzipiell auch möglich, z.B. eine Linearbewegung senkrecht zur Ebene beim planaren Antrieb. Allerdings ist die Bewegungsfreiheit, d.h. eine mögliche Auslenkung in diesen weiteren Richtungen, sehr gering gegenüber den nutzbaren Freiheitsgraden. Außerdem treten sehr große anziehende Kräfte zwischen Stator und Rotor durch die Permanentmagnete auf. Diese sind deutlich größer als die Vorschubkräfte, die zum gewünschten Vortrieb beitragen. Um auch bei starken Störkräften eine hohe Steifigkeit zu erzielen, wird daher die Funktion des Tragens von mechanischen Lagern übernommen, d.h. eine Bewegung in den nicht zum Antrieb nutzbaren Freiheitsgraden wird damit verhindert.

Durch die notwendige mechanische Lagerung des Läufers bzw. des Rotors, die räumliche Anordnung der Statorspulen und den benötigten Abtrieb der erzeugten Kraft, z.B. durch die Montage eines Flansches, ist eine Einschränkung in der Bewegungsfreiheit gegeben, auf die bei der detaillierten Darstellung des Flächenmotors und des Kugelmotors in den nachfolgenden Abschnitten näher eingegangen wird.

3.2 Elektromagnetische Kraftbildung und Motorauslegung

Bei den vorgestellten mehrdimensionalen Direktantrieben wird das Prinzip der elektromagnetischen Krafterzeugung angewandt. Dieses besagt, dass auf stromdurchflossene Leiter in einem Magnetfeld eine Kraft ausgeübt wird. Das Magnetfeld kann dabei durch

fließende Ladung erzeugt werden, es kann aber auch durch Permanentmagnete generiert werden. Diese sind Werkstoffe, deren atomare Elektronenströme speziell ausgerichtet sind [43] und somit auch zur Bildung eines Magnetfeldes beitragen, bzw. auf die eine magnetische Kraft ausgeübt werden kann. Auf stromdurchflossene Leiter, Permanentmagnete oder magnetisch leitende Körper wird in dem Magnetfeld eine anziehende oder abstoßende Kraft ausgeübt. Der Betrag der Kraft ist abhängig von den Materialien, den räumlichen Abständen und dem fließenden Strom. Die Kräfte können über die Energieänderung ΔW bei einer virtuellen Verschiebung um eine Wegänderung $\Delta \vec{s}$ berechnet werden.

$$\vec{F} = \lim_{\Delta \vec{s} \rightarrow 0} \frac{\Delta W}{\Delta \vec{s}} \quad (3.1)$$

Bei elektrischen Maschinen wird die Energiebetrachtung meist für den Luftspalt durchgeführt, da das Eisenmaterial, welches für den Rückschluss dient, vereinfacht als idealer magnetischer Leiter ohne Widerstand angesehen wird. Die Energiedichte im Luftspalt ist dabei von den magnetischen Flussquellen, d.h. den stromdurchflossenen Spulen und den Permanentmagneten, abhängig. Bei der Berechnung von realen Systemen ergibt sich das Problem, dass es unterschiedliche Verlustmechanismen, z.B. Streufelder und Verluste im magnetischen Kreis, gibt. Eine analytische Berechnung ist daher nur bei sehr vereinfachten Modellen sinnvoll. Für den Flächen- und Kugelmotor wird dagegen ein numerisches Verfahren angewendet [44]. Bei der FEM- (Finite Elementen Methode) Analyse wird das System mit Hilfe von Knoten (Potentialpunkten) modelliert, die miteinander vernetzt sind. Durch Berechnungen, bei denen die entsprechenden Differentialgleichungen gelöst werden, erhält man eine magnetische Verteilung im System und kann daraus die wirkenden Kräfte ermitteln.

Magnete existieren generell nur als Dipole. Sind mehrere Permanentmagnete auf eine magnetisch leitende Platte montiert, so erfolgt über die Platte ein magnetischer Rückschluss. Zur vereinfachten Darstellung werden nach Bild 3.2 die mit abwechselnder Orientierung ausgerichteten Magnete nur mit einer Polarität bezeichnet, und zwar mit der Polarität, die zu freien Oberfläche gerichtet ist.



Bild 3.2 Vereinfachte äquivalente Darstellung der Permanentmagnete auf einer magnetisch leitenden Platte (Läuferplatte)

Die Bezeichnungen der einzelnen elektromagnetischen Komponenten sind in Bild 3.3 gegeben. Detaillierte Angaben zum Aufbau und den Abmessungen sowie Fotos befinden sich in Anhang C. Die Spulenwicklungen (auch Polwicklungen genannt) sind auf einen magnetisch leitenden Kern, dem Statorpol aufgebracht. Der Statorpol ist mit der Statorplatte und diese wiederum mit dem ortsfesten Statorgehäuse verbunden. Über die Statorplatte

erfolgt der magnetische Rückschluss zur Läuferplatte, der in dieser Skizze zunächst als idealisiert im Unendlichen angesehen wird. Bei der späteren Anordnung erfolgt der Rückschluss über die anderen Statorpole und deren Luftspalte. Durch die Polarität des eingepprägten Stromes wird die Richtung des erzeugten Magnetfeldes im Statorpol festgelegt. Die Permanentmagnete sind auf einer beweglichen Läuferplatte befestigt. Durch eine mechanische Lagerung wird garantiert, dass der Luftspalt zwischen den Magneten und dem Polfuß immer gleich groß bleibt. Auf Erläuterungen zu den Abmaßen der Anordnung, die spezielle Formgebung und die verwendeten Materialien sei auf die Untersuchungen von Busch hingewiesen [45].

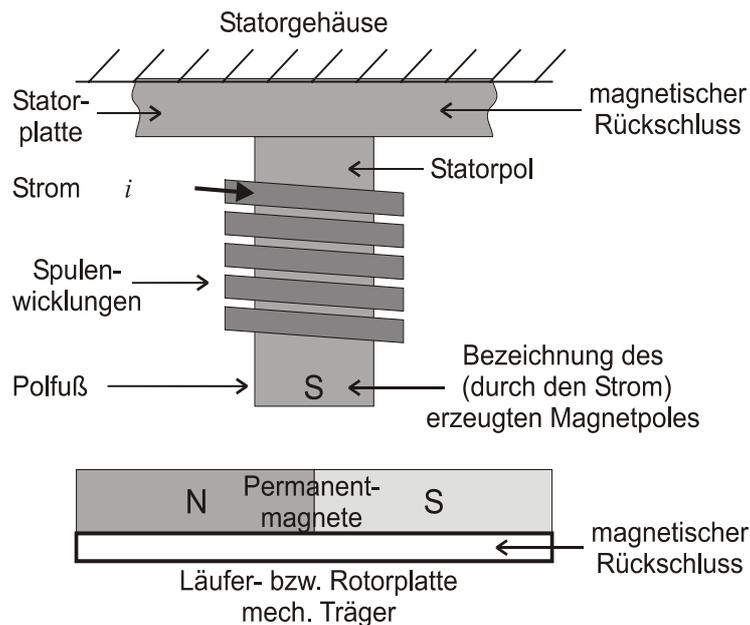


Bild 3.3 Bezeichnungen der elektromagnetischen Motorelemente

Der Betrag und die Richtung, der durch die Spulenwicklungen erzeugten Kräfte auf die Magnete, hängen dabei von der Größe und Polarität des Stromes und von der gegenüberliegenden Magnetanordnung und deren Abstand ab. Ausgehend von den oben beschriebenen Einzelpolen können nun zur Krafterzeugung in einer Maschine mehrere Permanentmagnete und mehrere stromdurchflossene Leiter miteinander kombiniert werden.

Am Institut für Elektrische Maschinen (IEM) der RWTH-Aachen wurden Berechnungen mit Hilfe von FEM-Programmen durchgeführt [44][45]. Mit diesen Berechnungen wird die Kraftwirkung von bestimmten Anordnungen ermittelt. Weiterhin sind die Ergebnisse bei der Wahl einer geeigneten geometrischen Form der Pole und deren räumlichen Anordnung hilfreich. Bild 3.4 zeigt ein Beispiel für ein vernetztes Modell von drei Statorpolen. Dabei befindet sich der mittlere Pol über einer Magnetkante. Dem Bereich der mittleren Spulenwicklung wird dabei eine vordefinierte Stromdichte eingeppräg. Untersuchungen haben ergeben, dass es bei der Anordnung eine Gesamtkraft $F_{x,ges}$ in Richtung der x -Koordinate gibt, die sich aus zwei Komponenten zusammensetzt.

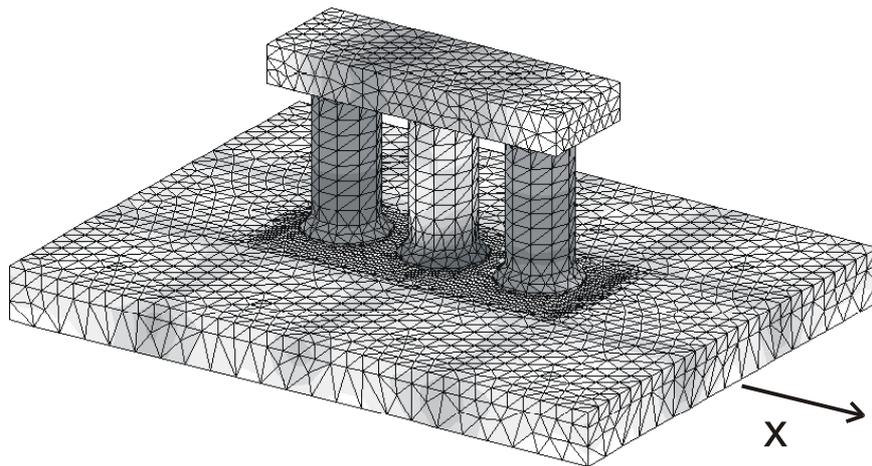


Bild 3.4 Finite-Elemente-Modell von Statorpolanordnung über Magnetfläche

Zum einen gibt es eine vom Strom unabhängige Rastkraft $F_{x,Rast}$, die nur von der Gesamtgeometrie abhängt, d.h. der Abstand der Statorpole untereinander und die Position der Statorpole relativ zu den Läufermagneten sind für diese Komponente verantwortlich. Diese Kraftkomponente kann mit Reluktanzkraft verglichen werden, die versucht den magnetischen Widerstand des Kreises zu minimieren. Zum anderen gibt es eine bestromungsabhängige Kraftkomponente $F_{x,Strom}$. Diese ist in erster Näherung proportional zum Strom, der in die mittlere Spulenwicklung eingepreßt wird.

$$F_{x,ges} = F_{x,Rast} + F_{x,Strom} \quad (3.2)$$

Verschiebt man bei gegebener Statorpolanordnung nun die Läuferplatte mit den Magneten in Richtung der x-Koordinate, so ergeben sich Kraftkennlinien, die neben der Stromabhängigkeit auch eine Abhängigkeit vom Ort besitzen.

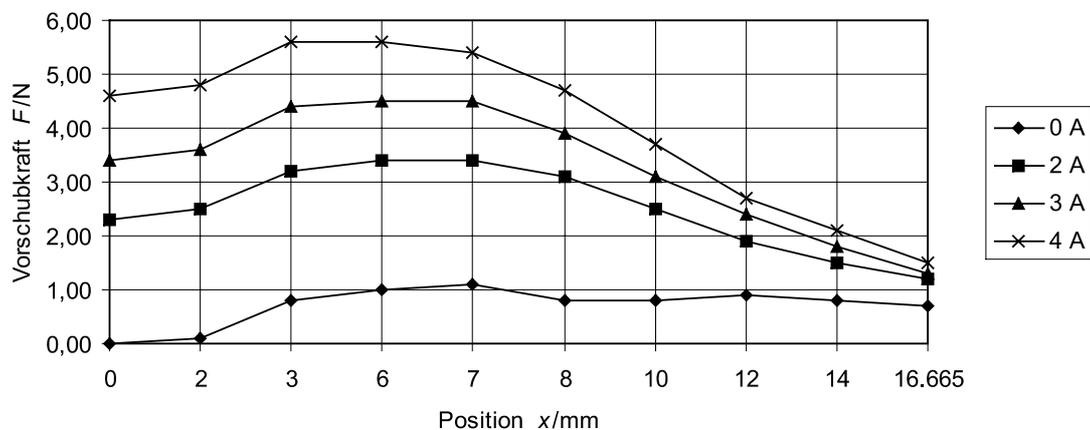


Bild 3.5 Orts- und stromabhängige Kraftkennlinien

Bild 3.5 zeigt beispielhaft die berechneten Kraftkennlinien einer bestromten Spulenwicklung über dem Verfahrensweg aufgetragen. Hierbei wird dem mittleren Statorpol aus Bild 3.4 ein Strom eingeprägt. Beim Ausgangspunkt ist der mittlere Pol genau mittig über einer Magnetkante. Mit der Verschiebung wird die ortsfeste Gleichung (3.2) um die Ortsabhängigkeit erweitert.

$$F_{x,ges}(x,i) = F_{x,Rast}(x) + F_{x,Strom}(x,i) \quad (3.3)$$

Hierbei wird deutlich, dass die Rastkraft nur von der Position abhängig ist. Ist die Rastkraft für alle Positionen bekannt, so kann diese bei einer späteren Regelung des Motors als eine Art Störgröße berücksichtigt werden.

Weitere Untersuchungen am Institut für Elektrische Maschinen haben ergeben, dass für die stromabhängige Kraft in erster Näherung gilt:

$$F_{x,Strom}(x,i) = i \cdot F_{x,0,Strom}(x) \quad (3.4)$$

Mit Hilfe dieser Beziehung kann beim Motor in jeder Position eine gewünschte Kraft erzeugt werden. $F_{x,0,Strom}$ ist dabei die auf einen Strom von $I_0 = 1$ A normierte Kraft. Entsprechend der geforderten Sollkraft muss aus diesen Kennlinienfeldern der notwendige Strom bestimmt werden. Die Proportionalität aus Gleichung (3.4) bietet den Vorteil, dass nur eine einzige stromabhängige Kennlinie gespeichert werden muss. Bild 3.6 zeigt die normierten Kraftkennlinien bei unterschiedlichen Strömen nach Abzug der Rastkräfte, welche aus Bild 3.5 ermittelt wurden. Diese Kennlinien werden bei den in Kapitel 4 erläuterten Regelverfahren genutzt.

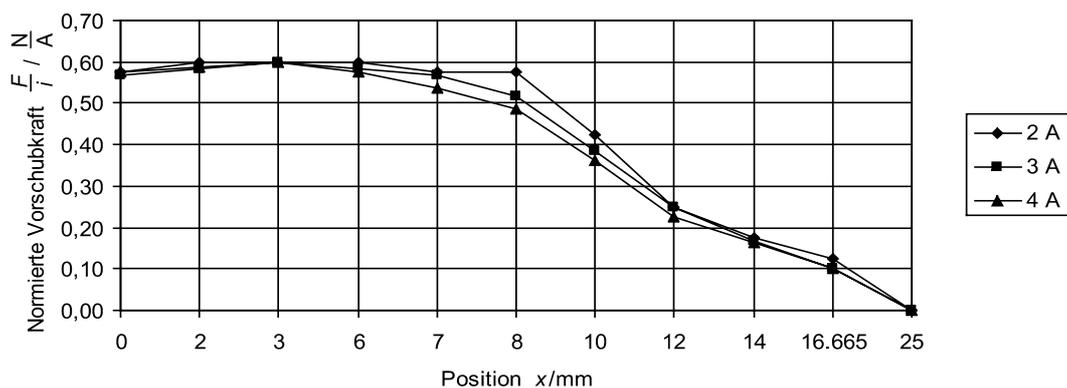


Bild 3.6 Normierte Kraftkennlinien ohne Rastkräfte

Weitere Untersuchungen beim IEM haben ergeben, dass bei der Bestromung verschiedener Polwindungen das Überlagerungsprinzip angewendet werden kann. Dies bedeutet, dass sich die Gesamtkraft aus der stromunabhängigen Rastkraft und der Summe aller n-Teilkräfte zusammensetzt.

$$F_{x, \text{ges}}(x, i) = F_{x, \text{Rast}}(x) + \sum_{k=1}^n F_{k, x, \text{Strom}}(x, i) \quad (3.5)$$

Als nächster Schritt wird eine Anordnung in der Ebene betrachtet, um mehrdimensionale Bewegungen zu ermöglichen. Aufbauend auf dem obigen Beispiel bei dem drei Statorpole in einer Reihe angeordnet waren, werden 16 Statorpole in Reihen und Spalten mit jeweils gleichen Abständen angeordnet. Die gegenüberstehenden quadratischen Magnete sind in abwechselnder Polarität, vergleichbar mit einem Schachbrettmuster, auf einer beweglichen Läuferplatte montiert. Wie oben ist dabei in der x - und y -Richtung ein Polteilungsverhältnis der Ständer- zu Läuferpolen von 3:2 gegeben.

Bild 3.7 zeigt eine Aufsicht von oben auf die Anordnung. Die hellen und dunklen Quadrate stellen die Magnete auf einer beweglichen Platte dar. Die Kreise repräsentieren die in Abstand darüber befindlichen Statorpole. Diese sind an einer starren Platte befestigt, über die auch der magnetische Rückschluss erfolgt. Zunächst sind nur Bewegungen in x - und y -Richtung möglich.

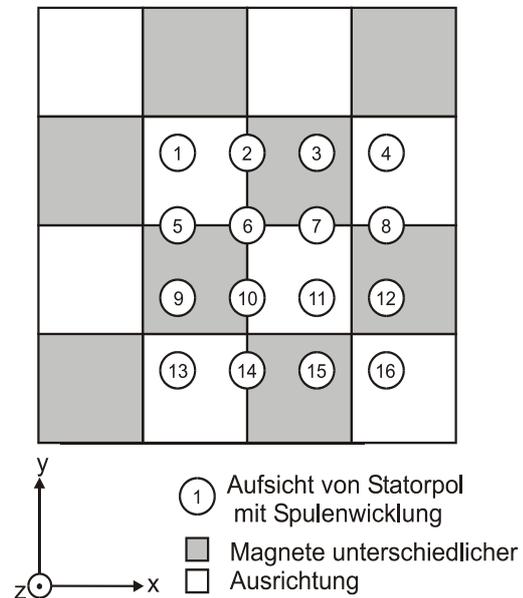


Bild 3.7 Aufsicht auf planare Anordnung von Statorpolen und Permanentmagneten

Bei paralleler bzw. orthogonaler Ausrichtung der Statorpolanordnung zu den Magnetreihen können mehrere Spulen zur Krafterzeugung und damit zu einer Bewegung beitragen. So können in dem gewählten Beispiel die Spulen 2, 10 und 14 eine Kraft in x -Richtung und die Spulen 5, 7 und 8 eine Kraft in y -Richtung erzeugen. die Spule 6 kann keine Kraft generieren, da sie genau über den Eckpunkten von vier Magneten steht. Je nach Position der beweglichen Magnetanordnung tragen manchmal auch mehr Spulen zur Gesamtkrafterzeugung bei. In jeder Stellung ist aber gewährleistet, dass eine Vorschubkraft erzeugt werden kann. Um eine Vorschubkraft in eine gewünschte Richtung der xy -Ebene zu erzielen, können verschiedene Polwicklungen unterschiedlich bestromt und kombiniert werden. Dabei ergibt sich der Gesamtkraftvektor aus der Summe aller Teilvektoren.

$$\vec{F}_{\text{ges}} = \vec{F}_{\text{Rast}} + \sum_{k=1}^n \vec{F}_{k, \text{Strom}} \quad (3.6)$$

Die Rastkraft ist, wie oben erläutert, nur von der geometrischen Anordnung bzw. der relativen Lage der Statorpolanordnung über den Magneten abhängig. Für die stromabhängigen Kräfte ist auch hier der Überlagerungssatz anwendbar, d.h. die Kräfte durch die Ströme in den einzelnen Statorpolwicklungen können zu einer Gesamtkraft summiert werden.

$$\vec{F}_{\text{ges}}(x, y, i) = \vec{F}_{\text{Rast}}(x, y) + \sum_{k=1}^n \vec{F}_{k, \text{Strom}}(x, y, i) \quad (3.7)$$

Verschiebt man einen bestromten Einzelpol einer Anordnung über der Ebene (vgl. lineares Verfahren Bild 3.4) und berechnet die jeweiligen Kraftkomponenten, so erkennt man auch hier, dass nur Vortriebskräfte im Bereich der Magnetkanten erzielt werden können. Bild 3.8 stellt über der Ebene die normierte Kraftkomponente in x -Richtung in einem Teilbereich dar.

Wird eine größere Kraft an einer bestimmten Position gefordert, so muss die auf $I_0 = 1$ A normierten Kraftkennlinie mit einem entsprechend höheren Strom multipliziert werden. Die Rastkräfte sind wie in Bild 3.6 vorher subtrahiert worden. Bei der späteren Speicherung der Daten für die Simulationen und auf den Regelungskarten muss ein 4-dimensionales Feld verwendet werden, in dem die Kräfte in x - und in y -Richtung über beiden Koordinaten aufgetragen werden.

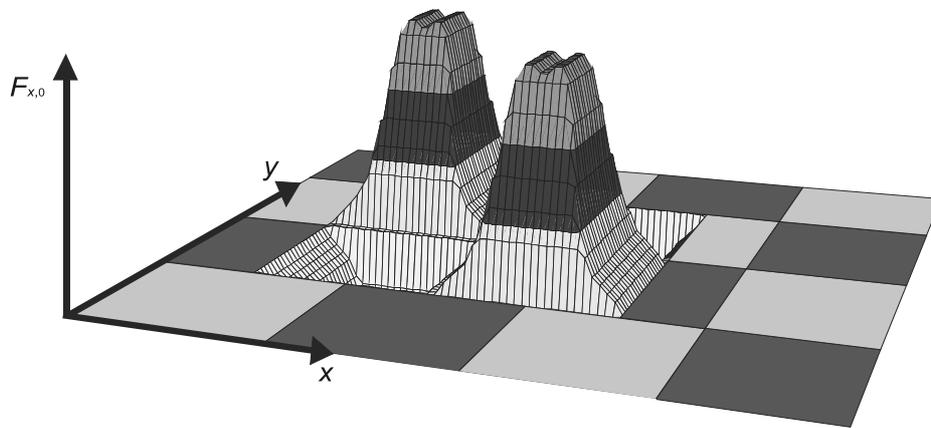


Bild 3.8 Normierter Kraftkennlinieverlauf
(für einen Teilbereich über der Magnetanordnung dargestellt)

Die gegebenen Kraftkennlinien werden als Stützstellen über dem gesamten Aktionsbereich für bestimmte diskrete Werte dargestellt. Aus ihnen müssen mittels einer Interpolation die Zwischenwerte abhängig von der aktuellen Position bestimmt werden. Dazu sind verschiedene Interpolationsverfahren möglich, die jeweils bestimmte Vorzüge haben [46]. Für den Flächen- und Kugelmotor wurden unterschiedliche Interpolationsverfahren miteinander verglichen. Generelles Ziel ist es, die benötigte Berechnungsdauer und die Abweichung vom tatsächlichen Wert zu minimieren. Weiterhin ist der Speicherplatz auf der Regelungshardware begrenzt, so dass die Anzahl der Stützstellen limitiert sein muss. Zur Bestimmung der Stützstellen der Kraftkennlinien wurden numerische Berechnungen und Messungen am Motor gemacht. Diese weisen eine quantitative Abweichung auf, die an Ungenauigkeiten in der Modellbildung liegen können (siehe auch Erläuterungen in Kapitel 6). Außerdem können durch Messfehler die gemessenen Stützstellen von den tatsächlichen abweichen. Aufgrund dieser Ungenauigkeiten wurde sich für eine einfache lineare Interpolation entschieden, die den Vorteil einer schnellen Berechnung hat.

Die oben erläuterten Kennlinienfelder für die Kräfte in x - und y -Richtung gelten nur für die ausgerichtete parallele Anordnung aus Bild 3.7. Bei Verdrehungen um die z -Achse müssen entsprechend mehr Kennlinienfelder berechnet werden, da dann die normierte Kraft von jeweils drei Koordinaten abhängt.

$$\vec{F}_{\text{ges}}(x, y, z, i) = \vec{F}_{\text{Rast}}(x, y, z) + \sum_{k=1}^n \vec{F}_{k, \text{Strom}}(x, y, z, i) \quad (3.8)$$

Eine Drehbewegung der skizzierten Anordnung (Bild 3.7) um die z -Achse kann z.B. durch eine Bestromung der Spulen 2 und 10 und eine Bestromung mit umgekehrten Vorzeichen der Spulen 5 und 7 erzeugt werden. Der Drehpunkt liegt dabei in der Mitte der Anordnung bzw. ist erzwungenermaßen die Befestigungsachse der Magnetanordnung.

Bei einer relativ großen Verdrehung um die z -Achse (z.B. 45°) gibt es Positionen, in der die Statorpole kaum noch Kräfte für eine Bewegung in der Ebene erzeugen können, sondern nur noch eine anziehende bzw. abstoßende Wirkung in z -Richtung haben (Bild 3.9). Betrachtet man das Polteilungsverhältnis von Statorpolen zu Läuferpolen so erkennt man, dass hier ein Verhältnis von 1:1 vorliegt. Durch Änderungen in der Positionierung der Statorpole untereinander kann diese Problematik teilweise verhindert werden. Für den Flächenmotor wurde daher eine weitere Anordnung aufgebaut (siehe Foto im Anhang C), die versetzte Reihen und Spalten besitzt. Es besteht die Möglichkeit, unregelmäßige Strukturen ohne eine Periodizität oder Symmetrie zu konstruieren. Verwendet man unregelmäßige Strukturen, so gibt es innerhalb der Anordnung unterschiedliche Polteilungsverhältnisse. Dies hat den Vorteil, auch in verdrehten Positionen noch Vorschubkräfte generieren zu können, birgt aber den Nachteil, dass weniger oder keine Symmetrien bei der Regelung genutzt werden können.

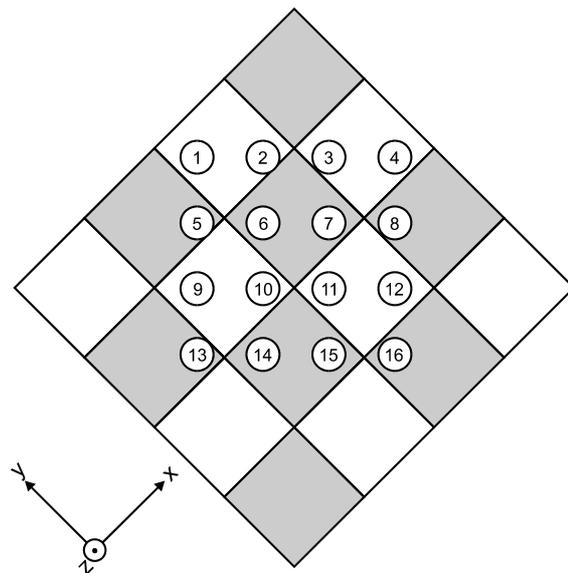


Bild 3.9 Aufsicht auf verdrehte Anordnung von Statorpolen zu den Permanentmagneten

Ist die planare Anordnung um die z -Achse frei drehbar, so kann Gleichung (3.6) zur Berechnung der Gesamtkraft nicht uneingeschränkt verwendet werden. Jede Kraftkomponente in x - und y -Richtung der einzelnen Pole im mitbewegten Läuferkoordinatensystem bewirkt neben einer translatorischen auch eine rotatorische Bewegung. Dies bedeutet, dass eine Momentenkomponente eine Drehung bewirkt. Der Drehpunkt ist dabei die Befestigungsachse der Läuferplatte. Ein Kraft- und Momentengleichungssystem ist sehr viel komplexer aufgebaut. Wie weiter unten erläutert wird, spielt die Drehung um die eigene Achse für den

späteren Kugelmotor keine besondere Rolle. Sie wird deshalb bei der planaren Anordnung nicht näher erläutert. Für die späteren Versuche wird daher die z -Achse der Anordnung festgeklemmt, so dass nur eine Bewegung entlang der x - und y -Achse möglich ist.

Beim Aufbau eines planaren Motors nach dem oben beschriebenen Grundprinzip gibt es grundsätzlich keine Grenzen in der flächenmäßigen Ausdehnung. Auch die Abmaße der Magnete und der Statorpolgröße sind skalierbar. Begrenzungen sind meist nur durch die entsprechende Anwendung oder aber durch mechanisch-konstruktive Randbedingungen vorgegeben.

Bei einer kugelförmigen Anordnung von Magneten und Statorspulen ist man auf die Kugeloberfläche begrenzt. Sowohl bei der Belegung mit Magneten, als auch bei der räumlichen Anordnung von Statorpolen auf einer Kugeloberfläche sind Besonderheiten zu beachten. Vereinfacht kann man einen sphärischen Teilausschnitt einer solchen Anordnung als Projektion auf eine Ebene darstellen, und somit eine Betrachtung wie oben geschildert durchführen. Bild 3.10 verdeutlicht die Generierung einer Kraft- bzw. Momentenkomponente durch eine Statorspulenwicklung. Der Rotor wird durch Lagertaschen in der Mitte gehalten, welches sich am unteren Fußpunkt und etwas oberhalb der Äquatorlinie befinden (siehe Bild im Anhang C).

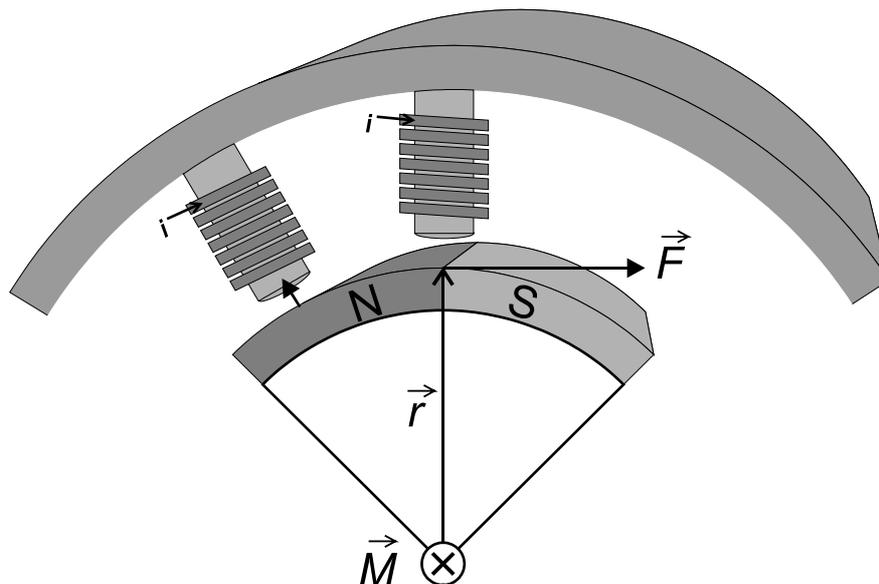


Bild 3.10 Momentbildung durch Kraft auf sphärische Magnetanordnung

Bei Bestromung eines Statorpols über einer Magnetkante wird eine Kraft in Tangentialrichtung erzeugt, die über einen Hebelarm mit dem Radius r ein Moment bewirkt. Ist die Spulen genau über einem Magnet, so können nur radiale Kräfte erzeugt werden. Die oben beschriebenen Prinzipien des Aufbaus und der Krafterzeugung gelten analog. Auch hier können nur die Statorpole, die im Bereich einer Grenzkante zwischen zwei verschiedenpoligen Magneten stehen, zu einer Bewegung (Drehung) beitragen. Steht der Statorpol genau über einem Magneten, so können nur Kräfte in radialer Richtung erzeugt werden, die nicht erwünscht sind, und durch mechanische Lager aufgefangen werden müssen.

Als Grundforderung für den Aufbau einer Kugelanordnung folgt, dass für ein hohes Drehmoment viele Magnetkanten und dementsprechend auch viele Statorspulenwicklungen über diesen Grenzkanten vorhanden sein müssen. Des Weiteren wird deutlich, dass das Drehmoment vom Hebelarm, d.h. vom Radius, abhängig ist. Vergleicht man die Drehachse einer Kugel mit der Polachse eines Globus, so kann bei einer konstanten vorgegebenen Kraft das größte Moment in Äquaturnähe erzeugt werden. Dies entspricht lokal einer linearen Bewegung (Tangente entlang des Äquatorkreises). Bei Kräften in Polnähe ist der Hebelarm im Bezug auf die Drehachse sehr klein. Daher tragen diese Kräfte nur zu einem sehr kleinen Anteil am Gesamtdrehmoment bei. Die Überlegungen von Bild 3.9 über die Generierung von Kräften für eine Drehung um die eigene Achse sind daher nur theoretischer Art, da sie für eine spätere Drehbewegung einer Kugel kaum Einfluss haben. Je nach gewünschter Drehrichtung der Kugel müssen nur die Spulenwicklungen des entsprechenden Äquatorgürtels bestromt werden.

Für die Auslegung eines Kugelmotors und dessen geometrische Anordnung müssen nach obigen Überlegungen folgende Punkte gegeben sein:

- hohe Anzahl an Grenzflächen von Permanentmagneten unterschiedlicher Polarität
- hohe Anzahl an Statorpolen incl. der Spulenwicklungen zur Krafterzeugung
- ungleiches Polteilungsverhältnis (Anzahl Statorpole \neq Anzahl Rotorpole)
- geringe Rastmomente in allen Positionen

Für die Regelung sind Symmetrien im Aufbau und der geometrischen Anordnung von Vorteil. Als vollkommen symmetrische Anordnungen für die Magnetbelegung wurden zunächst platonische Körper als Vorbild betrachtet. Diese sind räumliche Gebilde, deren Ecken auf einer Kugeloberfläche liegen, und deren Teilflächen alle gleich sind. Insgesamt gibt es nur fünf unterschiedliche platonische Körper, wobei beim Ikosaeder mit 20 Flächen die höchste Anzahl an Segmenten besteht. Allerdings ergibt sich das Problem, dass aufgrund der dreieckförmigen Grundflächen gleichnamige Magnetpole aneinander stoßen würden. Verwendet man unterschiedliche Segmentformen, versucht aber trotzdem eine hohe Regelmäßigkeit zu erreichen, ergeben sich Strukturen wie z.B. bei der Belegung eines Fußballs. Eine entsprechende Belegung mit Permanentmagneten scheitert dort allerdings an der Forderung nach abwechselnder Polarität der Magnete, da neben 6-eckigen Elementen auch 5-eckige Segmente vorhanden sind. Eine weitere Diskussion über symmetrische und regelmäßige räumliche Strukturen wird an dieser Stelle nicht geführt. Dem Leser soll aber damit kurz die Problematik der komplexen Auslegung vor Augen geführt werden. Eine vollkommene Symmetrie der mit Magneten belegten Rotorkugel kann nicht erreicht werden, da für den Abtrieb der Kraft ein Flansch vorgesehen ist, und somit ein Teil der Kugel nicht mit Magneten belegt ist.

Als eine einfache Ausführung wurde bei der Belegung der Kugel mit Permanentmagneten die Unterteilung in Längen- und Breitengrade ähnlich einem Globus gewählt. Zwar unterscheiden sich die Magnetsegmente in ihrer absoluten Kantenlänge; orientiert man sich allerdings an

den Winkelkoordinaten, so sind ihre Raumwinkel gleich groß. Betrachtet man nun einen kleinen lokalen Bereich auf der Kugeloberfläche, und projiziert diesen auf eine Ebene, so findet man in erster Näherung eine Anordnung wie das oben beschriebene Schachbrettmuster vor. Bei der sphärischen Anordnung kann, analog zur planaren Anordnung, die Gesamtkraft aus der Summe aller stromabhängigen Einzelkräfte und einem stromunabhängigen Rastmoment berechnet werden. Jede einzelne Kraft muss lediglich mit dem entsprechenden Hebelarm multipliziert werden, um das resultierende Moment zu erhalten. Zur Berechnung muss daher die Position der einzelnen Statorpole und die jeweils gegenüberliegende Magnetbelegung zu jedem Zeitpunkt bekannt sein. Eine genauere Beschreibung zur Umsetzung dieser Methode wird in Kapitel 4 der Antriebsregelung gegeben.

3.3 Der Flächenmotor

Die in Kapitel 2 beschriebenen planaren Motoren ermöglichen einen einfachen Aufbau. Allerdings lassen sich diese Funktionsprinzipien nicht oder nur bedingt auf einen sphärischen Anwendungsfall erweitern. Bei der Auslegung, des in dieser Arbeit beschriebenen Flächenmotors, wurde das Konzept des späteren Kugelmotors berücksichtigt. Eine detaillierte Zusammenstellung der Maße und Kenndaten des Motors befinden sich in Anhang C. Weitergehende Angaben zur mechanischen und elektromagnetischen Auslegung sind bei Busch gegeben [45].

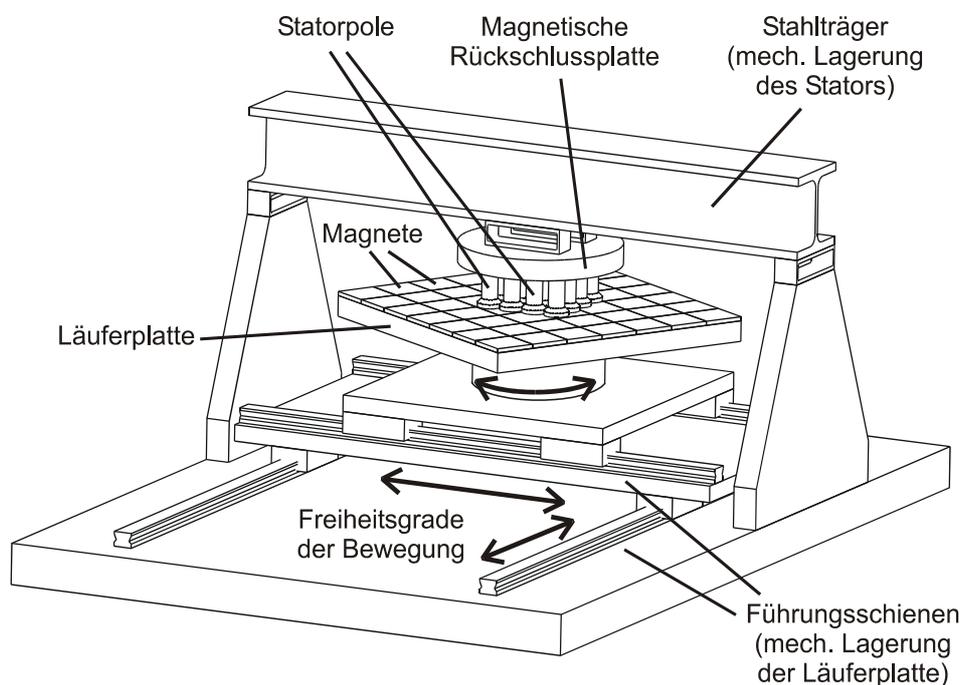


Bild 3.11 Der Aufbau des Flächenmotors

Der Aufbau des Flächenmotors ist in Bild 3.11 zu erkennen. Auf einer Trägerplatte (Läuferplatte) sind 49 quadratische Dauermagnete (NeFeB) in abwechselnder Polarität (ähnlich einem Schachbrettmuster) angeordnet. Diese Platte ist auf zwei orthogonal angeordneten Lagerschlitten geführt, so dass eine Bewegung in einer Ebene möglich ist. Die

Bestimmung der Position erfolgt mit Hilfe eines linearen Wegmesssystems, welches sich seitlich an den beiden orthogonalen Schlitten befindet. Zusätzlich besteht die Möglichkeit, über ein Drehgelenk die Platte um ihre eigene Achse zu drehen. Somit sind drei Freiheitsgrade in der Bewegung gegeben. Die Trägerplatte und die Lagerschlitten sind zur Minimierung des Gewichtes aus Aluminium ausgeführt. In den späteren Untersuchungen wird nur das Eigengewicht der Läuferplatte als bewegte Masse betrachtet. Die Einkopplung von extern angreifenden Kräften, z.B. über Greifarme, ist zunächst nicht vorgesehen. Ein Austausch der Läuferplatte ist möglich, um unterschiedliche Magnetanordnungen testen zu können.

Jede Bewegungsachse kann mechanisch mit Hilfe von Schrauben arretiert werden, womit eine Verminderung der Anzahl der Freiheitsgrade möglich ist. Durch die hohe Vorspannkraft in den Lagerführungen besteht eine gewisse Grundreibung, deren Reibkraft der Bewegung entgegenwirkt. Ihre Größe hängt außerdem von den Betriebszuständen ab, da durch die magnetischen Kräfte eine weitere Verspannung erfolgt. Weiterhin kann über Druckluftbremsen eine Festklemmung erfolgen oder eine zusätzliche Reibkraft aufgebracht werden, welche dann eine äußere Last darstellt. Für die späteren Betrachtungen und Untersuchungen wird die Drehachse fest geklemmt bleiben. Wie im Kapitel 3.2 über die sphärische Kraftbildung gezeigt wurde, spielt die Drehung um die eigene Achse für die Regelung des Kugelmotors nur eine untergeordnete Rolle, und wird daher bei den Versuchen nicht näher untersucht.

Die elektromagnetische Kraftbildung erfolgt über Kupferwicklungen, die sogenannten Statorspulen, die auf den Statorpolen aufgebracht sind. Die Statorpole haben ausgeprägte Statorfüße, um im Bereich des Luftspaltes zwischen Stator und Rotor die Streufelder zu minimieren. Oberhalb der Läuferplatte ist an einem H-förmigen Stahlträger eine Statorplatte befestigt, an der die einzelnen Statorpolfüße verschraubt sind. Bei den in dieser Arbeit beschriebenen Versuchen wurde eine Statorpolanordnung mit 9 Polen, die in drei Reihen und drei Spalten angeordnet sind, verwendet. Eine mögliche Erweiterung auf 16 Pole ist möglich. Außerdem kann die Statorplatte gewechselt werden, um andere Anordnungsformen zu ermöglichen, z.B. mit ungleichmäßigen Abständen. Die Statorplatte und die Statorpole sind aus einem weichmagnetischem Pulververbundwerkstoff ($\mu \approx 500$) hergestellt.

Die Statorspulen werden über Zuleitungen von einem Stromrichter gespeist, welcher im Kapitel 4 näher beschrieben wird. Durch eine gezielte Bestromung der einzelnen Spulenwicklungen kann eine Kraft auf die Permanentmagnete ausgeübt und damit eine Bewegung in eine gewünschte Richtung erzielt werden. Das grundlegende Prinzip wurde in Kapitel 3.2 erläutert. Die dabei unerwünscht auftretenden Kräfte in senkrechter Richtung zu den x - und y -Achsen werden durch die mechanischen Lager aufgefangen. Aufgrund der starken Permanentmagnete und dem magnetisch leitenden Statorrückschluss entstehen sehr hohe anziehende Kräfte auch im unbestromten Zustand. Daher sind die mechanischen Elemente, wie z.B. der Stahlträger, sehr massiv ausgeführt, um ein Durchbiegen zu verhindern. Weiter Angaben zu den technischen Daten und Abmaßen des Flächenmotors befinden sich in Anhang C.

3.4 Der Kugelmotor

In Abschnitt 3.2 wurde das grundlegende Funktionsprinzip der Krafterzeugung erläutert, bei dem durch Bestromung von Statorpolwicklungen eine Kraft auf Permanentmagnete ausgeübt wird. Dieses Prinzip wird auch beim Kugelmotor angewendet [1]. In Bild 3.12 ist der prinzipielle Aufbau des Motors mit drei Freiheitsgraden in der Bewegung zu erkennen. Detaillierte Angaben zu den Abmaßen und den technischen Kenndaten befinden sich in Anhang C. Zusätzliche Erläuterungen zu der konstruktiven Auslegung und speziellen Anforderungen an die Fertigungsverfahren sind Weck und Busch zu finden [47][48].

Eine in allen Richtungen frei drehbare Kugel ist in einer äußeren Schale hydrostatisch gelagert. Zur Reduzierung der bewegten Masse ist die Hohlkugel aus zwei Halbschalen zusammengesetzt. An der beweglichen Kugel ist ein Flansch montiert, über den ein Abtrieb einer Kraft oder eines Momentes möglich ist. Der Schwenkbereich ist nur durch den Öffnungswinkel des Gehäuses begrenzt. Innerhalb dieses Bereiches gibt es keine Einschränkungen in der Bewegung, d.h. die Kugel kann nach allen Seiten verkippen und sich um die eigene Hochachse drehen.

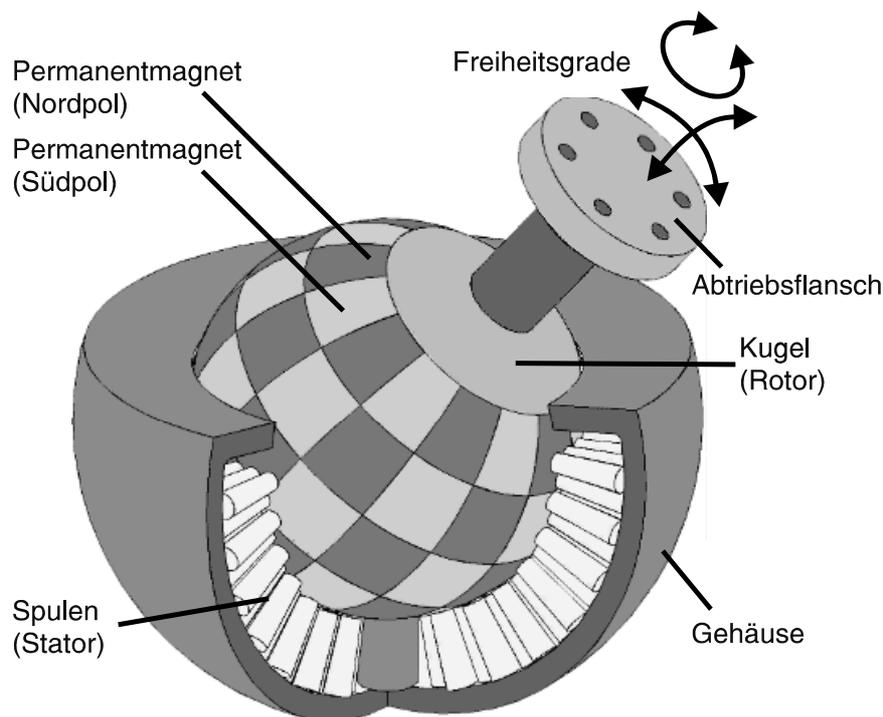


Bild 3.12 Der Aufbau des Kugelmotors

Auf der drehbaren Rotorkugel sind Permanentmagnete mit wechselnder Ausrichtung der Polarität aufgebracht. Der Verlauf der jeweiligen Grenzkanten der Magnete ist mit den Längen- und Breitengraden eines Globus vergleichbar. Wie oben beschrieben, ist für die Erzeugung einer großen Gesamtkraft eine hohe Anzahl an Magnetkanten notwendig, was bei der Konstruktion berücksichtigt wurde. 7 Reihen mit jeweils 16 Magneten ergeben insgesamt 112 Magnetsegmente. Zwar sind durch diese Anordnung die absoluten Längen- und

Breitenmaße der Magnete unterschiedlich, aber in der Betrachtung von Raumkoordinaten überstreichen sie den gleichen Winkel, d.h. jeder Magnet besitzt einen Raumwinkel von $22,5^\circ$ in Längen- und Breitengradrichtung.

Der Stator setzt sich aus einer großen Anzahl von insgesamt 96 Statorpolen mit den dazugehörigen Statorwicklungen und einer Innenschale für den magnetischen Rückschluss zusammen. Eine äußere Schale aus Stahl sorgt für die notwendige mechanische Festigkeit. Da die Richtung des magnetischen Flusses durch den Statorrückschluss nicht fest ist und sich während des Betriebes ändert, wird wie beim Flächenmotor ein weichmagnetisches Material ($\mu \approx 500$) aus einem Pulververbundwerkstoff eingesetzt. Die Statorpole sind gekennzeichnet durch den Polkörper und den charakteristischen Polfuß. Der Polfuß muss an seiner Außenseite konkav gewölbt sein, so dass zu der gegenüberstehenden Kugel ein gleichmäßiger Luftspalt mit konstantem Abstand entsteht. Auf jedem Polkörper ist eine Statorwicklung aufgebracht, welche für die Krafterzeugung verantwortlich ist. Mehrere Spulenanschlüsse werden gebündelt und zur Ansteuerung in mehradrigen Verbindungsleitungen zum Stromrichter geführt. Wie beim Flächenmotor kann ebenfalls jede Wicklung individuell bestromt werden. Die erzielbare lokale Kraft ist dabei von der Magnetanordnung abhängig, die sich dem jeweiligen Pol gegenüber befindet. Durch gezielte Ansteuerung von einem Teil oder aller Spulenwicklungen kann ein Gesamtdrehmoment innerhalb der drei Freiheitsgrade erzeugt werden.

Kräfte in den anderen Raumrichtungen, d.h. anziehende und abstoßende Kräfte in radialer Richtung, müssen durch die hydrostatische Lagerung kompensiert werden. Dazu sind am unteren Fußpunkt und oberhalb der gedachten Äquatorlinie in der Außenschale Lagertaschen angebracht. Durch den Öldruck wird eine hohe Steifigkeit für einen möglichst konstanten Abstand zwischen der Lagertasche und der Rotorkugel garantiert. Öl im Inneren des Systems wird weiterhin als Kühlmittel eingesetzt. Durch die ohmschen Verluste in den Spulenwicklungen entsteht Wärme, die nur in geringem Maße durch das weichmagnetische Verbundmaterial an das Außengehäuse weitergeleitet werden kann. Zu diesem Zweck erfolgt eine Zwangskühlung, bei dem Öl die entstehende Wärme von den Statorwicklungen abführt. Neben den Temperaturgrenzen der verwendeten Materialien muss insbesondere verhindert werden, dass es zu unerlaubten thermischen Ausdehnungen in den unterschiedlichen Bereichen kommt.

In Kapitel 3.2 wurde gezeigt, dass eine absolut regelmäßige Anordnung von einer großen Anzahl an Elementen auf einer Kugeloberfläche nicht möglich ist. Neben den rein mathematischen Betrachtungen müssen bei der Auslegung des Kugelmotors zur Anordnung der Statorpole auch fertigungstechnische Restriktionen beachtet werden. So ist z.B. die Gesamtfläche der runden Statorfüße nicht mehr vernachlässigbar klein gegenüber der Kugeloberfläche. Zwischen den Statorfüßen müssen die entsprechenden Verbindungsleitungen der Wicklungen verlegt werden. Außerdem wurde beim Motor berücksichtigt, dass ausreichend Platz für die Anschlussstecker und die Öllagertaschen vorgesehen sein muss.

Am Institut für Elektrische Maschinen (IEM) wurden Berechnungen mit Hilfe von FEM-Programmen durchgeführt und eine mögliche Anordnung entworfen [49]. Die Statorpole werden dabei in 5 Ebenen positioniert, wobei alle Pole einer Ebene auf dem gleichen Breitengrad des Statorgehäuses liegen (vgl. Bilder in Anhang C). Innerhalb dieses Ringes sind die Statorpole in unregelmäßigen Abständen montiert, so dass es keine Symmetrie zu den anderen Ebenen bzw. Reihen gibt. Eine unsymmetrische Anordnung wurde gewählt, um die unerwünschten Rastkräfte zu minimieren. Somit muss bei der Regelung für jeden Statorpol eine eigene Sollgröße berechnet werden und mit diesem Wert jede Spulenwicklung individuell bestromt werden.

Für eine Regelung der Position ist die Rückführung der aktuellen Lage notwendig. Das Wegmesssystem besteht aus drei separaten Wegsensoren und ist in Anhang C dargestellt. Die Drehung des Motors um die eigene Flanschachse wird über ein konventionelles Rotationsdrehgebersystem bestimmt. Dieses ist an einem schwenkbaren Bügelsystem montiert, dessen Drehachse durch den Kugelmittelpunkt geht. An der Drehachse ist ein Drehgeber montiert, über welchen der Verkippwinkel bestimmt werden kann. Auf dem Bügelsystem ist ein lineares Wegmesssystem aufgebracht, mit Hilfe dessen die Verkippung in dem dritten verbleibenden Freiheitsgrad bestimmt werden kann. In Kapitel 4 werden verschiedene Koordinatensysteme für die Regelalgorithmen vorgestellt. Es besteht daher die Notwendigkeit die gemessenen Positionswerte in das entsprechend benötigte Koordinatensystem zu transformieren.

Ähnlich wie beim Flächenmotor wurde beim Kugelmotor für die Inbetriebnahme nur die eigene Gewichtskraft bzw. das eigene Trägheitsmoment als Last genutzt. Die Festklemmung des Rotors ermöglicht es, Kraftmessungen mit einer Momentenmesswelle durchzuführen. Mit den ermittelten Drehmomenten können die berechneten Kraftkennlinien verifiziert werden. Nähere Angaben zu den experimentellen Untersuchungen befinden sich in Kapitel 6.

3.5 Zusammenfassung

Ausgehend von den Grundprinzipien der elektromagnetischen Krafterzeugung, wurde ein Entwurf für ein Antriebskonzept mit mehreren Freiheitsgraden in der Bewegung beschrieben. Die Konzeptauslegung erfolgte für den sphärischen Antrieb als Kugelmotor mit drei Freiheitsgraden. Als Vorstudie wurde ein Flächenmotor für fertigungstechnische und betriebsbedingte Voruntersuchungen entworfen.

Bei beiden Antrieben sind auf dem beweglichen Teil (Läufer, Rotor) eine große Anzahl an Permanentmagneten aufgebracht. Gegenüber befindet sich der ortsfeste Stator mit ausgeprägten Statorpolen. Auf den Statorpolen befinden sich Spulenwicklungen, durch deren Bestromung eine Kraft bzw. ein Moment erzeugt werden kann. Das besondere bei der großen Anzahl an Stator und Rotorpolen und deren Anordnung ist, dass es ein variables Polteilungsverhältnis, abhängig von der relativen Lage von Stator zu Rotor, gibt. Diese Besonderheit muss beim späteren Entwurf von Regelungsstrategien mit berücksichtigt werden.

4 Regelungskonzepte für mehrdimensionale Direktantriebe

Die Entwicklung im Bereich der Mikroprozessoren, in Verbindung mit neuartigen Leistungsbau-elementen, zum Erfolg der elektrischen Antriebstechnik beigetragen. Erst durch die Möglichkeit der schnellen Berechnung von komplexen mathematischen Ausdrücken wurde der Einsatz von neuartigen Regelungsstrategien möglich. Neben einer effizienten Nutzung mit einem guten Wirkungsgrad, steht vor allem bei den Servoantrieben und Handhabungsrobotern das dynamische Verhalten im Vordergrund. Aus diesem Grund müssen die Strom- und Spannungsgrößen, entsprechend der geforderten Kräfte und Momente, schnell und präzise berechnet werden.

In diesem Kapitel werden zunächst grundsätzliche Hinweise zum Entwurf von Regelungs-systemen gegeben, wie sie auch beim neu entwickelten Flächen- und Kugelmotor zur Anwendung kommen. Im weiteren Verlauf wird auf die Modellbildung des Motors eingegangen. Die physikalischen Modelle sind die Grundlage für den Reglerentwurf sowie deren mathematische Algorithmen. Der Regelkreis wird als zweistufiges Konzept aufgebaut, wobei die Kraft/Momentensteuerung von einer übergeordneten Geschwindigkeits- und Positionsregelung umgeben ist. Als rückgeführte Größe ist nur die aktuelle Position gegeben. Für den Flächenmotor wird eine vereinfachte zweidimensionale Regelung vorgestellt, die die generelle Funktionsweise verdeutlicht. Beim Kugelmotor erfolgt eine Erweiterung auf drei Freiheitsgrade. Dabei werden verschiedene Stellglieder untersucht, die aus den vorgegebenen Kräften und Momenten die entsprechenden Ströme für die Statorwicklungen berechnen. Die übergeordnete Positionsregelung beschreibt, wie alle Positionen innerhalb der Freiheitsgrade erreicht werden können.

4.1 Entwurf der Regelung

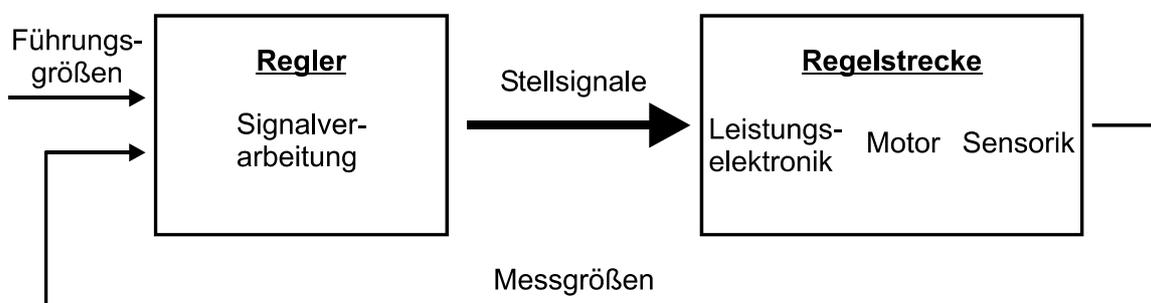
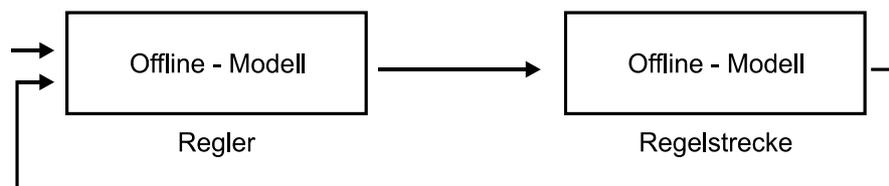
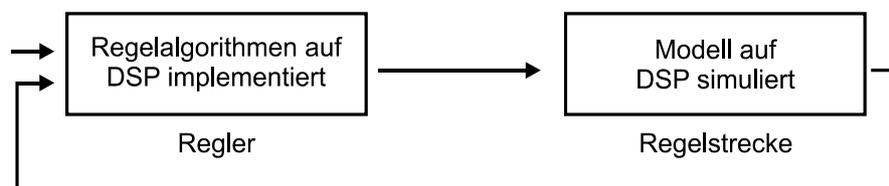


Bild 4.1 Grobstruktur eines Regelsystems

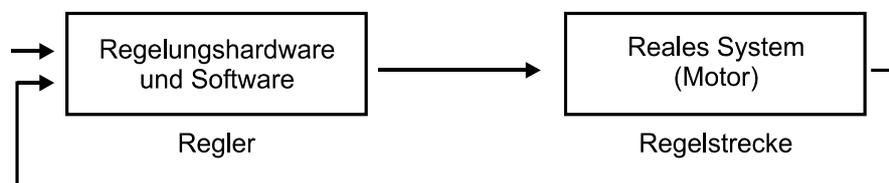
Ziel einer Regelung ist es, ein System durch Vorgabe von Führungsgrößen zu beeinflussen. Die Regelstrecke ist meistens nicht exakt beschreibbar und gewissen Störeinflüssen ausgesetzt. Daher ist eine einfache Steuerung nicht möglich, sondern es müssen eine oder mehrere Messgrößen auf den Regler zurückgeführt werden. In Bild 4.1 sind in dem Reglerblock die Kleinsignale, die in analogen bzw. digitalen Schaltungen verarbeitet werden, repräsentiert. Die Regelstrecke wird in diesem Kapitel grundsätzlich durch den Motor mit seiner Leistungselektronik beschrieben. Obwohl der Stromrichter selbst mit einem Stromregelkreis aufgebaut ist, wird er zur vereinfachten Darstellung komplett mit seinem Verhalten in der Regelstrecke integriert. Ein übergeordneter Prozessablauf, z.B. der Einsatz des Motors in einem Handhabungsroboter, wird an dieser Stelle nicht berücksichtigt. Die Sensoren stellen zunächst nur die Übergabe von gemessenen Größen des Motors zur Regelung dar. Für die Auslegung des Reglers muss die Regelstrecke möglichst exakt beschreibbar sein. Ist dies nicht der Fall, so müssen diese Ungenauigkeiten ähnlich wie unbekannte externe Störungen vom Regler ausgeglichen werden. Die Ungenauigkeiten und Störungen haben meist Auswirkungen auf die Genauigkeit der Regelgrößen und die Dynamik des Systems.



a) Simulation auf Rechner



b) Simulation auf Zielhardware



c) Betrieb mit realem System

Bild 4.2 Entwicklungsschritte beim Entwurf des Regelkreises

Bei der Entwicklung und Aufbau eines Regelungssystems können unterschiedliche Entwurfs- und Realisierungsphasen durchlaufen werden, um im Endstadium ein einsatzfähiges reales System zu besitzen [50][51][52]. In den einzelnen Phasen ist es notwendig, die Regelstrecke möglichst detailliert zu beschreiben, und mit Hilfe der identifizierten Parameter einen Regler

zu entwerfen bzw. zu optimieren. Außerdem sind in einem frühen Stadium noch Änderungen der Regelstrecke möglich, d.h. die Motorauslegung kann an Anforderungen des Gesamtsystems angepasst werden.

Die verschiedenen Entwicklungsstufen bei der Realisierung eines mehrdimensionalen Antriebes sind in Bild 4.2 dargestellt. In der ersten Entwicklungsphase (a) wurden mit Simulationen auf dem PC unterschiedliche Regelungsalgorithmen untersucht. Dabei war die Umsetzung der einzelnen Systembereiche und deren Schnittstellen noch nicht festgelegt. Parallel zur Entwicklung der Algorithmen wurde die benötigte Hardware aufgebaut und getestet. In einem zweiten Schritt (b) wurden dann die Algorithmen auf einem digitalen Signalprozessor (DSP) implementiert, der später die Regelung in Echtzeit übernehmen soll. Zunächst lief die Regelung und das Modell auf einem einzigen DSP, da allerdings die Berechnungszeiten für einen gesamten Berechnungszyklus länger waren als der geforderte Regelungstakt, wurden die unterschiedlichen Algorithmen auf mehrere Prozessoren verteilt. Im letzten Schritt (c) wird dann das Modell durch den tatsächlichen Motor ersetzt, um die Regelungsalgorithmen im Gesamtsystem testen zu können. In diesem Stadium kommen auch alle Schnittstellen zum Einsatz. Ein möglicher Zwischenschritt in der Entwicklung, bei dem die Regelungshardware mit allen Schnittstellen an einem emulierten Modell getestet wird, wurde aus Kostengründen nicht vollzogen.

Die grundlegenden Modelldaten wurden bei den hier verwendeten Motoren vom IEM mittels Simulationen ermittelt und zur Verfügung gestellt. An den realen Motoren wurden zu einem späteren Zeitpunkt Vergleichsmessungen durchgeführt, um die verwendeten Modellparameter zu verifizieren. In Kapitel 4.2.1 wird auf die Modellbeschreibung näher eingegangen. Es besteht generell die Schwierigkeit, die Regelstrecke mit möglichst einfachen Modellen darzustellen, um eine schnelle Berechnungszeit zu gewährleisten. Es muss dabei jeweils überprüft werden, inwieweit Vereinfachungen zulässig sind, z.B. in welchem Bereich die Linearisierung von nichtlinearen Systemen angewandt werden darf. Liegt eine einfache Beschreibung der Regelstrecke vor, so kann diese in Regelkreisen mit Beobachterstrukturen eingesetzt werden. Wie später gezeigt wird, stellt der Kugelmotor aber ein sehr komplexes Gebilde dar, welches nicht durch einfache lineare Gleichungen beschrieben werden kann.

Bei den bisherigen Betrachtungen wurde stillschweigend vorausgesetzt, dass die Regelungshardware in programmierbarer und damit leicht abänderbarer Weise aufgebaut ist. Dies ermöglicht eine hohe Flexibilität, die besonders beim Entwurf von neuen Systemen unabdingbar ist. Ein Aufbau in analoger Schaltungstechnik hat zwar den Vorteil, dass man mit ihr eine hohe Bandbreite erzielen kann und die Kosten relativ niedrig sind, aber Änderungen lassen sich kaum vornehmen und externe Einflüsse, z.B. Temperaturschwankungen können die Regelung negativ beeinflussen. Die Kosten für die programmierbare bzw. umkonfigurierbare Digitaltechnik sind in den letzten Jahren derart weit gesunken, dass sich nur für hohe Stückzahlen ein fest verdrahteter Aufbau lohnt. Für den Flächen- und Kugelmotor wurde daher eine flexible Regelungshardware entwickelt, die durch die Programmierbarkeit in ihrer Funktionsweise leicht veränderbar ist.

4.2 Allgemeine Darstellung des Regelkreises

Beim Entwurf einer Regelung wird zunächst das zu regelnde System (in Bild 4.3 der Antrieb als Regelstrecke) analysiert und durch mathematische Gleichungen beschrieben. Ist das System sehr komplex und durch analytische Methoden nicht lösbar, werden vereinfachte Modelle entworfen, und mittels numerischer Ausdrücke dargestellt. Dabei wird versucht das Gesamtsystem durch möglichst einfache Teilsysteme zu beschreiben.

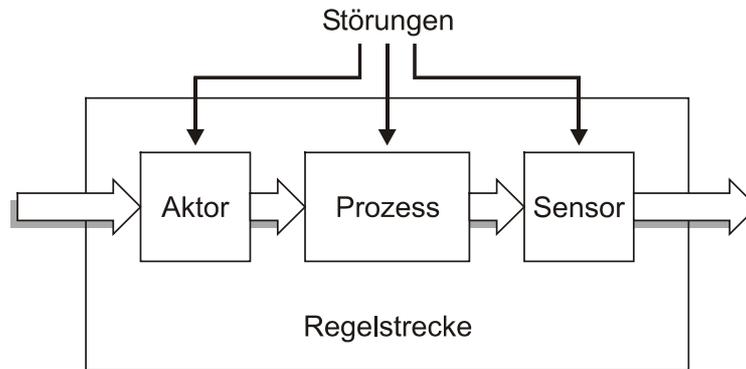


Bild 4.3 Darstellung des realen Antriebs als Regelstrecke

Beim Flächenmotor und Kugelmotor stellen die Spulensollströme die Eingangsgrößen der Regelstrecke dar. Der Aktor repräsentiert die elektromagnetische Komponente, die aus dem Stromrichter und den Spulenwicklungen besteht. Hier werden durch den fließenden Strom Kräfte erzeugt, die auf den beweglichen Rotor des Motors wirken. Der Prozess innerhalb der Regelstrecke beschreibt allgemein das mechanische Verhalten des Motors, d.h. die Umsetzung der Kräfte in eine Bewegung unter Berücksichtigung von Systemgrößen wie z.B. Massenträgheit und Reibung. Ein übergeordneter Prozess, bei dem der Motor als Antrieb dient, wird zunächst nicht betrachtet. Mit den Sensoren werden Systemzustände gemessen, in diesem Fall die Positionswerte, die an die Regelung zurück geführt werden. Alle Bereiche der Regelstrecke sind mehr oder minder großen Störungen ausgesetzt. Können bei der Reglerauslegung Bereiche des Systems nicht genau beschrieben werden, so wirken sich diese Ungenauigkeiten ebenfalls als Störungen aus. So gelten z.B. Linearisierungen zur Anwendung klassischer Regelverfahren nur für einen bestimmten Arbeitspunkt. Außerhalb dieses Arbeitspunktes ergeben sich Abweichungen der nichtlinearen Funktion, die sich wie äußere Störungen auswirken können.

Bei der Beschreibung der Regelstrecke in einem komplexen System müssen Vereinfachungen vorgenommen werden, um die Berechnungszeit für die Algorithmen zu reduzieren. Dies ist zulässig, wenn die dabei resultierenden Fehler relativ klein sind. Als Beispiel kann hier eine bewegte große Masse dienen, auf die eine Kraft mit einer bestimmten Amplitude und Frequenz einwirkt. Ist die Amplitude sehr klein und die anregende Frequenz sehr groß, so hat diese Kraft aufgrund der großen Trägheit des Systems praktisch keinen Einfluss und kann von daher vernachlässigt werden. Die Schwierigkeit beim Flächen- und Kugelmotor besteht darin, alle relevanten Größen quantitativ zu bestimmen. Erst wenn dies geschehen ist, kann abgeschätzt werden, in welchem Maße bestimmte Vereinfachungen zulässig sind.

Bei klassischen Regelkreisen kann die Regelstrecke durch eine einfache Funktion dargestellt werden. Dies ist meist eine Differentialgleichung n-ter Ordnung anhand derer eine Reglerauslegung vorgenommen wird. Bei der Regelstrecke des Flächen- und Kugelmotors ist eine einfache Beschreibung allerdings nur teilweise möglich. Die gesamte Regelstrecke lässt sich grob in zwei Bereiche unterteilen, einen mechanischen und einen elektro-mechanischen. Der mechanischer Anteil beschreibt die Kopplung zwischen der Summe der Kräfte bzw. Momente und einer Beschleunigung bzw. einer Winkelbeschleunigung und wird in Bild 4.4 mit P (Prozess) bezeichnet.

$$\Sigma \vec{F} = m\vec{a} \quad (4.1)$$

$$\Sigma \vec{M} = J\vec{\dot{\omega}} \quad (4.2)$$

Bei einem Motormodell wird aus diesen Größen durch Integration die Geschwindigkeit und die Position berechnet. Als Ausgangsgröße wird am realen Motor die Position in Winkelkoordinaten gemessen. Ein Strom, der als Eingangsgröße zur Regelstrecke anliegt, bewirkt eine Kraft bzw. ein Moment. Diese elektromechanische (aktorische) Komponente wird in Bild 4.4 mit A angegeben. Diese Beziehung ist zwischen Strom und Krafterzeugung nicht durch eine einfache Gleichung beschreibbar und daher für die Auslegung des Regelkreises nicht direkt nutzbar. Statt dessen wird versucht, die Abbildungsvorschrift A zu invertierten und der Regelstrecke voranzustellen. Bei Büttner [53] wird dies als Kompensation beschrieben. Die ideale Kompensation in realen Systemen existiert nicht. Daher kann nur eine unvollständige Kompensation erfolgen, die eine Rückführung benötigt.

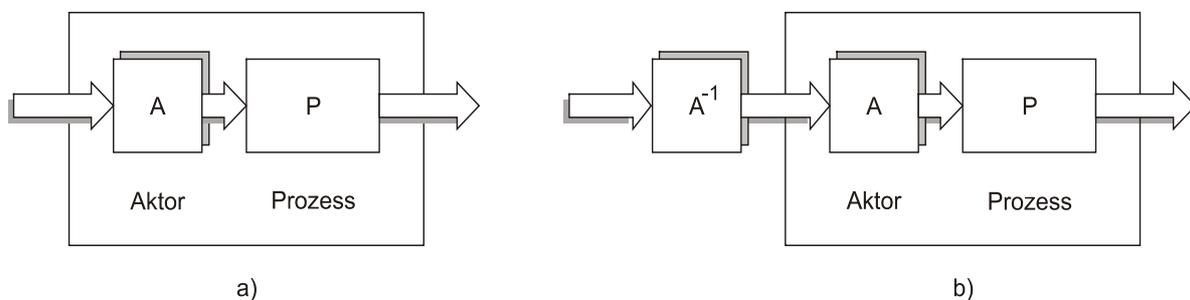


Bild 4.4 Darstellung der Regelstrecke a) ohne und b) mit Teilkompensation

Die Invertierung A^{-1} bewirkt mathematisch gesehen die angestrebte Kompensation der Abbildungsvorschrift A, und als verbleibende Regelstrecke muss nur noch der Anteil P betrachtet werden. Wie später gezeigt wird, ist es allerdings nicht möglich, eine einfache Invertierung vorzunehmen, da keine eindeutig umkehrbare Beziehung vorliegt. Außerdem müssen Verzögerungszeiten der Regelstrecke mit berücksichtigt werden. Das generelle Ziel dieser Kompensation ist, dass von einem Regler eine Sollkraft bzw. ein Sollmoment vorgegeben werden kann, die dann auf die Regelstrecke P wirkt. Mit Hilfe der Beschreibung von P ist dann eine einfache Auslegung des Reglers möglich. Im Weiteren wird die Invertierung A^{-1} als Stellglied bezeichnet, weil damit nach Vorgabe der Sollkraft bzw. des Sollmomentes ein Bestromungsmuster für den Motor (bzw. die Regelstrecke) erstellt wird.

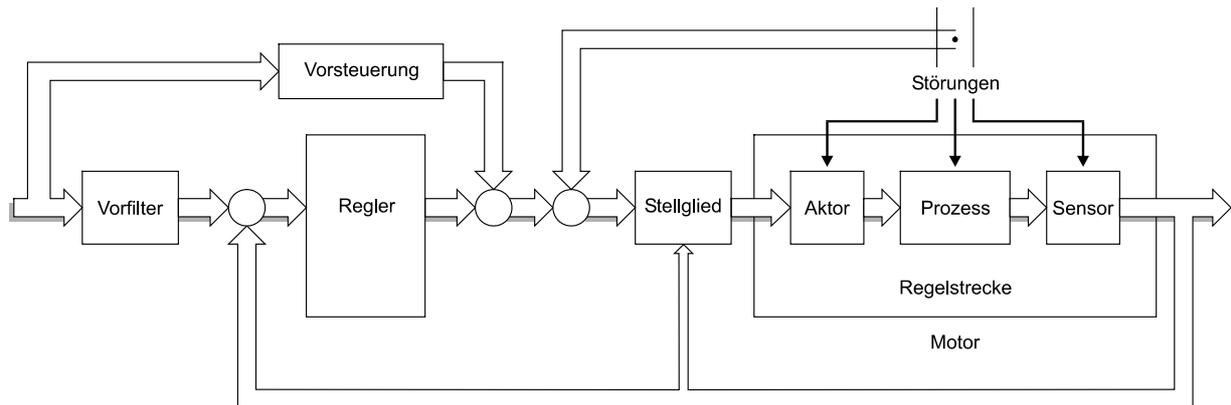


Bild 4.5 Blockschaltbild des gesamten Regelkreises

Der gesamte Aufbau des Regelkreises ist in Bild 4.5 skizziert. Am Motor werden die Positionsdaten erfasst und mit den Sollvorgaben verglichen, welche mit einem Vorfilter bearbeitet werden. Die Regelabweichung wird auf einen Regler gegeben, der versucht, diesen Fehler auszuregeln. Eine Vorsteuerung ermöglicht eine Verbesserung des dynamischen Verhaltens der Systems, da die Rückkopplung über den Regler nur einen verzögerten Ausgleich bewirkt. Soweit Störgrößen bekannt sind, werden diese in dem Regelkreis mit berücksichtigt. Diese drei Signale von Regler, Vorsteuerung und Störgrößenaufschaltung werden auf das Stellglied gegeben, welches ein geeignetes Bestromungsmuster für den Stromrichter generiert.

Die Beschreibung der einzelnen Blöcke wird in den Unterkapiteln 4.3 zum Flächenmotor und 4.4 zum Kugelmotor beschrieben. Neben den statischen Anforderungen einer hohen Endgenauigkeit an einen Regelkreis sind auch dynamische Faktoren von Bedeutung. So wird in Systemen eine schnelle Einstellzeit bei geringem Überschwingen gefordert. Die Auslegung der Regelkreise und die Bestimmung ihrer Parameter orientiert sich am übergeordneten Endprozess. Der vorgestellte Flächen- und Kugelmotor wird zunächst nur als Antrieb ohne zusätzlichen Prozess betrachtet. Die Verwendung von klassischen Reglerstrukturen, wie z.B. einem PID-Regler, ist bei nichtlinearen Systemen problematisch, da die Parameter nur auf einen bestimmten Arbeitspunkt optimierbar sind. In der Entwurfsphase müssen die Parameter so bestimmt werden, dass sie für einen weiten Arbeitsbereich verwendet werden können.

Neben der hier dargestellten inneren Regelungsstruktur des Antriebes gibt es auch noch eine äußere übergeordnete Regelschleife. Sie ermöglicht eine anwendungsspezifische Anpassung des Antriebs an besondere Vorgaben. So wurde eine Bahnkurvensteuerung implementiert, die eine Bewegung der Motoren entlang eines vorgegebenen Weges mit einer festgelegten Geschwindigkeit ermöglicht. Dies ist eine Vorstufe zu komplexen Bewegungsabläufen, wie sie z.B. bei Handhabungsrobotern oder Werkzeugmaschinen vorkommen.

4.2.1 Grundlagen zum Motormodell

Das Motormodell repräsentiert in den numerischen Simulationen den realen Motor und steht für den Entwurf der Regelalgorithmen zur Verfügung. In Kapitel 3 wurde gezeigt, dass die Kraft- bzw. Momentenwirkung zum einen von der geometrischen Anordnung der Magnete und Statorpole sowie der entsprechenden Position des Motors und zum anderen von der Bestromung der einzelnen Statorspulen abhängt. Berechnungen beim Institut für Elektrische Maschinen (IEM) haben gezeigt, dass das Überlagerungsprinzip anwendbar ist und die Gesamtkraft des Flächen- bzw. Kugelmotors sich aus verschiedenen Teilkräften zusammensetzt. Dabei werden die vom IEM berechneten Kraftkennlinien verwendet, die eine Abhängigkeit der Kraft vom Strom und der Position beinhalten.

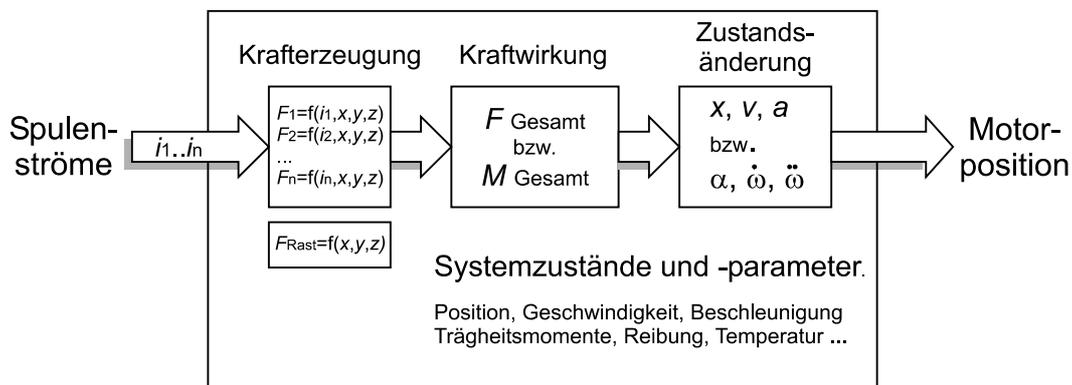


Bild 4.6 Teilbereiche des Motormodells

In den Stromrichtern des Antriebs erfolgt eine interne schnelle Stromregelung. Daher wird dem Motor, wie in Bild 4.6 skizziert, als äußere Stellgröße nur der Strom für alle einzelnen Kanäle vorgegeben. Die Stromänderungsgeschwindigkeiten in den Stromreglern sind durch die Induktivitäten begrenzt. Da diese elektrischen Zeitkonstanten im Vergleich zu den mechanischen Zeitkonstanten aber sehr klein sind, wird der Stromregler vereinfacht als ideal angenommen. Über die Kraftkennlinien und die entsprechenden Positionen können die einzelnen Teilkräfte berechnet werden, die zu einer Gesamtkraft, bzw. einem Gesamtdrehmoment aufsummiert werden. Mit Hilfe der mechanischen Grundgleichungen können aus den bisherigen Systemzuständen (Position, Geschwindigkeit, Beschleunigung) und den bekannten Systemparametern (Masse, Trägheitsmomente, Reibkoeffizienten, Störgrößen, u.a.) die neuen Systemzustände berechnet werden.

Das zeitkontinuierliche Systemverhalten des realen Motors muss bei der Modellierung auf den digitalen Rechnern (PC, DSP) berücksichtigt werden. Dazu werden die Berechnungszeiten des Modells sehr klein im Vergleich zu den mechanischen Zeitkonstanten gehalten. Damit wird ein quasi-kontinuierliches System geschaffen, an dem die Regelungsstruktur getestet werden kann. Bei den Simulationen auf dem PC und DSP wird pro Regelungstakt mehrmals das Modell berechnet, so dass auch Systemzustandsänderungen zwischen den Regelungszyklen mit berücksichtigt werden. Bei der Simulation auf dem DSP unter Echtzeitbedingung, ist es wichtig, dass das Modell möglichst schnell und genau

berechnet werden kann. Eine Problematik dabei ist der Konflikt zwischen Genauigkeit und Berechnungsgeschwindigkeit bei der Interpolation von Werten aus den Stützstellen der Kraftkennlinien, wie es in Kapitel 3.2 angedeutet wurde.

Als Ausgang des Motormodells wird nur die Motorposition ausgegeben, da diese am realen Motor als einzige Messgröße zur Verfügung steht. Weitere interne Zustände, wie z.B. die Geschwindigkeit und Beschleunigung, werden für den Regelkreis nicht verwendet, da sie nicht gemessen werden. Stattdessen muss für die Regelung versucht werden, aus den messbaren Größen die nicht messbaren Systemgrößen rechnerisch abzuleiten.

4.2.2 Grundlagen zum Stellglied

Der Motor kann Kräfte und Momente erzeugen, die für eine Beschleunigung, und damit auch für eine Geschwindigkeits- und Positionsänderung, oder für die Kompensation von außen angreifender Kräften genutzt werden. Die Größe der Gesamtkraft ist dabei von den Stromgrößen der einzelnen Spulen als Eingangsgröße abhängig. Die Kraftgröße kann dabei nicht unmittelbar gemessen, sondern nur über ihre Auswirkungen (z.B. Positionsänderung) beschrieben werden. Daher gibt es nicht die Möglichkeit, die Kraft als rückgeführte Größe im Regelkreis zu nutzen. Bei experimentellen Untersuchungen wurden Kraftmesssensoren an den Motoren angebracht, womit es in Vorversuchen möglich war, die Kraftgenerierung im statischen Lastfall zu untersuchen.

Soll eine definierte Kraft ausgeübt werden, so müsste das Verhalten des Motors (des Motormodells) invertiert werden, um ein geeignetes Bestromungsmuster zu erhalten. Es besteht allerdings das Problem, dass das Modell nicht eindeutig invertierbar ist, d.h. es entsteht ein Gleichungssystem mit zu vielen Unbekannten. Dies bedeutet, dass durch verschiedene Bestromungsmuster der einzelnen Statorspulen eine identische Gesamtkraft erzielt werden kann. Als Beispiel sollen hier drei Vektoren ($\vec{A}_1, \vec{A}_2, \vec{A}_3$) dienen, die einzelne Kräfte der Statorpole beim Flächenmotor repräsentieren. Aus ihnen soll mittels Vektoraddition ein Zielvektor (\vec{Z}) bestimmt werden, der die resultierende Gesamtkraft darstellt.

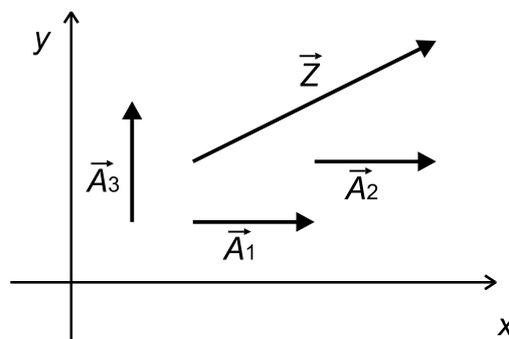


Bild 4.7 Beispiel für Vektoraddition

$$L \cdot \vec{A}_1 + M \cdot \vec{A}_2 + N \cdot \vec{A}_3 = \vec{Z} \quad (4.3)$$

Anhand von Bild 4.7 und mit Gleichung (4.3) wird deutlich, dass es verschiedene Lösungsmöglichkeiten gibt. Lässt man nur ganze (nicht negative) Zahlen zu, so sind die Variationen (L=1, M=1, N=1) (L=2, M=0, N=1) und (L=0, M=2, N=1) möglich. Hebt man die Beschränkung der diskreten Lösungen auf, so gibt es unendlich viele verschiedene Möglichkeiten. Beim Kugelmotor ergibt sich ein System, bei dem drei Zielvektoren (die drei unabhängigen Drehmomente) vorgegeben, aber 96 Spulenströme variabel sind, welche bestimmt werden müssen. Hierbei können die geforderten Momente durch alle Spulen, aber auch durch nur ein paar wenige erzeugt werden. Da das Lösungssystem nicht eindeutig ist, muss für den Regelkreis ein Stellglied entwickelt werden, welches die folgenden Anforderungen erfüllen muss:

- a) **Lösbarkeit:** Eine Berechnungsvorschrift muss in der Lage sein, die Stellgrößen (Sollströme) für eine geforderte Kraft in allen Positionen und für alle Bewegungsrichtungen zu bestimmen.
- b) **Genauigkeit:** Die Spulenströme müssen so bestimmt werden, dass die resultierende Gesamtkraft möglichst wenig von der geforderten Kraft abweicht. Kann die Zielgröße unter bestimmten Umständen nicht erreicht werden, so muss eine möglichst gute Annäherung erfolgen.
- c) **Geschwindigkeit:** Das Berechnungsverfahren soll möglichst schnell durchgeführt werden, um einen möglichst kurzen Regelungstakt zu ermöglichen. Gegebenenfalls müssen Vereinfachungen vorgenommen oder Abbruchkriterien bei Such- und Sortierverfahren vorgegeben werden.
- d) **Nebenbedingungen:** Für die Bestimmung der Ströme können auch zusätzliche Randbedingungen vorgegeben werden, z.B. eine Minimierung der Verluste durch eine gleichmäßige Stromaufteilung.

Für den Flächenmotor und den Kugelmotor wurden unterschiedliche Stellglieder, unter Berücksichtigung obiger Anforderungen, entworfen und untersucht, die in den folgenden Abschnitten näher erläutert werden. Dabei muss beachtet werden, dass die Konzepte des Flächenmotors nur bedingt beim Kugelmotor verwendet werden können, da aufgrund der höheren Anzahl an unabhängigen Kanälen die Berechnungszeiten enorm ansteigen.

4.3 Regelungskonzepte für den Flächenmotor

Der Entwurf einer Regelung für den Flächenmotor orientiert sich an der grundlegenden Funktionsweise des Motors, wie sie in Kapitel 3 beschrieben wurden. Ströme durch die Spulenwicklungen der Statorpole bewirken Kräfte auf die Permanentmagnete der beweglichen Läuferplatte. Mit einer geeigneten Wahl der Ströme kann eine gewünschte Vorschubkraft erzielt werden. Durch die schachbrettartige Anordnung der Magnete und die regelmäßige Anordnung der Statorspulen in Reihen und Spalten ist eine Periodizität und

Symmetrie gegeben, die einige Vereinfachungen zulässt. Allerdings sind durch die geringe Anzahl von 9 Spulenwicklungen nur relativ wenige kraftbildende Komponenten vorhanden, die zur Gesamtkraft und damit zu einer Bewegung beitragen können. Bedingt durch die ortsabhängigen Kräfte gibt es Positionen in denen nur eine begrenzte Krafterzeugung möglich ist. Dies hat zur Folge, dass das System in seinen dynamischen Fähigkeiten beschränkt ist.

4.3.1 Die Modellbildung des Flächenmotors

Bei der Modellierung des Motors wurde eine Aufteilung, wie in Bild 4.4 angedeutet, in einen aktorischen und einen mechanischen Anteil vorgenommen. Diese Aufteilung wurde gewählt, da für den Reglerentwurf beide Komponenten getrennt betrachtet werden können. Außerdem sind ähnliche Systemstrukturen auf die Kugelmotorregelung übertragbar.

Wie in Kapitel 3 zur Kraftbildung erläutert, setzt sich die Gesamtkraft \vec{F}_{gesFM} aus der Addition von stromabhängigen Kräften (Spulenkräften) und stromunabhängigen Kräften (Rastkräften) zusammen.

$$\vec{F}_{\text{gesFM}} = \sum_k \vec{F}_{\text{Spule } k}(x_k, y_k, i_k) + \vec{F}_{\text{Rast}}(x, y) \quad (4.4)$$

Diese einzelnen Komponenten können unabhängig voneinander berechnet und zu einer Gesamtkraft addiert werden. Daher wurde ein allgemeines Modell für eine einzelne Spule entwickelt, das für alle Spulen benutzt werden kann. Sie unterscheiden sich lediglich in der individuell gewählten Stromgröße und in der unterschiedlichen relativen Lage, d.h. die gegenüberliegende Magnetbelegung muss für jede Spule separat betrachtet werden. Bild 4.8 zeigt das Modell für eine einzelne Statorspulenwicklung.

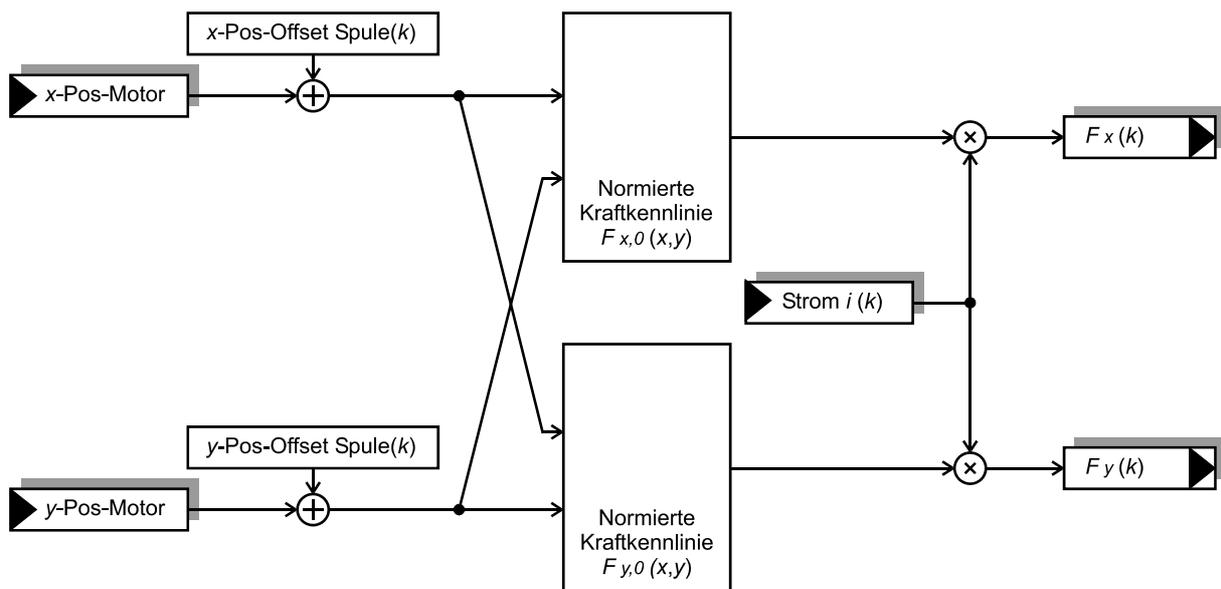


Bild 4.8 Simulationsmodell zum Kraftbeitrag einer einzelnen Spule

Als Eingangsgröße des Spulenmodells wird die Stromgröße und die Position des Ursprungs der beweglichen Magnetläuferplatte vorgegeben. Zusätzlich besitzt jede Spule eine Offset-Position, die ihre relative Lage zum Ursprungspunkt der gemessenen Läuferposition beschreibt. Durch die geometrische Anordnung des Motors sind diese Positionsdaten fest vorgegeben und ändern sich nur bei einer anderen Anordnung der Statorpole.

Da die Kraft proportional zum Strom ist, wird nur ein normiertes, auf 1 Ampere bezogenes, Kraftkennlinienfeld gespeichert. Durch den Stromfluss wird jeweils eine Kraftkomponente in die x - und in die y -Bewegungsrichtung erzeugt. Daher werden zwei getrennte Kennlinienfelder gespeichert ($F_{x,0}$ und $F_{y,0}$). Eine Drehung um die eigene Achse wird durch eine Klemmung unterdrückt, da dieser Fall, wie in Kapitel 3 beschrieben, für die Kugelmotoranordnung nicht von Interesse ist. Bei einer unregelmäßigen Belegung der Läuferplatte müssen über der gesamten Fläche die jeweiligen Kraftbeiträge bestimmt werden. Durch die große Symmetrie der schachbrettartigen Anordnung genügt es aber, nur die Stützstellen über einem Viertel des Magneten zu speichern, und die weiteren Punkte durch Spiegelungen und Verschiebungen zu berechnen. Zunächst wurden für die Simulationen die Daten aus den FEM-Analysen übernommen. Nach der Montage des Motors wurden die Kräfte dann experimentell ermittelt. Dazu wurde die Läuferplatte des Motors verschoben und alle 3 mm geklemmt, die Kraftkomponenten gemessen und diese als Stützstellen im Kennlinienfeld abgespeichert. Durch Interpolation werden dann aus diesem Kennlinienfeld im Modell die positionsabhängigen Kräfte ermittelt.

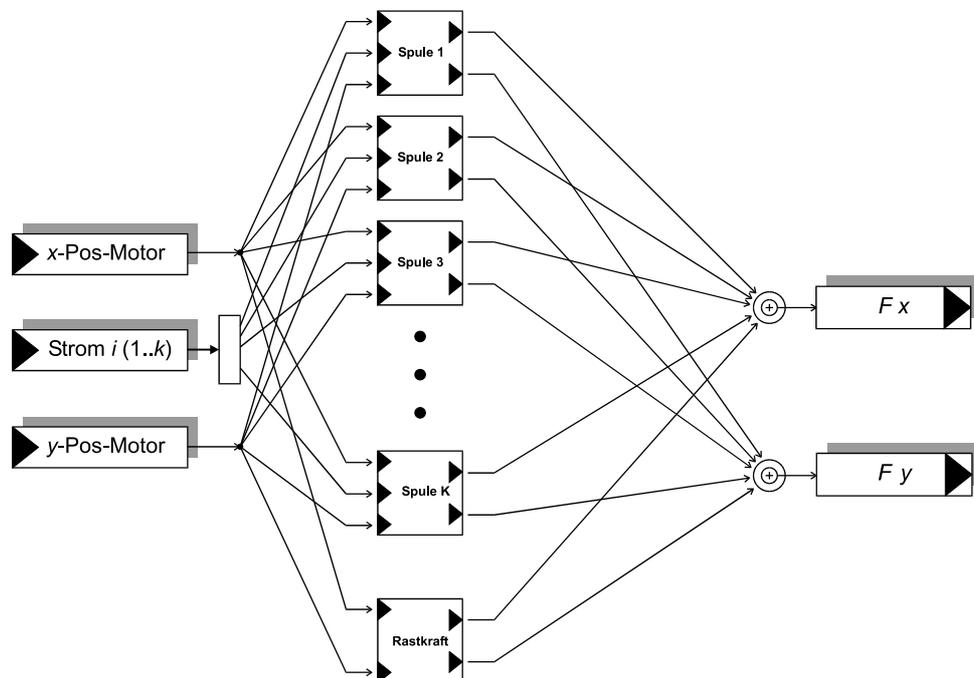


Bild 4.9 Modell der Kraftbildung des Flächenmotors

Neben den stromabhängigen Anteilen existiert auch eine stromunabhängige Komponente, die aufgrund der geometrischen Anordnung unerwünschte Rastkräfte in beiden Bewegungsrichtungen erzeugt. Diese Kräfte sind auch von der aktuellen Position der Läuferplatte

abhängig. Bild 4.9 zeigt das Zusammenwirken aller Einzelspulen und der stromunabhängigen Rastkraft und den daraus resultierenden Kräften in x - und y -Richtung. Fließt kein Strom durch die Spulen, bewirken die Rastkräfte eine Verschiebung der Läuferplatte in eine bevorzugte Position, in der ein stabiles Gleichgewicht herrscht und der Läufer „einrastet“.

Neben der aktorischen Komponente besteht das Motormodell aus der mechanischen Beschreibung des Systems. Auf die Läuferplatte wirkt eine Kraft, die nach dem Aktormodell durch zwei orthogonale Vektoren dargestellt wird. Darauf aufbauend, werden die mechanischen Auswirkungen auch getrennt betrachtet, d.h. wie die Kräfte können auch die Beschleunigung, die Geschwindigkeit und die Position in zwei Teilvektoren zerlegt werden.

$$\vec{F} = \begin{pmatrix} F_x \\ F_y \end{pmatrix}; \quad \vec{a} = \begin{pmatrix} a_x \\ a_y \end{pmatrix}; \quad \vec{v} = \begin{pmatrix} v_x \\ v_y \end{pmatrix}; \quad \vec{s} = \begin{pmatrix} s_x \\ s_y \end{pmatrix} \hat{=} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} \quad (4.5)$$

$$\vec{F}_{\text{gesFM}} = m \cdot \vec{a} + \vec{F}_R \quad (4.6)$$

Die x und y Kraftkomponenten von \vec{F}_S bewirken eine Beschleunigung in die jeweilige Richtung. Da die Läuferplatte auf einem Kreuztisch gelagert ist, besitzt der Motor in dem einen Freiheitsgrad eine geringere bewegte Masse als in dem anderen. Bei einer Bewegung in Richtung des unteren Schlittens muss das Gewicht des aufgesetzten Querschlittens zusätzlich mit bewegt werden. Die Schlitten sind zur Gewichtsreduktion aus Aluminium gefertigt, so dass diese bewegten Massen viel kleiner sind als die große Masse der Läuferplatte mit den aufgesetzten Magneten. Die Reibkraft \vec{F}_R wirkt der Bewegung entgegen. Sie resultiert aus der Vorspannung der Führungslager und dem Gewicht der aufgesetzten Läuferplatte. Diese Größe lässt sich allerdings nur recht ungenau abschätzen. Sobald die magnetische Läuferplatte sich unter den Statorpolen befindet, wirken sehr große anziehende Kräfte, die die Reibung in den Lagern verändern. Außerdem lässt sich die Reibung nicht durch einen Ausrollversuch bestimmen, da durch die Rastkräfte der Motor abrupt gebremst wird. Weiterhin tritt das Problem auf, dass bei Bewegungen aus dem Stillstand eine Haftreibungskomponente auftritt, die ebenfalls sehr schwer quantifizierbar ist. Mit Gleichung (4.6) kann aus der vorgegebenen Kraft und der geschätzten Reibkraft die Beschleunigung bestimmt werden.

$$\vec{v} = \int \vec{a} dt + \vec{v}_0 \quad (4.7)$$

$$\vec{s} = \int \vec{v} dt + \vec{s}_0 \quad (4.8)$$

Über die Integration der Beschleunigung kann die Geschwindigkeit und über deren Integration die Position bestimmt werden. Die somit berechneten aktuellen Positionen werden als Sensorsignale für die Regelung nach außen gegeben und als interner Zustand weiter verwendet, z.B. bei der Nutzung der Kennlinienfelder für die Kraftkomponenten.

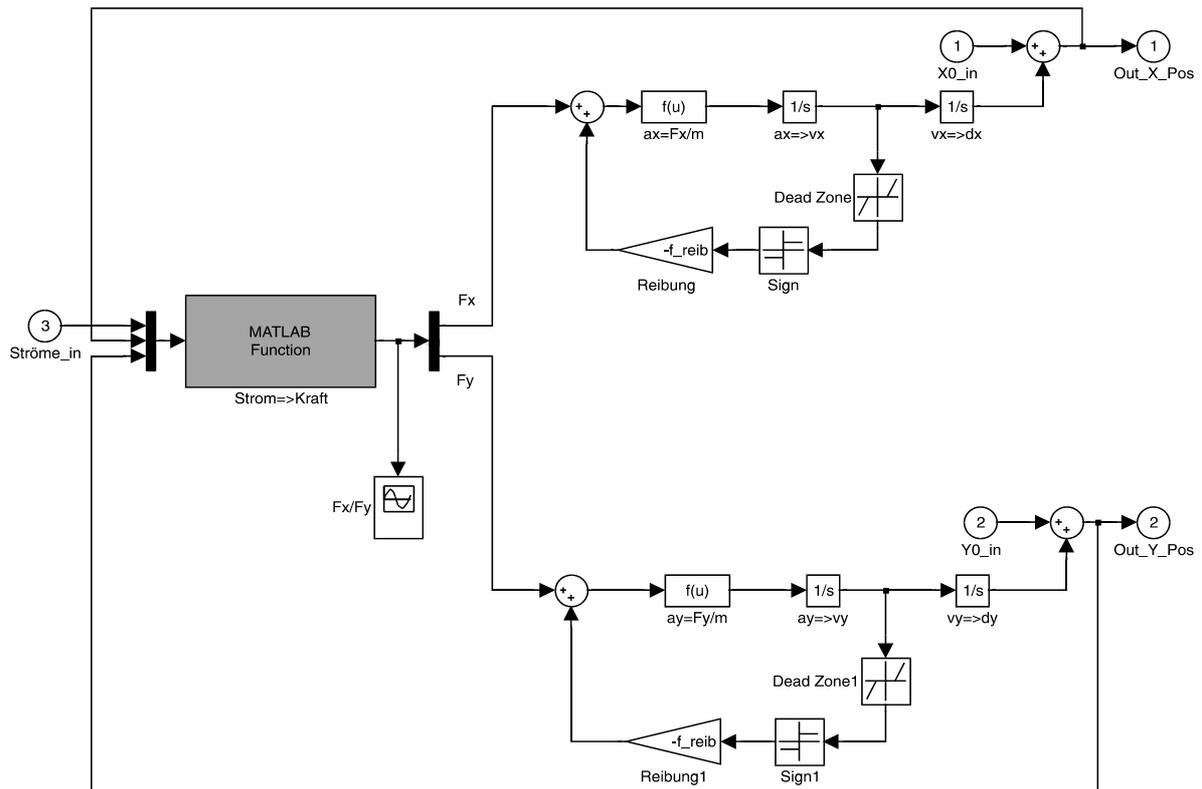


Bild 4.10 Blockschaltbild des Flächenmotormodells unter Matlab/Simulink

Das Blockschaltbild einer Simulation ist in Bild 4.10 erkennbar. Die aktorische Komponente (Strom \Rightarrow Kraft) wurde nicht als graphische Matlab-Funktion sondern als kompilierter Zeilencode implementiert und entspricht der Darstellung in Bild 4.9.

4.3.2 Das Stellglied des Flächenmotors

Die Aufgabe des Stellgliedes ist es, aus einer vorgegebenen Sollkraft \vec{F}_{soll} die einzelnen Ströme $i_{1..9}$ zur Ansteuerung des Flächenmotors zu berechnen. In Kapitel 4.2.2 wurde gezeigt, dass es nicht möglich ist, das Verhalten des aktorischen Teils des Motors zu invertieren. Dies bedeutet, es gibt keine eindeutige Abbildungsvorschrift $i_{1..9} = f(\vec{F})$, die aus dem Motorverhalten $\vec{F} = f(i_{1..9})$ ableitbar wäre. Daher muss ein Verfahren zur Verfügung stehen, welches ein Bestromungsmuster in einer geringen Rechenzeit bestimmt, und damit eine Sollkraft möglichst genau erzielt. Dabei muss als Randbedingung zunächst berücksichtigt werden, dass ein maximaler Strom pro Wicklung nicht überschritten werden darf. Weiterhin muss die positionsabhängige Rastkraft berücksichtigt werden, d.h. zum gewünschten Sollvektor muss diese Komponente addiert bzw. subtrahiert werden.

Jede einzelne Statorpolwicklung kann durch einen Stromfluss eine Kraft bewirken, die einen Betrag und eine Richtung hat. Befindet sich der Statorpol genau über einer Magnetkante, so

kann eine maximale Kraft erzielt werden, die zu einer Bewegung genutzt werden kann. Befindet sich der Statorpol mittig über einem Magneten, so kann dieser nicht genutzt werden, da er nur eine anziehende bzw. abstoßende Wirkung senkrecht zur Bewegungsebene besitzt. Eine erste Überlegung bestand darin, nur die Statorspulen zu berücksichtigen, die eine große Kraft erzielen können, d.h. deren Kraftvektorbetrag über einer bestimmten Grenze liegt. Diese Fallunterscheidung hat den Nachteil, dass bei einer Bewegung Sprünge in der Krafterzeugung auftreten können, wenn eine oder mehrere Spulen diese Grenze überschreiten und dabei bestromt bzw. abgeschaltet werden. Weiterhin gibt es beim Flächenmotor relativ wenige Spulen. Daher müssen bei einem Berechnungsverfahren die Kraftbeiträge aller Statorspulen mit berücksichtigt werden, auch wenn sie noch so gering erscheinen. Als mögliches Stellglied wurden drei unterschiedliche Verfahren untersucht, die als Vektorsortierverfahren, Vektorsuchverfahren und Vektorannäherungsverfahren bezeichnet werden. Allgemein besteht das Problem, dass die Daten in den Kraftkennlinienfelder nicht sehr genau bestimmbar sind. Die Berechnungen und Messungen sind mit gewissen Fehlern behaftet, und bei der Ermittlung der positionsabhängigen Kraftbeiträge durch Interpolation der Stützstellen können weitere Fehler entstehen. Daher ist es sinnvoll, Algorithmen zu verwenden, die statt einer hohen Genauigkeit eher eine schnelle Berechnungszeit aufweisen und damit öfters durchgeführt werden können. Die hohe Bandbreite muss natürlich im gesamten System vorhanden sein, damit der Regelungszyklus insgesamt möglichst kurz gehalten werden kann.

Die erste vorgestellte Variante ist das **Vektorsuchverfahrens**. Die Grundidee besteht darin, dass aus den Vektoren aller Spulen nur diejenigen heraus gesucht werden, die einen Beitrag in Richtung des gesuchten Sollvektors besitzen. Dies bedeutet, dass zunächst die am besten geeigneten Vektoren gesucht werden, um möglichst nah an den Zielvektor zu gelangen. Der Nachteil diese Verfahrens liegt darin, ein Entscheidungsmaß zu finden, wann ein Vektor gut geeignet ist oder nicht. So ist z.B. ein normierter Vektor, der genau in die Richtung des Zielvektors zeigt aber vom Betrag sehr klein ist, nicht geeignet. Vektoren, die eine größere Abweichung vom Zielvektor haben, fallen bei dem Suchverfahren heraus, obwohl sie in gemeinsamer Linearkombination einen großen Kraftbeitrag liefern könnten. Der Vorteil dieses Verfahrens liegt darin, dass mit wenigen Spulen der Zielvektor erreicht wird. Allerdings kann man nicht vorhersagen, in welcher Berechnungszeit der Zielvektor bestimmt ist, und muss daher im Regelungszyklus immer den längstmöglichen Sortierpfad vorsehen. Aufgrund dieser Nachteile wurde das Vektorsuchverfahren nicht weiter berücksichtigt.

Eine weitere Möglichkeit eines Stellgliedes ist, die Spulenströme über ein **Vektorsortierverfahren** zu bestimmen. Bei diesem Verfahren werden die normierten (auf 1 A bezogenen) Kraftbeiträge der einzelnen Polwicklungen nach Betrag und Phase berechnet und nach bestimmten Kriterien sortiert. Bei der Festlegung dieser Kriterien können beliebige Randbedingungen mit berücksichtigt werden. Im Folgenden soll ein sehr einfaches Beispiel gegeben werden. Ein Ablaufdiagramm des Verfahrens ist in Bild 4.11 dargestellt.

Vor dem eigentlichen Verfahren wird die Rastkraft abgezogen, da diese stromunabhängig auftritt, und nur der verbleibende Sollvektor durch die Spulenströme erreicht werden muss. Zunächst wird für alle Kraftvektoren der Spulen untersucht, ob der Vektor eine positive

Komponente in Richtung des Sollvektors hat, d.h. ob der Betrag des Winkels zwischen Sollvektor und Spulenvektor kleiner als 90° ist. Ist dies nicht der Fall, so wird der Kraftvektor um 180° gedreht. Dies bedeutet, dass der Stromfluss durch die Spulenwicklung ein negatives Vorzeichen haben muss, damit der Kraftvektor seine Richtung ändert. Danach wird für jeden Pol untersucht, ob er einen Beitrag in Bewegungsrichtung (A) oder senkrecht dazu (B) liefert und wird daraufhin in die entsprechende Kategorie einsortiert. Als Entscheidungskriterium liegt hier eine betragsmäßige Winkeldifferenz von 45° zu Grunde. Nachdem alle Spulen nach dieser Methode in zwei Kategorien unterteilt wurden, werden die normierten Kraftvektoren jeder Gruppe addiert. Damit ergeben sich zwei Vektoren, aus deren Linearkombination sich der Zielvektor der Sollkraft bestimmen lässt.

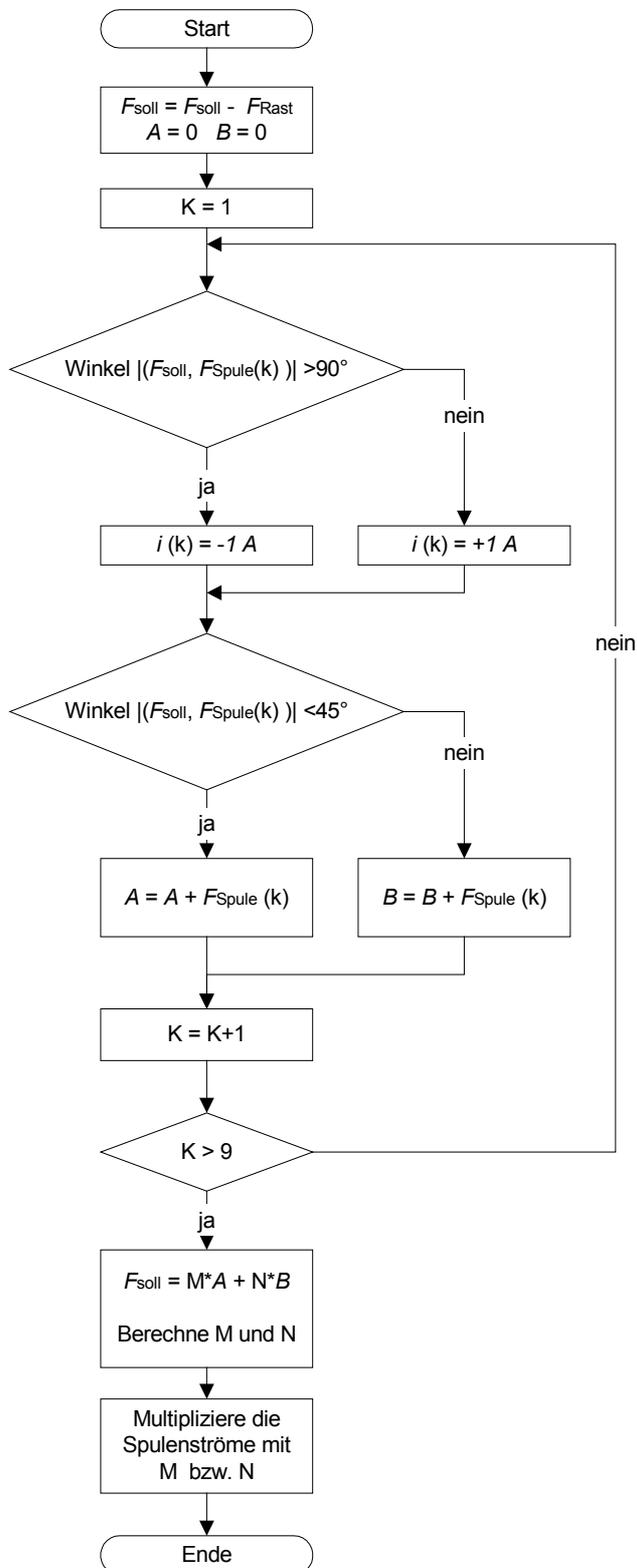
$$\vec{F}(x, y) = M \cdot \vec{A}(x, y) + N \cdot \vec{B}(x, y) \quad (4.9)$$

Die Faktoren M und N entsprechen dabei den Strömen, mit den die jeweiligen Spulenwicklungen der Kategorie bestromt werden müssen. Ergibt sich ein negatives Vorzeichen für einen Faktor, so müssen die Stromrichtungen des entsprechenden Bereiches umgekehrt werden. Als Randbedingung muss hierbei der maximale Strom durch die Spulen berücksichtigt werden. Ist der Sollvektor zu groß, d.h. die gewünschte Kraft kann nicht erzielt werden, so werden die Spulen maximal bestromt.

Ein weitere Ansatz für ein Stellglied ist das **Vektorannäherungsverfahren**. Bei diesem Algorithmus wird der Beitrag jeder Spulenwicklung individuell berücksichtigt. Das prinzipielle Verfahren ist in Bild 4.11 rechts dargestellt. Zu Beginn wird der Anteil der Rastkraft vom Sollkraftvektor abgezogen, da dieser schon einen Beitrag zum gewünschten Sollvektor liefert. Ist die Rastkraft in die entgegengesetzte Richtung orientiert, so kehrt sich das Vorzeichen um.

In der aktuellen Position des Motors werden alle normierten Kraftvektoren aus den Kennlinien bestimmt. Es werden nacheinander die Ströme der Spulen in der Weise bestimmt, dass sich der jeweils verbleibende Abstand zum Zielkraftvektor verkleinert. Der minimale erreichbare Abstand ist dann gegeben, wenn zwischen dem Kraftvektor der Spulenwicklung und dem neuen Sollvektor, dies ist der Vektor vom Endpunkt des betrachteten Vektors und dem Zielpunkt des ursprünglichen Sollvektors, ein rechter Winkel besteht, d.h. Kraftvektor und neuer Sollvektor stehen genau senkrecht aufeinander. Anschaulich wird dies in Bild 4.12 dargestellt.

Vektorsortierverfahren



Vektorannäherungsverfahren

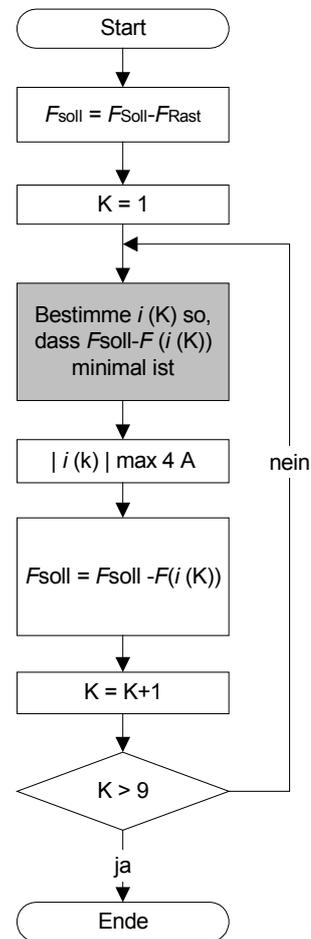


Bild 4.11 Flussdiagramme der Vektorverfahren

Mathematisch kann über die Winkelbeziehung zwischen Sollvektor \vec{F}_{soll} und dem normierten Kraftvektor \vec{F}_0 die Länge des zu bestromenden Kraftvektors bestimmt werden,

$$\cos \alpha = \frac{\vec{F}_0 \cdot \vec{F}_{soll}}{|\vec{F}_0| \cdot |\vec{F}_{soll}|} \quad (4.10)$$

welcher in der abgelegten Form der Kraftkennlinien auf einen Strom von $I_0 = 1$ A normiert ist.

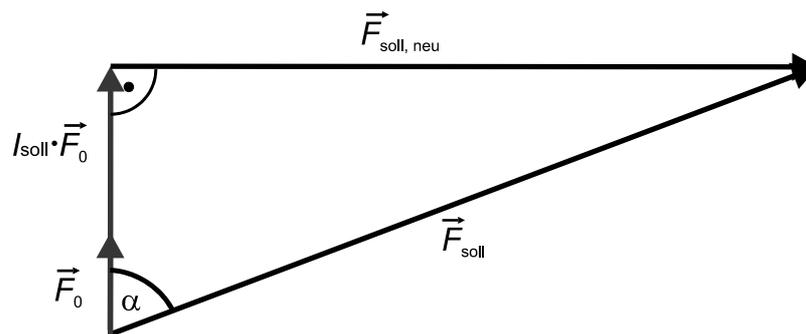


Bild 4.12 Bestimmung des minimalen Abstandes vom Zielpunkt des Sollkraftvektors

$$\frac{I_{soll}}{I_0} \cdot \vec{F}_0 = \cos \alpha \cdot |\vec{F}_{soll}| = \frac{\vec{F}_0 \cdot \vec{F}_{soll}}{|\vec{F}_0|} \quad (4.11)$$

Somit ergibt sich für den Sollstrom des Kraftvektors,

$$\frac{I_{soll}}{I_0} = \frac{\vec{F}_0 \cdot \vec{F}_{soll}}{|\vec{F}_0|^2} \quad (4.12)$$

der nach seinen Komponenten wie folgt dargestellt werden kann.

$$\frac{I_{soll}}{I_0} = \frac{(F_{x,0} \cdot F_{x,soll}) + (F_{y,0} \cdot F_{y,soll})}{(F_{x,0})^2 + (F_{y,0})^2} \quad (4.13)$$

Auf diese Weise nähert man sich mit dem neuen Sollvektor dem ursprünglichen Sollvektor. Der Vorteil bei der Berechnung liegt darin, dass keine trigonometrischen Berechnungen angestellt werden müssen, die viel Rechenzeit benötigen. Die Additionen und Multiplikationen sind dagegen auf dem digitalen Signalprozessor sehr schnell durchführbar. Mit dieser Methode ist sichergestellt, dass mit jedem weiteren Spulenbeitrag eine Annäherung an den Zielvektor erreicht wird, und somit auch ein maximaler Kraftbeitrag erzielt werden kann. Nachteilig ist die ungleichmäßige Auslastung der Spulenwicklungen. Bei kleinen und mittleren Sollkräften, werden die ersten Wicklungen in der Reihenfolge stark und die letzten Wicklungen der Reihenfolge nur schwach oder gar nicht belastet. Ein Vertauschen der

Reihenfolge während der Regelung ist nicht möglich, da dann komplett andere Bestromungsmuster entstehen, und die Beträge der Spulenströme schlagartig wechseln würden.

Bei den Untersuchungen des dynamischen Verhaltens des Flächenmotors wurde auch die Auslastung der Spulen mit betrachtet. Dabei konnte festgestellt werden, dass bei Beschleunigungsvorgängen eine hohe Kraft, und damit auch große Ströme in einzelnen Spulen, auftreten. Allerdings ändern sich mit der Positionsänderung, aufgrund der wechselnden magnetischen Belegung, auch die Kraftvektorenbeiträge der einzelnen Spulen. Von daher gibt es eine variierende Auslastung der Spulen bei dem Vektorannäherungsverfahren. Aufgrund der schnellen Berechnungsmöglichkeit und der maximalen Kraftausnutzung der wenigen Spulenbeiträge, wurde dieses Verfahren für die weiteren Untersuchungen zur übergeordneten Regelung verwendet.

4.3.3 Positions- und Geschwindigkeitsregelung des Flächenmotors

Beim Regelungsentwurf des Flächenmotors ist es das vorrangige Ziel eine möglichst hohe Positioniergenauigkeit der Läuferplatte zu erzielen. Der Aufbau der inneren Beschleunigungs- bzw. Kraftregelung wurde mit einem Stellglied als strukturoptimierter Regler realisiert. Dabei wird versucht, den aktorischen Teil des Motors zu kompensieren, so dass nur noch der kinematische Anteil auf den Regler abgestimmt werden muss. Eine vollständige Kompensation kann allerdings nicht erreicht werden, da das System nicht exakt beschreibbar ist. Für die äußeren Regelkreise (Positions- und Geschwindigkeitsregler) wurden parameteroptimierte Regler gewählt. Die Auslegung der Parameter, von z.B. einem PID-Regler, erfolgt prinzipiell anhand der beschreibbaren Strecke (Pol- und Nullstellen). Ist das System nicht exakt bekannt, so kann z.B. aus der Betrachtung von gemessener Übertragungsfunktion und Schwingversuchen auf das Verhalten der Regelstrecke und der Parameter geschlossen werden. Außerdem kann empirisches Wissen bei der Dimensionierung und Einstellung der Parameter hilfreich sein. Allerdings sei schon an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass das System Nichtlinearitäten besitzt, und die verwendeten Regler nur auf lineare Systeme optimal angepasst werden können. Betrachtet man das System allerdings in einem festen Arbeitspunkt, so kann das Verhalten linearisiert werden.

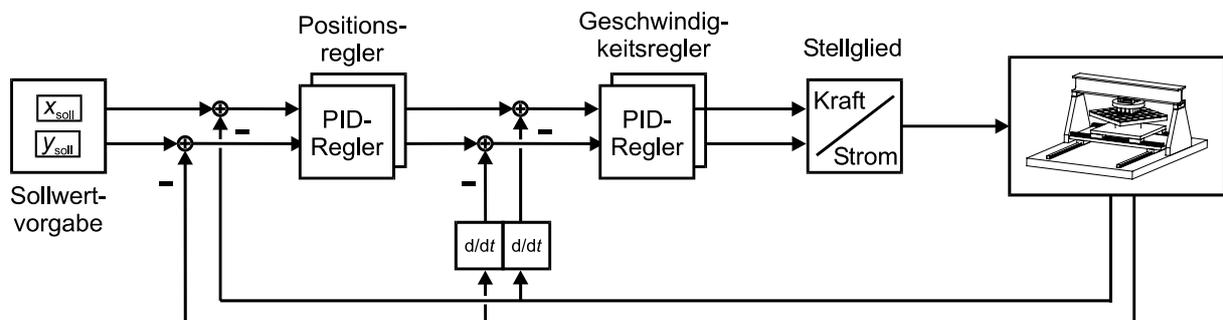


Bild 4.13 Kaskadierter Aufbau mit Positions- und Geschwindigkeitsregelung

Der Aufbau des inneren Geschwindigkeitsreglers und des überlagerten Positionsreglers ist in Bild 4.13 dargestellt. Die Geschwindigkeit muss dabei aus den Positionsdaten ermittelt werden, da kein Geschwindigkeitssensor vorhanden ist.

Bei den Simulationen auf dem PC kann das System als quasikontinuierlich modelliert werden. Dies ist zulässig, da die mechanischen Zeitkonstanten sehr groß im Vergleich zu den Abtastzeiten und dem Regelungstakt sind. Die Geschwindigkeit des Motors wird für die Regelung durch eine Differentiation (dx/dt) aus der Position bestimmt, wodurch die tatsächliche Geschwindigkeit sehr genau ermittelt wird. Bei der Regelung auf dem DSP erfolgt eine zeitdiskrete Abtastung der Position in einem bestimmten Zeitintervall. Die Geschwindigkeitsermittlung geht damit von einer Differentiation in eine Differenzenbildung über.

$$v = \frac{dx}{dt} \Rightarrow v = \frac{\Delta x}{\Delta t} \quad (4.14)$$

Nähere Erläuterungen zur Implementierung der Positions- und Geschwindigkeitsregelung sowie der Reglerauslegung beim Flächenmotorprüfstand sind in Kapitel 6.2 gegeben.

4.3.4 Bewegung entlang von Bahnkurven

Mit den bisher erläuterten Verfahren lässt sich eine Regelung um einen Arbeitspunkt innerhalb eines kleinen Bereiches erzielen. Möchte man größere Bewegungen über mehrere Polteilungen hinweg bewerkstelligen, so kommt es bei großen Sollsprüngen durch den integralen Anteil des Reglers zu einem nicht akzeptablen Überschwingen.

Zu diesem Zweck wird eine übergeordnete Bahnsteuerung implementiert. In dieser überlagerten Regelung können Randbedingungen, wie z.B. eine maximale Geschwindigkeit, mitberücksichtigt werden. Sollen bestimmte Wege gefahren werden, so sollte eine maximale Abweichung vom Weg einstellbar sein. Die Auslegung und Implementierung von Bahnkurvensteuerungen wird in dieser Arbeit nur kurz behandelt. Bei Robotern und Montageautomaten spielt die Generierung von Bahnkurven eine bedeutende Rolle. Bestimmte Bereiche dürfen mit den Werkstücken nicht durchfahren werden oder Drehungen und Bewegungen dürfen nur langsam durchgeführt werden, um die Querbeschleunigungen in den einzelnen Gelenkarmen auf ein Maximum zu begrenzen. Bei vielen Anwendungen sind die Verfahrswege durch einen Produktionsablauf vorgegeben und können für den Roboter entsprechend vorausberechnet werden.

Abhängig von der Endanwendung werden in Systemen sehr komplexe Bewegungsbahnen gefordert. Beim Flächenmotor wird nur die zweidimensionale Bewegung zwischen zwei Punkten betrachtet, die eine geradlinige oder kreisförmige Bewegung darstellt. Andere Bewegungsformen können entweder durch Geraden- oder Bogenstücke zusammengesetzt werden [17], oder bedürfen einer komplexen mathematischen Beschreibung.

Bei der geradlinigen Bewegung erfolgt eine Positionsänderung zwischen zwei Punkten. Als Beispiel sei eine Positionsänderung vom Ursprung $(0,0)$ zum Punkt (x_1, y_1) gegeben, wobei $x_1 > y_1$ ist. Die Bewegung gliedert sich in drei Phasen: eine Beschleunigung mit linearem Geschwindigkeitsanstieg, eine Bewegung mit konstanter Geschwindigkeit und einer negativen Beschleunigung mit einem linearem Geschwindigkeitsabfall (Bremsen). Durch den Motor und die Anwendung ist eine Beschränkung der maximalen Beschleunigung und der maximalen Geschwindigkeit gegeben. Bei der Berechnung der Bahnkurve wird davon ausgegangen, dass die Motorkraft groß genug ist, um in jedem Arbeitspunkt die geforderte maximale Beschleunigung zu erreichen.

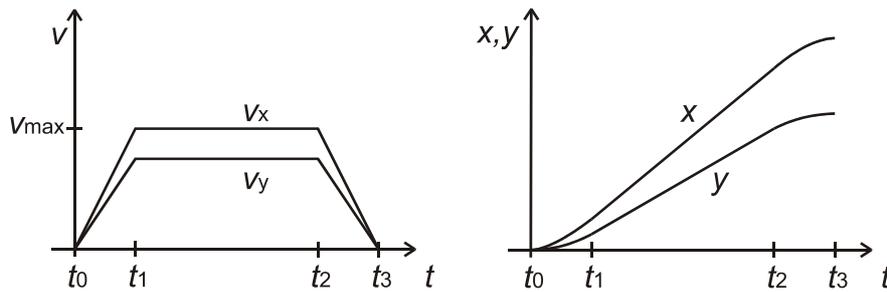


Bild 4.14 Geschwindigkeits- und Positionsprofil bei einer diagonalen Bewegung

In Bild 4.14 ist im Zeitbereich t_0-t_1 die Beschleunigungsphase, im Bereich t_1-t_2 die Phase konstanter Geschwindigkeit und im Bereich t_2-t_3 eine Phase mit negativer Beschleunigung dargestellt. Über dem zeitlichen Verlauf müssen die Positionen in den beiden Koordinaten berechnet werden. Dazu werden zunächst die Zeitpunkte bestimmt.

$$t_1 = \frac{v_{\max}}{a_{\max}} \quad (4.15)$$

$$t_2 = t_1 + \frac{\Delta x}{v_{\max}} \quad \text{mit} \quad \Delta x = x_1 - 2 \cdot \left(\frac{1}{2} a_{\max} \cdot t_1^2 \right) \quad (4.16)$$

Mit den berechneten Zeiten und Teildistanzen kann dann die jeweilige Wegkomponente berechnet werden.

$$x(t) = \begin{cases} 0 & t \leq 0 \\ \frac{1}{2} a_{\max} t^2 & 0 < t \leq t_1 \\ \frac{1}{2} a_{\max} t_1^2 + v_{\max} \cdot (t - t_1) & t_1 < t \leq t_2 \\ \frac{1}{2} a_{\max} t^2 + v_{\max} \cdot (t - t_1) - \frac{1}{2} a_{\max} (t - t_2)^2 & t_2 < t \leq t_3 \\ x_1 & t > t_3 \end{cases} \quad (4.17)$$

Analog dazu wird die y -Position berechnet. Dabei liegt allerdings eine verminderte Geschwindigkeit und Beschleunigung vor. Wie aus Bild 4.14 ersichtlich wird, sind die Beschleunigungsphasen und die Phase konstanter Geschwindigkeit bei beiden

Koordinatenrichtungen gleich lang. Dadurch ist gewährleistet, dass der Motor sich auf der direkten Verbindungslinie zwischen Start- und Zielpunkt bewegt.

Ist der Positionsweg in y -Richtung größer als in x -Richtung, so müssen zunächst die Zeitpunkte in der y -Richtung unter Berücksichtigung der maximalen Geschwindigkeit und maximalen Beschleunigung bestimmt werden. Als Sonderfall muss beachtet werden, dass bei einem kleinen Abstand zwischen Start- und Zielpunkt die maximale Geschwindigkeit nicht erreicht werden kann. Daher setzt sich der Bewegungsvorgang nur aus einer Beschleunigungs- und einer Abbremsphase zusammen.

Die oben berechnete Bahnkurve wird der bestehenden Regelung als Sollgröße vorgegeben. Damit liegt keine Sprungfunktion sondern eine stetige Änderung der Sollposition am Eingang an. Mit der gemessenen Istposition ergibt sich eine Regeldifferenz, die auf den oben beschriebenen Positions- und Geschwindigkeitsregler gegeben wird.

Die Berechnung einer Bahnkurve auf einer Kreisbahn erfolgt in ähnlicher Weise wie bei der linearen Bewegung. Dabei wird der Kreis bzw. der Bogenabschnitt durch den Kreismittelpunkt, den Radius sowie den Start- und Zielpunkt der Bewegung charakterisiert. Die jeweilige Position bei der entsprechenden Winkelbeschleunigungsphase und Phase konstanter Winkelgeschwindigkeit muss dabei auf die kartesischen Koordinaten umgerechnet werden. Der wesentliche Unterschied zur linearen Bewegung besteht bei der Kreisbewegung in einer konstanten Querbewegung, die von der Fliehkräften verursacht wird. Bei Saffert wird diese Querkraft als Wegfehlervektor bezeichnet, der senkrecht auf dem Bahnvektor (Zielvektor) steht [17]. Durch die kontinuierliche Nachführung des jeweils neuen Zielvektors, werden die Abweichungen von der Bahnkurve ausgeglichen. Allerdings lässt sich eine minimale Abweichung nicht verhindern, da die Position des Systems nur zu diskreten Zeitpunkten abgetastet wird und daraufhin neue Stellgrößen berechnet werden.

Als Erweiterung der bestehenden Reglerstruktur wurde eine Vorsteuerung implementiert, wie sie in Bild 4.15 dargestellt ist.

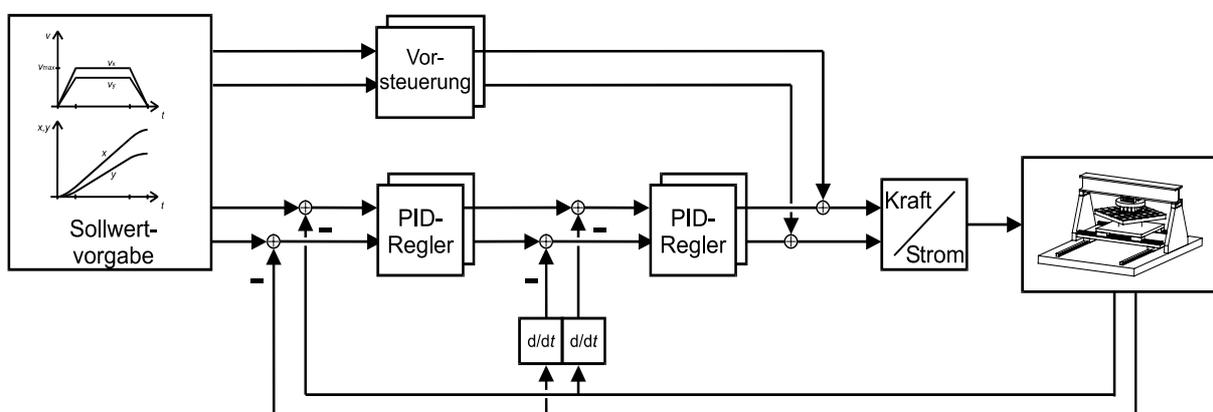


Bild 4.15 Regelungsstruktur mit Vorsteuerung und Bahnkurvenvorgabe

Mit Hilfe der berechneten Bahnkurve wird dem Regler nur die jeweiligen Position als Sollgröße übergeben. Mit Hilfe der Vorsteuerung kann nun über die kinematischen Gleichungen des Motors das System gezielt dynamisch beeinflusst werden. Mit der jeweils berechneten Beschleunigung auf der Bahnkurve wird eine zusätzliche Kraft für das Stellglied aufaddiert.

$$\vec{F}_{\text{Vorst.}} = m \cdot \vec{a}_{\text{soll}} + \vec{F}_{\text{Zusatz}} \quad (4.18)$$

Zusätzliche Kräfte \vec{F}_{Zusatz} können ebenfalls mit berücksichtigt werden. Diese sind z.B. durch die Reibung der Lagerung gegeben. Sind andere Störgrößen bekannt, so können diese auch mit berücksichtigt werden. In Kapitel 6.2 werden nähere Erläuterungen zur Umsetzung der Bahnkurvensteuerung am Versuchsstand und experimentelle Messungen vorgestellt.

4.4 Regelungskonzepte für den Kugelmotor

Aufbauend auf den Erfahrungen vom Flächenmotor wurden die Regelungen für den Kugelmotor erweitert. Dazu war nicht nur eine Erhöhung der Anzahl an Spulenwicklungen notwendig, sondern bei der sphärischen Anordnung muss auch der dritte Freiheitsgrad der Bewegung berücksichtigt werden. Der strukturelle Aufbau des Regelkreises erfolgt ähnlich wie beim Flächenmotor, wobei ebenfalls ein Modell für den Entwurf genutzt wird.

4.4.1 Koordinatensysteme

Für die Berechnungsmethoden der Kugelmotorregelung und des Modells sind verschiedene Koordinatendarstellungen nötig. Einige dienen vornehmlich der anschaulichen Beschreibung, andere dagegen sind zur einfachen Berechnung der mehrdimensionalen Bewegung notwendig.

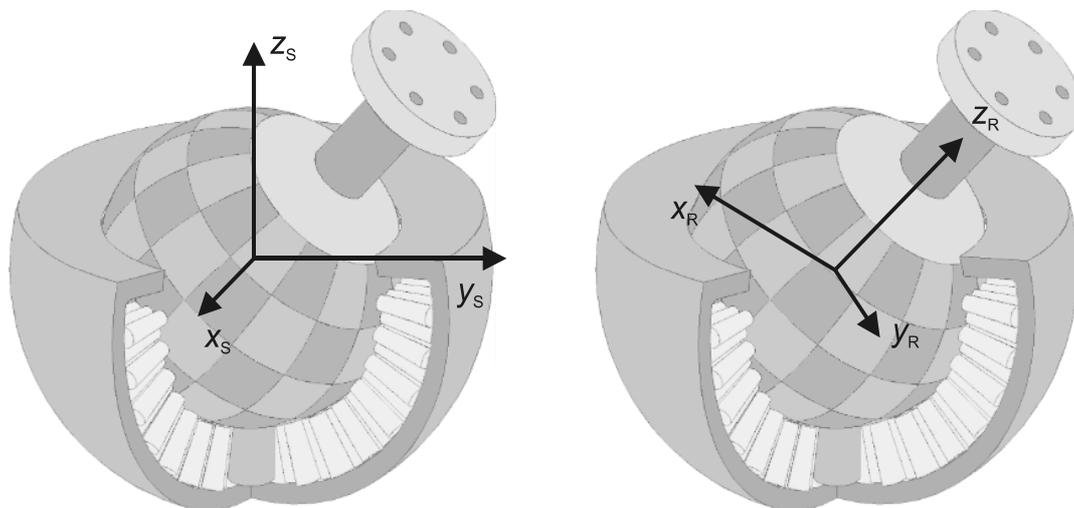


Bild 4.16 Statorkoordinatensystem (S) und Rotorkoordinatensystem (R)

Bild 4.16 deutet die festen Koordinatenachsen an, die mit dem Motor verbunden sind. Das kartesische Koordinatensystem des Stators hat seinen Ursprung im Mittelpunkt der Statorhalbkugel. Die z-Achse zeigt dabei in Richtung der unverkippten Rotorflanschachse. Das Statorkoordinatensystem wird mit dem Index „S“ bezeichnet und dient zur Lagebeschreibung der einzelnen Statorpole. Das Rotorkoordinatensystem ist ein kartesisches Koordinatensystem, welches fest mit dem Rotor verbunden ist und mit dem Index „R“ bezeichnet wird. Die z-Achse ist permanent in Richtung des Flansches ausgerichtet. Der Ursprung des Systems liegt in der Mitte der Kugel und ist identisch mit dem Statorsystem. Mit dem Rotorsystem werden die Positionen der Magnetflächen und damit auch die darauf ausgeübten Kräfte beschrieben. Die Kanten der Magnetflächen liegen auf Längen- und Breitengraden ähnlich wie bei einem Globus.

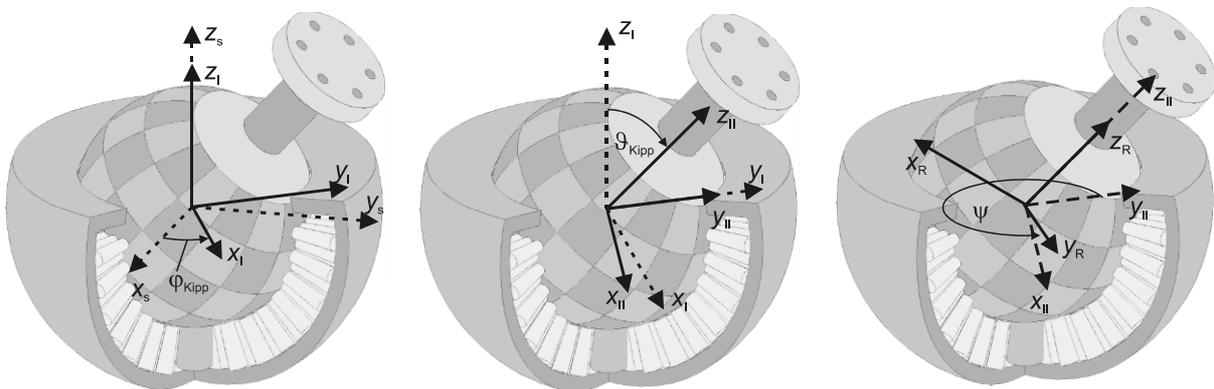


Bild 4.17 Koordinatentransformation über die abgewandelten Eulerschen Winkel

Um das Statorkoordinatensystem in das Rotorkoordinatensystem zu überführen wird eine Transformation über die abgewandelten Eulerschen Winkel nach Bild 4.17 durchgeführt. Zuerst erfolgt eine Drehung um die z_s -Achse um den Winkel φ_{kipp} . Anschließend wird das System um den Winkel ϑ_{kipp} um seine neue y_I -Achse gedreht. Im letzten Schritt findet eine Drehung um die neue z_{II} -Achse um den Winkel ψ statt. Der Winkel ψ berechnet sich dabei aus folgender Gleichung:

$$\psi = \varphi - \varphi_{kipp} \quad (4.19)$$

φ_{kipp} ist der Winkel zwischen der Projektion der Rotorachse in die xy -Ebene des Statorsystems und der x -Achse des Statorsystems die Verkipprichtung des Rotors an. Die Winkel ϑ_{kipp} , φ und φ_{kipp} werden in Bild 4.18 dargestellt.

Ein weiteres Koordinatensystem ist durch das Bügelmesssystem gegeben. Zur Positionsmessung ist ein Schwenkbügel mit linearem Wegsensor und zwei Drehwinkelsensoren gegeben. Die Drehachse des Schwenkbügels stimmt mit der y -Achse des Statorkoordinatensystems überein. Der am Schwenkbügel angebrachte Drehgeber misst die mit α bezeichnete Verdrehung des Schwenkbügels um die y -Achse des Statorsystems. Der

Winkel zwischen der Rotorachse und der y -Achse des Statorsystems wird mit β bezeichnet und von dem linearen Wegmesssystem ermittelt. Der zweite Drehgeber ist am Flansch angebracht und misst den Verdrehwinkel φ um die Rotorachse. Eine Darstellung des Bügelmesssystems ist in Anhang C gegeben.

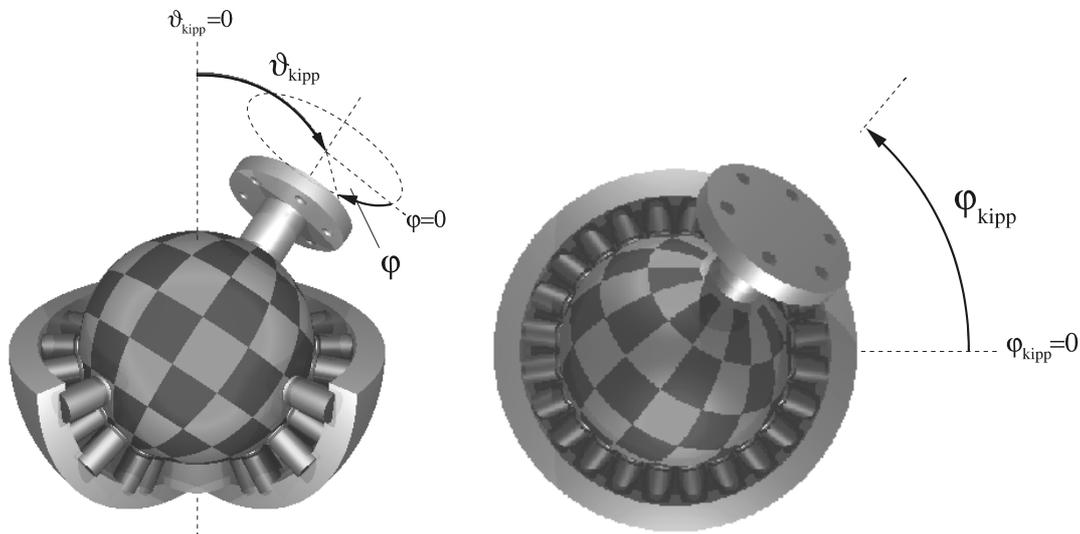


Bild 4.18 Bezeichnung der Positionswinkel

Für die Darstellung der Drehmomente wird ein weiteres kartesisches Koordinatensystem mit den Achsenbezeichnungen a , b und c eingeführt (siehe Bild 4.20). In diesem System werden die Vektoren der einzelnen Teilmomente in ihre Komponenten zerlegt. Der Sollmomentvektor zeigt dabei immer in die Richtung der a -Achse. Durch Kombination mehrerer Teilvektoren kann ein Gesamtmomentvektor erzielt werden, der möglichst genau dem Sollmomentvektor entsprechen muss.

Bei der Verwendung der Kennlinienfelder zur Kraft- bzw. Momentenberechnung des Modells und des Stellgliedes wurden keine absoluten Abstände der Magneten in metrischer Länge, sondern Winkelabstände angegeben. Dabei wurde vereinfachend angenommen, daß der Verlauf der Tangentialkräfte in Abhängigkeit des relativen Längen- und Breitengrads über allen Magneten gleich ist. Die Bezeichnung der relativen Längen- und Breitengrade ist im Bild 4.19 links angegeben.

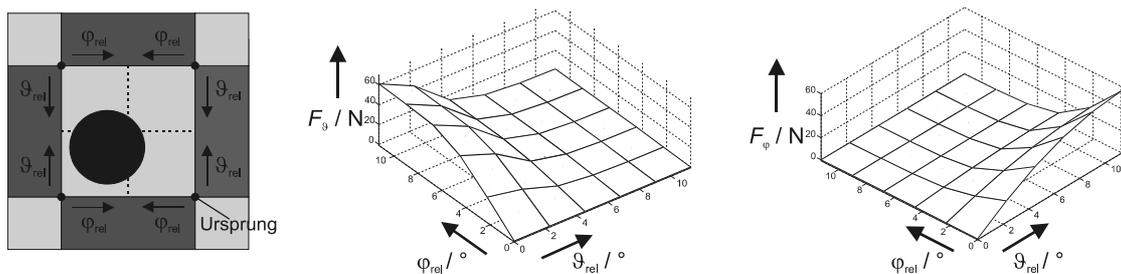


Bild 4.19 Bezeichnung der relativen Winkel und dazugehörige Kraftkennlinienfelder

Die in Richtung zunehmenden Breitengrades gerichtete Kraftkomponente wurde mit F_ϑ , die Kraftkomponente in Richtung zunehmenden Längengrades mit F_φ bezeichnet. Der Kraftverlauf über einem ganzen Magneten ergibt sich durch Spiegelung an den Magnetmittellachsen. Aufgrund der periodischen Anordnung kann mit dieser Darstellung die Kraftentwicklung an jeder Stelle der Kugeloberfläche bestimmt werden. Die gespeicherten Kraftkennlinien sind auf einen Strom von $I_0 = 1 \text{ A}$ normiert. Bei der Darstellung der Rastkräfte bzw. Rastmomente ist eine lokale Berechnung und Summation nicht möglich, da die Gesamtanordnung der Statorpole unsymmetrisch ist. Aus diesem Grund muss über dem gesamten Aktionsradius für alle drei Winkelkoordinaten ein Kennlinienfeld für die Rastkräfte abgespeichert werden.

4.4.2 Das Modell des Kugelmotors

Die Modellbildung erfolgt beim Kugelmotor ähnlich wie beim Flächenmotor. In dem aktorischen Teil erfolgt zunächst die Berechnung des Gesamtmomentes, welches von den einzelnen Strömen der Statorwindungen und einer Rastkraft durch die Permanentmagnete abhängt. Auch hier erfolgt eine Überlagerung aller Teilkräfte. Es müssen aus allen lokalen tangentialen Kräfte, abhängig von der Winkelposition des jeweiligen Poles und der Bestromungsgröße, die Momente berechnet und auf ein gemeinsames Koordinatensystem über entsprechende Winkelfunktionen bezogen werden. In dem mechanischen Anteil wird die von den Momenten erzwungene Bewegung bestimmt und schließlich die jeweils aktuelle Position in den Raumkoordinaten ausgegeben.

Der erste Schritt im aktorischen Teils ist die Bestimmung aller Teilbeiträge der einzelnen Statorpole zum Gesamtmoment. Dazu muß die Lage jeder Spule über dem Rotor ermittelt werden. Dies geschieht, indem zunächst der Ortsvektor der Spule im Rotorkoordinatensystem berechnet wird. Der normierte Ortsvektor \vec{O}_{Spule}^S der Spule wird vom Statorsystem ins Rotorsystem mit der Transformationsmatrix $T_{S \rightarrow R}$ transformiert.

$$\vec{O}_{\text{Spule}}^R = T_{S \rightarrow R} \cdot \vec{O}_{\text{Spule}}^S = T_{S \rightarrow R} \cdot \begin{pmatrix} x_{\text{Spule}}^S \\ y_{\text{Spule}}^S \\ z_{\text{Spule}}^S \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_{\text{Spule}}^R \\ y_{\text{Spule}}^R \\ z_{\text{Spule}}^R \end{pmatrix} \quad (4.20)$$

Aus Darstellungsgründen wurde bei der Transformationsmatrix $T_{S \rightarrow R}$ (4.21) die Abkürzung S für sin und C für cos verwendet.

$$T_{S \rightarrow R} = \begin{pmatrix} -S\varphi_{\text{Kipp}} \cdot S\psi + C\varphi_{\text{Kipp}} \cdot C\vartheta_{\text{Kipp}} \cdot C\psi & C\varphi_{\text{Kipp}} \cdot S\psi + S\varphi_{\text{Kipp}} \cdot C\vartheta_{\text{Kipp}} \cdot C\psi & -S\vartheta_{\text{Kipp}} \cdot C\psi \\ -S\varphi_{\text{Kipp}} \cdot C\psi - C\varphi_{\text{Kipp}} \cdot C\vartheta_{\text{Kipp}} \cdot S\psi & C\varphi_{\text{Kipp}} \cdot C\psi - S\varphi_{\text{Kipp}} \cdot C\vartheta_{\text{Kipp}} \cdot S\psi & S\vartheta_{\text{Kipp}} \cdot S\psi \\ C\varphi_{\text{Kipp}} \cdot S\vartheta_{\text{Kipp}} & S\varphi_{\text{Kipp}} \cdot S\vartheta_{\text{Kipp}} & C\vartheta_{\text{Kipp}} \end{pmatrix} \quad (4.21)$$

Aus den Rotorkoordinaten können nun der Längen- und Breitengrad bestimmt werden. Die von der Spule bei einem Strom von 1 A erzeugten Kräfte in Richtung zunehmenden Breitengrades (F_{ϑ}) und zunehmenden Längengrades (F_{φ}) können durch Interpolation aus Kennlinienfeldern gewonnen werden. Aus den interpolierten Kräften kann jetzt das normierte Drehmoment \vec{M}_0^R der Spule bestimmt werden.

$$\vec{M}_0^R = R_{\text{Rotorkugel}} \cdot \left[F_{0,\varphi} \cdot \begin{pmatrix} -\cos \varphi \cdot \cos \vartheta \\ -\sin \varphi \cdot \cos \vartheta \\ \sin \vartheta \end{pmatrix} + F_{0,\vartheta} \cdot \begin{pmatrix} \sin \varphi \\ -\cos \varphi \\ 0 \end{pmatrix} \right] \quad (4.22)$$

Wie oben erläutert, wird der Breitengrad mit ϑ , der Längengrad mit φ und der Radius der Rotorkugel mit $R_{\text{Rotorkugel}}$ bezeichnet. Das normierte Drehmoment wird nun mit der Stromgröße i der betreffenden Spule multipliziert und ergibt damit den Kraftbeitrag einer Spulenwicklung.

$$\vec{M}_{\text{Spule}}^R = i \cdot \vec{M}_0^R \quad (4.23)$$

Mit der Summe aller Einzelbeiträge ergibt sich das Gesamtdrehmoment, welches auf den Rotor bezogen ist.

$$\vec{M}_{\text{Rotor}}^R = \sum_{k=1}^{96} \vec{M}_{k,\text{Spule}}^R \quad (4.24)$$

Die Rastkräfte bzw. Rastmomente werden in einer separaten Funktion aus den gespeicherten Kennlinien ermittelt und als Zusatzmomente addiert. Zu diesen Zusatzmomenten wird auch die Gewichtskraft des Flansches und ggf. zusätzliche bekannte Gewichte hinzuaddiert. Der Abstand des Schwerpunkts des Flansches bzw. der Last vom Mittelpunkt der Rotorkugel wird mit r_{Last} bezeichnet.

$$\vec{M}_{\text{Gewicht}}^S = (r_{\text{Last}} \cdot \vec{z}_{\text{Rotor}}^S) \times (-m \cdot g \cdot \vec{e}_z^S) = m \cdot g \cdot r_{\text{Last}} \cdot \begin{pmatrix} -z_{\text{Rotor},y}^S \\ z_{\text{Rotor},x}^S \\ 0 \end{pmatrix} = K_{\text{Gewicht}} \cdot \begin{pmatrix} -z_{\text{Rotor},y}^S \\ z_{\text{Rotor},x}^S \\ 0 \end{pmatrix} \quad (4.25)$$

Dieses Zusatzmoment muss nun mit der Transformationsvorschrift auf das Rotorkoordinatensystem bezogen werden. Mit dem so ermittelten Gesamtdrehmoment erfolgt eine Berechnung der Beschleunigungskomponenten. Da es sich hier um einen Körper handelt, der sich um einen feststehenden Punkt dreht, können die Eulerschen Bewegungsgleichungen in den drei Koordinatenachsen aufgestellt werden.

$$M_x = J_x \cdot \alpha_x - (J_y - J_z) \cdot \omega_y \cdot \omega_z \quad (4.26)$$

$$M_y = J_y \cdot \alpha_y - (J_z - J_x) \cdot \omega_z \cdot \omega_x \quad (4.27)$$

$$M_z = J_z \cdot \alpha_z - (J_x - J_y) \cdot \omega_x \cdot \omega_y \quad (4.28)$$

Nach Umformung erhält man die Winkelbeschleunigungen, welche auf die Hauptachsen des bewegten Körpers (Rotor) bezogen sind:

$$\alpha_x = \frac{M_x + (J_y - J_z) \cdot \omega_y \cdot \omega_z}{J_x} \quad (4.29)$$

$$\alpha_y = \frac{M_y + (J_z - J_x) \cdot \omega_x \cdot \omega_z}{J_y} \quad (4.30)$$

$$\alpha_z = \frac{M_z + (J_x - J_y) \cdot \omega_x \cdot \omega_y}{J_z} \quad (4.31)$$

Die Winkelgeschwindigkeit erhält man durch die Integration über die Zeit, wobei bei den numerischen Berechnungen des Modells in diskreten Zeitschritten ΔT das Integral in eine Summe übergeht.

$$\vec{\omega} = \int \vec{\alpha} dt + \vec{\omega}_0 \Rightarrow \vec{\omega} = \sum \vec{\alpha} \cdot \Delta T + \vec{\omega}_0 \quad (4.32)$$

Für die Berechnung der Simulation wird ein rekursiver Algorithmus verwendet, bei dem der neue Geschwindigkeitsvektor zum Zeitpunkt $k+1$ aus der aktuellen Geschwindigkeit zum Zeitpunkt k und dem Geschwindigkeitszuwachs durch das Produkt von Beschleunigung und Zeitschritt ΔT berechnet wird.

$$\vec{\omega}(k+1) = \vec{\omega}(k) + \vec{\alpha}(k) \cdot \Delta T \quad (4.33)$$

Der ermittelte Geschwindigkeitsvektor wird anschließend mit der Transformationsmatrix $T_{R \rightarrow S}$ ins Statorkoordinatensystem transformiert. Auch hier wird zur Darstellung die Abkürzung S für sin und C für cos verwendet.

$$T_{R \rightarrow S} = \begin{pmatrix} -S\varphi_{Kipp} \cdot S\psi + C\varphi_{Kipp} \cdot C\vartheta_{Kipp} \cdot C\psi & -S\varphi_{Kipp} \cdot C\psi - C\varphi_{Kipp} \cdot C\vartheta_{Kipp} \cdot S\psi & C\varphi_{Kipp} \cdot S\vartheta_{Kipp} \\ C\varphi_{Kipp} \cdot S\psi + S\varphi_{Kipp} \cdot \vartheta_{Kipp} \cdot C\psi & C\varphi_{Kipp} \cdot C\psi - S\varphi_{Kipp} \cdot \vartheta_{Kipp} \cdot S\psi & S\varphi_{Kipp} \cdot S\vartheta_{Kipp} \\ -S\vartheta_{Kipp} \cdot C\psi & S\vartheta_{Kipp} \cdot S\psi & C\vartheta_{Kipp} \end{pmatrix} \quad (4.34)$$

Die Positionsdarstellung des Rotors geschieht im Statorsystem. Die neue Rotorposition wird bestimmt, indem die alte Position um einen Verdrehwinkel $\Delta \vec{\gamma}$ verändert wird. Da innerhalb eines Simulationsschrittes die Geschwindigkeit annähernd konstant bleibt, kann der

Verdrehwinkel über das Produkt aus Winkelgeschwindigkeit und Integrationszeitkonstante bestimmt werden.

$$\Delta\vec{\gamma} = \begin{pmatrix} \Delta\gamma_x \\ \Delta\gamma_y \\ \Delta\gamma_z \end{pmatrix} = \vec{\omega}^S \cdot \Delta T \quad (4.35)$$

Der Richtungsvektor \vec{a} ergibt sich aus der Richtung der Winkelgeschwindigkeit $\vec{\omega}^S$

$$\vec{a} = \begin{pmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \end{pmatrix} = \frac{\vec{\omega}^S}{\|\vec{\omega}^S\|} \quad (4.36)$$

Hieraus kann die Drehmatrix $\vec{D}(\Delta\vec{\gamma})$ berechnet werden,

$$\vec{D}(\Delta\vec{\gamma}) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} + (1 - \cos\Delta\gamma) \cdot \begin{pmatrix} a_x^2 - 1 & a_x \cdot a_y & a_x \cdot a_z \\ a_x \cdot a_y & a_y^2 - 1 & a_y \cdot a_z \\ a_x \cdot a_z & a_y \cdot a_z & a_z^2 - 1 \end{pmatrix} + \sin\Delta\gamma \cdot \begin{pmatrix} 0 & -a_z & a_y \\ a_z & 0 & -a_x \\ -a_y & a_x & 0 \end{pmatrix} \quad (4.37)$$

worüber die neue Rotorposition bestimmt wird.

$$\vec{x}_{\text{Rotor,neu}}^S = \vec{D}(\Delta\vec{\gamma}) \cdot \vec{x}_{\text{Rotor,alt}}^S \quad (4.38)$$

$$\vec{y}_{\text{Rotor,neu}}^S = \vec{D}(\Delta\vec{\gamma}) \cdot \vec{y}_{\text{Rotor,alt}}^S \quad (4.39)$$

$$\vec{z}_{\text{Rotor,neu}}^S = \vec{D}(\Delta\vec{\gamma}) \cdot \vec{z}_{\text{Rotor,alt}}^S \quad (4.40)$$

Bei kleinen Winkelgeschwindigkeiten $\vec{\omega}^S$ wird der Nenner in Gleichung (4.36) sehr klein, was zu numerischen Problemen bei der Bestimmung des Richtungsvektors \vec{a} führt. Auch bei größeren Winkelgeschwindigkeiten ist aufgrund der kleinen Integrationskonstante die Änderung $\Delta\vec{\gamma}$ relativ gering, so dass folgende Annäherung gemacht werden kann:

$$\sin\Delta\gamma \approx \Delta\gamma \quad (4.41)$$

$$1 - \cos\Delta\gamma = 1 - \sqrt{1 - (\sin\Delta\gamma)^2} \approx 1 - \sqrt{1 - \Delta\gamma^2} \approx 1 - \left(1 - \frac{\Delta\gamma^2}{2}\right) = \frac{\Delta\gamma^2}{2} \quad (4.42)$$

Dadurch ergibt sich für die Berechnung der Drehmatrix folgende Vereinfachung,

$$\begin{aligned} \bar{D}(\Delta\vec{\gamma}) &\approx \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} + \frac{\Delta\gamma^2}{2} \cdot \begin{pmatrix} a_x^2 - 1 & a_x \cdot a_y & a_x \cdot a_z \\ a_x \cdot a_y & a_y^2 - 1 & a_y \cdot a_z \\ a_x \cdot a_z & a_y \cdot a_z & a_z^2 - 1 \end{pmatrix} + \Delta\gamma \cdot \begin{pmatrix} 0 & -a_z & a_y \\ a_z & 0 & -a_x \\ -a_y & a_x & 0 \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} + \frac{1}{2} \cdot \begin{pmatrix} \Delta\gamma_x^2 - \Delta\gamma^2 & \Delta\gamma_x \cdot \Delta\gamma_y & \Delta\gamma_x \cdot \Delta\gamma_z \\ \Delta\gamma_x \cdot \Delta\gamma_y & \Delta\gamma_y^2 - \Delta\gamma^2 & \Delta\gamma_y \cdot \Delta\gamma_z \\ \Delta\gamma_x \cdot \Delta\gamma_z & \Delta\gamma_y \cdot \Delta\gamma_z & \Delta\gamma_z^2 - \Delta\gamma^2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 & -\Delta\gamma_z & \Delta\gamma_y \\ \Delta\gamma_z & 0 & -\Delta\gamma_x \\ -\Delta\gamma_y & \Delta\gamma_x & 0 \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (4.43)$$

bei der keine Division und keine trigonometrische Berechnungen durchgeführt werden muss, welche bei Signalprozessoren zeitintensiv sind.

Aus der neu bestimmten Position im Statorkoordinatensystem werden dann die Eulerwinkel bestimmt. Aus diesen erfolgt dann eine Transformation auf die Winkel, wie sie das Messsystem liefert und für die Simulation des Regelkreises benötigt wird. Weiterhin dienen die Winkel zur Bestimmung der neuen Transformationsmatrix $T_{S \rightarrow R}$ und $T_{R \rightarrow S}$.

4.4.3 Stellglieder des Kugelmotors

Die Aufgabe des Stellgliedes ist es, aus einem von der Regelung vorgegebenen Momentenvektor, die Sollströme aller Motorwicklungen so zu bestimmen, dass das gesuchte Moment möglichst gut erreicht wird. Jeder Statorpol erzeugt bei Bestromung eine lokale Kraft, die über den entsprechenden Hebelarm (Radius zum Kugelmittelpunkt) ein Moment bewirkt. Dieses Teilmoment muss in seine Komponenten zerlegt werden, d.h. es wird in drei unabhängige Vektoren aufgespalten.

Nachfolgend werden das **Vektorsortierverfahren** und das **Vektorannäherungsverfahren** für den Kugelmotor vorgestellt. Die Grundidee basiert auf den Untersuchungen vom Flächenmotor, wobei nun allerdings die Problematik der räumlichen Kraftwirkung in drei Freiheitsgraden berücksichtigt werden muss. Das beim Flächenmotor bereits erwähnte **Vektorsuchverfahren** hat auch beim Kugelmotor den Nachteil, dass ein Entscheidungskriterium festgelegt werden muss, wie stark die Richtung und wie stark der Betrag gewichtet wird. Untersuchungen mit festen Entscheidungskriterien haben ein nicht zufrieden stellendes Regelungsverhalten gezeigt. Daher wird dieses Verfahren nicht weiter betrachtet.

4.4.3.1 Stellglied nach dem Vektorsortierverfahren

Beim Vektorsortierverfahren werden die Momentenbeiträge jeder einzelnen Spulenwicklung bestimmt und dann in bestimmte Bereiche (im folgenden Sektoren genannt) eingeteilt. Die Sektoren beinhalten Momentenvektoren, die ungefähr in die gleiche Richtung zeigen, d.h. einen ungefähr gleichen Raumwinkel besitzen. Alle normierten Momentenbeiträge der Spulen eines Sektors ergeben in der Summe ein sogenanntes normiertes Sektorenmoment. Ist ein stärkeres Sektorenmoment gefordert, so muss durch alle Spulen des Sektors ein entsprechend höherer Strom (I_{Sektor}) fließen. Die Anzahl der Sektoren ist prinzipiell nicht festgelegt. Um

einen Momentenvektor im dreidimensionalen Raum eindeutig zu beschreiben sind mindestens drei Sektormomente notwendig (vgl. Bild 4.20 links). Wählt man die Anzahl der Sektoren zu groß, so kann es Sektoren geben, in die kein Drehmomentenvektor einsortiert wird. Mit der Anzahl der Sektoren steigt allerdings der Berechnungsaufwand. Aus diesem Grund soll der Algorithmus mit 8 Sektoren vorgestellt werden. Nach dem Einsortieren aller Spulenbeiträge in die Sektoren müssen die Sektorenströme so bestimmt werden, dass durch Linearkombination der gewünschte Sollmomentenvektor möglichst gut erreicht wird. Die einzelnen Schritte des Algorithmus werden wie folgt durchgeführt.

- Bestimmung der normierten Momentenvektoren

Im ersten Schritt wird für jede Spule der normierte (auf $I_0=1$ A bezogene) Momentenvektor ermittelt. Die Berechnungsvorschrift ist identisch mit der Gleichung (4.22) des Motormodells, wo auch die normierten Drehmomente benötigt werden.

$$\vec{M}_0^R = R \cdot \left[F_{0,\varphi} \cdot \begin{pmatrix} -\cos \varphi \cdot \cos \vartheta \\ -\sin \varphi \cdot \cos \vartheta \\ \sin \vartheta \end{pmatrix} + F_{0,\vartheta} \cdot \begin{pmatrix} \sin \varphi \\ -\cos \varphi \\ 0 \end{pmatrix} \right] \quad (4.44)$$

Da das Sollmoment auch im Rotorkoordinatensystem gegeben ist, muss keine Transformation durchgeführt werden.

- Einsortieren in der Momentenvektoren in die Sektoren

Im sogenannten Drehmomentenraum wird ein kartesisches Koordinatensystem aufgespannt, wobei die a -Achse in Richtung des Sollmomentes zeigt, und die b - und c -Achse senkrecht dazu stehen. Die Sektoren orientieren sich an diesen Koordinatenachsen. Bild 4.20 zeigt zwei Beispiele für die Sektoreneinteilung, wobei die rechte Darstellung mit 8 Sektoren für die späteren Algorithmen gewählt wurde

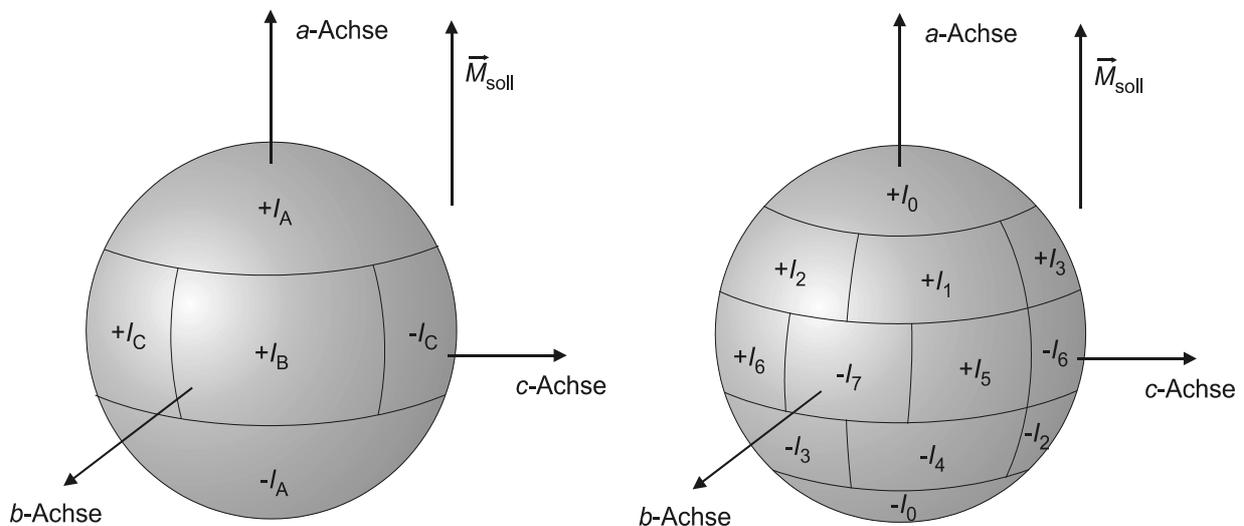


Bild 4.20 Beispiele für Drehmomentenräume mit drei und acht unabhängigen Sektoren

Jeder Sektor hat einen gegenüberstehenden Sektor, welcher mit negativem Vorzeichen gekennzeichnet ist. Der Grund dafür liegt darin, dass ein Momentenvektor, welcher in dem "negativem" Sektor liegt, durch Bestromung mit umgekehrtem Vorzeichen ($-I_{\text{Sektor}}$), in den "positiven" Sektor überführt werden kann. Die Sektoren sind durch bestimmte Raumwinkel festgelegt, deren Grenzen vergleichbar mit einem Globus auf bestimmten Längen- und Breitengraden liegen.

Zur Sortierung der einzelnen Momentenbeiträge, werden diese mit den Vektoren \vec{a}^R , \vec{b}^R und \vec{c}^R multipliziert, welche die Koordinatenachsen des a, b, c -Systems bezogen auf das Rotorkoordinatensystem darstellen.

$$M_{0,a} = M_{0,x}^R \cdot a_{0,x}^R + M_{0,y}^R \cdot a_{0,y}^R + M_{0,z}^R \cdot a_{0,z}^R \quad (4.45)$$

$$M_{0,b} = M_{0,x}^R \cdot b_{0,x}^R + M_{0,y}^R \cdot b_{0,y}^R + M_{0,z}^R \cdot b_{0,z}^R \quad (4.46)$$

$$M_{0,c} = M_{0,x}^R \cdot c_{0,x}^R + M_{0,y}^R \cdot c_{0,y}^R + M_{0,z}^R \cdot c_{0,z}^R \quad (4.47)$$

Die Statorpole, die genau in der Mitte über einem Magneten oder über dem Eckpunkt von vier Magneten stehen, können fast kein Drehmoment erzeugen, sondern haben nur eine anziehende bzw. abstoßende Kraft in radialer Richtung. Diese Vektoren sind zum Antrieb nicht nutzbar und werden aussortiert. Dazu wird von jedem normierten Drehmomentenvektor der Betrag gebildet

$$\|\vec{M}_0\| = \sqrt{M_{0,a}^2 + M_{0,b}^2 + M_{0,c}^2} \quad (4.48)$$

und sobald dieser kleiner als ein Mindestwert $M_{0,\min}$ ist, die entsprechende Spule nicht mehr berücksichtigt. Der normierte Gesamtvektor eines Sektors (auch mit Sektormoment bezeichnet) ergibt sich aus der Summe aller normierten einzelnen Momente:

$$\vec{M}_{0, \text{Sektor}} = \sum_{\substack{\text{Spulen} \\ \text{im Sektor}}} \vec{M}_{0, \text{Spulen}} \quad (4.49)$$

Die positiven und negativen Sektorenbereiche werden zusammengefasst, indem die normierten Ströme des negativen Sektors ein negatives Vorzeichen bekommen, d.h. $I_{0,\text{Spule}} = -1$ A wird. Die Ströme des positiven Sektors besitzen ein positives Vorzeichen, d.h. $I_{0,\text{Spule}} = +1$ A. Es findet somit eine Initialisierung der Spulenströme statt. Somit ergeben sich 8 unabhängige Sektoren, die jeweils ein bestimmtes Moment erzeugen können.

- Berechnung der Sektorenströme

Ein beliebiger Drehmomentenvektor kann eindeutig durch drei unabhängige Sektormomente dargestellt werden. In dem a, b, c -Koordinatensystem liegt der gesuchte

Momentenvektor genau in der a -Achse. Das Gleichungssystem für eine Linearkombination aus drei Sektormomenten lautet

$$k_\alpha \cdot \vec{M}_{0,\text{Sektor } \alpha} + k_\beta \cdot \vec{M}_{0,\text{Sektor } \beta} + k_\gamma \cdot \vec{M}_{0,\text{Sektor } \gamma} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (4.50)$$

woraus die Koeffizienten k_α , k_β und k_γ bestimmt werden mit:

$$k_\alpha = \frac{M_{0,\text{Sektor } \beta,b} \cdot M_{0,\text{Sektor } \gamma,c} - M_{0,\text{Sektor } \beta,c} \cdot M_{0,\text{Sektor } \gamma,b}}{\det(\vec{M}_{0,\text{Sektor } \alpha} \quad \vec{M}_{0,\text{Sektor } \beta} \quad \vec{M}_{0,\text{Sektor } \gamma})} \quad (4.51)$$

$$k_\beta = \frac{M_{0,\text{Sektor } \gamma,b} \cdot M_{0,\text{Sektor } \alpha,c} - M_{0,\text{Sektor } \gamma,c} \cdot M_{0,\text{Sektor } \alpha,b}}{\det(\vec{M}_{0,\text{Sektor } \alpha} \quad \vec{M}_{0,\text{Sektor } \beta} \quad \vec{M}_{0,\text{Sektor } \gamma})} \quad (4.52)$$

$$k_\gamma = \frac{M_{0,\text{Sektor } \alpha,b} \cdot M_{0,\text{Sektor } \beta,c} - M_{0,\text{Sektor } \alpha,c} \cdot M_{0,\text{Sektor } \beta,b}}{\det(\vec{M}_{0,\text{Sektor } \alpha} \quad \vec{M}_{0,\text{Sektor } \beta} \quad \vec{M}_{0,\text{Sektor } \gamma})} \quad (4.53)$$

Die Indizes α , β und γ stehen dabei für unterschiedliche Sektoren. Mit 8 Sektoren gibt es insgesamt $n = (8 \cdot 7 \cdot 6) / (3 \cdot 2 \cdot 1) = 56$ verschiedene Kombinationsmöglichkeiten, die jeweils alle berechnet werden. Weiterhin werden alle Sektorenströme und das Gesamtmoment M_a , welches in die Richtung der a -Achse zeigt (vgl. Bild 4.20), zu Null initialisiert. Bei der folgenden Bestimmung der einzelnen Sektorenströme muss darauf geachtet werden, dass ein maximal zulässiger Strom I_{Grenz} nicht überschritten wird.

Es wird eine Schleife mehrmals durchlaufen, bei der aus den Linearkombinationen von drei Sektoren diejenige ausgewählt wird, die den größten Kraftbeitrag ΔM_{best} in Richtung des Solldrehmomentes (a -Achse) liefert. Dieser Beitrag wird jeweils zu dem erreichbaren Gesamtmoment hinzu addiert.

$$M_a := M_a + \Delta M_{\text{best}} \quad (4.54)$$

Erreicht ein Sektorstrom den erlaubten maximalen Wert, so wird dieser Sektor nicht mehr weiter berücksichtigt. Ist das somit ermittelte Gesamtmoment M_a größer als das Sollmoment, so müssen die Sektorenströme mit dem entsprechenden Faktor reduziert werden.

$$f = \frac{\|\vec{M}_{\text{soll}}\|}{M_a} \quad (4.55)$$

$$I_{\text{Sektor } k} := f \cdot I_{\text{Sektor } k} \quad \text{mit } k = 0, 1, \dots, 7 \quad (4.56)$$

- Berechnung der Spulenströme

Da alle Spulen eines Sektors einen gleich großen Strom haben, müssen die zu Beginn initialisierten Spulen mit dem ermittelten Sektorenstrom multipliziert werden. Damit ergibt sich mit einem positiven oder negativen Vorzeichen die tatsächliche Stromrichtung.

$$I_{\text{Spule}} = +I_{\text{Sektor}} \quad \text{oder} \quad I_{\text{Spule}} = -I_{\text{Sektor}} \quad (4.57)$$

4.4.3.2 Stellglied nach dem Vektorannäherungsverfahren

Das am Flächenmotor getestete Verfahren wird auf die dreidimensionale Problemstellung des Kugelmotors erweitert. Dabei wird nacheinander jeder Strom bestimmt, der durch die einzelnen Statorspulen fließen muss. Der Strom und damit der Drehmomentenbeitrag wird jeweils so groß gewählt, dass der Verbindungsvektor (der dann neue Sollvektor) zum Endpunkt des Zielvektors einen rechten Winkel mit dem Teilvektor besitzt. Bild 4.21 stellt dabei die Erweiterung von Bild 4.12 auf den dreidimensionalen Raum dar.

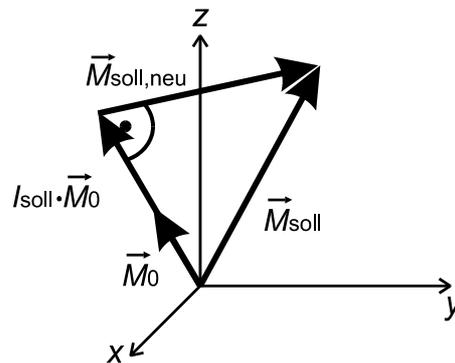


Bild 4.21 Bestimmung des minimalen Abstandes vom Zielvektor im Raum

Der Sollstrom einer Spule kann über die Komponenten des normierten Teilvektors \vec{M}_0 und des Sollvektors \vec{M}_{soll} berechnet werden, wobei eine maximale Obergrenze für den Strom beachtet werden muss.

$$\frac{I_{\text{soll}}}{I_0} = \frac{(M_{x,0} \cdot M_{\text{soll},x}) + (M_{y,0} \cdot M_{\text{soll},y}) + (M_{z,0} \cdot M_{\text{soll},z})}{(M_{x,0})^2 + (M_{y,0})^2 + (M_{z,0})^2} \quad (4.58)$$

Der Sollmomentvektor ist zu Beginn gleich dem Zielvektor, d.h. dem angestrebten Moment. Mit jedem neu hinzukommenden Teilbetrag, durch Bestromung einer weiteren Spulenwicklung, verringert sich der verbleibende Sollvektor. In der praktischen Umsetzung wird eine Abbruchbedingung festgelegt, sobald der verbleibende Momentensollvektor $\vec{M}_{\text{soll,neu}}$ kleiner als ein bestimmter Grenzwert wird.

Da das Verfahren immer bei einer bestimmten Spule begonnen wird und eine vorgegebene Reihenfolge abgearbeitet wird, werden bei kleineren Soll Drehmomenten die Spulen, die in der Liste weit vorne stehen, jeweils sehr stark bestromt und die verbleibenden Spulen fast gar nicht. Da die Verluste in den Spulenwicklungen quadratisch mit dem Strom eingehen, kommt es hier zur erhöhten Wärmeentwicklung in den bestromten Spulen. Zu diesem Zweck wird der maximale Strom in der Spule abhängig vom geforderten Zielmoment festgelegt, d.h. bei einem kleinen Sollmoment werden die Spulen nur mit einem kleinen maximalen Strom beaufschlagt. Dies hat zur Folge, dass möglichst viele Spulen gleichmäßig bestromt werden. Nachteilig bei dieser Methode ist, dass es keine optimale Ausnutzung gibt, da eine bestimmte Reserve vorgehalten werden muss, da nicht exakt vorhergesagt werden kann, ob die maximale Stromstärke ausreicht, um das gewünschte Moment zu erreichen.

4.4.4 Positionsregelung des Kugelmotors

Beim Flächenmotor wurde eine Positionsregelung bzw. eine Bahnkurvensteuerung im zweidimensionalen Raum vorgestellt. Beim Kugelmotor liegen keine translatorischen, sondern nur rotatorischen Bewegungen vor. Die Besonderheit dabei ist, dass neben Drehungen um eine feste Rotationsachse auch komplexe Bewegungen möglich sind, bei denen sich die Rotationsachse kontinuierlich ändert. Weiterhin ist bei dem hier betrachteten System als rückgekoppelte Regelgröße nur die von den Winkelsensoren gemessene Position gegeben. Winkelgeschwindigkeits- oder Beschleunigungssensoren sind nicht vorhanden. Die entsprechenden Größen müssen rechnerisch aus den Positionsänderungen ermittelt werden. Außerdem sind keine Kraftsensoren vorhanden, wie sie bei haptischen Manipulatoren und Handhabungsroboter eingesetzt werden [54].

Nach den erfolgreichen Untersuchungen am Flächenmotor wurde für den Kugelmotor ebenfalls eine kaskadierte Regelung aufgebaut, wie sie in Bild 4.13 dargestellt ist. In der äußeren übergeordneten Schleife wird die Position und in einer unterlagerten Schleife die Winkelgeschwindigkeit geregelt. Die gewünschte Winkelbeschleunigung erfordert ein bestimmtes Drehmoment, welches generiert werden muss. Das innere Stellglied, welches aus dem vorgegebenen Moment die entsprechenden Ströme berechnet, wurde im vorherigen Kapitel vorgestellt.

Nachfolgend wird ein allgemeiner Ansatz für die Positionsregelung und die unterlagerte Winkelgeschwindigkeitsregelung gegeben. Ähnlich wie beim Flächenmotor werden die Regler nur in einem kleinen Bereich verwendet. Wird eine größere Bewegung angestrebt, so ist ein übergeordnete Bahnsteuerung sinnvoll. Der Positionsänderung lässt sich durch zwei Teilbewegungen beschreiben. Zum einen liegt eine Änderung der Verkippwinkel vor, die die Ausrichtung der Rotorflanschachse angeben und zum anderen liegt ein Verdrehung um die eigene Hochachse vor. Aus diesen zwei Komponenten wird die Regelabweichung bestimmt und über einen Regler ein Stellvektor für die innere Geschwindigkeitsregelung ermittelt. Dabei gibt $\Delta\vec{\gamma}$ den (Dreh-)Vektor an, um den das Ist-Koordinatensystem gedreht werden muß, um es in das Soll-Koordinatensystem zu überführen.

Im Rotorkoordinatensystem hat die Rotorhochachse den Ortsvektor $(0 \ 0 \ 1)^T$. Daraus ergibt sich der Ortsvektor im Statorkoordinatensystem, womit der Soll- und der Istvektor berechnet werden können:

$$\vec{z}_{Rotor} = T_{R \rightarrow S} \cdot \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \varphi_{Kipp} \cdot \sin \vartheta_{Kipp} \\ \sin \varphi_{Kipp} \cdot \sin \vartheta_{Kipp} \\ \cos \vartheta_{Kipp} \end{pmatrix} \quad (4.59)$$

Die Transformationsmatrix $T_{R \rightarrow S}$ ist in Gleichung (4.34) angegeben. Die Regelabweichung e muß nicht nur den Betrag der Abweichung, sondern auch die Richtung der Verkippung zwischen der Soll- und der Istposition des Rotors angeben. Dabei handelt es sich um einen Vektor, der in die Richtung des Kreuzproduktes der Vektoren $\vec{z}_{Rotor,Ist}$ und $\vec{z}_{Rotor,Soll}$ zeigt. Der Betrag des Vektors entspricht dem Winkel zwischen den beiden Vektoren.

$$\|\vec{e}_{Pos,Kipp}^S\| = \arg(\vec{z}_{Rotor,Ist}, \vec{z}_{Rotor,Soll}) \quad (4.60)$$

Somit ergibt sich der folgende Ausdruck für die Regelabweichung des Positionsreglers:

$$\vec{e}_{Pos,Kipp}^S = \arg(\vec{z}_{Rotor,Ist}, \vec{z}_{Rotor,Soll}) \cdot \frac{\vec{z}_{Rotor,Ist} \times \vec{z}_{Rotor,Soll}}{\|\vec{z}_{Rotor,Ist} \times \vec{z}_{Rotor,Soll}\|} \quad (4.61)$$

Bei kleinen Regelabweichungen geht der Ausdruck im Nenner gegen Null. Um eine Division durch Null zu vermeiden, wird eine Näherung eingeführt. Der Betrag des Kreuzproduktes ist gleich dem Sinus des Winkels zwischen den beiden Vektoren. Hiermit ergibt sich für die Regelabweichung:

$$\vec{e}_{Pos,Kipp}^S = \frac{\arg(\vec{z}_{Rotor,Ist}, \vec{z}_{Rotor,Soll})}{\sin[\arg(\vec{z}_{Rotor,Ist}, \vec{z}_{Rotor,Soll})]} \cdot (\vec{z}_{Rotor,Ist} \times \vec{z}_{Rotor,Soll}) \quad (4.62)$$

Für kleine Regelabweichungen (d.h. für kleine Winkel zwischen $\vec{z}_{Rotor,Ist}$ und $\vec{z}_{Rotor,Soll}$) gilt:

$$\frac{\arg(\vec{z}_{Rotor,Ist}, \vec{z}_{Rotor,Soll})}{\sin[\arg(\vec{z}_{Rotor,Ist}, \vec{z}_{Rotor,Soll})]} \approx 1 \quad (4.63)$$

Somit folgt für die Regelabweichung des Positionsreglers:

$$\vec{e}_{Pos,Kipp}^S \approx \vec{z}_{Rotor,Ist} \times \vec{z}_{Rotor,Soll} \quad (4.64)$$

Diese Regelabweichung entspricht dem Verkippwinkel, um den der Rotor gekippt werden muss:

$$\Delta \vec{\gamma}_{Kipp} = \vec{z}_{Rotor,Ist} \times \vec{z}_{Rotor,Soll} \quad (4.65)$$

Bei einer Verkippung der Rotorachse kann gleichzeitig eine Änderung des Winkels φ eintreten, was einer Drehung um die Rotorachse entspricht. Die Orientierung des verkippten Rotorkoordinatensystem ist mit der z-Achse alleine noch nicht eindeutig festgelegt. Zur eindeutigen Festlegung wird die Lage der verkippten x-Achse bestimmt. Die Drehmatrix D entspricht dabei der in Gleichung (4.43) beschriebenen Form.

$$\vec{x}_{Rotor,Ist,Verkippt} = \vec{D}(\Delta \vec{\gamma}_{Kipp}) \cdot \vec{x}_{Rotor,Ist} \quad (4.66)$$

Aus der verkippten Position der x-Achse und der Sollposition kann nun der Anteil berechnet werden, um den das Koordinatensystem noch gedreht werden muss.

$$\Delta \vec{\gamma}_{Dreh} = \vec{x}_{Rotor,Ist,Verkippt} \times \vec{x}_{Rotor,Soll} \quad (4.67)$$

Der Gesamtdrehvektor $\Delta \vec{\gamma}$ ergibt sich nun aus den Anteilen der Verkippung und der Verdrehung:

$$\Delta \vec{\gamma} = \Delta \vec{\gamma}_{Kipp} + \Delta \vec{\gamma}_{Dreh} \quad (4.68)$$

Diese Größe dient nun als Eingangsgröße für den Positionsregler, der wie beim Flächenmotor als parameteroptimierter PID-Regler aufgebaut ist. Der Ausgang des Positionsreglers ergibt die Soll-Winkelgeschwindigkeit $\vec{\omega}_{Soll}^S$.

Die momentane Ist-Winkelgeschwindigkeit $\vec{\omega}_{Ist}^S$ muss aus den Positionsdaten ermittelt werden. Wie beim Flächenmotor erläutert wurde, muss auch hier bei der Implementation auf der digitalen Regelungshardware beachtet werden, dass die Differentiation im zeitkontinuierlichen in eine Differenzenbildung im zeitdiskreten übergeht. Die momentane Geschwindigkeit wird über den Drehvektor $\Delta \vec{\gamma}_{\omega}$ bestimmt. Der Drehvektor $\Delta \vec{\gamma}_{\omega}$ wird nach den Gleichungen (4.65) bis (4.73) berechnet, wobei als Positionsvektoren nicht die Soll- und Istwerte dienen, sondern der aktuelle und der davor gemessene Wert.

$$\Delta \vec{\gamma}_{\omega Kipp} = \vec{z}_{Rotor,Ist,alt} \times \vec{z}_{Rotor,Ist} \quad (4.69)$$

$$\Delta \vec{\gamma}_{\omega Dreh} = \vec{x}_{Rotor,Ist,alt,Verkippt} \times \vec{x}_{Rotor,Ist} \quad (4.70)$$

$$\Delta \vec{\gamma}_{\omega} = \Delta \vec{\gamma}_{\omega Kipp} + \Delta \vec{\gamma}_{\omega Dreh} \quad (4.71)$$

Die aktuelle Winkelgeschwindigkeit kann aus dem Verdrehvektor bestimmt werden.

$$\vec{\omega}_{Ist}^S = \frac{\Delta \vec{\gamma}}{T_{Regelung}} \quad (4.72)$$

Die beim Flächenmotor erläuterte Problematik der Geschwindigkeitsbestimmung bei einer begrenzten Auflösung ist bei dem später beschriebenen Versuchsstand nicht gegeben, da dort sehr präzise Messgeber vorhanden sind. Die Eingangsgröße für den Winkelgeschwindigkeitsregler ergibt sich aus der Differenz von Soll- und Ist-Winkelgeschwindigkeit.

$$\vec{e}_\omega^S = \vec{\omega}_{Soll}^S - \vec{\omega}_{Ist}^S \quad (4.73)$$

Auch hier wird über einen parameteroptimierten Regler die Soll-Winkelbeschleunigung $\vec{\alpha}_{Soll}^S$ berechnet. Für die Berechnung der daraus geforderten Sollmomente müssen die Winkelbeschleunigung und die Winkelgeschwindigkeit in das Rotorkoordinatensystem mit Hilfe der Transformationsmatrix nach Gleichung (4.21) umgeformt werden.

$$\vec{\alpha}_{Soll}^R = T_{S \rightarrow R} \cdot \vec{\alpha}_{Soll}^S \quad (4.74)$$

$$\vec{\omega}_{Ist}^R = T_{S \rightarrow R} \cdot \vec{\omega}_{Ist}^S \quad (4.75)$$

Aus der allgemeinen Bewegungsgleichung

$$\sum M = \dot{L} \quad \text{mit} \quad L = J \cdot \omega \quad (4.76)$$

ergibt sich

$$\sum M = J \cdot \dot{\omega} + \omega \times (J \cdot \omega) \quad \text{mit} \quad \alpha = \dot{\omega} \quad (4.77)$$

womit die drei Komponenten des Sollmomentenvektors bestimmt werden können.

$$M_{Soll,x}^R = J_x \cdot \alpha_{Soll,x}^R - (J_y - J_z) \cdot \omega_{Ist,y}^R \cdot \omega_{Ist,z}^R \quad (4.78)$$

$$M_{Soll,y}^R = J_y \cdot \alpha_{Soll,y}^R - (J_z - J_x) \cdot \omega_{Ist,x}^R \cdot \omega_{Ist,z}^R \quad (4.79)$$

$$M_{Soll,z}^R = J_z \cdot \alpha_{Soll,z}^R - (J_x - J_y) \cdot \omega_{Ist,x}^R \cdot \omega_{Ist,y}^R \quad (4.80)$$

Die Sollmomente dienen als Eingang für das Stellglied, welches in den vorherigen Kapiteln beschrieben wurde und die entsprechenden Ströme zur Ansteuerung berechnet. Sind neben der rückgekoppelten Positionsgröße weitere Momente bekannt, so können diese im Regelkreis mit berücksichtigt werden und damit das dynamische Verhalten verbessern.

$$\vec{M}_{Strom}(i_{1..96}) = \vec{J} \cdot \dot{\omega} + \vec{M}_{Reib}(\omega) + \vec{M}_{Gyro} + \vec{M}_{Gewicht} \quad (4.81)$$

Aus der Gleichung (4.81) wird das Gleichgewicht der Momente deutlich. Durch die Ströme in den Statorwicklungen wird ein Moment M_{Strom} generiert, welches eine Winkelbeschleunigung $\dot{\omega}$ der Massenträgheit J bewirkt. Weitere Momente versuchen eine Beschleunigung zu verhindern. Das Reibmoment resultiert aus der hydrostatischen Lagerung und kann bei kleinen Winkelgeschwindigkeiten als sehr gering angenommen werden. Das Gyromoment entsteht dadurch, dass ein Drehimpuls, z.B. durch einen Stoß, auf einen rotierenden Körper ausgeübt wird, woraufhin die Drehimpulsachse sich leicht um die Rotationsachse verschiebt (vgl. Stoß auf einen drehenden Kreisel, der zu einer Nutationsbewegung führt). Das Moment M_{Gewicht} berücksichtigt, dass der Schwerpunkt der Anordnung außerhalb des Mittelpunktes der Kugel liegt. Die Rotorkugel ist zwar symmetrisch aufgebaut, aber der angebrachte Flansch zum Kraftabtrieb hat auch ein bestimmtes Eigengewicht, welches den Schwerpunkt der Kugel verschiebt. Auch zusätzliche Lasten bewirken, dass durch die Gravitation ein Moment über den Flanscharm entsteht, welches versucht den Rotor aus seiner (Ruhe-)Lage zu bringen. Alle zusätzlichen Momente werden zu einem Moment M_{Extern} zusammengefasst, womit deutlich wird, dass diese zusätzlich vom Antrieb aufgebracht werden müssen.

$$\vec{M}_{\text{Strom}}(i_{1..96}) = \vec{J} \cdot \dot{\omega} + \vec{M}_{\text{Extern}} \quad (4.82)$$

4.4.5 Bewegung entlang von Bahnkurven

Wie beim Flächenmotor wird auch beim Kugelmotor eine Bewegung zwischen Start- und Zielposition angestrebt. Beim praktischen Einsatz muss der Anwender allerdings entscheiden, ob die gleichzeitige Änderung in allen Freiheitsgraden sinnvoll ist. Weiterhin werden, in der hier vorliegenden Betrachtung, die Eulerschen Winkel verwendet, die meist nicht mit dem Koordinatensystem des Endsystems (Winkel des Messsystems) übereinstimmen. Daher muss die Auslegung der Bahnkurvensteuerung sich an den Endanwendung orientieren. Als Schnittstelle muss dann eine entsprechende Koordinatentransformation erfolgen.

Für den hier vorliegenden Kugelmotor wurde eine Bahnkurvensteuerung wie beim Flächenmotor in Kapitel 4.3.4 nur für einen Freiheitsgrad (Drehung um die Rotorflanschachse) implementiert. Die Bahnkurvensteuerung in den anderen Freiheitsgraden wurde auch erfolgreich getestet. Die Interpretation der Kurvenverläufe ist allerdings schwierig, da die Darstellung in den Eulerschen Winkeln nicht sehr anschaulich ist.

4.5 Zusammenfassung

Es wurde ein Überblick über die Regelungsstruktur von mehrdimensionalen Direktantrieben mit variabler Polteilung gegeben. Als Beispiel von permanenterregten Antrieben wurde der Systemaufbau anhand eines Flächenmotors und eines Kugelmotors beschrieben. Zur Auslegung des Regelkreises dient ein Motormodell, welches die elektromagnetische Krafterzeugung und das kinematische Verhalten beschreibt.

Der Regelkreis wurde als mehrstufige Kaskade aufgebaut. Verschiedene Stellglieder wurden untersucht, die nach Vorgabe einer Sollkraft bzw. eines Sollmomentes die entsprechenden Bestromungsmuster für die Statorspulen berechnen. Aufgrund der großen Polanzahl gibt es keine eindeutige Lösung, da das System überbestimmt ist. Die verschiedenen Verfahren der Kraft/Momentensteuerung setzen einen Zielvektor aus mehreren Teilvektoren zusammen, so dass eine geeignete Lösung gefunden wird.

Der inneren Kraft-/Momentensteuerung ist eine Positions- und Geschwindigkeitsregelung überlagert, die nach dem Prinzip von klassischen PID-Regelstrukturen arbeitet. Beim Antriebsprüfstand sind Sensoren nur für die Bestimmung der aktuellen Position vorhanden. Daher wird im Regelkonzept diese Größe als einzige auf den Regler zurück geführt. Zusätzliche Informationen über Geschwindigkeit und Beschleunigung müssen aus diesen gemessenen Daten rechnerisch ermittelt werden. Dem bestehenden Regelkreis kann noch eine Bahnkurvensteuerung aufgesetzt werden, welche das Verhalten des Antriebs während einer Bewegung zwischen zwei Punkten steuert.

5 Antriebskomponenten der mehrdimensionalen Direktantriebe

Beim elektrischen Antrieb spielen neben dem Motor vor allem der Umrichter und die Regelungshardware als Antriebskomponenten eine wesentliche Rolle. Durch deren Auslegung und Betriebsverhalten wird die Leistungsfähigkeit des Gesamtsystems bestimmt. Der Flächenmotor und der Kugelmotor besitzen eine große Anzahl an Statorpolwicklungen. Diese müssen aufgrund der variablen Polteilung individuell angesteuert werden. Die Aufgabe der Regelungshardware ist es, die im vorangegangenen Kapitel beschriebenen Algorithmen zu berechnen und die Steuersignale an den Stromrichter zu senden.

Die Anforderungen an die Regelungshardware und der realisierte Aufbau wird im folgenden Kapitel beschrieben. Für die komplexen Algorithmen ist eine hohe Rechenleistung mit entsprechend großem Speicher notwendig. Wichtig ist, dass nicht nur auf die Leistungsfähigkeit eines Prozessors oder einer Regelungskarte sondern auch die Verteilung der Prozesse auf mehrere Ressourcen geachtet wird. Ein weiterer wichtiger Aspekt ist der externe Datenaustausch. Zur Regelung des Motors müssen die 96 Spulen gleichzeitig angesteuert und dementsprechend die Sollsignale ausgegeben werden.

Die Aufgabe des Stromrichters ist es, die berechneten Stromgrößen an den Statorpolwicklungen des Motors einzustellen. Im weiteren Verlauf werden die Systemanforderungen und daraus resultierend die Auswahl einer Stromrichtertopologie mit dazugehörigem Ansteuerverfahren vorgestellt. Neben theoretischen Betrachtungen werden experimentelle Untersuchungen zur Demonstration des Betriebsverhaltens beim Einsatz aller Kanäle durchgeführt.

5.1 Die Regelungshardware

Die Grundaufgabe der Regelungshardware ist es, vom Motor messbare Systemzustände, wie z.B. die aktuellen Positionsdaten, zu erfassen, Berechnungsalgorithmen durchzuführen und Stellsignale für den Stromrichter zu generieren. Der Begriff Regelungshardware wird hier für die komplette Signalverarbeitung verwendet. Neben den Prozessoren, die eine Berechnung der Algorithmen durchführen, gehören dazu auch die analogen und digitalen Schnittstellen, die einen Austausch von Daten ermöglichen. Für den Kugelmotor und in reduzierter Form auch für den Flächenmotor lassen sich die folgenden Forderungen an die Regelungshardware stellen:

- **Rechenleistung:** Es muss eine Recheneinheit vorhanden sein, die komplexe Regelungsalgorithmen in kurzer Zeit berechnet. Für steigende Anforderungen muss genügend Reserve vorgehalten werden, d.h. das System sollte erweiterbar sein. Für den

oben beschriebenen Entwicklungsschritt der Simulation muss entsprechende Rechenleistung für das Motormodell reserviert werden.

- **Echtzeitfähigkeit:** Neben einer kurzen Berechnungszeit müssen verschiedene Abläufe zueinander synchronisiert werden. Der spätere gesamte Regelungszyklus muss dabei innerhalb eines festgelegten Regeltaktes beendet sein.
- **Speichergröße:** Für die Algorithmen und die große Anzahl an Kraftkennlinien des Motormodells muß ein großer und ausreichend schneller Speicher zur Verfügung stehen. Außerdem muss beachtet werden, dass globale Daten von mehreren Prozessoren benötigt werden. Demnach sind Zugriffsmechanismen notwendig, die einen effizienten Datenaustausch gewährleisten.
- **Kanalanzahl für Ein-/Ausgabe:** Da alle Stromrichterkanäle einzeln angesteuert werden, müssen sehr viele Ausgangskanäle zur Verfügung stehen. Es müssen sowohl analoge Werte als Sollgröße für die Stromregler als auch digitale Werte als Freigabe und Statussignale übergeben werden.
- **Benutzerschnittstelle:** Der Anwender soll über einen PC das System beobachten können. Weiterhin müssen Stellgrößen und Parameter zur gezielten Beeinflussung übertragen werden. Eine manuelle Eingabe und optische Anzeige direkt am Steuerschrank ist ebenfalls wünschenswert.
- **Systemkriterien:** Anforderungen, auf die der Motor und die Leistungselektronik ausgelegt sind, müssen von der Regelungshardware entsprechend unterstützt werden, wie z.B. Redundanz bei Ausfall von Teilbereichen.
- **sonstige Anforderungen:** Neben den leistungsspezifischen Anforderungen gelten auch Bestimmungen, die einen sicheren und ungestörten Betrieb ermöglichen, z.B. Fehlerschutz durch galvanische Trennung.

Die angeführten Kriterien sind zunächst nicht genauer quantitativ spezifiziert, da eine Skalierung der Leistungsdaten möglich sein soll. Es muss untersucht werden, wie groß der Speicherbedarf für die Kraftkennlinienfelder ist, und wie dieser durch Interpolationsmechanismen reduziert werden kann. Diese zusätzlichen Algorithmen bedeuten allerdings einen erhöhten Aufwand an Rechenzeit. Daher wurde zunächst für die Bereiche Rechenleistung und Speichergröße eine Überdimensionierung vorgenommen, so dass genügende Leistungsreserven vorhanden sind. Eine Erweiterbarkeit ist in vielen Bereichen möglich; allerdings ist diese aufgrund von elektrischen und mechanischen Randbedingungen auf ein gewisses Maximum begrenzt. Im Folgenden wird die komplette Hardware, in Bezug auf die oben genannten Forderungen, vorgestellt. Der programmtechnische Ablauf, z.B. der Transfer von Daten, wird nur angedeutet. Eine Beschreibung, wie die Regelalgorithmen auf die verschiedenen Karten aufgeteilt sind, befindet sich im Kapitel 6 über die Implementierung der Regelung.

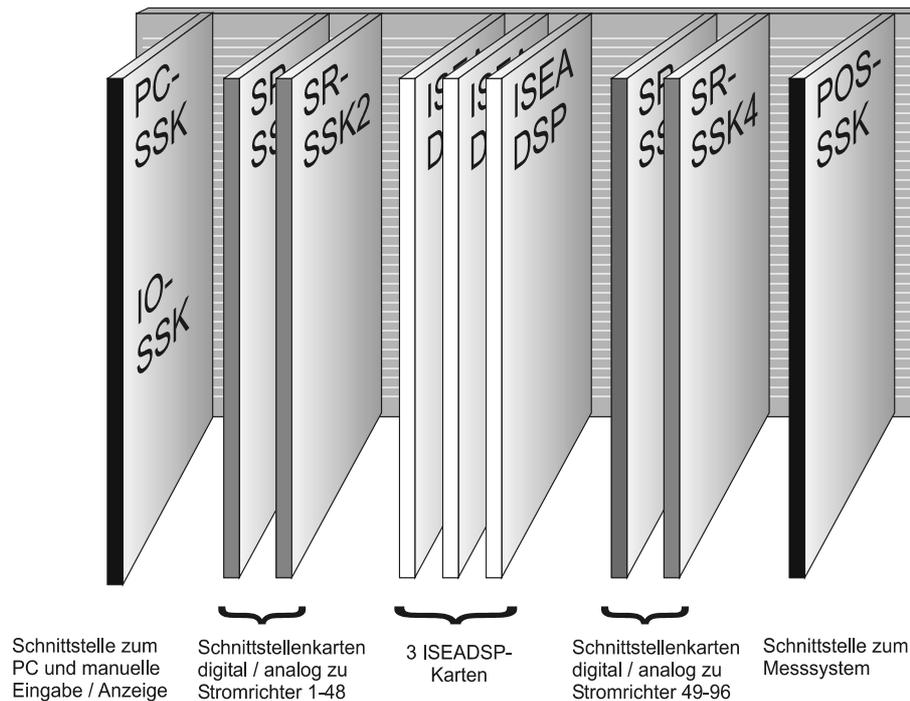


Bild 5.1 Regelungshardware mit ISEADSP-Cluster und Schnittstellenkarten

Einen Überblick über die gewählte Anordnung gibt Bild 5.1. Es veranschaulicht das mechanische Konzept und die räumliche Aufteilung des Systems. Ein Foto des Aufbaus ist in Anhang B vorhanden. Kernstück der Regelungshardware sind drei ISEADSP-Karten, die in Kapitel 5.1.1 beschrieben werden. Auf ihnen werden die Regelalgorithmen berechnet und die entsprechenden Stellsignale zu den Schnittstellenkarten ausgegeben. Die Beschreibung der Schnittstellenkarten erfolgt in Kapitel 5.1.2. Kennzeichnend für die gesamte Anordnung ist, dass alle Ein-/ Ausgabesignale über eine Backplane laufen. Über die Backplane werden nur digitale Signale übertragen. Dies bedeutet, dass auf den ISEADSP-Karten keine analogen Wandlerbausteine benutzt werden. Dies hat den Vorteil einer einfacheren galvanischen Trennung der Signale. Die analogen und digitalen Signale werden über Kabel an der Frontseite zu den Stromrichterplatinen geführt. Alle Signale außerhalb der DSP-Karten sind Punkt zu Punkt Verbindungen, d.h. es besteht kein Bussystem. Damit wird eine hohe Redundanz des Systems erzielt. Fallen einzelne Kanäle aus, so können die verbleibenden ohne eine Beeinflussung weiter betrieben werden.

5.1.1 Die ISEADSP-Regelungskarte

Am Institut für Stromrichtertechnik und Elektrische Antriebe der RWTH-Aachen wurde eine Regelungskarte (ISEADSP) mit digitalen Signalprozessoren entwickelt [55][56][50], die den oben beschriebenen Anforderungen Rechnung trägt und spezielle Vorteile bei der Regelung des mehrdimensionalen Antriebs bietet. Ein Vergleich zu anderen Karten und Systemstrukturen sowie die Vorteile dieses Systems wurde von Karipidis angestellt [50]. Anhand des Einsatzes beim Kugelmotorantrieb wird der Aufbau näher beschrieben. Eine

detaillierte Auflistung der spezifischen Kenndaten und Leistungsmerkmale der Regelungskarte ist in [57] zu finden.

Zentrales Element der ISEADSP-Karte ist ein digitaler Signalprozessor (DSP) vom Typ 2106x der Firma Analog Devices. In Bild 5.2 sind dessen Hauptkomponenten skizziert. Der DSP besitzt ein Rechenwerk (CPU) mit Fließkommaarithmetik und kann in einem Taktzyklus gleichzeitig eine Multiplikation, eine Addition und eine Schiebeoperation durchführen. Es ist ein großer interner Speicher vorhanden, der nach der modifizierten Harvard-Struktur, sowohl als Programm- als auch als Datenspeicher, frei konfiguriert werden kann.

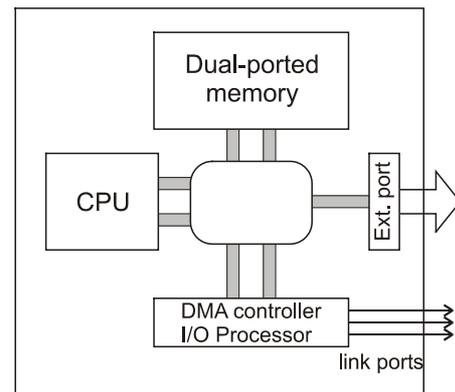


Bild 5.2 Komponenten des digitalen Signalprozessors ADSP21060/62

Auf diesen Speicher kann gleichzeitig vom Rechenwerk und über einen externen Bus zugegriffen werden (Dual Ported RAM). Dies hat den Vorteil, dass gleichzeitig Rechenoperationen durchgeführt und Datentransfers vorgenommen werden können, ohne dass diese sich gegenseitig beeinflussen. Daten können über einen parallelen Datenbus (Ext. Port) oder über Punkt zu Punkt Verbindungen (link ports) mit anderen Bausteinen ausgetauscht werden. Bei der Aufteilung der Algorithmen in Unterprozesse (siehe Kapitel 6) wird der Austausch der Daten zwischen den Prozessoren über die link-ports vorgenommen, damit der externe Bus nicht blockiert wird. Der Datenaustausch kann als direkter Zugriff erfolgen oder aber als eigenständiger Prozess zur Übergabe von größeren Datenpaketen aufgesetzt werden (DMA-Transfer), ohne dass der Rechenkern in seinen Prozessen unterbrochen wird. Wie später gezeigt wird, ist eine Verwaltung der Speicherressourcen und ein effizienter Datenaustausch über unterschiedliche Wege von enormer Bedeutung. Weitere detailliertere Erläuterungen und Beschreibungen über den Prozessor können im Prozessorhandbuch nachgelesen werden [58].

Die ISEADSP-Karte ist für die Kugelmotoranwendung mit zwei DSPs bestückt. Damit stehen zusätzliche Rechenleistung und Speicher zur Verfügung. Neben der parallelen Prozessverarbeitung sind verschiedene Mechanismen eines Multiprozessorsystems nutzbar, wie z.B. ein gemeinsamer Speicheradressbereich. Für die Erstellung und das Testen von Programmroutinen, sowohl in der Hochsprache C als auch in hardwarenahem Maschinencode (Assembler), steht für die Signalprozessoren eine integrierte Entwicklungsumgebung zur Verfügung. In einem nichtflüchtigen Speicher (FLASH-EPROM) sind neben den Programm- und Konfigurationsdaten auch Kennlinienfelder für die Kraftberechnungen dauerhaft gespeichert. Neben dem internen Speicher in den DSPs gibt es einen großen schnellen Arbeitsspeicher (SRAM) auf den ohne Wartezyklen (0-wait states) zugegriffen werden kann. Dieser Speicher dient zum Ablegen von größeren Datenmengen, wie z.B. den Kraftkennlinienfeldern, oder zum Austausch von Daten zwischen den Prozessoren sowohl innerhalb einer Karte als auch über mehrere Karten hinweg.

Kernstück der Regelungskarten sind programmierbare Logikbausteine (FPGAs), die schnelle und komplexe Abläufe von logischen Zuständen steuern. Die Steuerung betrifft sowohl interne Mechanismen, z.B. Synchronisationsaufgaben, als auch Schnittstellen, die z.B. Signalmuster nach außen ausgeben können. Durch ihre Flexibilität können die FPGAs an die verschiedenen Aufgaben angepasst werden. Generell werden sie nach ihrem Programmiervorgang und vor dem Regelungsstart mit ihren Konfigurationsdaten geladen. Grundsätzlich erfolgt das Ansprechen der FPGAs, und damit das Starten einer Zustandsabfolge, vom DSP aus über Registeradressen, ähnlich einem Speicherzugriff. Die verwendeten Steuerwerke bei der Kugelmotoranwendung werden im Folgenden in ihren wichtigsten Funktionen vorgestellt. Eine detaillierte Beschreibung aller Funktionen ist bei Karipidis angegeben [50].

- **Hauptsteuerwerk (MSC):** Dieses FPGA übernimmt Funktionen für die übergeordnete Ablaufsteuerung. Ein programmierbares Netzwerk aus Interrupt- und FLAG-Leitungen von verschiedenen Bausteinen ermöglicht eine flexible Konfiguration. Weiterhin ist eine Synchronisation von mehreren gekoppelten DSP-Karten möglich. Neben zusätzlichen Timern sind in diesem Baustein auch zwei Schnittstellen zum PC realisiert, über die Daten ausgetauscht werden können.
- **Bussteuerwerk (EXT):** Für den Datenaustausch zwischen mehreren Karten ist in diesem Baustein ein Dual-ported-RAM realisiert.
- **Analoges Steuerwerk (AIO):** Mit Hilfe dieses FPGAs werden die Analog/Digital- und Digital/Analog Wandlerbausteine angesteuert. Die Sollwerte werden in ein Datenregister des FPGA geschrieben, worauf die Ansteuersignale für die Wandler alle gleichzeitig generiert werden.
- **Digitales Steuerwerk (DIO):** Für alle Stromrichterkanäle wird hierüber ein Freigabesignal ausgegeben. Als Rückmeldung können Statusinformationen abgefragt werden (Fehlersignale) oder auch ausgegeben werden (LED-Anzeige).
- **Encoder Steuerwerk (ENC):** Von den Messaufnehmern werden positionsabhängig inkrementelle Signale gesendet. In diesem FPGA sind Zähler realisiert, die diese Signale aufaddieren und damit ein Positionsmaß zur Verfügung stellen, welches vom DSP ausgelesen werden kann.

Beim Kugelmotorantrieb arbeiten 3 Regelungskarten in einem Cluster zusammen. Dadurch wird, neben der hohen Anzahl an Ausgabekanälen für die Stromrichtersollsignale, eine große Rechenleistung mit zusätzlichem Speicher erzielt. In dem in Bild 5.3 dargestellten Kartenverbund arbeitet die mittlere Karte als Master-Karte, d.h. sie ist für die Hauptregelung verantwortlich. Außerdem übernimmt sie weitere übergeordnete Aufgaben. Dazu gehören unter anderem Koordinations- und Synchronisationsaufgaben, das Erfassen der Positionssignale und ein Datenaustausch zur PC-Benutzerschnittstelle.

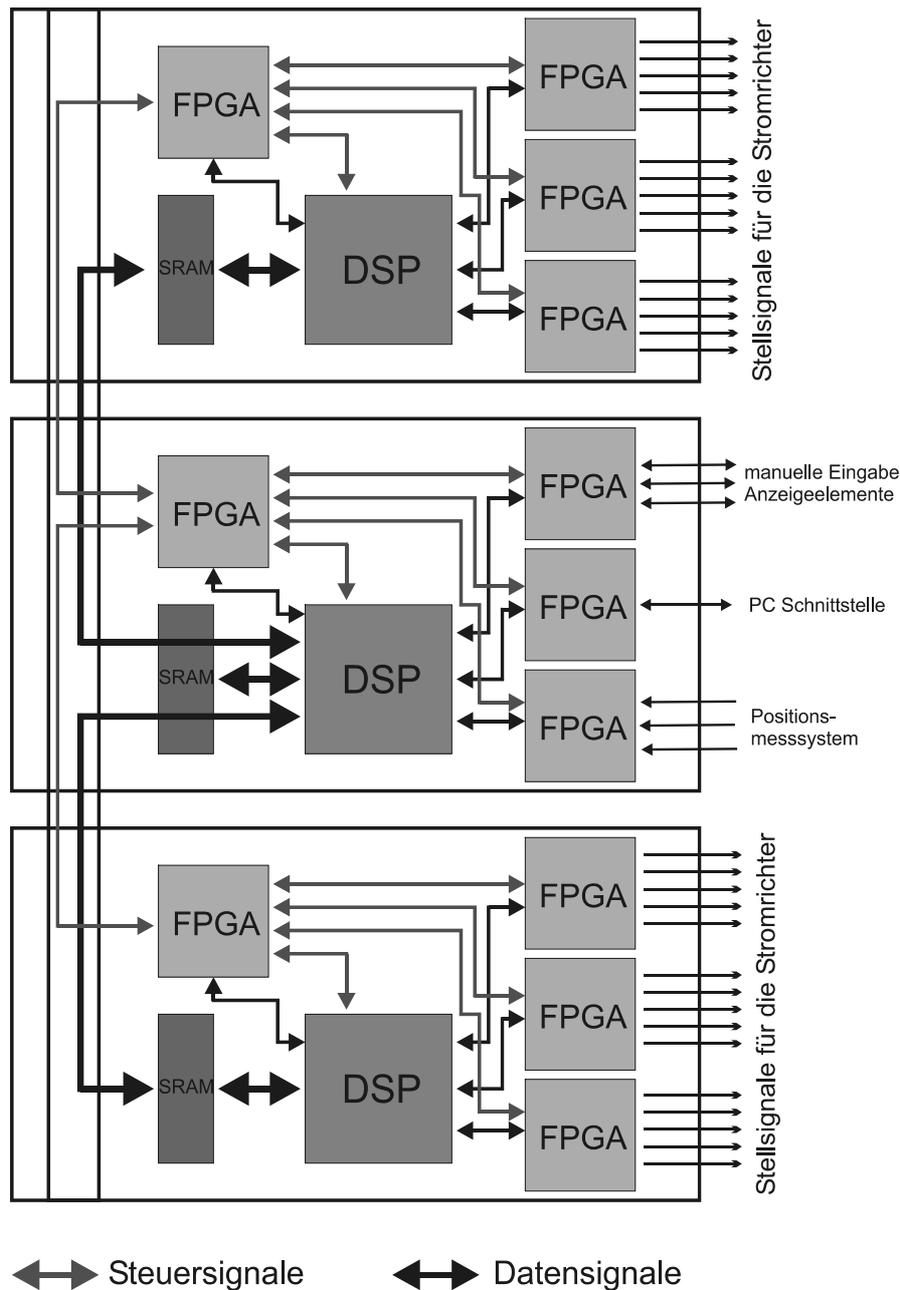


Bild 5.3 Vereinfachte Darstellung des Signalflusses zwischen den gekoppelten ISEADSP-Karten

Die beiden äußeren Karten arbeiten als Slave-Karten, d.h. sie übernehmen Hilfsfunktionen und führen Berechnungen von Unterroutrinen aus. Ihre Aufgabe ist es, die berechneten Sollsignale an die Stromrichter-Schnittstellenkarten (SR-SSK) auszugeben, die einzelnen Kanäle freizugeben und ggf. Fehlermeldungen zu detektieren. Bei der Entwicklung von Regelungsalgorithmen und Berechnungsroutinen wurde eine mögliche parallele Verarbeitung von Prozessen untersucht. Durch die flexible Struktur können die unterschiedlichen Rechen- und Speicherressourcen unterschiedlich genutzt werden. Einzig durch die Kopplung mit den Schnittstellenkarten sind gewisse Aufgaben der unterschiedlichen DSP-Karten festgelegt.

5.1.2 Die Schnittstellenkarten

Die Aufgabe der Schnittstellenkarten ist es, eine galvanische Trennung zwischen den DSP-Regelungskarten und den weiteren Systemeinheiten vorzunehmen. Eine Entkopplung der Stromversorgung erfolgt dabei über isolierte DC/DC-Wandler und separate Netzteile. Neben den elektrischen Eigenschaften stellen Schnittstellenkarten auch notwendigen mechanischen Steckverbindungen zur Verfügung. Die Anschlussstecker sind alle nach vorne heraus geführt. Die Kopplung zwischen den Schnittstellenkarten und den ISEADSP-Karten erfolgt über eine gemeinsame Backplane auf der Rückseite. Die verschiedenen Schnittstellenkarten werden wie folgt bezeichnet:

- **Stromrichter-Schnittstellenkarte (SR-SSK):** Sie ist für den Austausch von Signalen zwischen den DSP-Karten und den Stromrichterkarten zuständig. Es gibt insgesamt 4 SR-SSK, die jeweils für die Ansteuerung von 24 Kanälen verantwortlich sind. Zum einen sind Digital/Analog-Wandler vorhanden, die analoge Sollwerte für die Stromrichterkanäle vorgeben. Die Steuersignale für die Wandler werden von den FPGAs der DSP-Karten generiert. Die digitalen Signale werden über die Backplane übertragen und dann galvanisch getrennt. Weiterhin gibt es Freigabesignale für die einzelnen Stromrichterkanäle und Statussignale, die von den Stromrichter zu den DSP-Karten zurück gesendet werden. Somit sind Fehlerfälle von der übergeordneten Regelung detektierbar. Des weiteren wird auf den SR-SSK ein Taktsignal erzeugt und verteilt, welches für die gemeinsame Schaltfrequenz aller Stromrichterkanäle verantwortlich ist.
- **PC-Schnittstellenkarte (PC-SSK):** Diese Karte unterstützt die Kommunikation zwischen den DSP-Karten und einem PC. Es erfolgt eine galvanische Trennung über Optokoppler und eine Pegelanpassung an die Standard RS232-Schnittstelle. Jede DSP-Karte besitzt zwei serielle Schnittstellen. Über die erste werden Regelparameter und Statusinformationen ausgetauscht. Über die zweite kann kontinuierliches Mitschreiben von Messdaten für eine spätere Auswertung erfolgen.
- **Positionserfassungs-Schnittstellenkarte (POS-SSK):** Über diese Karte werden die Signale der Positionsmesssysteme für die Regelung ermittelt. Die Positionssensoren besitzen die Möglichkeit, über ein spezielles Protokoll (EnDat der Firma Heidenhain) die absolute Position zu bestimmen. Des weiteren werden inkrementelle Signale generiert, die nach einer externen Interpolationseinheit vom Encoder-FPGA der DSP-Karte ausgewertet werden und eine sehr hohe Auflösung ermöglichen. Die POS-SSK hat neben dem mechanischen Anschluss auch die Aufgabe, eine Pegelanpassung an die Signale vorzunehmen, welche dem RS-485 Standard entsprechen.
- **Benutzer-Schnittstellenkarte (IO-SSK):** Über einen Drehschalter und Taster können hier vom Benutzer manuell Vorgaben gemacht werden, z.B. die Auswahl von bestimmten Programmmodi, ohne dass eine Verbindung zum PC bestehen muss. Mehrere Leuchtdioden können dabei ausgewählte Zustände oder binäre Zahlenwerte darstellen. Die Abfrage des Drehschalters und das Ansprechen der Leuchtdioden wird vom Hauptprogramm durchgeführt.

Neben den physikalischen Schnittstellen ist eine Benutzeroberfläche auf dem PC vorhanden, über welche Parameter für die Regelung übergeben und Anzeigen von den Zustandsgrößen des Antriebs gemacht werden. Die Oberfläche wurde mit dem Programmpaket LabView der Firma National Instruments entwickelt. Der Anwender kann bei der Anzeige von Position, Spulenströmen und Motorparametern zwischen numerischen und graphischen Darstellungen wählen. Parallel zur numerisch/graphischen Anzeige ist auch ein Mitschreiben in eine Datei möglich, so dass eine Auswertung der Versuche später offline erfolgen kann. Neben dem Beobachten von Systemzuständen und Parametern ist auch eine aktive Beeinflussung möglich. Dazu sind Eingabemasken für globale Variablen, wie z.B. neue Sollpositionen, vorhanden. Bei der großen Anzahl an Daten und der begrenzten Bandbreite der seriellen Schnittstelle des PCs muss eine Auswahl getroffen werden, welche Daten angezeigt werden, d.h. es können nicht alle Parameter gleichzeitig beobachtet werden.

5.2 Leistungselektronik zur Ansteuerung des Kugelmotors

Die Leistungselektronik ist für den Einsatz als Prototyp im Labor ausgelegt worden. Hierbei ist vor allem die Leistungsfähigkeit mit genügend Reserven von Bedeutung. Andere Anforderungskriterien für eine Serienproduktion, wie z.B. geringes Volumen und Gewicht, wurden nicht berücksichtigt. Für den mehrdimensionalen Direktantrieb müssen folgenden Kriterien des Stromrichters erfüllt werden:

- Eine große Anzahl an Spulenwicklungen muss individuell bestromt werden, d.h. der Stromrichter muss mit vielen einzelnen, getrennt voneinander steuerbaren Kanälen (Phasen) realisiert werden. Somit muss ein möglichst einfacher Aufbau für jeden Kanal gewählt werden.
- Entsprechend der geforderten Kraftwirkung muss ein Strom durch die Motorwicklungen fließen, der positiv oder negativ sein kann. Je nach Betriebszustand und Regelungsvorgaben hat der Strom zeitlich einen konstanten Wert oder kann sich variabel ändern. Betriebsbedingt wird ein Stromrichter benötigt, der in allen 4 Quadranten des Betriebsdiagrammes arbeitet, d.h. sowohl im motorischen als auch im generatorischen Betrieb einen Leistungsfluss ermöglicht.

Aus diesen Bedingungen ergibt sich der Einsatz von selbstgeführten Stromrichterzweigen, die aus einem Spannungszwischenkreis gespeist werden. Aufgrund der großen Anzahl von 96 Kanälen wurde eine Halbbrückentopologie (Bild 5.4) für den praktischen Aufbau mit einer Stromregelung ausgewählt. Dadurch ist gewährleistet, dass jede Spulenwicklung separat angesteuert werden kann. Unterschiedliche Strommessmethoden sind bei Costa beschrieben [59]. Die Halbbrückenschaltung ermöglicht es, einen kostengünstigen

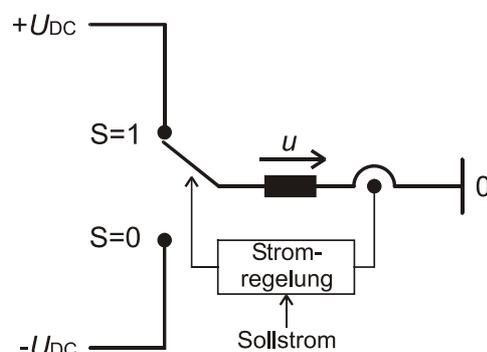


Bild 5.4 Halbbrückenschaltung mit analoger Stromregelung

Messshunt zu verwenden. Von Kazmierkowski wurden verschiedene Steuerverfahren zur Stromregelung bei unterschiedlichen Einsatzgebieten verglichen [60]. Für die Anwendung des Kugelmotors wird eine Stromregelung mit fester Schaltfrequenz gewählt. Bild 5.5 zeigt die Schaltzeitpunkte von zwei verschiedenen Kanälen, deren Sollwerte i_1^* und i_2^* mit einem gemeinsamen Dreieckssignal verglichen werden. Die Schalthandlungen finden zwar zu unterschiedlichen Zeitpunkten statt, aber die Grundfrequenz der durch die Schaltungen erzeugten Stromripple ist fest. Wie später gezeigt wird, ist dieses Verhalten beim Zusammenwirken der vielen Kanäle wichtig.

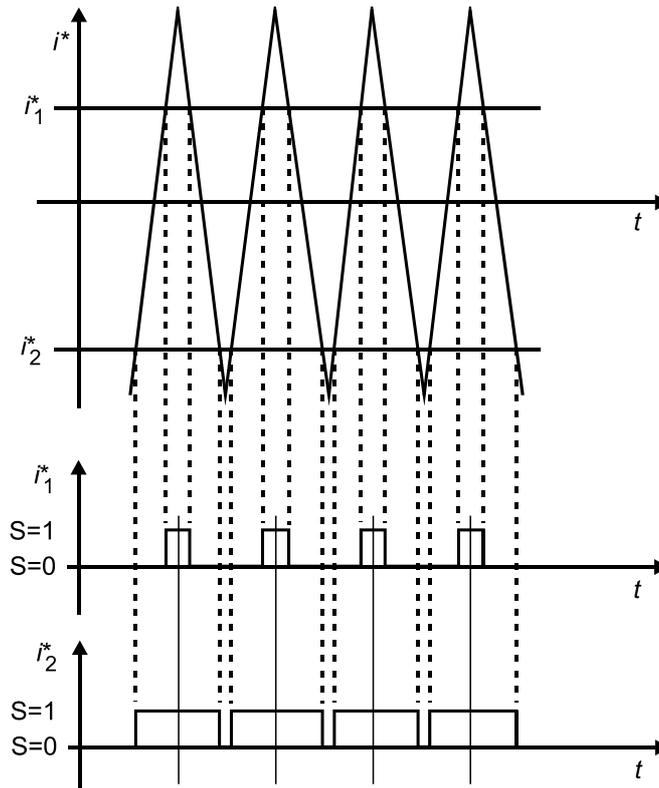


Bild 5.5 Erzeugung der Schaltzeitpunkte bei unterschiedlichen Stellgrößen

5.2.1 Konzept und Aufbau des Stromrichters für den Kugelmotor

Im Folgenden wird der Aufbau und die Funktionsweise des gesamten Stromrichters für den Einsatz am Flächen- und Kugelmotor erläutert. Dabei wird zunächst ein einzelner Stromrichterkanal und anschließend dessen Einsatz im Gesamtsystem beschrieben.

Die Kopplung der Stromrichterkanäle an die Regelung ist in Bild 5.6 dargestellt. Die Sollströme werden als analoge Stellgröße übergeben. Aus einem zentralen Taktsignal wird ein Dreieckssignal, für die Bestimmung der Schaltzeitpunkte, generiert, welches mittels einer PLL (phase locked loop) Schaltung synchronisiert wird. Über digitale Signale werden die Treiberbausteine der Leistungsbauelemente (MOSFETs) freigegeben. Statussignale ermöglichen die Detektion einer Überstromabschaltung, so dass die Regelungshardware einen Ausfall in der Regelung mit berücksichtigen kann.

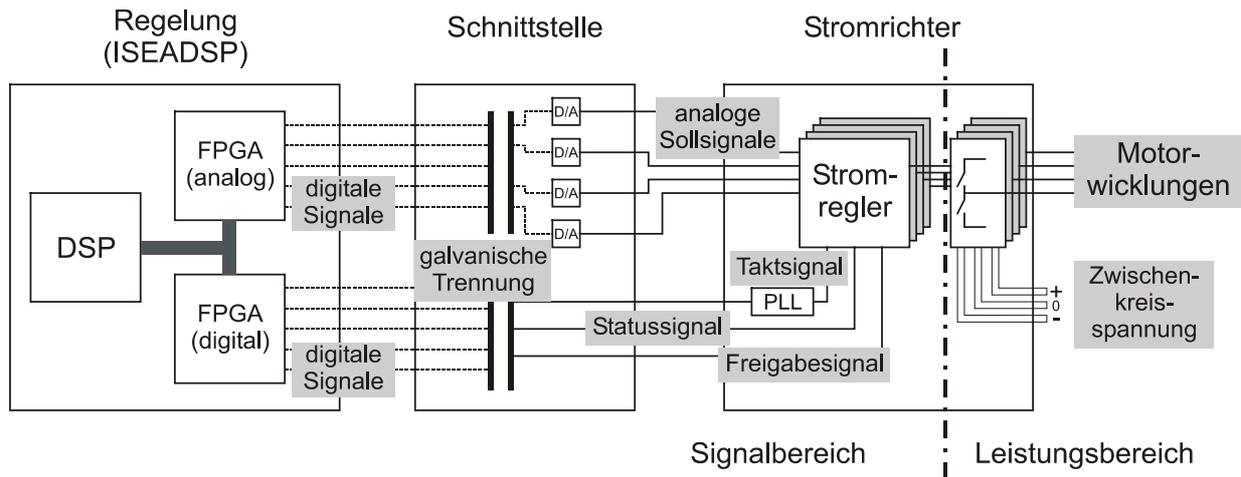


Bild 5.6 Kopplung des Stromrichters an die Regelung

Der Aufbau des inneren Stromregelkreises erfolgt in analoger Schaltungstechnik auf den Stromrichterkarten. Dies hat den Vorteil einer schnellen Regelung. Außerdem wird durch die dezentralen Stromregelkreise für diese Aufgabe weniger Rechenkapazität auf der zentralen Regelungshardware benötigt. In den folgenden Betrachtungen wird der Begriff Stromrichterphase vermieden, da dieser bei Drehfeldmaschinen für eine feste Beziehung zwischen den einzelnen Windungssträngen aufgrund der mechanischen und elektrischen Anordnung steht. Beim Kugelmotor wird jede Motorwicklung individuell angesprochen und unabhängig von den anderen Spulen bestromt. Daher wird im Folgenden von den einzelnen Stromrichterkanälen gesprochen.

Mit der Motorenauslegung beim Institut für Elektrische Maschinen (IEM) wurden auch die Spannungen und Ströme festgelegt, die an den Motorwindungen anliegen bzw. durch die Spulenwicklungen fließen. Beim Flächen- bzw. Kugelmotor ergibt sich die Gesamtkraft bzw. das Gesamtmoment aus der Summe der Beiträge aller Statorwicklungen. Daher sind hier die einzelnen Ströme relativ klein. Aufgrund der niedrigen Drehzahl sind die induzierten Gegenspannungen gering, so dass die treibende Spannung des Zwischenkreises relativ niedrig gewählt werden kann. Weiterhin müssen durch die niedrigen Potentialunterschiede keine aufwendigen Isolations- und Schutzmaßnahmen getroffen werden. Außerdem kann der Einfluss durch die kapazitiven Kopplungen bei den kleinen Spannungen gering gehalten werden.

Die spezifischen Daten des Motors und des Stromrichters sind in Anhang C und D aufgelistet. Die folgenden Erläuterungen sind allgemein gültig und können entsprechend für andere Antriebsauslegungen skaliert werden. So wurde für den Flächenmotor der Stromrichter mit verringerter Leistung und einer kleineren Anzahl von 16 Kanälen aufgebaut. Für den Kugelmotor wurde das System erweitert und mit einer Anzahl von 96 Kanälen errichtet. Beim Aufbau der Prototypen wurde darauf geachtet, soweit wie möglich Standardkomponenten zu verwenden, z.B. Netzteile für die Zwischenkreisversorgung.

5.2.2 Beschreibung der Stromrichterkanäle

Der Aufbau der Halbbrückenschaltung ist in Bild 5.7 dargestellt. Insgesamt befinden sich vier dieser Schaltungen auf einer Stromrichterplatine. Die dickeren Linien kennzeichnen dabei den Leistungsfluss und die dünneren Linien den Signalfluss. Aus einem bipolarem Gleichspannungszwischenkreis $+U_{DC}$ und $-U_{DC}$ wird die Schaltung versorgt.

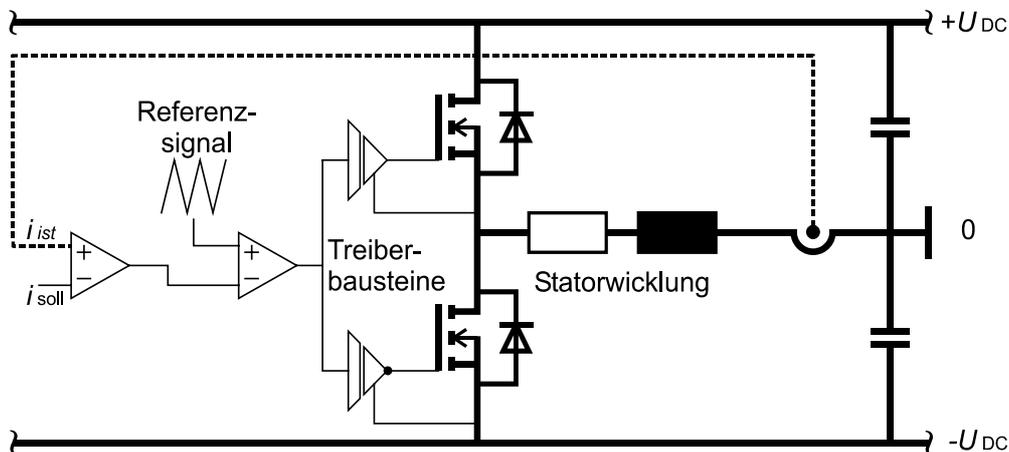


Bild 5.7 Aufbau der Halbbrückenschaltung mit Stromregelung

Als schaltende Bauelemente werden MOSFETs eingesetzt. Diese haben bei kleinen Spannungen ($U < 100 \text{ V}$) und kleinen Strömen ($i < 10 \text{ A}$) den Vorteil von niedrigen Verlusten und ermöglichen eine einfache spannungsgeführte Ansteuerung. Die Motorwicklungen werden durch eine ohmsch-induktive Last dargestellt. Der ohmsche Anteil repräsentiert den Widerstand der Kupferwicklungen sowie den Widerstand der Zuleitungen zum Motor. Durch die Bewegung des Motors tritt eine induzierte Gegenspannung auf. Diese mindert die anliegende Spannung des Zwischenkreises an der Spulenwicklung und verkleinert somit die Stromanstiegsgeschwindigkeit. Die Gegenspannungsquelle ist hier nicht eingezeichnet und für die Erläuterungen der Schaltung nicht notwendig. Zudem ist dieser Spannungsanteil bei den geplanten langsamen Bewegungen des Motors sehr gering.

Abhängig von den Steuersignalen wird nun entweder der obere MOSFET oder der untere MOSFET eingeschaltet und entsprechend die Induktivität auf- oder abmagnetisiert. Der Strom wird über einen einfachen Messshunt gemessen. Der gemessene Strom wird mit einem Stromsollwert verglichen. Der Sollwert wird dabei als analoges Signal von der übergeordneten Regelung zur Verfügung gestellt. Das Differenzsignal zwischen Soll- und Istwert ist ein Entscheidungsmaß zur Generierung der Schaltsignale. Als Referenz dient ein Dreieckssignal, welches in einem Baustein erzeugt und mittels einer PLL-Schaltung auf einen zentralen Takt synchronisiert wird. Das erzeugte Schaltsignal aus dem Vergleich mit der Dreiecksspannung wird dann zur Ansteuerung des oberen MOSFET und invertiert für die Ansteuerung des unteren MOSFET genutzt. Die Ansteuerung übernehmen integrierte Treiberbausteine, die eine interne Unterspannungserkennung haben und zusätzlich ein Freigabesignal besitzen. Somit kann über ein digitales Signal von der übergeordneten Steuerung die Schaltung aktiviert oder im Fehlerfall abgeschaltet werden. Für die einzelnen

Stromrichterkanäle wurde eine interne Stromüberwachung realisiert. Im Falle eines Überstroms, z.B. durch einen Windungskurzschluss, erfolgt eine Abschaltung des entsprechenden Kanales. Weiterhin gibt es eine optische Anzeige mittels Leuchtdioden (LEDs) und ein digitales Rückmeldesignal zur übergeordneten Steuerung, so dass Teilausfälle in der übergeordneten Regelung berücksichtigt werden können. Gibt es betriebsbedingt einen kurzfristigen Überstrom, so verbleibt der Stromrichterkanal in einem abgeschalteten Fehlerzustand, kann aber von der übergeordneten Regelung wieder in den normalen Betriebszustand zurückgesetzt werden (RESET-Funktion). Sämtliche Freigabesignale besitzen eine passive Sicherheit, d.h. im Falle eines Spannungsabfalls oder einer Unterbrechung der Freigabeleitungen werden die Treiberbausteine abgeschaltet und durch die Spulenwicklungen kann kein Strom fließen.

5.2.3 Beschreibung des Gesamtsystems

Prinzipiell wird jeder einzelne Stromrichterkanal über die gemeinsame bipolare Spannungsversorgung gespeist. Der Aufbau ist schematisch in Bild 5.8 dargestellt. Für den praktischen Versuchsaufbau werden handelsübliche Netzteile eingesetzt. Diese entnehmen die benötigte Leistung aus dem 380V Drehstromnetz. Ein Filter zur Reduktion von Netzurückwirkungen und eine galvanische Trennung im Schaltnetzteil sind vorhanden. Die Stützung der Ausgangsspannung geschieht über interne Elektrolytkondensatoren. Eine interne Schutzdiode verhindert eine Rückspeisung von Energie, was zu einem unerlaubtem Ansteigen der Spannung führen würde. Zur Erhöhung der Gesamtleistung wurden jeweils zwei Netzteile parallel geschaltet. Die Netzteile haben dabei Symmetrierfunktionen integriert, die eine gleichmäßige Belastung garantieren und eine Redundanz im Fehlerfall aufweisen [61]. Es sind zusätzliche Zwischenkreiskondensatoren vorhanden, die zurückgespeiste Energie zwischenspeichern und kurzfristige Lastspitzen schnell abdecken können.

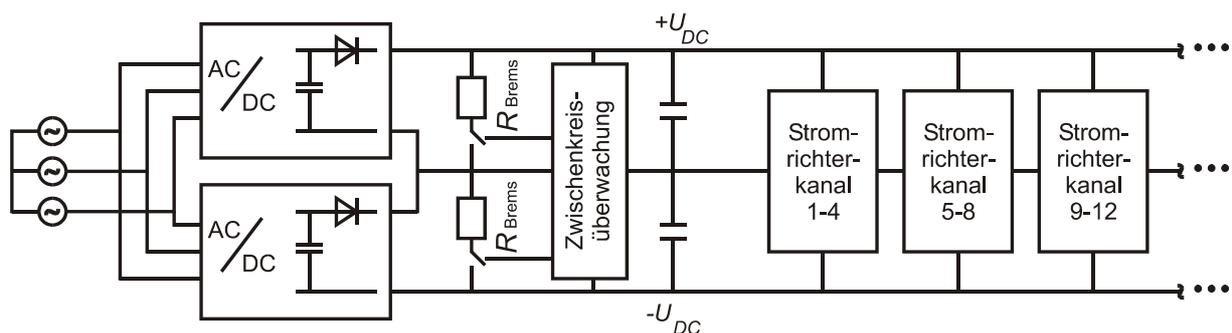


Bild 5.8 Gesamtanordnung des Stromrichters mit allen Kanälen

Eine Zwischenkreisüberwachung überprüft die anliegenden Spannungen. Im Falle eines unerlaubten Anstieges, wird ein Bremschopper aktiviert, der über einen Bremswiderstand die überschüssige Energie abführt. Steigt die Spannung trotzdem weiter über einen bestimmten Grenzwert oder wird eine Mindestspannung unterschritten, so wird das gesamte System sicherheitshalber abgeschaltet. Nicht eingezeichnet sind Schalter, die ein zusätzliches Auftrennen der Netzteile vom Zwischenkreis ermöglichen. Mit diesen Schaltern sind

Entladewiderstände gekoppelt, so dass im Falle einer Trennung, z.B. bei Betätigung des Notaus-Schalters, die Zwischenkreiskondensatoren entladen werden.

Wie oben beschrieben, befinden sich jeweils vier Kanäle auf einer Platine. Für die übergeordnete Regelungshardware stehen eigene Netzteile zur Versorgung bereit. Die Übergabe von Signalen erfolgt über Schnittstellkarten, die eine galvanische Trennung des Regelungssystems vom Leistungsteil garantieren. Neben der Zwischenkreisüberwachung sind noch weitere übergeordnete Schutzfunktionen, wie z.B. eine Temperaturüberwachung implementiert. Der Aufbau für die Flächenmotor- und die Kugelmotoranwendung ist prinzipiell gleich. Allerdings gibt es beim Kugelmotor eine größere Anzahl an Statorspulen, so dass ein größerer Gesamtstrom benötigt wird und damit die installierte Leistung entsprechend höher ausfallen muss. Bei beiden Anwendungen ist durch den separaten Aufbau der einzelnen Kanäle eine Redundanz gegeben, d.h. ein Ausfall einzelner Kanäle oder Teilbereiche kann bei der Krafterzeugung durch die restlichen Kanäle kompensiert werden. Daher ist es notwendig, dass die einzelnen Stromrichterkanäle für eine kürzere Zeit mit einem Strom belastet werden können, der größer als der Nennstrom ist. Für den Motor bedeutet dies allerdings, dass auch in den Motorwicklungen durch den höheren Strom zusätzliche Verluste anfallen. Dies verursacht zusätzliche Wärme, die entsprechend abgeführt werden muss.

Der gesamte Aufbau ist in einem Schaltschrank untergebracht und in Anhang B abgebildet. Von den einzelnen Stromrichterplatinen werden die Verbindungsleitungen zu den Spulenanschlüssen des Motors in mehradrigen Kabelbündeln geführt. Eine Betrachtung des Betriebsverhaltens und messtechnische Untersuchungen der einzelnen Komponenten, auch im Hinblick auf die verschiedenen Verlustmechanismen erfolgen in den nächsten beiden Unterkapiteln.

5.3 Betriebsverhalten des Stromrichters

Im Folgenden wird das Zusammenspiel mehrerer Stromrichterkanäle im Gesamtsystem untersucht. Die unterschiedlichen Betriebsfälle werden beispielhaft an jeweils zwei Einzelkanälen aufgezeigt, gelten aber allgemeinen auch für das Zusammenspiel aller Stromrichterkanäle. Die messtechnische Untersuchungen wurden dann an den Spulenwicklungen des Kugelmotorversuchsstandes durchgeführt und sind im nächsten Unterkapitel 5.3.4 näher beschrieben.

Bei der Beschreibung des elektrischen Motorenverhaltens kann allgemein die Formel

$$u = R \cdot i + L \frac{di}{dt} + u_i \quad (5.1)$$

verwendet werden. Dabei ist u die anliegende Spannung des Stromrichterzwischenkreises, und i der Strom, welcher durch die Motorwicklung fließt. R stellt den ohmschen Widerstand und L die Induktivität der Spulenwindungen dar. In Abhängigkeit der Bewegungsgeschwindigkeit tritt eine induzierte Spannung u_i auf, die der anliegenden äußeren Spannung

entgegenwirkt. Für die folgenden Erläuterungen und Betrachtungen zur Funktionsweise des Stromrichters wird der ohmsche Widerstand und die induzierte Gegenspannung vernachlässigt. Dies ist in erster Näherung zulässig, da beide Anteile relativ klein sind und erst in der späteren Auslegung und Dimensionierung berücksichtigt werden müssen.

$$u = L \frac{di}{dt} \quad (5.2)$$

Weiterhin sind die Schaltzeiten des Stromrichters so schnell, dass die große Zeitkonstante L/R bei der Lösung der Differentialgleichung aus (5.1) vernachlässigt werden kann. Daher kann nach Gleichung (5.2) der Stromanstieg durch eine Gerade dargestellt werden. Dementsprechend wird der ohmsche Widerstandsanteil in den folgenden Ersatzschaltbildern nicht mit eingezeichnet.

5.3.1 Rückspeisung von Energie in den Zwischenkreis

Bei elektrischen Antrieben wird bei Rückspeisung von Energie meist der generatorische Betrieb betrachtet, bei dem die Maschine im zweiten oder vierten Quadranten arbeitet. Dies bedeutet mechanisch, dass Drehmoment und Winkelgeschwindigkeit entgegengesetzt sind, bzw. auf der elektrischen Seite Strom und Spannung unterschiedliche Vorzeichen haben. Grundsätzlich erfolgt auch bei jeder kurzen Schalthandlung, bei der die Motorinduktivitäten abmagnetisiert werden, eine Energierückspeisung. Bei den hier verwendeten Halbbrückenschaltungen muss die Rückspeisung auch im motorischen Betrieb besonders beachtet werden. Durch einen Energierückfluss kann es zu einer unerlaubten Spannungserhöhung der Zwischenkreiskondensatoren kommen. Zunächst wird ein einzelner Stromrichterkanal mit einem Halbbrückenweig in Bild 5.9 betrachtet. Die Versorgungsnetzteile (hier als Spannungsquellen dargestellt) können durch die vorhandenen internen Schutzdioden der Netzteile keinen Strom aufnehmen.

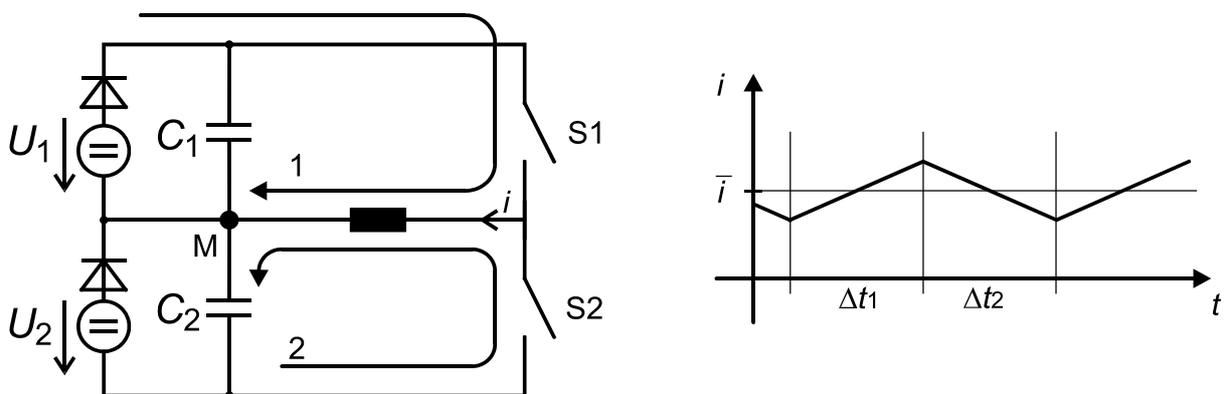


Bild 5.9 Stromfluss bei der Halbbrückenschaltung

Zunächst wird in einem Zeitbereich Δt_1 die Spule bei geschlossenem Schalter S_1 (Transistor) aufmagnetisiert. Es erfolgt ein Stromanstieg, wobei die Ladung aus der Spannungsquelle U_1

fließt. Im Zeitbereich Δt_2 ist der Schalter S2 geschlossen und es erfolgt eine Abmagnetisierung der Induktivität. Aufgrund der Schutzdiode kann die Ladung nur in den Kondensator C_2 fließen. Würde der Strom dauerhaft in die gleiche Richtung fließen, so würde die Spannung in unerlaubter Weise ansteigen. Beim entwickelten Stromrichter wird die Zwischenkreisspannung überwacht. Wird eine bestimmte Grenzwelle überschritten, so wird ein Bremswiderstand eingeschaltet, über den die überschüssige Ladung des Kondensators abfließen kann. Die gespeicherte Energie wird somit im Bremswiderstand in Wärme umgesetzt. Tatsächlich tritt dieses Problem beim Betrieb des Flächen- bzw. Kugelmotors nur sehr selten auf. Da zu jedem Zeitpunkt etwa gleich viele Statorpole über Nord/Süd-Magnetkanten als auch über Süd/Nord-Magnetkanten stehen, werden demnach gleich viele Spulenwicklungen mit positivem wie negativem Strom durchflossen. Die überschüssige Ladung des einen Zweiges kann somit im nächsten Zweig verwendet werden, der eine entgegengesetzte Stromrichtung besitzt. Ein unerlaubtes Ansteigen der Zwischenkreisspannung ist somit nicht gegeben.

5.3.2 Vergleich von synchroner und asynchroner Taktung

Beim bipolare Schalten der Spuleninduktivitäten ergibt sich ein mittlerer Strom, der bei entsprechender Sollvorgabe in bestimmten Zeitbereichen konstant sein kann. Diesem mittleren Strom ist ein kleiner Stromrippel überlagert, welcher durch das kurzzeitige Auf- und Abmagnetisieren der Induktivität erzeugt wird. Bei den folgenden Betrachtungen und Untersuchungen, und damit auch in der Schaltungsrealisierung berücksichtigt, steht die Summe dieser Stromrippel im Vordergrund, die zeitweise sehr groß werden kann [62]. Zum einen kann ein zusätzlicher Stromanteil einen Einfluss auf die Kraft- bzw. Momentenerzeugung haben, da die Kraft in erster Näherung proportional zum Strom ist. Besonders bei niederfrequenten Schwebungen könnte es passieren, dass die mechanischen Eigenfrequenzen eines Systems damit angeregt werden. Zum anderen kann die Summe der Stromanteile zu hohen Belastungen der Zwischenkreiskondensatoren führen und die Netzteile in besonderem Maße beanspruchen. Jeder Stromrichterkanal ist so aufgebaut, dass er eigenständig arbeiten kann und neben dem analogen Sollsollsignal ein Freigabesignal benötigt. Des Weiteren ist ein Baustein vorhanden, der ein Dreieckssignal generiert, womit feste Schaltzeitpunkte definiert werden. Es besteht nun die Möglichkeit, alle Dreiecksgeneratoren unabhängig voneinander laufen zu lassen.

Der dreieckförmige Stromverlauf durch das Auf- und Abmagnetisieren wurde bisher durch Geradenstücke angenähert (vgl. Bild 5.9). Zerlegt man die Dreiecksfunktion mittels einer Fourieranalyse in sinusförmige Signale, so erhält man eine Grundschwingung, deren Frequenz mit der Schaltfrequenz übereinstimmt. Die weiteren Betrachtungen werden für die sinusförmige Grundschwingung durchgeführt; sie gelten allerdings auch für die höheren Oberschwingungen. Zunächst werden zwei unterschiedliche Stromrichterkanäle betrachtet. Besitzen beide Dreiecksgeneratoren unterschiedliche Frequenzen, so besitzen die Grundschwingungen der Ausgangsströme auch unterschiedliche Frequenzen f_1 und f_2 .

$$y_1(t) = \hat{y} \cdot \cos(2\pi f_1 t) \quad (5.3)$$

$$y_2(t) = \hat{y} \cdot \cos(2\pi f_2 t) \quad (5.4)$$

Bildet man nun die Summe aus den beiden Funktionen, so erhält man:

$$y_{\text{Summe}} = y_1(t) + y_2(t) = 2\hat{y} \cdot \cos\left(\frac{2\pi \Delta f}{2} t\right) \cdot \cos(2\pi f_{\text{Schalt}} t) \quad (5.5)$$

$$\text{mit } \Delta f = f_1 - f_2 \quad \text{und} \quad f_{\text{Schalt}} \approx f_1 \approx f_2$$

Betrachtet man den Sonderfall, bei dem die Frequenzen beider Grundfunktionen genau gleich groß sind, so erhält man bei der Addition, abhängig von der Phasenlage, eine Verstärkung oder Auslöschung. Sind die Frequenzen unterschiedlich, aber ungefähr gleich groß, so erhält man bei der Addition eine Schwebung. Die maximale Amplitude der Schwingung ist dabei doppelt so groß wie die Amplitude der Ausgangsschwingungen. Die Periodendauer, die sogenannte Schwebungsdauer, zwischen zwei Amplitudenmaxima bzw. zwischen zwei Nullpunkten ergibt sich aus der Schwebungsfrequenz Δf , die aus der Differenz der beiden Grundfrequenzen bestimmt wird. Die Schaltfrequenz f_{Schalt} innerhalb der Schwebung entspricht ungefähr der Frequenz der beiden Grundfunktionen.

Betrachtet man beim Betrieb der Stromrichterkanäle die Motorwicklungen als ideale Induktivität, so setzt sich der Stromverlauf beim Auf- und Abmagnetisieren aus Geradenstücken zu einer Dreiecksfunktion zusammen. In der Realität wird der geradlinige Verlauf durch den ohmschen Anteil und den kapazitiven Einfluss der Zuleitungen abgeflacht.

Um nun mögliche negativen Auswirkungen nach außen, d.h. den Einfluss auf die Krafterzeugung, oder nach innen, d.h. Rückwirkungen auf den Zwischenkreis, zu vermeiden, wurde der Aufbau mit einer gemeinsamen Taktversorgung realisiert. Dies bedeutet, dass an zentraler Stelle ein Taktsignal generiert und an die Stromrichterkanäle verteilt wird. Somit ist für den überlagerten Stromrippel eine feste Grundfrequenz gegeben. Tritt eine Kopplung von Störsignalen mit dieser festen Frequenz auf, so besteht der Vorteil, dass diese gut durch passive Filterelemente eliminiert werden können.

5.3.3 Vergleich von variabler und fester Phasenbeziehung

Für die weiteren Untersuchungen wird eine feste Schaltfrequenz für alle Stromrichtersignale vorgegeben. Die Motorwicklung wird weiterhin vereinfacht als Induktivität dargestellt. Der mittlere Strom wird dabei als konstant angenommen, d.h. transiente Vorgänge werden nicht berücksichtigt. Beim Flächen- bzw. Kugelmotor ergibt sich eine Überlagerung von vielen Stromrichterkanälen. Wie oben wird allerdings nur das Zusammenwirken von zwei Kanälen betrachtet.

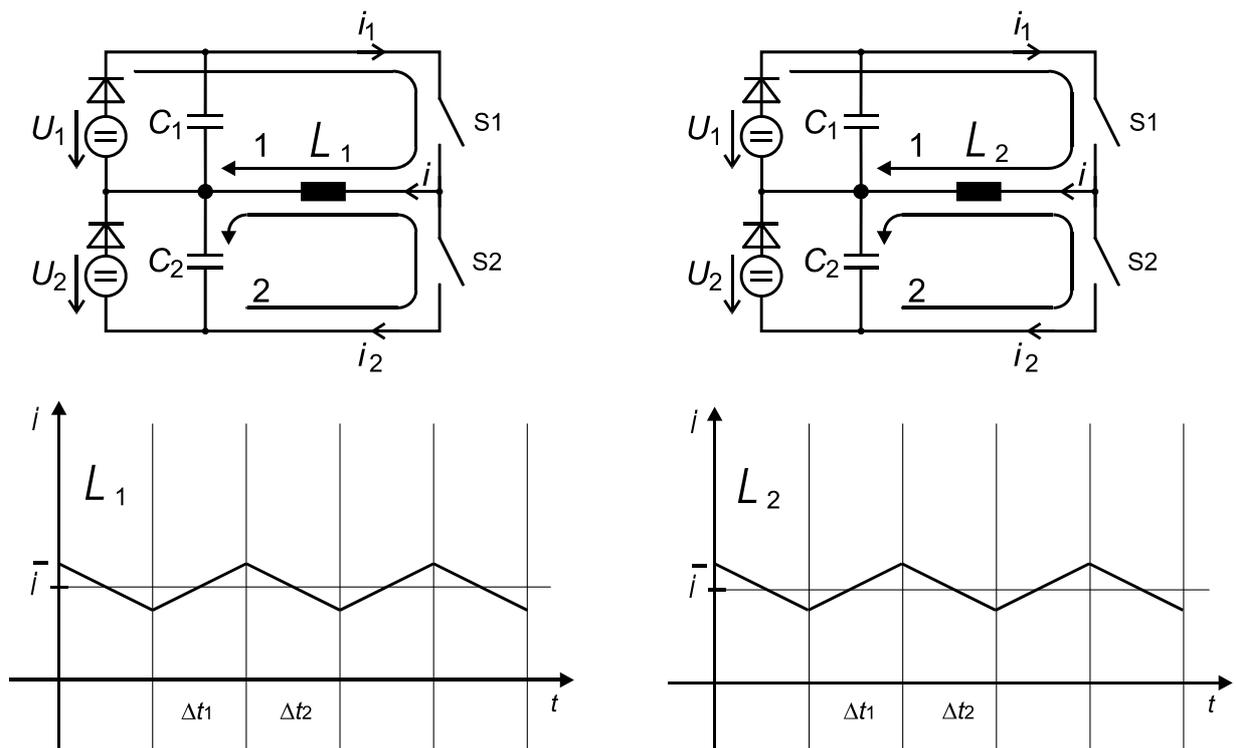


Bild 5.10 Stromrichterkanäle mit gleicher Stromrichtung und gleicher Phase

Zuerst werden zwei Motorwicklungen betrachtet, durch die ein gleicher konstanter Strom fließt (Bild 5.10). Beide haben die gleiche Phasenlage, d.h. die Schaltsignale für Schalter S1 bzw. für Schalter S2 werden zu den gleichen Zeitpunkten generiert. Man kann erkennen, dass in den gleichen Zeitbereichen Δt_1 der Strom ansteigt und in den anderen gemeinsamen Zeitbereichen Δt_2 der Strom wieder abfällt.

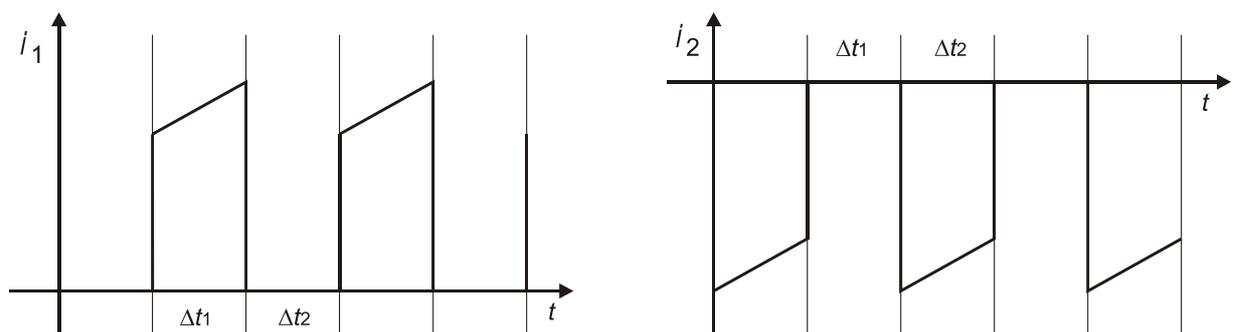


Bild 5.11 Stromverlauf in den Zuleitungen zu den Stromrichterplatten bei gleichem Vorzeichen und gleicher Phase

Betrachtet man nun den Stromfluss, so erkennt man, dass im Zeitbereich Δt_1 (Schalter S1 ist geschlossen) der gesamte Strom aus dem Netzteil gespeist werden muss (Bild 5.11 links). Im Zeitbereich Δt_2 erfolgt kein Stromfluss über die Zuleitung vom oberen Netzteil. Stattdessen

fließt zu dieser Zeit eine größere Ladung auf den Kondensator (Bild 5.11 rechts). Aufgrund der Definition der Stromrichtung ist dieser Strom negativ eingezeichnet. Insgesamt lässt sich erkennen, dass eine große kurzzeitige Beanspruchung des Netzteils und des Kondensators vorliegt.

Als nächstes werden zwei Stromrichterkanäle betrachtet, die wie oben einen Strom mit gleichem Vorzeichen führen. Allerdings sind hier die beiden Schaltzustände um eine halbe Periode phasenverschoben (Bild 5.12). Diese Verschiebung kann dadurch erzielt werden, dass beim Stromregler die Dreiecksspannung invertiert wird.

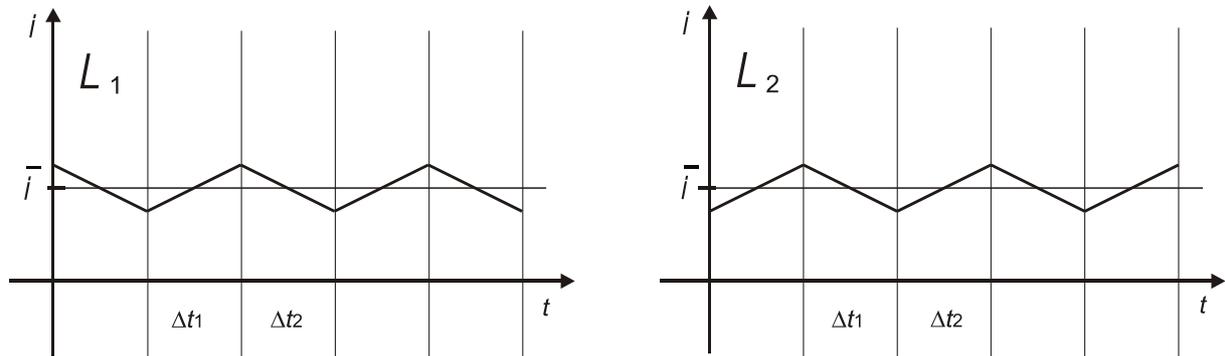


Bild 5.12 Verlauf der Ströme bei gleichem Vorzeichen aber verschiedener Phase

Während bei dem einen Kanal der obere Schalter S1 geschlossen ist und damit der Strom ansteigt, ist beim anderen Kanal der untere Schalter S2 geschlossen und der Strom fällt ab.

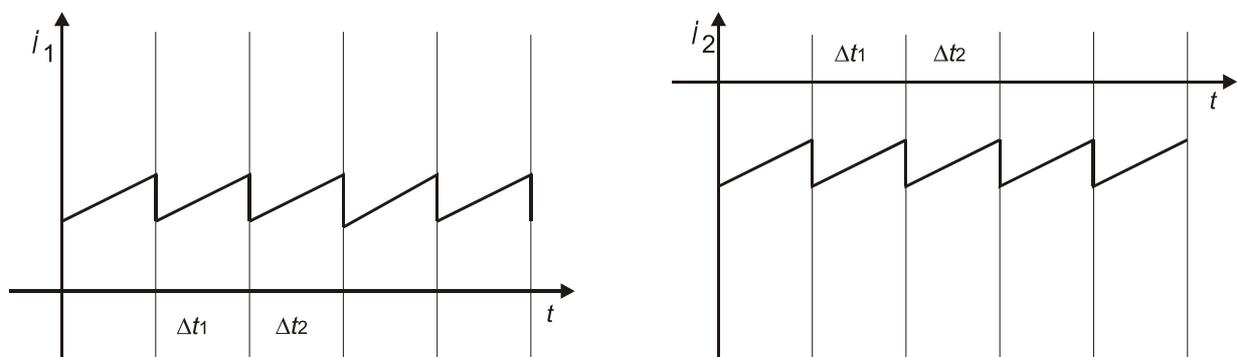


Bild 5.13 Stromverlauf in den Zuleitungen zu den Stromrichterplatinen bei gleichem Vorzeichen aber verschiedener Phase

Betrachtet man nun über einen längeren Zeitbereich den Strom i_1 und i_2 in den Zuleitungen der Motorwicklung (Bild 5.13), so erkennt man, dass im Mittel der gleiche Strom fließt wie in dem vorherigen Beispiel. Allerdings ist die kurzfristige Belastung, d.h. die maximalen Stromwerte und die Sprünge in den Stromverläufen, für das Netzteil und den Kondensator wesentlich geringer.

Wie in Kapitel 5.3.1 angeführt, ist eine Bestromung von allen Kanälen mit einem Strom von gleichem Vorzeichen nicht sinnvoll. Abhängig von den Regelungsalgorithmen kann es

temporär Zustände geben, bei denen die positive oder die negative Bestromungsrichtung überwiegt, aber im Mittel wird die Summe aller Ströme Null ergeben.

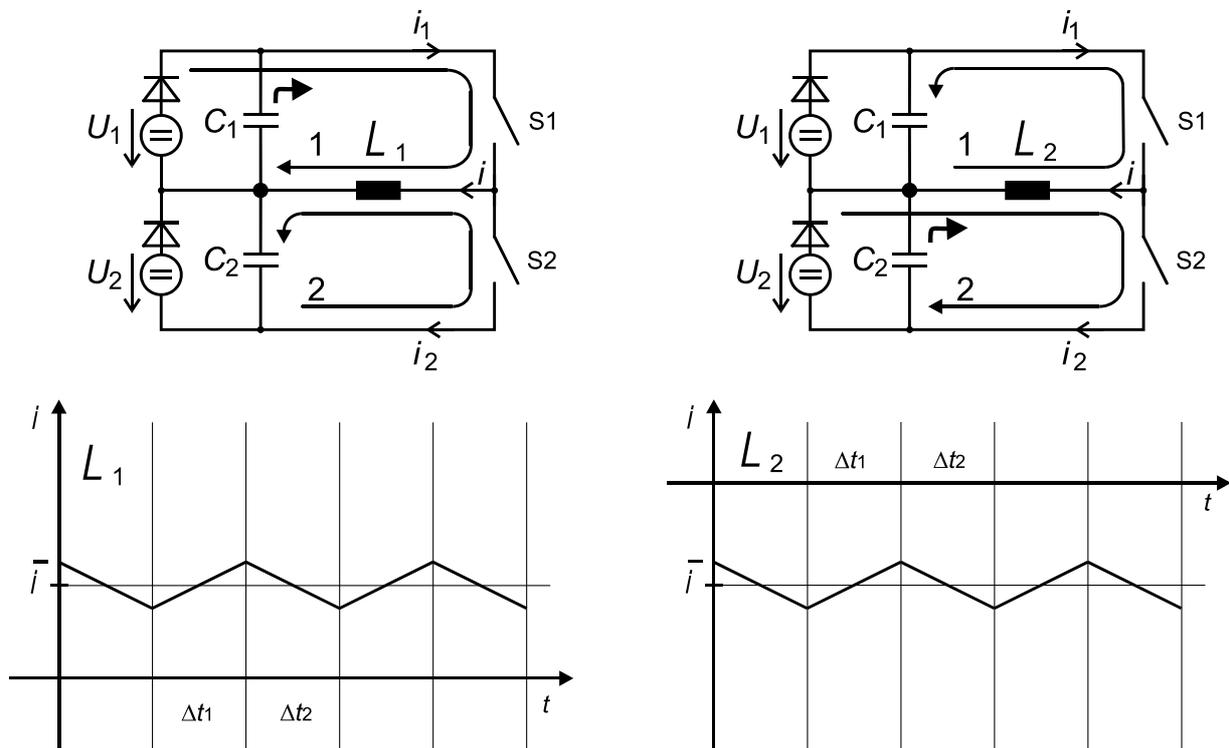


Bild 5.14 Stromrichterkanäle mit verschiedener Stromrichtung und gleicher Phase

Im nächsten Beispiel fließt durch die eine Motorwicklung ein positiver Strom und durch die andere Motorwicklung ein negativer Strom (Bild 5.14). Zu beachten ist, dass in den Ersatzschaltbildern die Richtungen der Strompfeile beibehalten wird und sich daher bei negativer Stromrichtung das Vorzeichen im Stromdiagramm umkehrt. Beide Schaltungen besitzen die gleiche Phase, d.h. jeweils im Zeitbereich Δt_1 sind die oberen Schalter S1 geschlossen und im Zeitbereich Δt_2 sind die unteren Schalter S2 geschlossen.

Erfolgt in der linken Schaltung ein Stromanstieg in der Induktivität L_1 , so wird die benötigte Energie aus dem oberen Netzteil geliefert, bzw. aus dem oberen Kondensator C_1 , falls dieser aufgrund von einem Ladungsüberschuss eine höhere Spannung besitzt. Erfolgt ein Stromabfall, so kann die überschüssige Energie aufgrund der Schutzdiode nicht in das untere Netzteil fließen. Stattdessen fließt die Ladung auf den unteren Kondensator C_2 . Bei der rechten Schaltung kann in diesem Moment die überschüssige Ladung aus dem Kondensator C_2 für den Stromanstieg in der Induktivität L_2 genutzt werden. Falls benötigt liefert das untere Netzteil zusätzliche Energie. Fällt der Strom an L_2 wieder ab, so wird die überschüssige Energie in den Kondensator C_1 zurück gespeist. Von hier kann die Ladung wieder in die linke Schaltung (L_1) fließen.

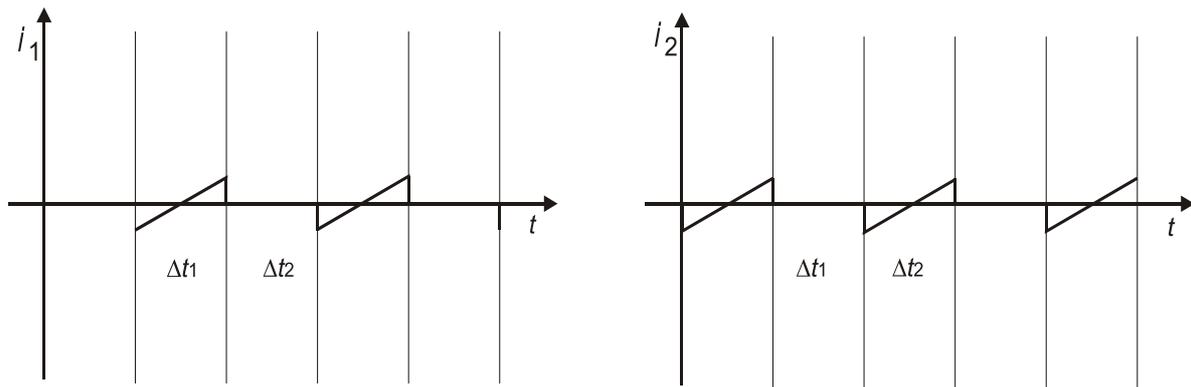


Bild 5.15 Stromverlauf in den Zuleitungen zur Motorwicklung bei verschiedenem Vorzeichen und gleicher Phase

Wie Bild 5.15 zeigt, ergibt sich aus der Überlagerung der beiden Schaltungen nur noch ein sehr geringer Anteil, der aus den Netzteilen bzw. aus den Kondensatoren gespeist werden muss. Liegen die Stromrichterkanäle an einer gemeinsamen Versorgungsschiene der Zwischenkreisspannung, so kann die freiwerdende Energie beim Abmagnetisieren direkt zum Aufmagnetisieren der nächsten Induktivität verwendet werden, ohne dass Energie in die Kondensatoren ein- oder ausgelagert werden muss. Lediglich die auftretenden Verluste müssen gespeist werden, bzw. die Energie die für einen Beschleunigungsvorgang des Motors notwendig ist.

Bei der Auslegung des Stromrichters und zur Analyse der verschiedenen Schaltungen und Ansteuerungsverfahren wurden Simulationen mit dem Programm PSpice der Firma MicroSim gemacht. Dabei wurde ein einzelner Kanal mit seiner analogen Stromregelung sehr exakt modelliert. Bei den obigen theoretischen Betrachtungen wurden ideale Bauelemente und ideale Zuleitungen angenommen. Folgende Unterschiede sind allerdings beim realen Antrieb gegeben und wurden bei den Simulationen berücksichtigt:

- Die Motorwicklung besitzt neben der Induktivität auch einen nicht zu vernachlässigenden ohmschen Anteil. Dieser verursacht Verluste, die aus dem Zwischenkreis mit gespeist werden müssen.
- Die langen Zuleitungen vom Schaltschrank zum Motor haben ebenfalls zusätzliche ohmsche Verluste.
- Die Verbindungsleitungen zum Zwischenkreis besitzen eine Induktivität und können bei den Schaltvorgängen Spannungsspitzen verursachen.
- Neben den Kondensatoren der Netzteile und den großen Zwischenkreiskondensatoren gibt es kleinere Stützkondensatoren auf jeder Stromrichterplatine. Die Kopplung dieser vielen unterschiedlichen Kapazitäten über die induktiven Leitungen könnten Schwingungen im System hervorrufen, was aber bei den praktischen Untersuchungen nicht festgestellt wurde.

Bei der Simulation von mehreren Kanälen wird das Modell sehr komplex. Bei der Simulation von 96 einzelnen Stromrichterkanälen müssen nicht nur alle Einzelsysteme entsprechend oft dargestellt werden, sondern auch die Leitungsverbindungen aufgrund der räumlichen Anordnung spielen eine Rolle. Als Beispiel ist eine Simulation mit zwei separaten Stromrichterkanälen in Bild 5.16 dargestellt. Die Schaltzeitpunkte wurden durch die Pulsspannungsquellen ($V3$ und $V4$) vorgegeben und liefern die gleichen Signale wie bei der Stromregelung.

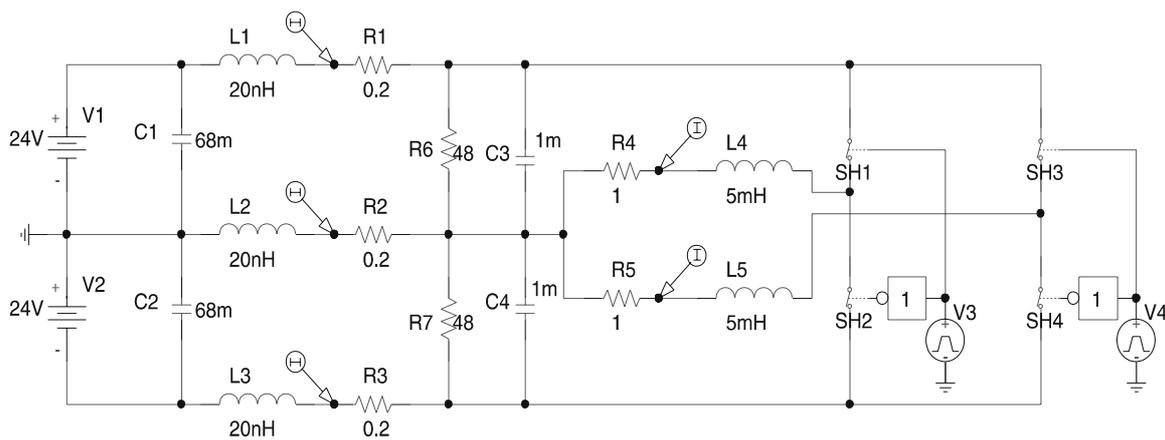


Bild 5.16 PSpice-Simulationsschaltbild von zwei Stromrichterkanälen

Neben den Spannungsquellen und den großen Zwischenkreiskondensatoren ($C1$ und $C2$) sind die Stützkondensatoren ($C3$ und $C4$) modelliert, die sich auf jeder Stromrichterplatine befinden. Zwar sind die Kondensatoren auf jeder Platine relativ klein, da aber alle Platinen an dem gemeinsamen Zwischenkreis hängen, ergibt sich die Größe aus der Parallelschaltung aller Kondensatoren. Die Motorwicklungen und deren Zuleitungen werden durch eine Induktivität ($L4$ und $L5$) und einem ohmschen Widerstand ($R4$ und $R5$) dargestellt. Die Widerstände $R6$ und $R7$ repräsentieren eine Grundlast, die durch die Versorgung der Operationsverstärker der Stromregelung gegeben sind.

In Bild 5.17 ist das Ergebnis einer Simulation mit einem positiven Stromfluss durch die beiden Wicklungen $L4$ und $L5$ gegeben. Die idealisierte Betrachtung erfolgte in Bild 5.10. Die Ströme sind betragsmäßig gleich groß (4 A) und liegen mit ihren Schaltzeitpunkten in Phase. Analysiert man die Ströme, welcher vom positiven und negativen Zwischenkreis fließen (i_{+DC} und i_{-DC}) (gemessen an $R1$ und $R3$), so stellt man fest, dass nach dem Stromanstieg dieser nicht auf Null zurück geht, sondern nach einer Exponentialfunktion abnimmt. Dieses Verhalten ist durch die zusätzlichen Kondensatoren ($C3$ und $C4$) auf den Stromrichterplatinen zu erklären. Der größere Stromfluss aus dem positiven Zwischenkreis ist durch die zusätzlichen Verbraucher ($R6$ und $R7$) begründet. Die Summe der Spulenströme fließt über den gemeinsamen Mittelpunkt zurück (i_{0DC}) (gemessen an $R2$). Man kann erkennen, dass auf dem oberen und dem unteren Zwischenkreisstrom ein deutlicher Rippel überlagert ist, der durch das synchrone Auf- und Abmagnetisieren der Induktivitäten erzeugt wird.

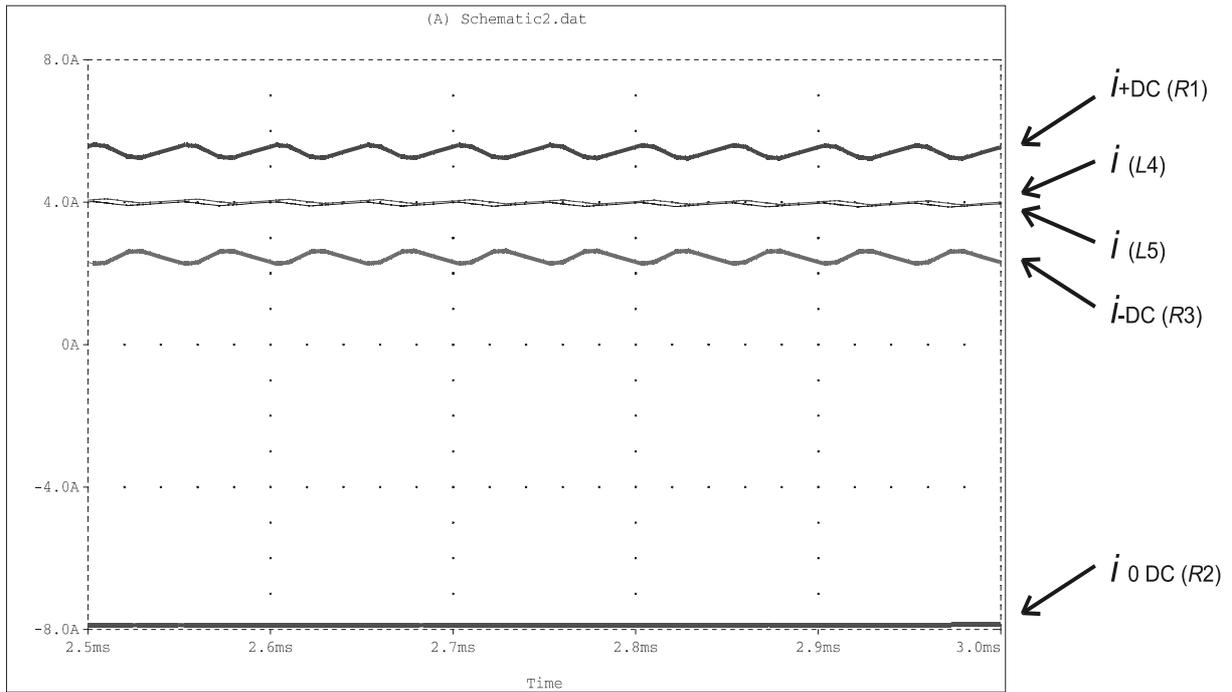


Bild 5.17 Zwischenkreisströme bei zwei positiven Spulenströmen

Die Simulationsergebnisse in Bild 5.18 stammen von einem positiven Stromfluss durch $L4$ und einem negativen Stromfluss durch $L5$. Das Verhalten wurde idealisiert in Bild 5.14 betrachtet. Man kann erkennen, dass sich die beiden Ströme durch die Motorwicklung kompensieren und der Rückfluss in den Mittelpunkt (i_{0DC}) Null ergibt.

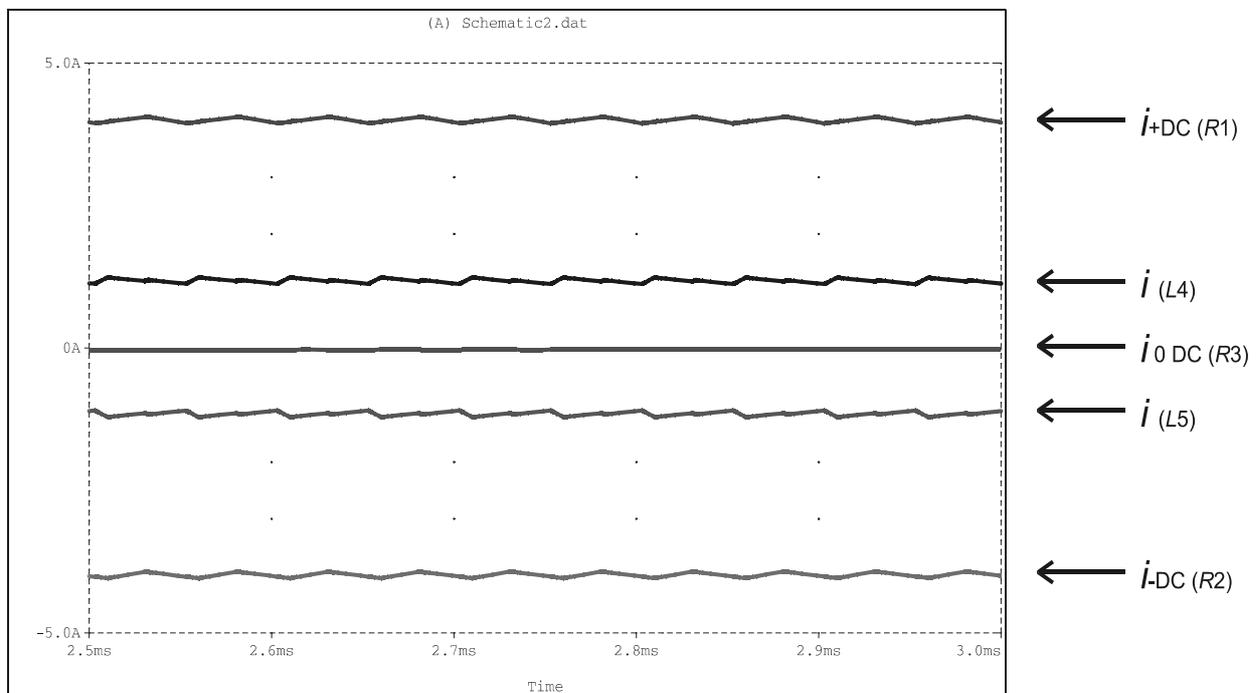


Bild 5.18 Zwischenkreisströme bei einem positivem und einem negativem Spulenstrom

Der Stromfluss in den beiden Zwischenkreisen (i_{+DC} und i_{-DC}) ist gleich groß, womit sich eine gleichmäßige Belastung der Netzteile ergibt. Es ist weiterhin ein nur sehr geringer Stromrippel auf den Zwischenkreisleitungen (i_{+DC} und i_{-DC}) vorhanden, wie es in den idealisierten Betrachtungen (Bild 5.15) schon gezeigt wurde. Bei der Bestromung mit zwei Strömen mit gleichem Vorzeichen ist dieser Stromrippel (vgl. Simulation von Bild 5.17) drei mal so groß.

5.3.4 Messtechnische Untersuchungen

In diesem Abschnitt werden einige messtechnische Untersuchungen erläutert, die die allgemeine Funktion und das Betriebsverhalten des Stromrichters beschreiben. Mit den idealisierten Betrachtungen und einfachen Simulationen aus dem vorherigen Abschnitt, wurden nur einfache Anordnungen beschrieben. Bei der großen Anzahl an unabhängigen Stromrichterkanälen ist eine Gesamtsimulation sehr komplex und schwierig zu modellieren. Die messtechnischen Untersuchungen dienen dazu, die generelle Funktionsfähigkeit des Systems zu verifizieren und mögliche parasitären Effekte und ihre Auswirkungen aufzuzeigen. Hierbei werden die Messungen nur qualitativ dargestellt. Eine quantitative Betrachtung der dabei auftretenden Verluste, geschieht im nachfolgenden Abschnitt.

Bei der Modellierung und Simulation war jeder Punkt der Schaltung analysierbar. Beim realen Aufbau ist dies nur eingeschränkt möglich, da durch den kompakten Aufbau nicht alle Punkte frei zugänglich sind. Die Platzierung von Strommesszangen ist daher nur an ausgewählten Punkten möglich. Weiterhin wurden nur quasistationäre Zustände betrachtet, d.h. der mittlere Strom ist annähernd konstant. Dies ist soweit zulässig, da die Umdrehungsgeschwindigkeit des Motors sehr langsam ist, und sich damit der mittlere Strom innerhalb einer Schaltperiode nicht ändert.

Für den Stromrichter des Kugelmotors wurde nach den vorhergehenden Untersuchungen ein Takt mit einer festen Phasenbeziehung für alle Stromrichterkanäle vorgegeben. Dies bedeutet, dass alle Stromreglerschaltungen ein Dreieckssignal zum Vergleich benutzten, welches zu einem zentralen Taktsignal abgestimmt ist. Durch die unterschiedlichen Stromgrößen kommt es im Betrieb des Motors zu unterschiedlichen Schaltzeitpunkten der einzelnen Kanäle, wie es in Bild 5.5 skizziert wurde.

Zunächst wurde der Betrieb einzelner Stromrichterkanäle und der daraus resultierende Stromfluss untersucht. Bild 5.19 zeigt den Stromverlauf bei Bestromung von zwei Statorspulen mit positivem Strom. Wie in der Simulation (Bild 5.18) ist der Rückstrom in den Mittelpunkt annähernd konstant (Kurve 2 mit ca. -8 A). Der Stromfluss zur positiven (Kurve 1) und negativen (Kurve 2) Zwischenkreisschiene weist deutliche Stromrippel auf.

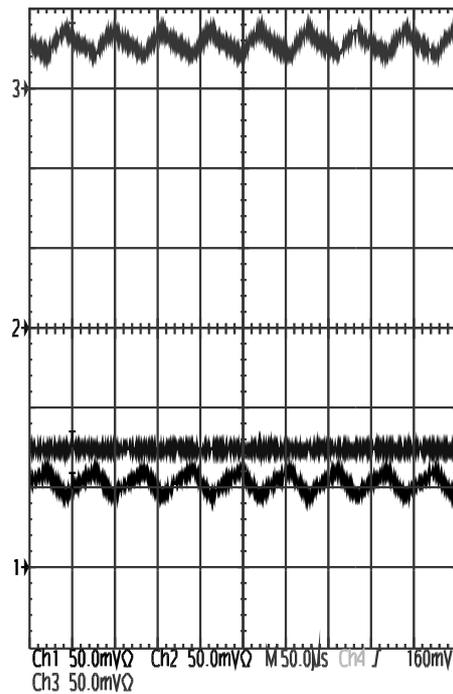


Bild 5.19 Strommessung bei positiver Bestromung von zwei Kanälen

Werden nicht nur zwei Spulenwicklungen mit gleicher Richtung bestromt, sondern eine große Anzahl, so ergibt sich ebenfalls eine Überlagerung mit ausgeprägten Stromrippeln. Bild 5.20 zeigt eine Messung bei Bestromung von 16 Statorwicklungen.

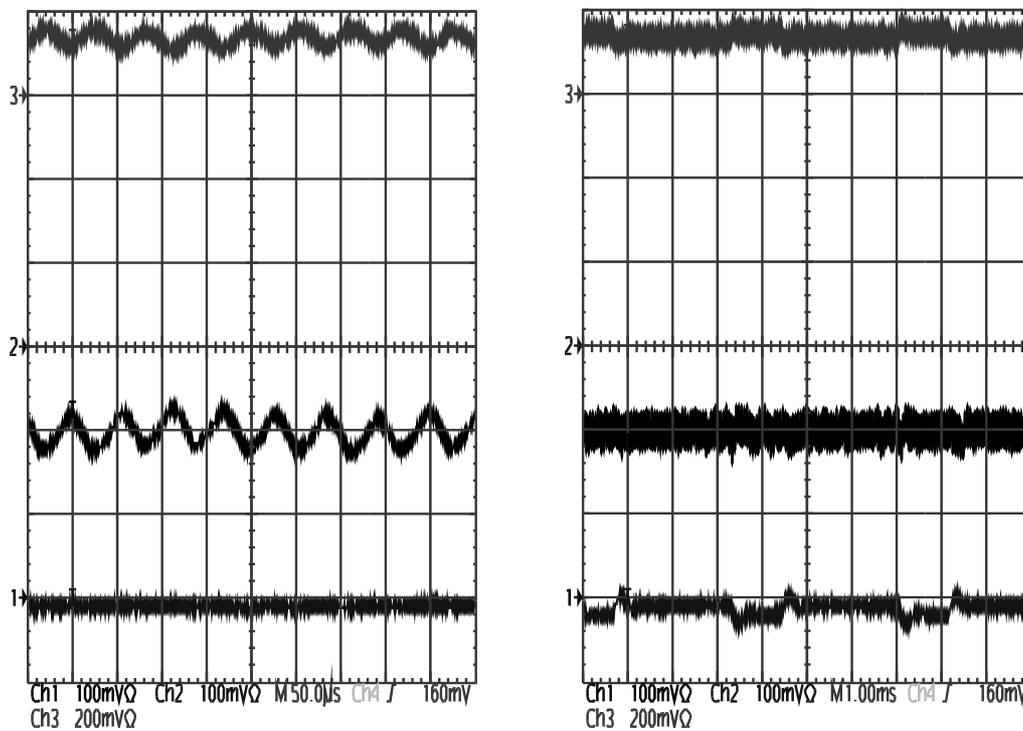


Bild 5.20 Strommessung bei positiver Bestromung von 16 Kanälen (bei zwei unterschiedlichen Zeitbereichen aufgenommen)

Bei einem größeren Zeitmaßstab in Bild 5.20 rechts sind leichte Schwankungen im Stromverlauf zu erkennen. Diese rühren daher, dass zu bestimmten Zeitpunkten der Bremschopper aktiviert wird. Bei positivem Strom in den Wicklungen fließt die Ladung auf den Kondensator des negativen Zwischenkreises, so dass nach Zuschaltung des Bremswiderstandes ein zusätzlicher Stromanteil über die Null-Schiene (Kurve 2) und die negative Schiene (Kurve 3) fließt.

Der Einfluss des Bremschoppers ist auch auf der Netzteilseite messbar. In Bild 5.21 links ist das Schalten des Bremschoppers, bei Bestromung von 16 Kanälen mit positiver Stromrichtung, zu erkennen. Die leichten Schwankungen bei Kanal 1 sind als Übersprechen der Messleitungen zu interpretieren, da der positive Bremschopper nicht aktiv ist. Auf dem rechten Bild ist der Strom, bei Bestromung von 16 Kanälen mit positiver und 16 Kanälen mit negativer Stromrichtung, zu erkennen, wobei keine Aktivierung des Bremschoppers erfolgt.

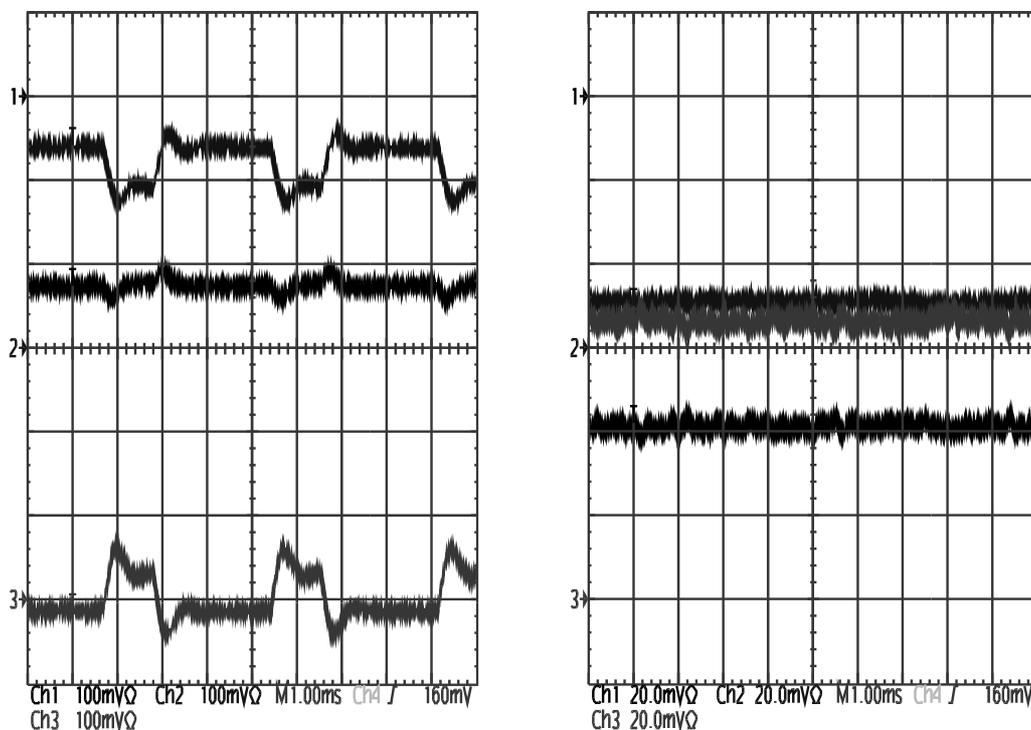


Bild 5.21 Strommessung am Netzteil (DC) bei unsymmetrischer (links) und bei symmetrischer Belastung (rechts)

Bei unsymmetrischer Belastung der Stromrichterkanäle, d.h. die Summe der positiven Ströme in den Wicklungen ist viel größer als die Summe der negativen Ströme (oder umgekehrt) wird der Bremschopper aktiviert. Als Entscheidungsmaß wird die Zwischenkreisspannung am Kondensator herangezogen. Wird durch die zufließende Ladung eine Spannungsgrenze überschritten, so erfolgt ein Zuschaltung des Bremswiderstandes. Nachdem genügend Ladung abgeflossen ist, wird bei einer niedrigeren Spannungsgrenze der Bremschopper wieder deaktiviert. Bei einer kleinen Unsymmetrie wird der Bremswiderstand nicht zugeschaltet, da die rückfließenden Ströme zur Grundversorgung der Regelungselektronik genutzt werden können. Bild 5.22 zeigt das Verhalten auf den Zuleitungen zum Bremschopper bei großer

positiver Bestromung von mehreren Spulen. Die obere glatte Kurve zeigt die Zuleitung zur positiven Schiene, was bedeutet, dass der Bremschopper zur positiven Zwischenkreisspannung nicht aktiv ist.

Die beiden unteren Kurven in Bild 5.22 zeigen die Kurven zum und vom Bremschopper der negativen Zwischenkreisspannung. Betriebsbedingt durch die Rückspeisung der Stromrichter kann jeweils nur ein Bremschopper aktiv sein. Bei zu viel überschüssiger Ladung auf einem Zwischenkreis könnte über einen DC/DC-Wandler die Energie auf den anderen Zwischenkreis transferiert werden. Auch eine Rückspeisung in das Versorgungsnetz wäre möglich. Allerdings hat sich bei den praktischen Versuchen gezeigt, dass der Bremschopper fast nie aktiv ist, d.h. es wird keine überschüssige Energie in Wärme umgesetzt.

Abschließend wird noch das Verhalten bei autark laufenden Stromrichtern dokumentiert. Für die Untersuchungen wurde der Taktgenerator entfernt. Da nun keine Synchronisation stattfinden kann, laufen alle Stromrichterkanäle mit einer eigenen Dreiecksfrequenz, welche zur Generierung der Schaltsignale genutzt wird. Diese Eigenständigkeit ist sinnvoll, da im Falle eines Fehlers, bei welchem der zentrale Takt ausfällt, das System weiter aktiv ist und der Antrieb nicht abgeschaltet werden muss. Bild 5.23 zeigt den Stromfluss von den Netzteilen in den Zwischenkreis. Dabei sind Schwebungen mit einer großen Amplitude zu erkennen. Dieser in Abschnitt 5.3.2 beschriebene Fall, muss im Betrieb vermieden werden.

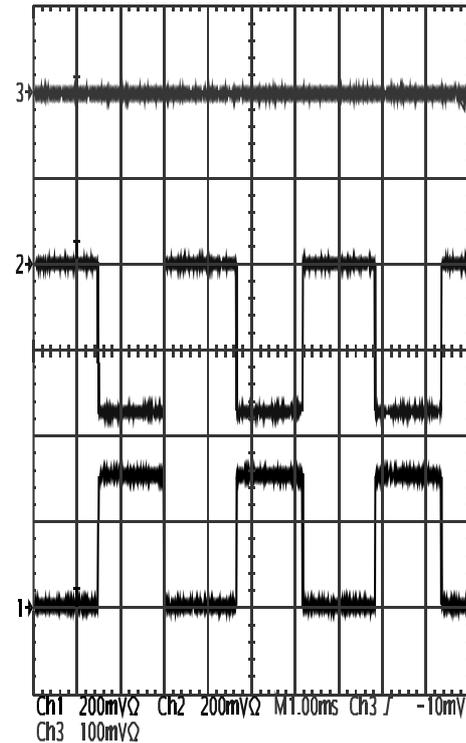


Bild 5.22 Strommessung in den Zuleitungen zum Bremschopper

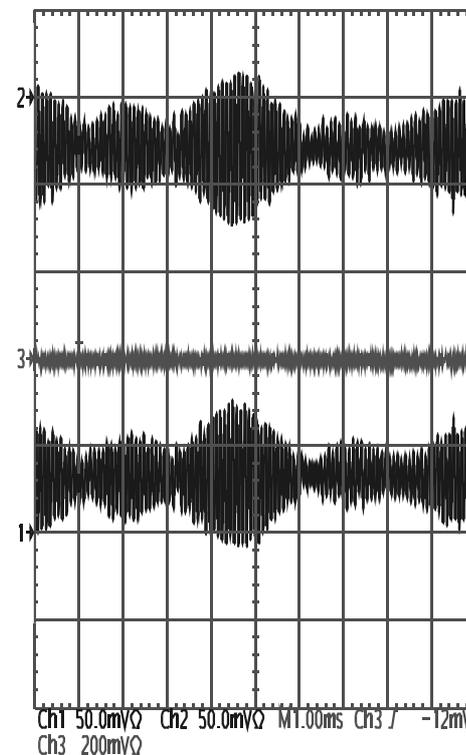


Bild 5.23 Strommessung bei nichtsynchronisierten Stromrichterkanälen

5.4 Zusammenfassung

Aufgrund des besonderen Konzeptes des permanentmagnetischen Antriebes mit mehreren Freiheitsgraden können keine Standardkomponenten verwendet werden. Daher wurde für die Regelung eine spezielle Hardware entwickelt, die mit ihren digitalen Signalprozessoren besonderen Anforderungen gerecht wird. Neben der hohen Rechenleistung mit entsprechend großem Speicher ist ein effizienter Datenaustausch zwischen den einzelnen Regelungskarten mit einer Parallelverarbeitung von Prozessen vorhanden. Weiterhin existiert eine große Anzahl von analogen Kanälen zur Ausgabe von Stromsollgrößen für die Leistungselektronik.

Das Grundkonzept des Kugelmotors erfordert, dass jeder Stromrichterkanal individuell, anhand eines vorgegebenen Sollwertes, einen Strom einstellen muss. Zu diesem Zweck wurden Stromrichterplatinen aufgebaut, die jeweils vier Kanäle mit analogen Stromregelkreisen besitzen. Abhängig von der Kanalanzahl und der benötigten Gesamtleistung wurde sowohl beim Flächenmotor als auch beim Kugelmotor ein modularer Aufbau des Stromrichters realisiert. Ausgehend von dem Schaltverhalten jedes einzelnen Kanals wurde das Zusammenspiel der Kanäle untersucht, die mit einem gemeinsamen Takt für ein synchrones Schaltverhalten betrieben werden. Negative Auswirkungen aufgrund von Modulationen bei unterschiedlichen Schaltfrequenzen im Hinblick auf die Krafterzeugung und die Spitzenbelastung der Netzteile und Zwischenkreiskondensatoren werden dadurch vermieden. Messtechnische Untersuchungen am Flächen- und Kugelmotor haben gezeigt, dass ein störungsfreier Betrieb mit genügend Leistungsreserven möglich ist.

6 Simulationen und experimentelle Untersuchungen

Bei Simulationen wird mit Hilfe von leistungsfähigen Rechnern das Systemverhalten detailliert beschrieben. Änderungen können schnell in das vorhandene Modell implementiert und dementsprechend die Regelparameter angepasst werden. Da nicht alle externen Störeinflüsse berücksichtigt werden und die Modellierungen Fehler aufweisen können, sind experimentelle Untersuchungen notwendig, um die Leistungsfähigkeit des Systems und der dazugehörigen Regelung zu verifizieren. Dies ist auch bei dem vorgestellten neuartigen Konzept des Flächen- und Kugelmotors der Fall.

Zunächst wurden mit einem PC verschiedene Regelungsstrategien untersucht. Die unterschiedlichen Regelungskonzepte wurden in ihrer Grundfunktion in Kapitel 4 dargestellt. Die Ergebnisse der Simulationen werden im Folgenden dargestellt. Des Weiteren erfolgt eine Beschreibung, wie die Regelungs- und Modellstrukturen auf der Zielhardware implementiert sind. Dies veranschaulicht, in welcher Weise sowohl die Regelung als auch das Motormodell auf den digitalen Signalprozessoren abläuft, welche auch bei der späteren Regelung des Antriebes verwendet werden. Erläuterungen zu den experimentellen Erkenntnissen und zur Leistungsfähigkeit runden das Kapitel ab.

6.1 Entwicklungsschritte und Arbeitsumgebung

Die Simulationen des Motormodells und der Regelung wurden auf dem PC mit Hilfe des Programmpaketes Matlab/Simulink der Firma "The MathWorks" durchgeführt. Der Entwurf mittels graphischer Programmblöcke erwies sich zunächst als geeignete Möglichkeit ein einfaches System zu beschreiben. Allerdings wird mit steigender Komplexität der Gesamtanordnung eine graphische Darstellung recht unübersichtlich und die Änderung von lokalen Parametern aufwendig. Daher wurden speziell für den Kugelmotor die mathematischen Unterroutinen in einer "C"-ähnlichen Hochsprache implementiert und in die Simulink-Blöcke eingebunden. Dies hat weiterhin den Vorteil, dass Programmteile schnell auf die Prozessoren der ISEADSP-Karte adaptiert werden können. Für die Programmentwicklung stand die integrierte Entwicklungsumgebung Visual-DSP der Firma Analog Devices zu Verfügung. Die gesamte Regelungsstruktur wurde in der Hochsprache C entwickelt, wobei der vorhandene Compiler die spezielle Architektur des digitalen Signalprozessors bei der Erstellung des Programmcodes mit berücksichtigt. Für zeitkritische Aufgaben und für spezielle Routinen, die einen Zugriff auf Hardwarekomponenten ermöglichen, ist in den Programmablauf auch schneller Assembler-Maschinencode implementiert worden.

Beim Entwurf der Regelung für den Flächenmotor wurden, nach Simulationen auf dem PC, die Algorithmen auf dem DSP implementiert und direkt am realen Motor erprobt. Es wurden keine Simulationen auf der Zielhardware vorgenommen, da diese nur mit verminderter Leistungsfähigkeit (nur ein DSP und wenig statischem Speicher) zur Verfügung stand. Beim Regelungsentwurf für den Kugelmotor wurden dagegen die Entwürfe der PC-Simulation zunächst auf der Zielhardware, die aus einem Cluster von drei ISEADSP-Karten besteht, getestet. Dazu wurden sowohl die Regelung als auch das Motormodell auf den DSPs implementiert. Pro Regelungsschritt des Regelkreises wurde das Modell 10 mal berechnet, um so ein quasikontinuierliches Verhalten des Motors zu simulieren. Vorrangiges Ziel war dabei, die Lauffähigkeit des erstellten Programmcodes zu überprüfen. Die Berechnung der Algorithmen in Echtzeit, hängt nicht nur von der Leistungsfähigkeit der einzelnen Prozessoren ab, sondern wird auch durch die Geschwindigkeit des Datenaustauschs und die Parallelisierbarkeit des Programms bestimmt.

Während beim Flächenmotor alle Berechnungen auf einem Prozessor ablaufen, werden beim Kugelmotor die Algorithmen auf mehrere Prozessoren verteilt (siehe Kapitel 6.3). Für den Regeltakt wird eine Zeit von 1 ms gewählt, wie sie bei konventionellen Antrieben vorkommt. Aufgrund der großen Massenträgheit des Motors und der beschränkten Dynamik des Stromrichters ist eine schnellere Taktfrequenz nicht sinnvoll. Für den Datenaustausch mit der Benutzerschnittstelle ist ein asynchroner Datenaustausch realisiert. Der Anwender kann über eine PC-LabView-Oberfläche (Bild 6.1) der Regelung Vorgaben machen (z.B. neue Sollposition und Regelparameter) und Systeminformationen abfragen (z.B. Istposition und Geschwindigkeit). Bei der Erfassung von Positionsdaten wird ein Zeitstempel mitgeschrieben, so dass eine spätere Auswertung mit äquidistanten Zeitschritten möglich ist. Durch die verwendete RS232 Schnittstelle ist die Bandbreite der Informationsübertragung begrenzt. Sollen sehr viele Daten aufgezeichnet dem PC übertragen werden, so muss die Möglichkeit der Zwischenspeicherung auf der DSP-Karte und ein nachträgliches Auslesen gewählt werden.

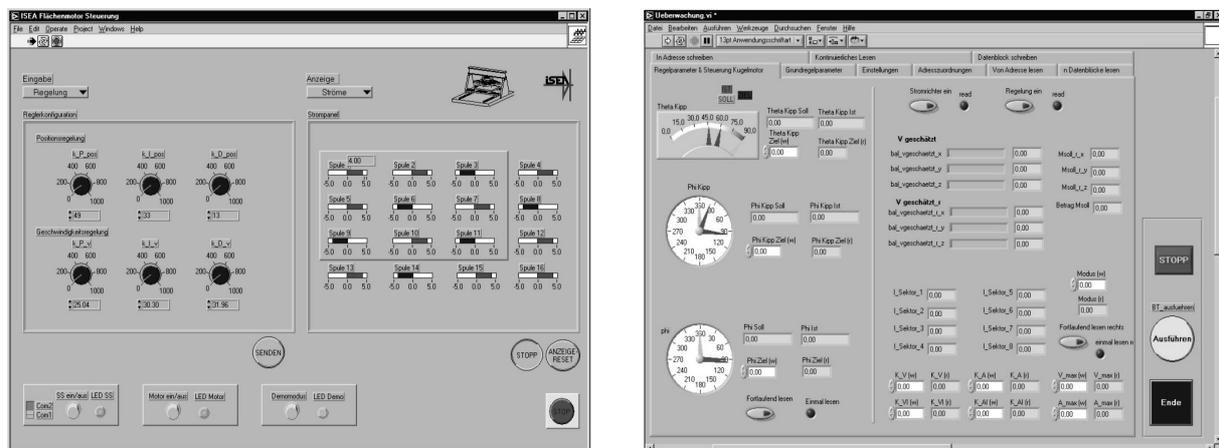


Bild 6.1 Beispiel PC-Benutzeroberfläche für Flächenmotor und Kugelmotor

Aufgrund des zweistufigen Regelungskonzeptes wurden beim Flächenmotor und beim Kugelmotor sowohl die Simulationen als auch die Experimente in zwei unterschiedliche Bereiche unterteilt: die Kraft/Momentenregelung des Stellgliedes und die Positionsregelung. Bei den Simulationen besteht der Vorteil, dass alle Größen und Zustände im System beobachtbar sind. Bei den experimentellen Untersuchungen können nur die Signale der vorhandenen Positionssensoren ausgewertet werden. Eine Messung der mehrdimensionalen Kräfte und Momente ist durch den gegebenen mechanischen Aufbau problematisch und störanfällig. Ein Vergleich zwischen Berechnung und Messung ist nur bedingt aussagekräftig, da beide Methoden fehlerbehaftet sind. Mit dem messbaren Positionssignal muss daher das innere Systemverhalten bestimmt werden.

6.2 Regelung des Flächenmotors

Für die Reglerauslegung beim Flächenmotor wurden zunächst Simulationen auf dem PC mittels graphischer Blöcke des Programmpaketes Matlab/Simulink gemacht. Die Schwierigkeit in der Systemmodellierung besteht darin, das Verhalten des Motors möglichst gut nachzubilden. So zeigten die Messungen zur Bestimmung der Kraftkennlinien Abweichungen zu den berechneten Kräften der FEM-Simulationen (Bild 6.2).

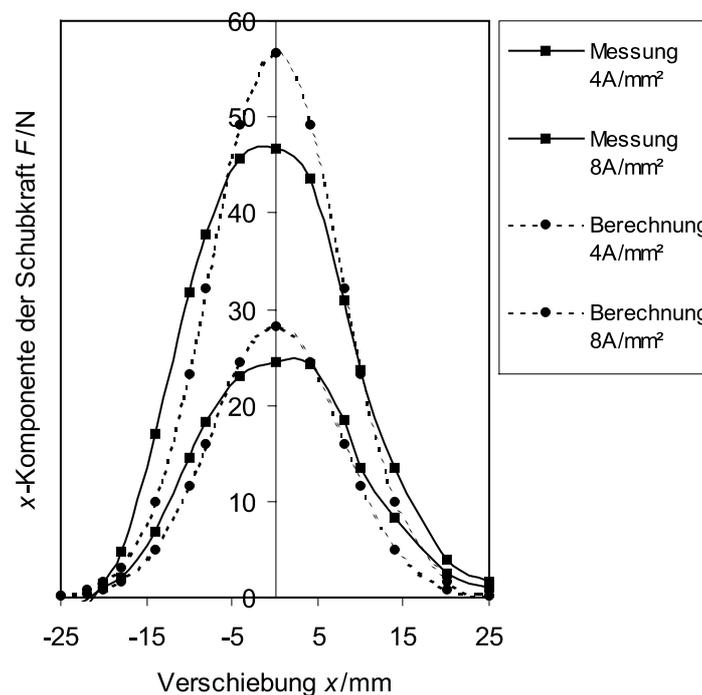


Bild 6.2 Vergleich der Kraftkennlinien aus Berechnung und Messung

Da in den Simulationen nicht alle Materialparameter exakt nachgebildet werden konnten und bei den Messungen auch Fehlerquellen vorhanden sind, besteht eine Unsicherheit in der Genauigkeit der verwendeten Kraftkennlinien. Für die Versuche wurden die Kennlinien der Messung genutzt, da sie das reale Systemverhalten widerspiegeln.

6.2.1 Stellglieder für die Kraftregelung

Beim Flächenmotor sind zur Erzeugung einer Vorschubkraft nur wenige Statorpole vorhanden. In Abhängigkeit der Position und der Bewegungsrichtung können daher teilweise nur drei der neun Spulenwicklungen genutzt werden. Beim **Vektorannäherungsverfahren** wird der angestrebte Kraftvektor sehr gut erreicht. Dabei wird immer eine bestimmte Reihenfolge in der Spulenansteuerung beibehalten. Die ersten Elemente der Reihe werden stärker belastet, wogegen die letzten Elemente nur selten genutzt werden. Beim **Vektorsortierverfahren** werden die Spulen gleichmäßiger belastet, d.h. durch die Nutzung vieler Spulenwicklungen gibt es keine Spitzenbelastung von einzelnen Polwicklungen. Da die ohmschen Verluste quadratisch mit dem Strom ansteigen und entsprechende Verlustwärme abgeben, können lokale Temperaturerhöhungen vermieden werden. Aufgrund der wenigen Spulen beim Flächenmotor müssen allerdings meist alle Spulen bestromt werden, was wiederum die Gesamtverlustleistung erhöht. Ein Vergleich der beiden Vektorverfahren erfolgt im nächsten Abschnitt im Zusammenhang mit der übergeordneten Positionsregelung. Eine genauere Bewertung ist allerdings erst bei einer größeren Anzahl an Spulenwicklungen möglich, wie sie beim Kugelmotor gegeben ist.

6.2.2 Positionsregelung und Bahnkurvensteuerung

Beim Regelungsentwurf des Flächenmotors war es das vorrangige Ziel, eine möglichst hohe Positioniergenauigkeit der Läuferplatte zu erzielen. Zunächst wurde beim Flächenmotor ein Regelkreis mit einer einfachen PID-Positionsregelung implementiert, die aufgrund der Differenz zwischen Istposition und Sollposition die entsprechenden Stellgrößen für die Stromrichter bestimmt. Die Reglerauslegung erfolgte dabei nach den Einstellregeln für Reglerparameter nach Takahashi in Anlehnung an Ziegler-Nichols [63]. Dabei wird der Regler zunächst nur als P-Regler ausgelegt und der Verstärkungsfaktor so weit vergrößert, bis das System zu Schwingungen neigt. Abhängig von diesem kritischen Verstärkungsfaktor werden der Verstärkungsfaktor und die Zeitkonstanten des integralen und differentiellen Anteils berechnet. Allerdings erwies sich diese einfache Regelungsstruktur im Hinblick auf die dynamischen Eigenschaften als nicht gut geeignet.

Die Regelungsstruktur wurde um eine innere Geschwindigkeitsregelung erweitert. Der Vorteil der kaskadierten Struktur liegt darin, dass Störungen schon im unterlagerten Regelkreis ausgeregelt werden können und nicht in die äußeren Kreise gelangen. Außerdem können Maximalwerte für Regelgrößen vorgegeben werden, die Grenzbedingungen des Antriebes darstellen oder zum Schutz des Motors vorgesehen sind. Die Auslegung der Regelparameter ist einfach durchführbar, wobei generell mit dem inneren Kreis der kaskadierten Struktur begonnen wird. Eine exakte Abstimmung dieser Parameter ist allerdings schwierig, da das System sehr große Nichtlinearitäten besitzt. Die Dimensionierung ist dabei stark von der Position abhängig. Dies wird durch Bild 6.3 verdeutlicht. Es ist jeweils die x-Koordinate von zwei diagonale Bewegungen dargestellt, bei denen unterschiedliche Start- und Zielpunkten aber gleiche Abstände vorgegeben waren. Bei gleichen Regelparametern sind unterschiedliche Einstellzeiten und verschiedene Überschwingverhalten erkennbar.

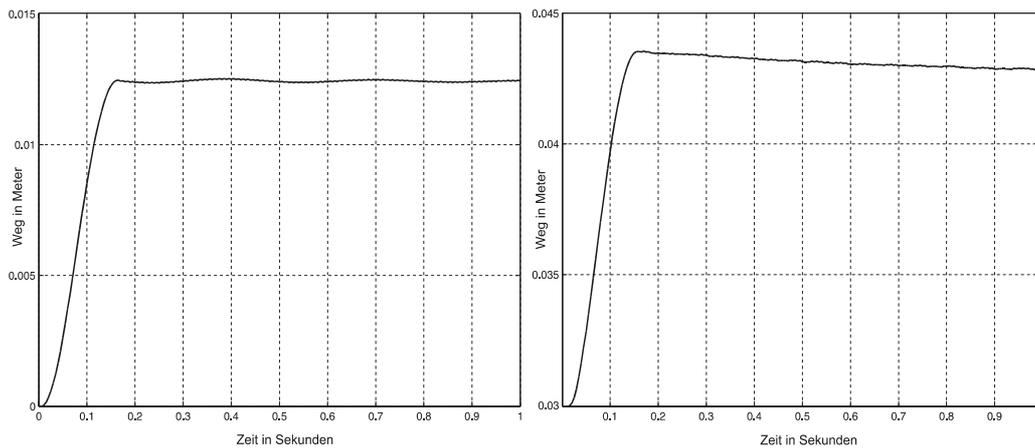


Bild 6.3 x- Position von zwei unterschiedlichen Verfahrenswegen mit gleicher Distanz

Bei den Untersuchungen am Versuchsstand traten bei sehr langsamen Geschwindigkeiten leichte Schwingungen auf. Diese rühren daher, dass die Position mit diskreten inkrementellen Werten bestimmt wird. Erfolgt nach einer Ruhestellung, bei der die Geschwindigkeit Null ist, eine Positionsänderung um ein Inkrement (in diesem Fall $5\ \mu\text{m}$), so ergibt dies einen Geschwindigkeitssprung aufgrund der kleinen Zeitkonstante ($1\ \text{ms}$). Dies ist besonders bei einer Positionsregelung problematisch, wenn in dem Zielpunkt ein labiles Gleichgewicht vorliegt. Um dies zu verhindern, wurde ein Algorithmus mit Filtereigenschaften nach [64] implementiert.

Dieser als "high-gain-structure" bezeichnete Algorithmus stellt eine Beobachterstruktur dar, die prinzipiell zur Kompensation von Störungen geeignet ist. Diese Störungen liegen bei dem hier betrachteten System darin, dass die Position nicht exakt, sondern nur durch Stufen in quantisierten Schritten und Abständen bestimmt werden kann.

$$\begin{aligned} v &= g \cdot (x - tmp) \\ tmp &= tmp + v \cdot \Delta t \end{aligned} \quad (6.1)$$

Um den bestehenden Geschwindigkeitsregler weiter zu nutzen, wird mit dem rekursiven Berechnungsschritt nach Gleichung (6.1) die Geschwindigkeit bestimmt. Dabei erfolgt eine starke Glättung mit einem kleinen Faktor g ähnlich einem Tiefpassfilter. Mit dieser Beobachterstruktur konnten die Schwingungen bei langsamen Bewegungen eliminiert werden. In Positionen, in denen ein labiles Gleichgewicht aufgrund der Rastkräfte herrscht, kann man kleine Auslenkungen um den Zielpunkt aufgrund der zeitdiskreten Regelungsschritte erkennen, aber es kommt zu keinen Instabilitäten aufgrund der ungenauen Geschwindigkeitsermittlung.

Die Untersuchungen konzentrieren sich beim Flächenmotor auf geradlinige und kreisförmige Bewegungen. Diese können durch einen Start und einen Zielpunkt beschrieben werden. Bei Kreisbögen muss zusätzlich der Mittelpunkt des Radius angegeben werden. Sollen mehrere Punkte nacheinander angefahren werden, so muss der Motor in den Zwischenpunkten jeweils

abgebremst werden. Die andere Möglichkeit ist, die Bahnkurve mittels Spline-Kurven zu runden, damit keine unerlaubt großen Querbeschleunigungen auftreten [4].

In Bild 6.4 ist ein gemessener geradliniger Fahrweg des Motors für verschiedene Regelungsstrukturen dargestellt. Dabei wird eine relativ große Änderung von 7 cm vorgegeben. Beim dem PI-Regler ist ein deutliches Überschwingen mit einem langsamen Abklingen der Schwingung zu erkennen. Das große Überschwingen ergibt sich aus dem großen Sprung der Führungsgröße und dem integralen Anteil. Ein integraler Anteil im Regler ist notwendig, da es keine statische Regelabweichung geben soll. Bei Systemen mit P- oder PD-Regler, verbleibt immer eine kleine Regelabweichung. Ist das System gut beschreibbar, so ist die Regelabweichung sehr gering und kann toleriert werden. Beim Flächenmotor handelt es sich allerdings um ein sehr komplexes nichtlineares System mit vielen Unbekannten. Von daher wurde das Verhalten eines PID-Reglers untersucht. Die Positionskurve des Motors mit dem PID-Regler in Bild 6.4 zeigt ebenfalls ein großes Überschwingen aufgrund des I-Anteils, hat aber eine schnellere Einstellzeit als ein PI-Regler. Mit der Bahnkurvensteuerung wird dem Motor zu jedem Zeitpunkt eine neue Sollposition vorgegeben, so dass kein großer Sollsprung vorliegt und damit kein Überschwingen erfolgt. Es können verschiedene maximale Geschwindigkeiten vorgegeben werden. Zu beachten ist, dass die dynamischen Fähigkeiten des Motors ausreichend groß sein müssen, um der Sollbahnkurve zu folgen.

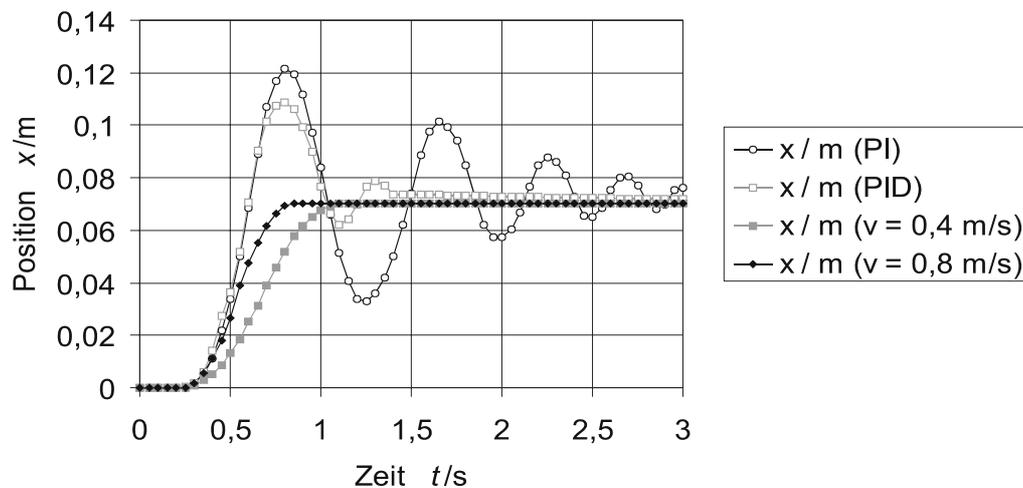


Bild 6.4 Vergleich von PI Regler, PID-Regler und Bahnkurvensteuerung nach dem Vektorannäherungsverfahren bei Messungen am Flächenmotor

In Bild 6.4 sind die Messkurven des Vektorannäherungsverfahrens und in Bild 6.5 des Vektorsortierverfahrens dargestellt. Beim Vektorsortierverfahren ist die Dynamik des Systems etwas schlechter, was auf eine verminderte Kraftbildung schließen lässt. Allerdings sind beim Flächenmotor zu wenige Statorwindungen vorhanden, um eine Aussage über die Qualität der unterschiedlichen Verfahren für den späteren Kugelmotor zu treffen. In der Positioniergenauigkeit im Zielbereich gibt es keine signifikanten Unterschiede der beide Vektorverfahren.

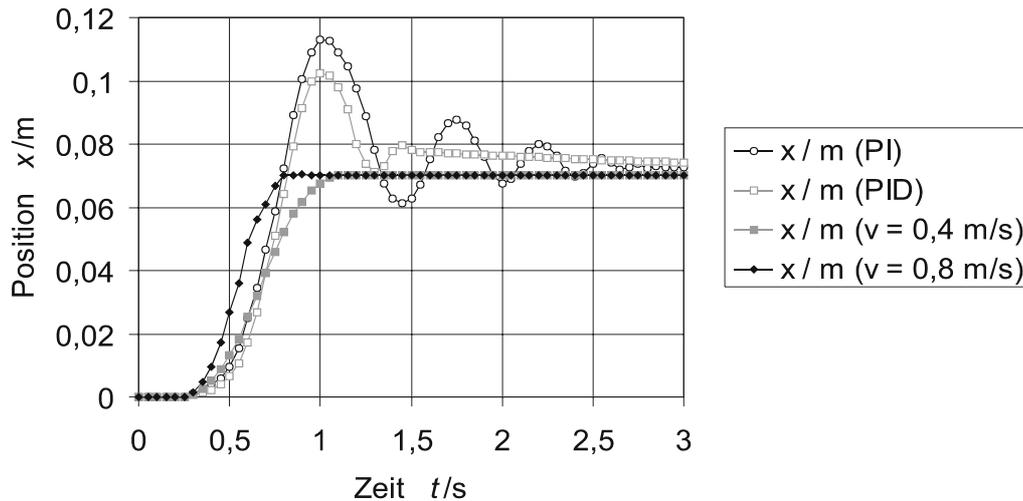


Bild 6.5 Vergleich von PI Regler, PID-Regler und Bahnkurvensteuerung nach dem Vektorsortierverfahren bei Messungen am Flächenmotor

Bei den weiteren Untersuchungen am Flächenmotor wurde festgestellt, dass es durch den D-Anteil des Reglers zu Vibrationen kommt. Die Ursache kann in der Abtastung der Position zu diskreten Zeitpunkten liegen. Aufgrund der erfassten diskreten Positionsschritte ergeben sich durch den differentiellen Anteil des Reglers schlagartige Änderungen in der Sollvorgabe. Diese Sprünge verursachen eine schwankende Krafterzeugung. Durch Oszillationen in der Kraftgenerierung wird der mechanische Aufbau angeregt und strahlt daraufhin akustisch hörbare Schwingungen ab. Diese Geräusche sind nicht nur für den Benutzer störend, sondern wirken sich als verstärkte Materialbeanspruchung aus und müssen daher vermieden werden.

Neben den geradlinigen Bewegungen wurden auch kreisförmige Verfahrenwege untersucht. Hierbei erfährt der Motor eine konstante Querbewegung, die zusätzlich durch entsprechende Kräfte kompensiert werden muss. Bild 6.6 zeigt die Positionskoordinaten des Flächenmotors bei einer langsamen Kreisfahrt. Durch die Bahnkurvensteuerung ist eine Begrenzung der maximalen Geschwindigkeit möglich. Wird die Verfahrensgeschwindigkeit zu hoch gewählt, so bricht der Motor aus und verlässt die vorgegebene Kreisbahn. In Bild 6.7 ist die Abweichung von der idealen Kreisbahn dargestellt. Sowohl bei der langsamen als auch bei der schnellen Bewegung gibt es markante Bereiche, wo die prozentuale Abweichung größer ist. Durch die Permanentmagnete und die Statorpolanordnung sind in bestimmten Positionen starke Rastkräfte vorhanden, die eine Störung der Positionsregelung bewirken und dementsprechend kompensiert werden müssen.

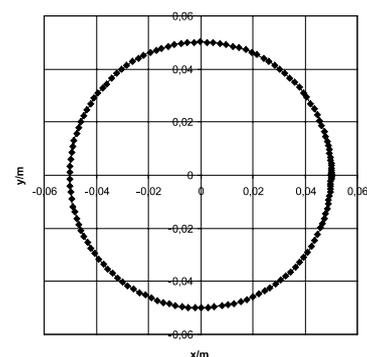


Bild 6.6 Gemessene Bewegung auf Kreisbahn

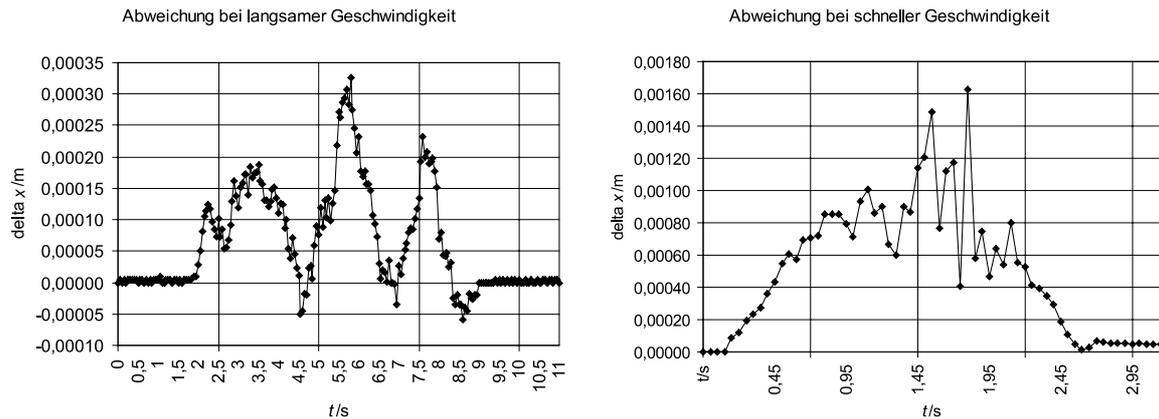


Bild 6.7 Gemessene Abweichung von der Kreisbahn bei langsamer und bei schneller Geschwindigkeit

Mit diesen Untersuchungen wird deutlich, dass es verschiedene Auslegungskriterien gibt, die nicht gleichzeitig erfüllt werden können. Wird eine schnelle Bewegung gefordert, so ergibt sich eine größere Abweichung in der Bahnkurve. Vor allem bei Kreisbewegungen muss die auftretende Querschleunigung kompensiert werden. Soll allerdings eine sehr hohe Endgenauigkeit erreicht werden und auf dem Verfahrensweg nur eine kleine Abweichung erlaubt sein, so ist eine Reduzierung der Geschwindigkeit notwendig.

6.2.3 Weitere experimentelle Beobachtungen

Bei den Untersuchungen und Messungen am Flächenmotorprüfstand konnten, neben dem bisher beschriebenen Verhalten des Regelkreises, weitere Beobachtungen gemacht werden, die für das Gesamtsystemverhalten von Bedeutung sind.

Durch die vorgespannten Lager der Führungsschienen der Läuferplatte ist eine Reibung gegeben. Allerdings ist die Reibkraft auch von der Normalkraft auf die Läuferplatte abhängig. Befindet sich der Läufer unter den Statorpolen (wie es auch im normalen Betrieb der Fall ist) so wirkt eine sehr hohe anziehende Kraft (Normalkraft), die auch den Anteil der Reibkraft in Vorschubrichtung beeinflusst. Eine Bestimmung der Reibkraft unter den Statorpolen ist allerdings nicht möglich, da aufgrund der Permanentmagnete sehr hohe Rastkräfte auftreten, die den Motor in bestimmten Positionen festhalten. Diese anziehenden Kräfte sind bei der 16 poligen Anordnung so groß, dass starke Verbiegungen der Läufer Schlitten auftreten und daher diese Anordnung für weitere Untersuchungen nicht verwendet wurde.

Die Positionssensoren sind jeweils an den beiden Lagerschlitten befestigt. Die Messaufnehmer können am Ort der Leseköpfe sehr feine Positionsänderungen detektieren. Bei bestimmten Betriebsbedingungen konnten leichte Vibrationen erkannt werden, obwohl das Messsystem eine Ruhelage angezeigt hat. Durch Verbiegungen und Lagerspiel können solche minimalen Abweichungen im oberen Bereich auftreten, obwohl der untere Fußpunkt, an dem die Sensoren befestigt sind, sich nicht bewegt.

Während des Betriebes erwies sich die Regelungshardware und der gesamte Stromrichter als sehr zuverlässig. Der in Kapitel 5.4.4 erläuterte Betrieb des Bremschoppers trat bei den vorgenommenen Positionsmessungen nicht auf. Dies bedeutet, dass eine gleichmäßige Belastung beider Zwischenkreise vorliegt und keine Energie im Bremschopper in Wärme umgesetzt wird. Die Untersuchungen am Flächenmotor haben gezeigt, dass mit den wenigen Statorwindungen eine große Krafterzeugung und damit eine gute Positionsregelung möglich ist. Von daher sind diese Grundlagen für die Adaption auf den Kugelmotor als dreidimensionaler Motor verwendbar.

6.3 Regelung des Kugelmotors

Wie oben beschrieben, wurden die Simulationen zur Reglerauslegung zunächst auf dem PC durchgeführt. Die dortigen Berechnungen sind nicht zeitkritisch. Daher können die Modelle sehr detailliert und die Algorithmen beliebig komplex ausgelegt sein. Als weiterer Schritt wurden dann sowohl die Regelung als auch das Modell auf den digitalen Signalprozessoren der ISEADSP-Karte implementiert. Hierbei wird zunächst kontrolliert, dass die Algorithmen auf der Zielhardware lauffähig sind. Da das System echtzeitfähig sein muss, d.h. die Berechnungen und die Ausgabe von Stellgrößen müssen innerhalb einer festgelegten Zeit erfolgen, bedarf es einer optimalen Nutzung aller Ressourcen. Dabei stellt sich das Problem, dass eine Berechnung eines Motormodells sehr rechenintensiv ist und dabei wichtige Prozessorleistung in Anspruch nimmt, die sonst für die Regelung verwendet werden könnte. Neben der Rechenleistung ist auch der Austausch von Daten zwischen den Prozessoren von besonderer Bedeutung. Während das vorgestellte Vektorannäherungsverfahren (siehe Kapitel 4.4.3.2) streng sequentiell abgearbeitet wird, sind beim Vektorsortierverfahren (siehe Kapitel 4.4.3.1) die Berechnungsroutinen auf verschiedene Prozessoren aufteilbar und können teilweise parallel verarbeitet werden. Der implementierte Ablauf mit drei ISEADSP-Karten ist in Bild 6.8 vereinfacht dargestellt. Ein Timer-Interrupt startet die Routinen gemeinsam und sorgt dafür, dass ein fester Regeltakt eingehalten wird. Die Master-Karte liest die Positionswinkel vom Messsystem ein und berechnet die Transformationsmatrizen (1). Diese werden den beiden Slave-Karten übergeben, die daraufhin jeweils für die Hälfte der Spulen die normierten Drehmomente berechnen (2). Währenddessen wird auf der Master-Karte die Hauptregelung durchgeführt, die aus den Soll/Ist-Vergleichen von Position und Geschwindigkeit die notwendigen Momente berechnet und dementsprechend die Achsen im Momentenraum bestimmt (3). Mit diesen Achsen werden dann die Spulen in die Sektoren einsortiert und die normierten Sektormomente bestimmt (4). Aus der Kombination der Sektormomente wird der angestrebte Sollmomentvektor in Abhängigkeit der Sektorenströme bestimmt (5). Daraufhin werden die einzelnen Sollströme in Abhängigkeit von der Sektorenzugehörigkeit berechnet (6) und nach einem Synchronisationssignal (7) von beiden Slave-Karten gleichzeitig ausgegeben (8).

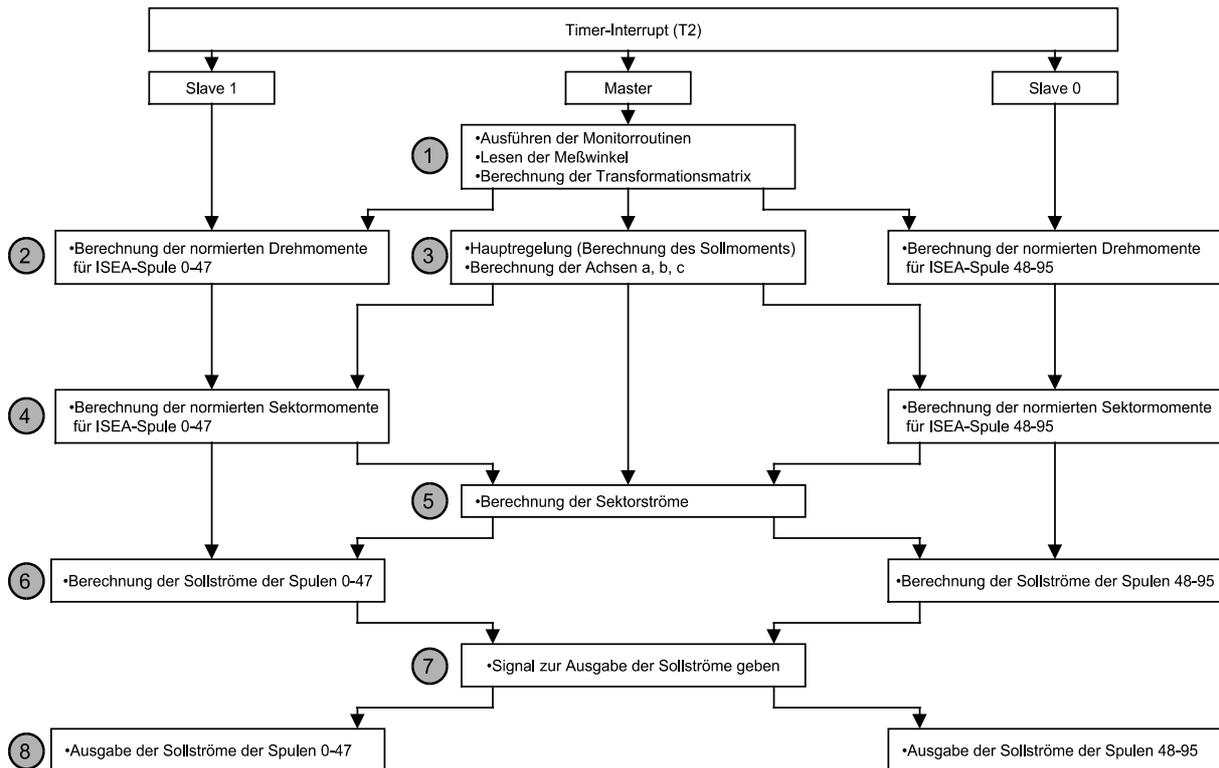


Bild 6.8 Parallelverarbeitung der Algorithmen beim Vektorsortierverfahren

Des weiteren bietet sich teilweise die Möglichkeit, die Teilprozesse noch weiter zu verfeinern. Auf jeder Regelungskarte sind zwei Prozessoren vorhanden, so dass gegebenenfalls eine weitere Parallelverarbeitung implementiert werden kann.

Bei den folgenden Untersuchungen wurden Kraftkennlinien verwendet, die am Institut für Elektrische Maschinen mittels FEM-Analysen berechnet wurden. Eine messtechnische Ermittlung am Kugelmotorprüfstand ist aufgrund der großen Komplexität und der Fehlerquellen nicht sinnvoll. Die Kräfte zwischen den Stützstellen müssen mit Hilfe von Interpolationsverfahren (siehe auch Kapitel 3) ermittelt werden.

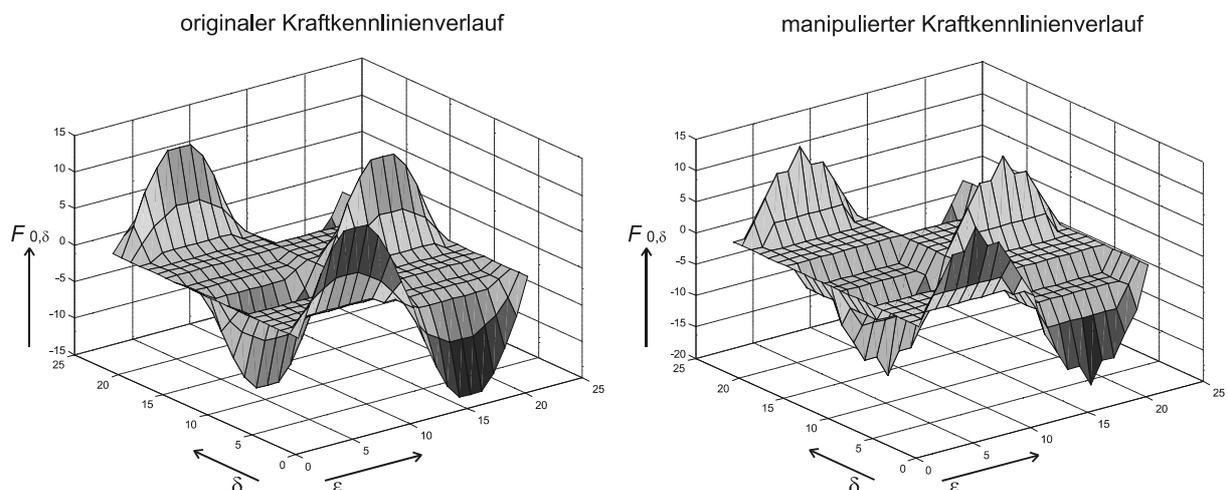


Bild 6.9 Kraftkennlinien mit qualitativen und quantitativen Änderungen

Durch Manipulationen der originalen Stützstellen sind die verschiedene Kennliniefelder entstanden, wovon beispielhaft eine Kennlinie in Bild 6.9 dargestellt ist. Diese wird für die späteren Systemsimulationen verwendet, um das Verhalten bei unterschiedlichen Abweichungen von dem tatsächlichen Kraftverlauf zu analysieren.

6.3.1 Untersuchung der Stellglieder

Zunächst wurden die Stellglieder nach dem Vektorsortier- und dem Vektorannäherungsverfahren untersucht. Bild 6.10 zeigt eine Matlab/Simulink-Simulationsumgebung für die Ermittlung der Momente. Als Eingangsgrößen werden die Positionswinkel (1) und die Sollmomente (2) in den drei Richtungen dem Stellglied (3) vorgegeben. Mit Hilfe der Kraftkennlinien werden die Ströme berechnet, und anschließend dem Motormodell (4) übergeben. Die erzeugten Momente des Motors können ausgewertet und mit den Sollgrößen verglichen werden. Für eine anschauliche Darstellung wurden zwei Koordinaten (ϑ_k, φ_k) mit fester Position gewählt und die dritte (φ) variabel mit der Zeit verändert. In den Block des Stellgliedes wurden die Programme der beiden unterschiedlichen Vektorverfahren implementiert. Bei der Überprüfung der Stellglieder befindet sich der Rotor in einer um 10° verkippten Position ($\vartheta_k = 10^\circ, \varphi_k = 10^\circ$). Dabei wird er eine ganze Umdrehung (360°) um seine Flanschachse gedreht. In jeder Position wird überprüft, wie groß die Motormomente in den drei unabhängigen Richtungen sind.

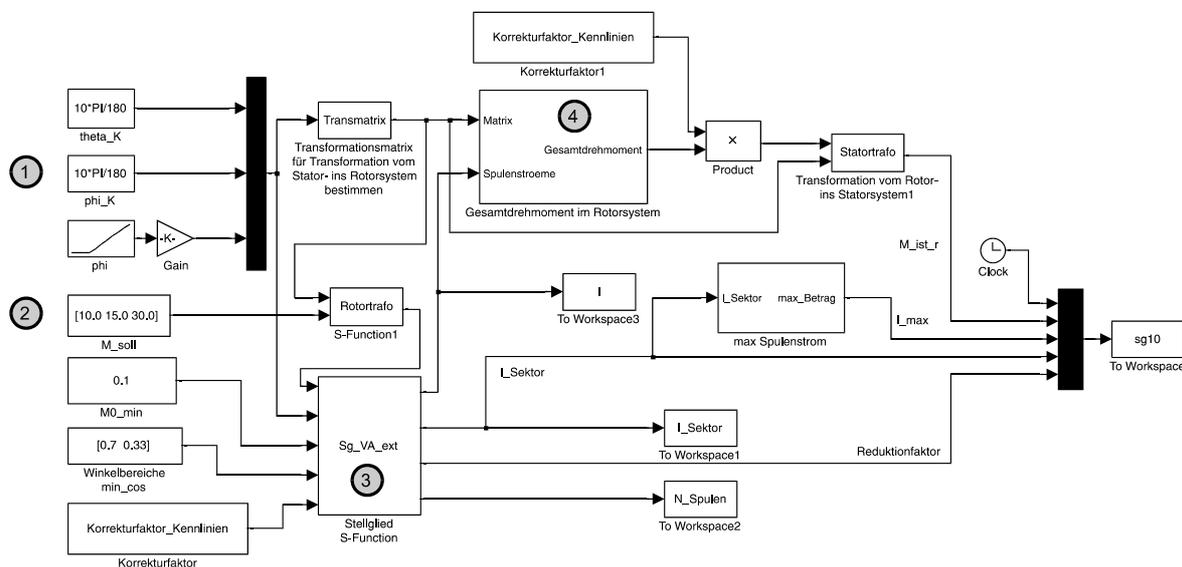


Bild 6.10 Testumgebung für Momentenregelung des Stellgliedes

Zunächst wurden die originalen Kraftkennlinien genutzt. In Bild 6.11 ist beim Vektorsortierverfahren zu erkennen, dass die Momente in allen Positionen sehr genau erreicht werden können. Beim Vektorannäherungsverfahren ist dagegen eine leichte Schwankung in Abhängigkeit von der Position gegeben. Die Größe der Schwankung wird allerdings von der

Grenze des Mindestmomentes beeinflusst. Werden auch die Spulen in der Regelung mit berücksichtigt, die ein sehr kleines Moment erzeugen, so wird die Schwankung vermindert.

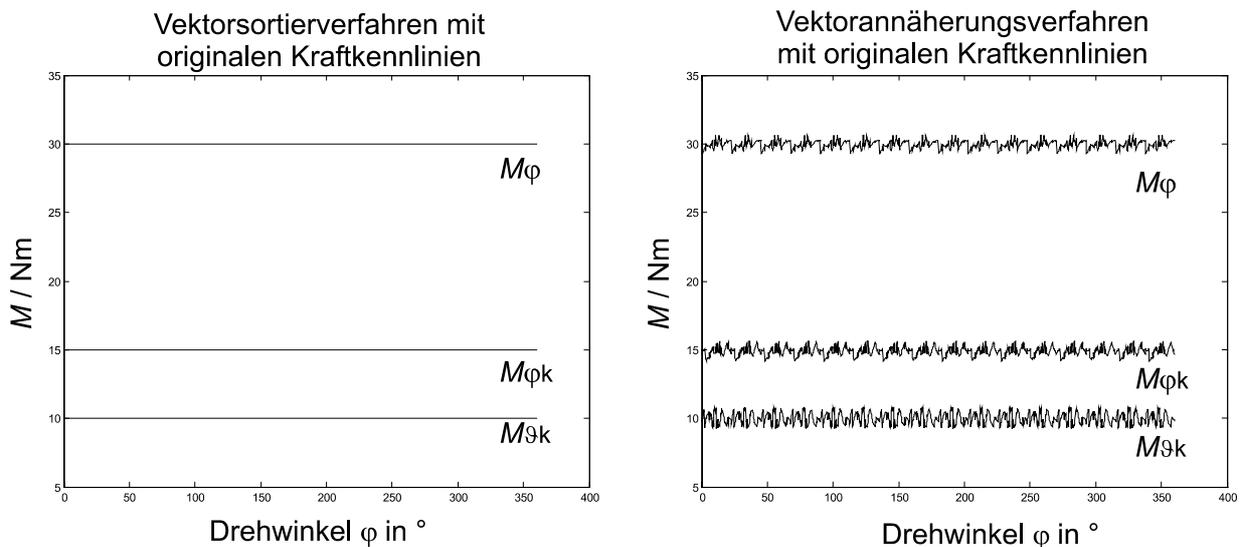


Bild 6.11 Vergleich der Vektorverfahren bei Verwendung der originalen Kraftkennlinien

Werden die manipulierten Kennlinien verwendet, so sind teilweise sehr große Schwankungen im Moment in Abhängigkeit von der Position zu beobachten (Bild 6.12). Da dem Stellglied keine Rückkopplung über das tatsächliche Moment vorliegt, können keine Korrekturen vorgenommen werden. Stimmen die genutzten Kennlinien in ihrem qualitativen Verlauf überein, so kann eine quantitative Abweichung mit einem Korrekturfaktor ausgeglichen werden.

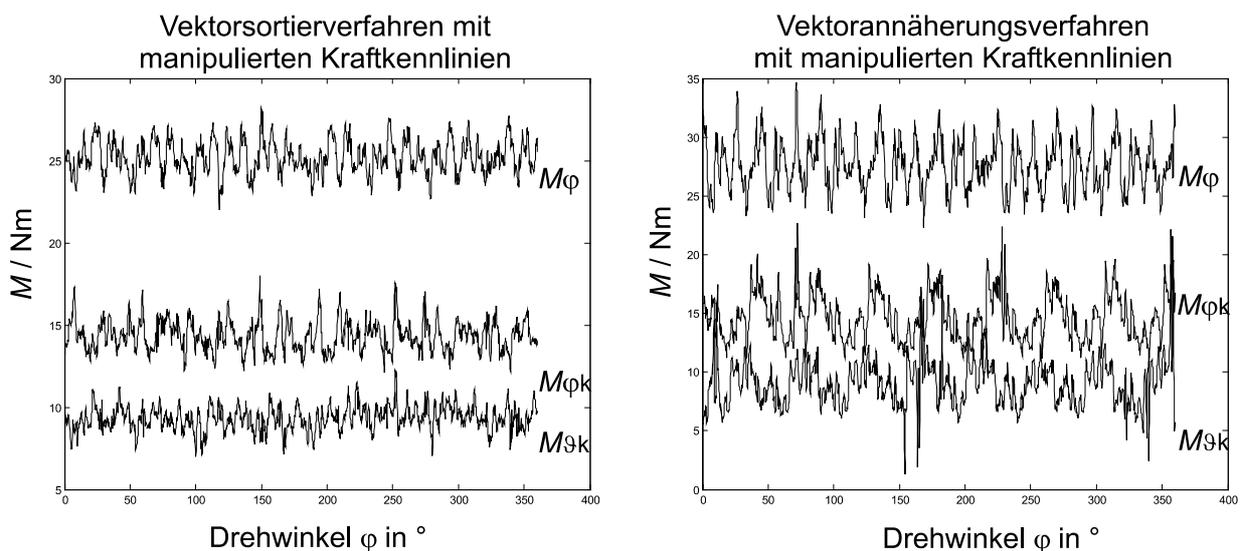


Bild 6.12 Vergleich der Vektorverfahren mit manipulierten Kennlinien

Beim Kugelmotorprüfstand wurde der Motor um die Rotorhochachse des Flansches zwangsgeführt, so dass nur ein Freiheitsgrad in der Bewegung gegeben ist (siehe auch Bild in Anhang C). Mit einer Drehmomentenwelle konnten die Momente um die Rotorhochachse

gemessen und damit die Stellglieder überprüft werden. Bei der Inbetriebnahme wurde festgestellt, dass das erzeugte Moment größer als das berechnete ist. In Bild 6.13 ist ein sinusförmiger Sollwertverlauf mit einer Amplitude von 40 Nm vorgegeben. Die tatsächlichen gemessenen Amplituden liegen bei etwa 55 Nm. Die Abweichungen von der Sinusform in den Maxima sind durch Spiel in einem vorhandenen Stellgetriebe zu erklären.

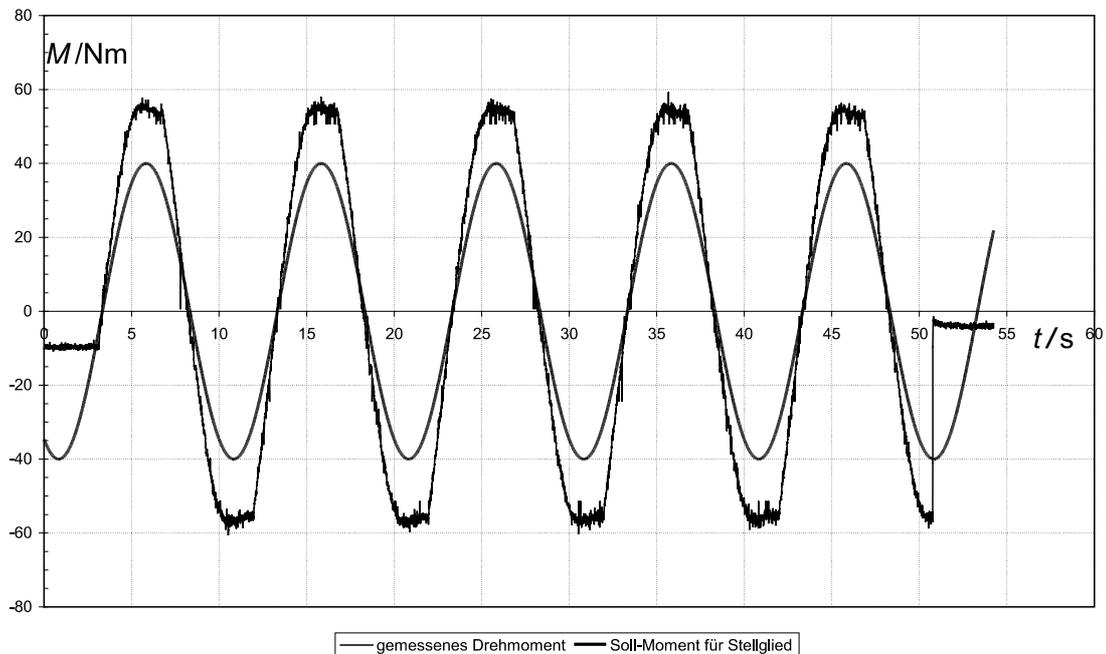


Bild 6.13 Sollwertvorgabe und gemessener sinusförmiger Drehmomentenverlauf

6.3.2 Mehrdimensionale Positions- und Geschwindigkeitsregelung

Die Positionsregelung wurde ähnlich wie beim Flächenmotor mit konventionellen PID-Regelkreisen aufgebaut. Bei der Drehung um die Rotorflanschachse ergibt sich die Besonderheit, dass mehrere Umdrehungen um die eigene Achse möglich sind, was bei Robotern und Handhabungsmaschinen durch die Zuleitungen nicht möglich ist. Ein Sprung in der Winkeldarstellung führt zu Problemen im Regelkreis. Aus diesem Grund wird der Winkel kontinuierlich weitergezählt, z.B. zwei ganze Umdrehungen werden als 720° dargestellt. Dies ist zulässig, da der Motor zunächst nur als Positionier- und Stellantrieb verwendet wird. Wird eine kontinuierliche Drehung angestrebt, so muss berücksichtigt werden, dass es zu einem Über- oder Unterlauf in der Zahlendarstellung kommen kann.

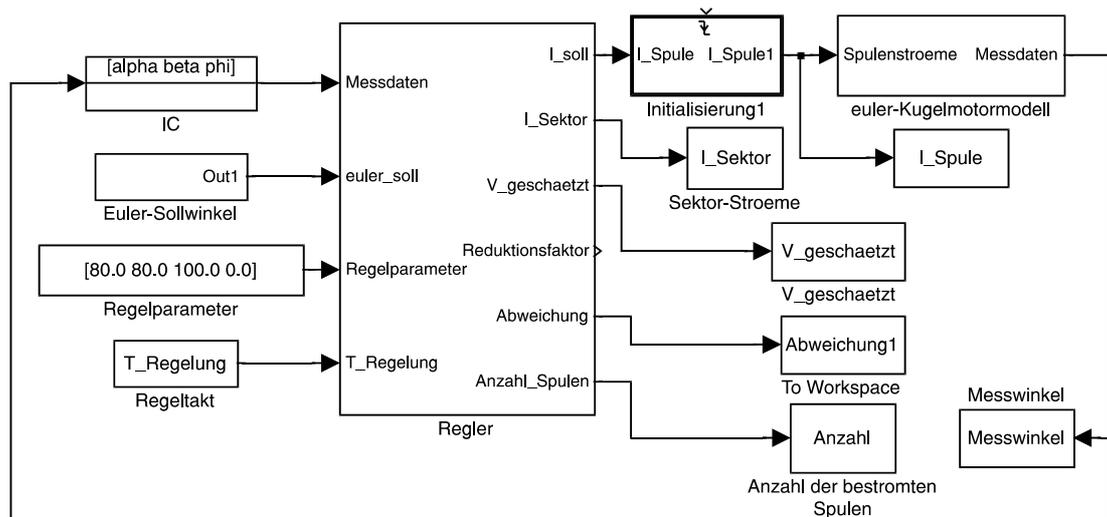


Bild 6.14 Blockschaltbild des Regelkreises mit Regler und Kugelmotormodell

Der Regelkreis mit dem Motormodell ist in Bild 6.14 dargestellt. Zu beachten ist, dass die Positionsvorgaben in den Eulerschen Winkeln ($\vartheta_k, \varphi_k, \varphi$) gemacht werden. Die gemessenen Winkel werden dagegen in den Winkelkoordinaten (α, β, φ) der Drehgeber angezeigt, so wie sie auch am Kugelmotorprüfstand vorhanden sind. Die Funktion des Reglers ist in Bild 6.15 dargestellt. Das Stellglied beinhaltet die Positions- und Geschwindigkeitsregelung. Mit der Vorgabe des Sollmomentes werden im Stellglied mit Hilfe der Vektorverfahren die Bestromungsmuster für die Statorspulenwicklungen berechnet. Diese zwei Hauptblöcke wurden in der Hochsprache C programmiert, so dass sie direkt für die Regelung am Motorprüfstand übernommen werden können.

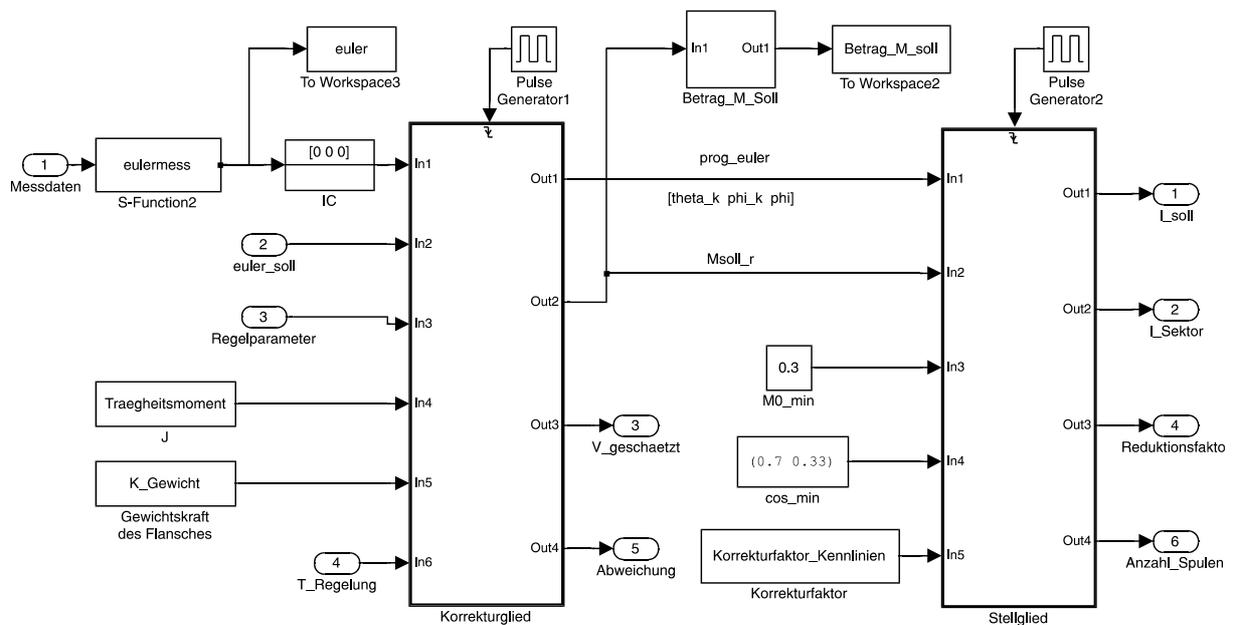


Bild 6.15 Aufbau des Reglers mit Korrekturglied und Stellglied

Prinzipiell sind beliebig komplexe Bewegungen im Raum möglich. Durch eine spätere Endanwendung werden die notwendigen Bewegungskurven festgelegt. Wie schon beim Flächenmotor beschrieben lässt sich ein Verfahrensweg in mehrere Punkt zu Punkt Verbindungsstrecken unterteilen. Im folgenden Beispiel in Bild 6.16 wird eine Drehung um die Rotorflanschachse durchgeführt. Zu diesem Zweck wurde eine Bahnkurvensteuerung, wie sie beim Flächenmotor genutzt wird, für den Winkel φ der Rotorachse implementiert. Die anderen beiden Winkel (α, β) werden über eine einfache PID-Struktur ausgeregelt und weisen bei einer Sprungollgröße entsprechendes Überschwingen auf.

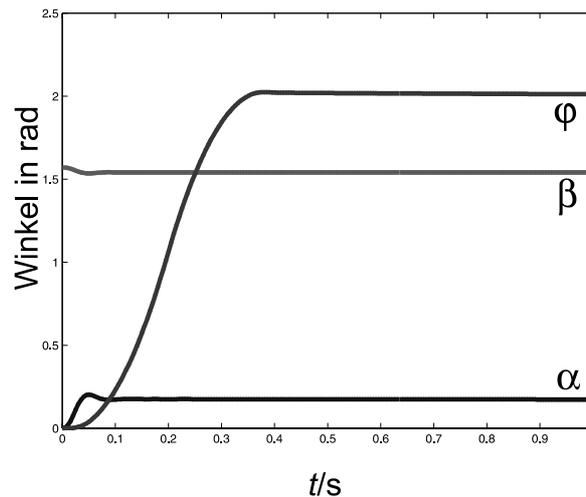


Bild 6.16 Positionen der Messwinkel bei simulierter Drehung um die Rotorflanschachse

Es ist zu erkennen, dass der Kurvenverlauf von φ eine schnelle Einstellzeit mit kaum erkennbarem Überschwingen aufweist. Betrachtet man das unterschiedliche Verhalten von Vektorsortier- und Vektorannäherungsverfahren in Bild 6.17, so sind nur zu Beginn der Bewegung kleine Unterschiede festzustellen. In der Zielposition sind praktisch keine Differenzen vorhanden.

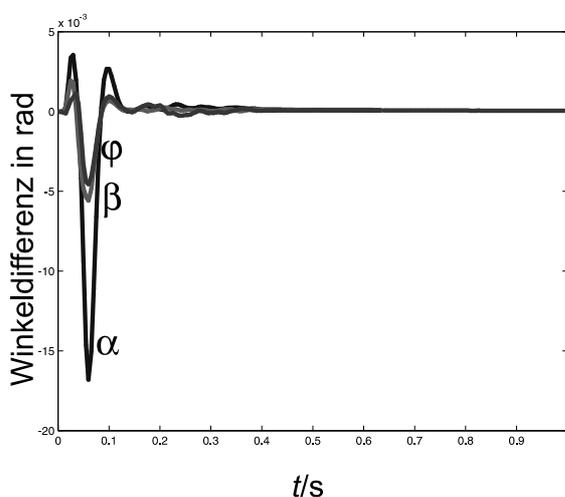


Bild 6.17 Differenz von Vektorsortier- und Vektorannäherungsverfahren

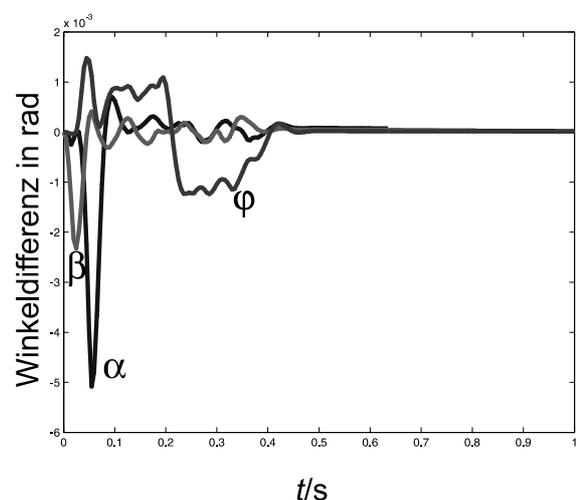


Bild 6.18 Differenz zwischen originaler und manipulierter Kraftkennlinie

Wird die gleiche Bewegung mit der Verwendung der manipulierten Kraftkennlinien durchgeführt (Bild 6.18), so beträgt die maximale Abweichung während des Verfahrens höchstens $0,1^\circ$. In der Endposition ist quasi kein Unterschied mehr vorhanden.

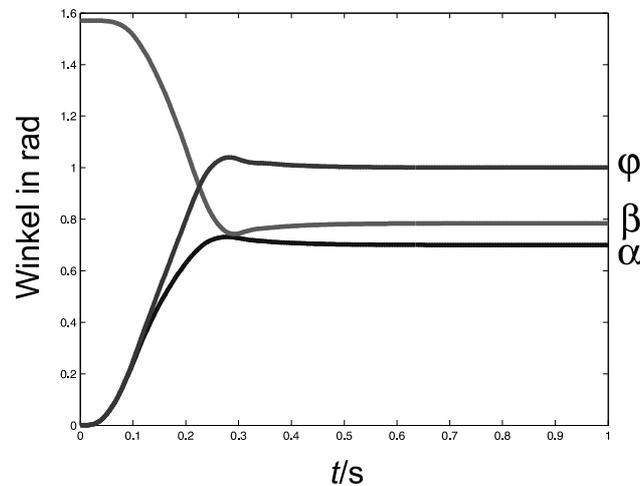


Bild 6.19 Simulationsbeispiel für Bahnkurvensteuerung mit drei Winkelkoordinaten

Ein Beispiel für eine Bahnkurvensteuerung von allen drei Winkeln ist in Bild 6.19 dargestellt. Bei späteren Anwendungen ist es sinnvoll, die Bahnkurvensteuerung nicht mit den Eulerschen Winkeln sondern mit den Winkeln des Messsystems bzw. der Koordinaten der Endanwendung durchzuführen.

Die verschiedenen Algorithmen wurden nach den Simulationen mit dem PC auf den ISEADSP-Karten der Regelungshardware implementiert. Anschließende Simulationen auf der Zielhardware zeigten ähnlich gute Ergebnisse. Für die Inbetriebnahme erfolgte eine Klemmung des Kugelmotors um seine Rotorflanschachse (siehe Bild in Anhand C). Mit einer Bahnkurvensteuerung des Winkel φ kann eine gezielte Bewegung erreicht werden. Die Positioniergenauigkeit im Zielpunkt lag wie bei den Versuchen am Flächenmotor in der Größenordnung der Auflösung des Messsystems.

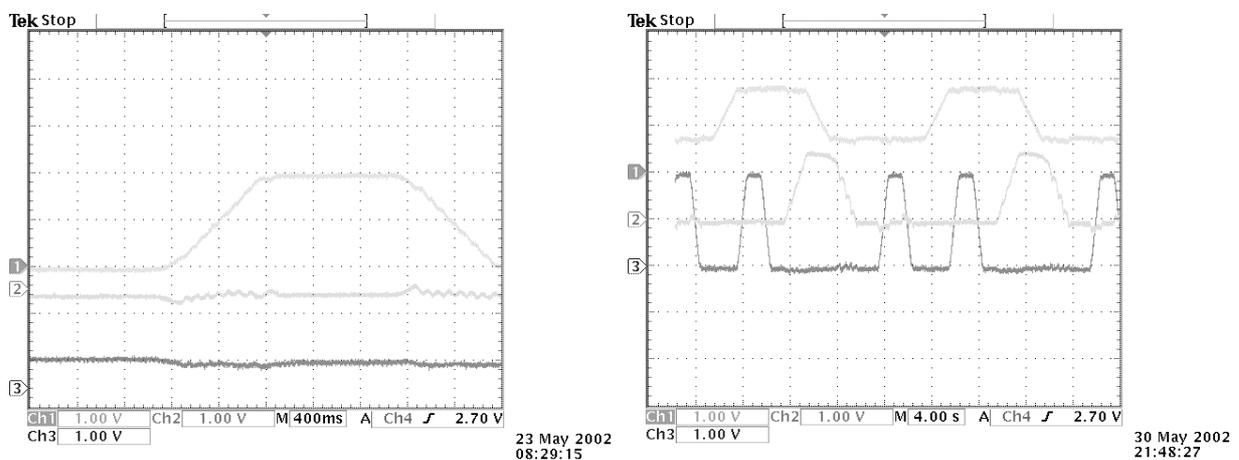


Bild 6.20 Beispiel für gemessene Bahnkurven mit drei unabhängigen Winkelkoordinaten

In Bild 6.20 sind beispielhaft zwei Messungen bei der Bewegung mit drei Freiheitsgraden gezeigt, d.h. die Rotorkugel ist frei beweglich gelagert. Im linken Bild zeigt die obere Kurve die Winkeldrehung um die Rotorhochachse an. Die anderen beiden Winkelstellungen werden konstant gehalten. In dem rechten Bild ist eine Bewegung von allen drei unabhängigen Koordinaten dargestellt.

6.3.3 Weitere experimentelle Beobachtungen

Wie beim Flächenmotor gab es bei den experimentellen Untersuchungen am Kugelmotor keine Erwärmung der Bremswiderstände. Dies deutet auf eine gleichmäßige Ausnutzung der Spulen aus beiden Zwischenkreisen hin. Die beim Abbremsen zurück gespeiste Energie wird zur Grundversorgung der Elektronik und zur Deckung der ohmschen Verluste verwendet. Eine unerlaubte Erwärmung der Spulenwicklungen konnte durch ein vorhandenes Kühlaggregat im Ölkreislauf verhindert werden.

Aufgrund der Permanentmagnete und der ausgeprägten Statorpole gibt es bestimmte Positionen, in denen sehr hohe Rastkräfte auftreten. Diese Kräfte können, aufgrund der zeitlichen Berechnungsdauer der FEM-Modelle, nicht für alle Positionen des Rotors bestimmt werden. Eine messtechnische Ermittlung aller Rastkräfte ist ebenfalls sehr aufwendig, da dazu der Rotor jeweils geklemmt werden muss, um die auftretenden Kräfte zu bestimmen. In den experimentellen Untersuchungen wurden diese Rastkräfte in der Regelung noch nicht berücksichtigt. Dies ist mit eine Begründung, warum Positionsschwankungen (die erkennbaren Ripple in Bild 6.20) bei der Bewegung der Kugel auftreten. Weiterhin besteht das Problem, dass durch die Messaufbauten das Systemverhalten beeinflusst wird. So erwies sich die Verwendung von einer Momentenmesswelle und Kraftsensoren (Dehnmessstreifen) als schwierig, da durch eine Klemmung der Achse zusätzliche Kraftangriffspunkte vorhanden sind, die eine exakte quantitative Analyse der Kräfte und Momente unmöglich macht.

Bei der Inbetriebnahme des Kugelmotorprüfstandes trat eine sehr große Reibung auf, die das dynamische Verhalten des Motors stark beeinträchtigte. Es wurde festgestellt, dass eine Unrundheit der Rotorkugel vorliegt. Durch eine Vergrößerung des Abstandes der Lagertaschen von der Rotorkugel konnte die Reibung vermindert werden. Die damit verbundene Verminderung der Steifigkeit ist für die Testphase nicht von Bedeutung, da keine großen externen Kräfte angreifen.

6.4 Ausblick und Optimierungsansätze für den Kugelmotorantrieb

Bei den Optimierungsansätzen können allgemein zwei Ziele verfolgt werden. Zum einen können lokale Optimierungen vorgenommen werden, die einzelne Bereiche oder Komponenten betreffen und die vorhandenen Schnittstellen unverändert lassen. Dies ist besonders im hier vorliegenden Prototypenstadium sinnvoll. Zum anderen können am allgemeinen Konzept Änderungen vorgenommen werden, die Auswirkungen auf die prinzipielle Funktionsweise haben. Hierbei können Teilbereiche wegfallen und neue entstehen, so dass unter Umständen auch neue Schnittstellen geschaffen werden müssen.

Zunächst werden mögliche Änderungen angedeutet, die den Stromrichter betreffen. Die Abstimmung der Schnittstellen muss dabei mit der dazugehörigen Regelungshardware erfolgen. Prinzipiell können sich auch komplett andere Topologien und Verfahren ergeben, die durch neuartige Regelungsmethoden notwendig werden. Da allerdings die Untersuchungen der Regelalgorithmen erst ganz am Anfang stehen, werden nur die naheliegenden Optimierungen angedeutet.

- **Standardisierungen:** Durch Verwendung von standardisierten Komponenten und Modulen wird ein kostengünstiger Aufbau ermöglicht. Werden z.B. leistungselektronische Komponenten aus dem Automotive-Bereich verwendet, so können sich niedrige Preise durch die hohen Stückzahlen ergeben. Weiterhin erhält man eine gute Performance, z.B. niedrige Verluste, durch die allgemein hohen Anforderungen und entsprechende Spezifikationen. Die reduzierten Verluste ermöglichen eine geringere installierte Gesamtleistung, was sich wiederum im Wirkungsgrad und in niedrigeren Kosten auswirkt.
- **Erhöhung der Integrationsdichte:** Durch die hohe Anzahl an einzelnen Kanälen wird ein sehr hohes Volumen benötigt. Dieses kann durch eine Integration von Leistungsbau-elementen und Steuerungslogik vermindert werden. Ein Ansatz sind z.B. Intelligent Power Modules (IPM). Neben dem Volumen werden meist auch die Betriebsverluste der diskreten Bauelemente reduziert und damit verbunden eine niedrigere Ausfallwahrscheinlichkeit erzielt. Ein weiteres Ziel kann sein, die Leistungselektronik nah beim Motor zu integrieren, wie es bei Industrieantrieben schon heute realisiert wird.
- **Skalierbarkeit:** Durch die einzeln ansteuerbaren Motorwicklungen, kann das System entsprechend der Anwendung skaliert und angepasst werden. Wird eine verminderte Leistung oder ein geringeres Drehmoment gefordert, so kann ein Antrieb mit weniger Spulenwicklungen und damit auch mit weniger Stromrichterkanälen aufgebaut werden.
- **Technische Konzeptänderungen:** Weiterhin sind einige grundlegende technische Änderungen denkbar. Es wäre möglich, dass es einen gemeinsamen Rückleiter aller Spulenwicklungen gibt, wodurch die Hälfte aller Anschlussleitungen eingespart werden könnte. Dies ist zulässig, da die Rückleiter aller Spulenwicklungen auf dem gleichen Nullpotential enden. Jeder fließende Strom durch eine Spulenwicklung erzeugt ein magnetisches Feld. Da das Flächenintegral der magnetischen Feldlinien über eine geschlossene Kugeloberfläche Null ergibt ($\text{Div } \vec{B} = 0$) muss auch die Summe aller Ströme der einzelnen Spulen Null ergeben. Dies bedeutet wiederum, dass in einem gemeinsamen Rückleiter kein Strom fließt und dieser auch eingespart werden kann. Bei einer solchen Konfiguration muss die Strommessung vor der Spulenwicklung erfolgen. Aufgrund des springenden Bezugspotentials muss die Auswertung mit einem Stromwandler erfolgen. Der Einsatz von Stromwandlern ist dagegen kostenintensiver. Eine weitere strukturelle Alternative wäre eine digitale Stromregelung. Dazu muss der gemessene Strom zunächst über einen A/D-Umsetzer in digitale Signale gewandelt werden. Daraufhin können mittels digitaler Schaltungstechnik die Steuersignale für die Leistungsschalter generiert werden. Dies hat den Vorteil, dass von der Regelungshardware keine analogen Signale übertragen

werden müssen. Mit der Übergabe von digitalen Sollsignalen ist eine weitere Vereinfachung denkbar. Die Stellgrößen, welche über einzelne Direktverbindungen übertragen werden, werden über ein Bussystem gesendet. Dabei reduziert sich der Verkabelungsaufwand erheblich. Es muss aber genauer untersucht werden, inwieweit die Datenübertragung zeitkritischen Bedingungen unterliegt und eine simultane Abtastung bzw. Generierung der Stellgrößen gewährleistet ist. Außerdem muss das Bussystem mit einer gewissen Redundanz ausgelegt sein. Die momentanen Punkt zu Punkt Verbindungen aller einzelnen Kanäle haben den entscheidenden Vorteil, dass bei Ausfall einzelner Leitungen das restliche System ungestört weiterlaufen kann.

Neben den Antriebskomponenten gibt es auch Optimierungsmöglichkeiten bei der Regelungsstruktur und deren Algorithmen. Diese lassen sich auch in lokale Verbesserungen und konzeptionelle Änderungen unterteilen.

- **Zykluszeit:** Die Algorithmen wurden mit der Hochsprache C erstellt. Zwar ist der Compiler speziell auf die Strukturen des DSPs ausgelegt, aber trotzdem können durch prozessornahen Assembler-Code einige Geschwindigkeitsvorteile erreicht werden. Dadurch lässt sich der Regelungstakt erhöhen. Durch die große Trägheit ist die Dynamik des Systems beschränkt und damit eine weitere Verkürzung des Taktzyklus nicht sinnvoll.
- **Modellbildung:** Die Berechnungen und Messungen zur Bestimmung der Kraftkennlinien weisen teilweise starke Unterschiede auf. Sowohl bei den Berechnungsmodellen als auch durch die Messaufbauten sind Fehlerquellen vorhanden. Für die Modellierung des Systems wurden diese fehlerbehafteten Kennlinien verwendet. Um das System besser beschreiben zu können, kann es sinnvoll sein, einen lernenden Beobachter im Betrieb mitlaufen zu lassen. Durch das Verhalten des Antriebes können Parameter mit der Zeit angeglichen und somit das System exakter beschrieben werden.
- **Regler:** Die verwendeten parameteroptimierten PID-Regler sind prinzipiell für einen linearisierten Arbeitsbereich ausgelegt. Ein anderes Regelkonzept könnte neuronale und fuzzy Strukturen berücksichtigen. Hierbei könnten Nichtlinearitäten und sich ändernde Systemparameter mit berücksichtigt werden. Allerdings muss dabei geprüft werden, ob die Anforderungen an Dynamik und Stabilität gewährleistet werden können.

Die genannten Punkte sind Ansätze von Optimierungsmöglichkeiten. Die experimentellen Untersuchungen im dauerhaften Einsatz müssen zunächst zeigen, wie leistungsfähig das System ist und inwieweit technische Modifikationen notwendig sind. Die weiteren Änderungen werden durch die späteren Einsatzgebiete bestimmt und orientieren sich an der industriellen Einsatztauglichkeit.

Das vorgestellte Konzept der mehrdimensionalen Direktantriebe befindet sich in einem Forschungsstadium. Für einen kommerziellen Einsatz im industriellen Bereich müssen zunächst weitere Erfahrungen gesammelt werden. Die Auslegung wurde für unterschiedliche Anwendungsgebiete von Werkzeugmaschinen und für die Roboter- und Handhabungstechnik vorgenommen, ohne jedoch auf einen speziellen Einsatzzweck hin optimiert worden zu sein.

Mit der Vorgabe eines bestimmten Lastfalles kann die Regelung entsprechend auf ein gefordertes Systemverhalten hin ausgelegt werden.

6.5 Zusammenfassung

Es wurden die Entwicklungsumgebung und die Vorgehensweise beim Entwurf der Regelkreise von mehrdimensionalen Direktantrieben vorgestellt. Als Grundlage dienen Modelle des Flächenmotors und des Kugelmotors in einer Simulationsumgebung auf dem PC, die das reale Verhalten der Systeme nachbilden. Diese Modelle sind die Voraussetzung beim Entwurf einer Regelungsstruktur, wie sie in Kapitel 4 beschrieben wurden. Die Simulationen haben eine große Kraftentwicklung und eine hohe Positioniergenauigkeit der Motoren gezeigt, wobei sich beim Flächenmotor aufgrund der wenigen Statorpole nur eine vergleichsweise geringe Kraft ergibt. Die große bewegte Masse ist für eine beschränkte Dynamik verantwortlich. Als Ziel wurde eine möglichst hohe Positioniergenauigkeit vorgegeben.

Nach der Simulation auf dem PC wurden beim Kugelmotor sowohl die Regelalgorithmen als auch das Modell auf der Zielhardware implementiert. Dadurch konnte die Programme unter der realen Umgebung getestet werden.

Beim Flächenmotorversuchsstand konnte eine sehr hohe Positioniergenauigkeit erreicht werden, welche nur durch die Auflösegenauigkeit von $5\ \mu\text{m}$ des Messsystems limitiert ist. Durch die kleinen Abmaße der Läuferplatte ist nur ein kurzer Verfahrweg mit entsprechender Beschleunigungs- und Abbremsphase möglich. Dabei wurden Geschwindigkeiten von über $1\ \text{m/s}$ erreicht. Mit einer übergeordneten Bahnkurvensteuerung lassen sich geradlinige und kreisförmige Bewegungen in der Ebene durchführen. Beim Kugelmotorversuchsstand wurde die berechneten Drehmomente von $40\ \text{Nm}$ weit übertroffen. Für die Inbetriebnahme wurde der Motor um die Flanschachse des Rotors geklemmt. Es ist ebenso wie beim Flächenmotor eine Start-Zielbewegung möglich. Auch die Positioniergenauigkeit liegt im Bereich der Messsystemauflösung. Bei beiden Motoren sind zur Zeit hohe Reibkräfte vorhanden, die die Dynamik und Effizienz negativ beeinflussen. In Experimenten konnte gezeigt werden, dass eine mehrdimensionale Regelung mit drei Freiheitsgraden möglich ist.

Die entwickelte Regelungshardware und Leistungselektronik zeigte im Betrieb ein robustes und zuverlässiges Verhalten. Die entsprechende überdimensionierte Auslegung ermöglichte in den Testphasen verschiedene extreme Lastfälle, da genügend Leistungsreserven in den Antriebskomponenten vorhanden sind. Optimierungen können lokal oder für das Gesamtsystem vorgenommen werden. Allerdings werden die Kriterien maßgeblich von der Endanwendung bestimmt. Die Untersuchungen wurden allgemeingültig durchgeführt, wobei sich der generelle Zielkonflikt zwischen einer guten Dynamik und einer hohen Genauigkeit zeigte.

7 Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit wurde ein neuartiges Antriebskonzept für permanenterregte Direktantriebe mit mehreren Freiheitsgraden am Beispiel eines Flächenmotors und eines Kugelmotors vorgestellt. Bei der Bewegung liegt ein variables Polteilungsverhältnis vor, welches eine individuelle Ansteuerung aller einzelnen Statorwicklungen bedingt. Konventionelle Antriebskomponenten und Steuerverfahren sind daher nicht direkt verwendbar. Das Ziel war es, neuartige Regelstrategien für die speziellen Direktantriebe zu entwickeln und deren Verhalten am Flächen- und Kugelmotor zu untersuchen. Für einen möglichen Einsatz in Robotern und Werkzeugmaschinen müssen dabei große Kräfte und Momente mit einer hohen Positioniergenauigkeit erreicht werden. Die zu entwickelnden Antriebskomponenten müssen auf die besondere Motorstruktur abgestimmt und für die Anwendung der Regelungsalgorithmen ausgelegt sein.

Es wurde eine kaskadierte Regelungsstruktur mit einem inneren Stellglied und einem äußeren Regelkreis gewählt. Die innere Kraft- und Momentensteuerung berechnet aus den Stellgrößen die notwendigen Bestromungsgrößen für den Motor. Durch die große Anzahl an Statorwicklungen muss für jede Spulenwicklung eine eigene Stromgröße berechnet werden. Die elektromagnetischen Kräfte der Polwicklungen werden durch Kraftvektoren in einem Vektorraum dargestellt. Mit einem Vektorsortier- und einem Vektorannäherungsverfahren wurden zwei Methoden entwickelt und miteinander verglichen, die den Zielvektor durch Kombination aus mehreren einzelnen Kraftvektoren zusammen setzen. Mit beiden Vektorverfahren ist es möglich, innerhalb einer durch den Regeltakt begrenzten Zeit, eine Lösung des überbestimmten Systems zu finden. In der äußeren Regelschleife wurde eine Positions- und Geschwindigkeitsregelung implementiert. Die Auslegung der Regelparameter erfolgte im Hinblick auf eine möglichst hohe Positioniergenauigkeit. Um das dynamische Verhalten bei geradlinigen und kreisförmigen Bewegungen zwischen einem Start- und einem Zielpunkt zu kontrollieren, wurde eine übergeordnete Bahnkurvensteuerung entworfen.

Die Antriebskomponenten wurden im Hinblick auf die speziellen Systemanforderungen entwickelt. Der Stromrichter besteht aus einzelnen Halbbrückenschaltungen mit analoger Stromregelung. Durch den modularen Aufbau ist das System skalierbar und besitzt eine hohe Redundanz. Die Modulationsreferenzsignale der Stromrichterkanäle sind auf ein gemeinsames Taktsignal synchronisiert. Dadurch werden Kraft- und Momentenschwankungen durch niederfrequente Schwingungen vermieden. Außerdem wird damit die Belastung der Netzteile und Zwischenkreiskondensatoren auf ein minimales Maß beschränkt. Zur Berechnung der komplexen Regelalgorithmen wurde eine Regelungshardware entworfen, die ebenfalls modular aufgebaut ist. Kernstück sind drei Regelungskarten (ISEADSP) mit digitalen Signalprozessoren. Die Vorgabe einer Zielposition, die Beeinflussung von

Regelparametern und die Beobachtung des Motorverhaltens erfolgt über eine PC-Benutzerschnittstelle. Unter Verwendung der gemessenen Positionsdaten werden die Regelalgorithmen parallel auf mehreren Prozessoren verarbeitet und die resultierenden Stellgrößen über elektrisch isolierende Schnittstellenkarten an die Stromrichter ausgegeben.

Zur Verifikation der theoretischen Auslegung und der Simulationen wurden experimentelle Untersuchungen an den zwei Motorprüfständen durchgeführt. Beim Flächenmotor kann eine große Vorschubkraft in allen Positionen erreicht werden. Mit der Positions- und Geschwindigkeitsregelung sowie der übergeordneten Bahnkurvensteuerung ist eine geradlinige und eine kreisförmige Bewegung in der Ebene möglich. Die Positioniergenauigkeit im Zielpunkt ist nur durch die Auflösung des Messsystems beschränkt. Beim Kugelmotor können aufgrund der größeren Anzahl an Statorspulen entsprechend große Kräfte und Drehmomente erzeugt werden. Die innere Momentensteuerung wurde erfolgreich in Betrieb genommen und zeigte deutliche Leistungsreserven. Weiterhin ist mit der Bahnkurvensteuerung eine sehr genaue Positionierung um die Rotorflanschachse gemessen worden. In experimentellen Untersuchungen wurde gezeigt, dass eine räumliche Bewegung mit drei Freiheitsgraden möglich ist. Das Beschleunigungsverhalten ist sowohl beim Flächenmotor als auch beim Kugelmotor durch die große bewegte Masse beschränkt. Trotzdem ermöglicht der erreichte Regeltakt eine hohe Steifigkeit der Systeme, um einen späteren Einsatz als Positionierantrieb zu ermöglichen.

Anhang A Literaturverzeichnis

- [1] **Prust, D.:** Mehrachsiger Antrieb mit variabler Polung, Patent DE 197 22 814 A1, 1998
- [2] **Henneberger, G.:** Skript zur Vorlesung Elektrische Maschinen, Institut für Elektrische Maschinen, RWTH Aachen, 2001
- [3] **De Doncker, R.:** Skript zur Vorlesung Elektrische Antriebe, Institut für Stromrichtertechnik und Elektrische Antriebe, RWTH Aachen, 2001
- [4] **Deutsche Forschungsgemeinschaft:** Flexible Handhabungsgeräte im Maschinenbau, Ergebnisse aus dem SFB 208, 1996, ISBN 3-527-27721-8
- [5] **Murakami, T.; Kahlen, K.; De Doncker, R.:** Robust motion control based on projection plane in multi-degrees-of-freedom manipulator, IECON 2000, International conference on industrial electronics, control and instrumentation, Nagoya, 2000
- [6] **Mendrela, E.A.:** Theory of induction motors with two degrees of mechanical freedom, International conference on electrical machines, 1986
- [7] **Fernandez, V.; Reyne, G.; Cugat O.:** Prospective FEM modeling of induction planar micromotors, IEEE Transactions on magnetics, Vol. 35, No. 3, 1999
- [8] **Sawyer, B.A.:** Magnetic positioning device, Patent US 3.376.578, 1968
- [9] **Ish-Shalom, J.:** Sawyer sensor for planar motion systems, IEEE Conference on robotics and automation, San Diego, 1994
- [10] **Sawyer, B.A.:** Magnetic positioning device, Patent US 3.376.578, 1969
- [11] **Melkote, H.; Khorrami, F.; Ish-Shalom, J.:** Closed-loop control of a three degree-of-freedom ultra accurate linear stepper motor, IEEE Conference on control applications, Hartford, 1997
- [12] **Fries, G. A.; Rizzi, A. A.; Hollis, R. L.:** Fluorescent dye based optical position sensing for planar linear motors, IEEE Conference on robotics and automation, Detroit, 1999

-
- [13] **Kuhlbusch, W.; Moritz, W.; Lückel J.; Toepper, S.; Scharfeld, F.:** TRIPLANAR - A new process-machine type developed by means of the mechatronic design, IEEE ASME Conference on advanced intelligent mechatronics (AIM 99), Atlanta, 1999
- [14] **Ebihara, D. ;Watada,M.:** Study of a basic structure fo surface actuator, IEEE Transactionson magnetics Vol. 25, No5. Sept. 1989
- [15] **Filho, A. F. F.; Susin, A. A.; da Silva, M. A.:** Application of neodymium-iron-boron permanent magnets on the assembling of a novel planar actuator, IEEE Transactions on magnetics, Vol 35, No. 5; 1999
- [16] **Nakazawa, H.; Watanabe, Y.; Morita, O.; Edo, M; Yonezawa, E.:** The two-dimensional micro conveyer, Transducers '97, International conference on solid-state sensors and actuators, Chicago, 1997
- [17] **Saffert, E.; Schäffel, C.; Kallenbach, E.:** Planar multi-coordinate drives, Proceodings intelligent motion, 1998
- [18] **Kim, W.-J.; Trumper, D. L.; Lang, J. H.:** Modeling and vector control of planar magnetic levitator, IEEE Transactions on industry applications, Vol 34 No 6, 1998
- [19] **Molenaar, L.; Zaaier, E.; van Beek, F:** A novel long stroke planar magnetic bearing actuator, , MoViC'98, International conference on motion and vibration control, Zürich, 1998
- [20] **Zesch, W.; Büchi, R.; Codourey, A.; Siegwart, R.:** Inertial drives for micro-and nanorobots: Two novel mechanisms, SPIE's int. symp. on intelligent systems and advanced manufacturing, Philadelphia, 1995
- [21] **Egawa, S.; Niino, T.; Higuchi, T.:** Film actuators: Planar, electrostatic surface-drive actuators, IEEE Proceedings micro electro mechanical systems, 1991
- [22] **Stewart, R.:** Variable speed induciton motor, Patent US 1.559.920, 1925
- [23] **Williams, F.C.; Laithwaite, E.R.; Piggott, L.S.:** Brushless variable-speed induction mtoros, Proceedings IEE, Vol 104-A, 1956
- [24] **Bers, N.S.:** Motor structure including spherical windings, Patent US 3.178.600, 1965
- [25] **Bolenz, K.:** Der Kugelmotor als Sonderbauform der Induktionsmaschine, Dissertation, Universität Hannover, 1972

- [26] **Purczynski, J.; Kaszycki, L.:** Calculation of power losses and driving torque in spherical symmetry induction motor, Archiv für Elektrotechnik 69, Springer Verlag, 1986
- [27] **Davey, K.; Vachtsevanos, G.; Powers, R.:** The analysis of fields and torques in spherical induction motors, IEEE Transactions of magnetics, Vol. Mag 23, No.1, 1987
- [28] **Lordo, R.E.; McSparran, L.W.:** Motion Simulator, Patent EU 0421029B1, 1989
- [29] **Lee, K.-M.; Vachtsevanos, G.; Kwan, C.K.:** Development of a spherical stepper wrist motor, IEEE Conference on robotics and automation, Philadelphia, 1988
- [30] **Lee, K.-M.; Kwan, C.-K.:** Design concept development of a spherical stepper for robotic applications, IEEE Transactions on robotics and automation, Vol. 7, No.1, 1991
- [31] **Zouh, Z.; Lee, K.-L.:** Real-time motion control of a multi-degree-of-freedom variable reluctance spherical motor, IEEE International conference on robotics and automation, Minneapolis, 1996
- [32] **Lee, K.-M.; Blenis, R.S.; Pao, T.-L.:** Real-time vision system and control algorithm for a spherical motor, Patent US 5,416,392, 1995
- [33] **Chirikjian, G. S.; Stein, D.:** Kinematic design and commutation of a spherical stepper motor, IEEE/ASME Transactions on mechatronics, Vol. 4, 1999, S.342-353
- [34] **Kaneko, K.; Yamada, I.; Ito, K.:** A spherical DC servo motor with three degrees of freedom, Transactions of the ASME, Vol. 111, 1989
- [35] **Bederson, B.B.; Wallace, R.S.; Schwartz, E.L.:** Control and design of the spherical pointing motor, IEEE international conference on robotics and automation, Atlanta, 1993
- [36] **Wang, J.; Jewell, G.W.; Howe, D.:** Analysis, design and control of a novel spherical permanent-magnet actuator, IEE Proceedings electric power applications, Vol 145, No.1, 1998
- [37] **Wang, J.; Wang, W.; Jewell, G.W.; Howe, D.:** A novel spherical permanent magnet actuator with three degrees-of-freedom, IEEE Transactions on magnetics, Vol. 34, No.4, 1998

- [38] **Anders, M.; Andresen, E.-Ch.; Binder, A.:** Determination of thrust force ripple of a spherical linear PM motor for a direct telescope drive, European power electronics (EPE) conference, Lausanne, 1999
- [39] **Klinchuch, J.F.:** Electrostatic gyroskope suspension system, Patent US 3.697.143, 1971
- [40] **Hu, M.; Ling, S.-F.; Du, H.; Teo, J.-K.:** Design of a novel ultrasonic spherical motor, IEEE Ultrasonic symposium, Vol.1, San Juan, Puerto Rico, 2000
- [41] **Aoyagi, M.; Ogasawara, Y.; Tomikawa, Y.; Takan, T.:** Multi-degrees-of-freedom ultrasonic actuator employing multi-vibration modes of a disk, Actuator Konferenz, Bremen, 2000
- [42] **Takemura, K.; Maeno, T.:** Characteristics of an ultrasonic motor capable of generating a multi-degrees of freedom motion, IEEE Conference on robotics and automation, San Francisco, 2000
- [43] **Hering, E.; Martin, R.; Stohrer, M.:** Physik für Ingenieure, VDI Verlag Düsseldorf, 1989
- [44] **Busch, T.; Henneberger, G.:** ISEM International symposium on nonlinear electromagnetic systems, Pavia, Italien, 1999, ISBN 1586030248
- [45] **Busch, T.; Henneberger, G.; Kahlen, K.; De Doncker, R.; Reinartz, T.; Weck, M.:** Flächenmotor als mehrachsiger Direktantrieb, VDI Mechatronik - Mechanisch/Elektrische Antriebstechnik, Wiesloch 2000
- [46] **Mauracher, P.:** Modellbildung und Verbundoptimierung bei Elektrostraßenfahrzeugen, Dissertation, RWTH Aachen, 1996
- [47] **Weck, M.; Reinartz, T.; Henneberger, G.; De Doncker, R.:** Design of a spherical motor with three degrees of freedom, Annals of the CIRP Vol. 49/1/2000, 2000
- [48] **Busch, T.; Henneberger, G.; Kahlen, K.; De Doncker, R.; Reinartz, T.; Weck, M.:** Kugelmotor als mehrachsiger Direktantrieb, VDI Mechatronik - Innovative Produktentwicklungen, Frankenthal, 2001
- [49] **Busch, T.; Henneberger, G.:** New stator pole arrangement for a planar multi-coordinate drive, ICEM 2000, international conference on electrical machines, Helsinki, 2000
- [50] **Karipidis, C.-U.:** A versatile DSP/FPGA structure optimized for rapid prototyping and digital real-time simulation of power electronic and electrical drive systems, Dissertation, RWTH Aachen, 2001

- [51] **Jacobs, J.; De Donker, R.:** Rapid prototyping tools for power electronic systems - demonstration with shunt active power filters, IECON 2000, International conference on industrial electronics, control and instrumentation, Nagoya, 2000
- [52] **Geitner, G.-H.; Müller, V.:** Rechnerunterstützung beim Entwurf von Bewegungssteuerungen in elektrischen Antriebssystemen, Elektrie, 05-07, Berlin, 2001
- [53] **Büttner, W.:** Digitale Regelungssysteme, Vieweg Verlag Braunschweig, 1990
- [54] **Vachtsevanos, G.J.; Davey, K.; Lee, K.-M.:** Development of a novel intelligent robotic manipulator, IEEE control systems magazine, Band 7, Heft 3, 1987
- [55] **ISEA, 1998:** Jahresbericht 1998 des Instituts für Stromrichtertechnik und Elektrische Antriebe der RWTH Aachen, Hrsg: R. De Doncker
- [56] **ISEA, 1999:** Jahresbericht 1999 des Instituts für Stromrichtertechnik und Elektrische Antriebe der RWTH Aachen, Hrsg: R. De Doncker
- [57] **ISEA, 2000:** ISEADSP Datasheet, Institut für Stromrichtertechnik und Elektrische Antriebe, RWTH Aachen, 2000, [http: www.isea.rwth-aachen.de](http://www.isea.rwth-aachen.de)
- [58] **Analog Devices:** SHARC users' manual ADSP2106x, 1997, im Internet erhältlich unter www.analog.com
- [59] **Costa, F.; Poulichet, P.; Mazaleyrat, F.; Laboure, E.:** The current sensors in Power electronics - a review; EPE Journal, Vol. 11 No. 1, Feb 2001
- [60] **Kazmierkowski, M.:** Current control techniques for three-phase-voltage.source PWM converters : a survey, IEEE Transactions on industrial electronics, Vol 45, No.5, 1998
- [61] **Puls :** Datenblatt zum Einsatz von Netzteilen der Serie Silver-Line, Internet: www.puls-power.de
- [62] **Kahlen, K.; De Doncker, R.:** Current regulators for multi-phase permanent magnet spherical drives, IAS 2000, IEEE Conference on industrial application, Rom, 2000
- [63] **Isermann, R.:** Digitale Regelsysteme, Springer Verlag, Berlin, 1988
- [64] **Murakami, T.; Yu, F.; Ohnishi, K.:** Torque sensorless control in multidegree-of-freedom manipulator, IEEE Transactions on industrial electronics, 40(2):259-265, 1993

Einige Zeichnungen und Bilder der Motoren sind ganz oder teilweise von Herrn Thomas Reinartz (Laboratorium für Werkzeugmaschinen WZL-WM, RWTH-Aachen) und von Herrn Thomas Busch (Institut für Elektrische Maschinen IEM, RWTH-Aachen) übernommen worden. Unterstützung bei der ISEADSP-Karte erfolgte durch Herrn Claus-Ulrich Karipidis.

Eine ganze Reihe an Studenten haben im Rahmen ihrer Hilfstätigkeit am Institut an verschiedenen Themenstellungen mitgearbeitet. Im Zusammenhang mit den in dieser Arbeit beschriebenen Untersuchungen sind folgende vom Autor betreute Studien- und Diplomarbeiten am Institut für Stromrichtertechnik und Elektrische Antriebe entstanden:

- Joachim Plütschow: Analoge Ein/Ausgabeschnittstelle einer DSP-Karte, Diplomarbeit, 1997
- Lucas Hamers: Aufbau und Ansteuerung einer Ein/Ausgabeeinheit für einen digitalen Signalprozessor, Studienarbeit, 1998
- Stefan Reufer: Entwurf eines Regelungskonzeptes für einen Flächenmotor, Studienarbeit, 1998
- Kai Abendroth: Stromrichterentwurf für einen Flächenmotor, Diplomarbeit, 1998
- Ingo Voß: Erstellung einer Bedienoberfläche zur Ansteuerung eines Flächenmotors, Studienarbeit, 1999
- Thorsten Bartz: Entwicklung eines Stromrichters für einen Kugelmotor, Diplomarbeit, 1999
- Ingo Voß: Entwurf und Realisierung eines Kugelmotormodells, Diplomarbeit, 2000
- Christian Priebe: Regelalgorithmen für die Inbetriebnahme eines Kugelmotors, Diplomarbeit 2001
- Stefan Reufer: Implementierung und Optimierung von Regelungsverfahren an einem Flächenmotor, Diplomarbeit, 2002

Anhang B Verzeichnis der verwendeten Formelzeichen

| | |
|-------------------------------|---|
| \vec{A} | Summe der Kraftvektoren in Bewegungsrichtung (Vektorsortierverfahren) |
| \vec{B} | Summe der Kraftvektoren senkrecht zu Bewegungsrichtung (Vektorsortierverfahren) |
| C | Abkürzung für cosinus (zur Vereinfachten Darstellung) |
| $\vec{D}(\Delta\vec{\gamma})$ | Matrix für die Drehung um den Vektor $\Delta\vec{\gamma}$ |
| \vec{F} | Kraft |
| \vec{F}_{ges} | Gesamtkraft |
| $\vec{F}_{k,\text{Strom}}$ | Stromabhängige Kraft der Spule k |
| \vec{F}_{R} | Reibkraft |
| \vec{F}_{Rast} | Rastkraft |
| \vec{F}_{soll} | Sollkraft |
| $\vec{F}_{\text{Spule } k}$ | Kraft der Spule k |
| $\vec{F}_{\text{Vorst.}}$ | von der Vorsteuerung berechnete Kraft |
| \vec{F}_{Rast} | Rastkraft des Flächenmotors |
| F_x, F_y | Kraftkomponenten in x- und y-Richtung |
| \vec{F}_{Zusatz} | zusätzliche Kräfte (z.B. Reibung in den Lagern, angreifende Störgrößen) |
| \vec{F}_0 | normierte Kraft (Kraft einer Spule bei Bestromung mit 1A) |
| F_φ | Tangentialkraft in Richtung zunehmenden Längengrads |
| $F_{0,\varphi}$ | normierte Tangentialkraft in Richtung zunehmenden Längengrads |

| | |
|---------------------|---|
| F_{ϑ} | Tangentialkraft in Richtung zunehmenden Breitengrads |
| $F_{0,\vartheta}$ | normierte Tangentialkraft in Richtung zunehmenden Breitengrads |
| I_0 | normierter Strom 1A |
| I_{soll} | Spulensollstrom |
| I_{Sektor} | Sektorstrom |
| I_{Grenz} | max. zulässiger Spulenstrom |
| \bar{J} | Trägheitsmoment der Rotorkugel |
| $K_{Gewicht}$ | Konstante zur Berechnung des durch das Gewicht des Flansches oder einer bekannten Last erzeugten Drehmoments |
| L | Faktor für Strom (Vektorsortierverfahren) |
| L | Drehimpuls |
| L | Induktivität |
| M | Faktor für Strom (Vektorsortierverfahren) |
| \vec{M} | Moment |
| M_a | Durch Bestromung erzeugtes Drehmoment in Richtung der a-Achse |
| ΔM_{max} | maximaler Drehmomentbeitrag einer Dreierkombination von Sektoren |
| ΔM_{best} | maximaler Drehmomentbeitrag der drei Sektoren, die den größten maximalen Drehmomentbeitrag aller Dreierkombinationen leisten können |
| \vec{M}_{Reib} | Reibmoment |
| \vec{M}_{Gyro} | Gyrostatisches Moment |
| \vec{M}_{Extern} | Zusätzliche Lastmomente am Motor |
| \vec{M}_N^R | normiertes Drehmoment auf Rotor bezogen |
| \vec{M}_{Rast}^R | Rastmoment im Rotorsystem |
| \vec{M}_{Rotor}^R | Gesamtdrehmoment im Rotorkoordinatensystem |

| | |
|-----------------------|---|
| \vec{M}_{Soll}^R | Solldrehmoment im Rotorsystem |
| \vec{M}_{Strom}^R | Bestromungsdrehmoment im Rotorsystem |
| \vec{M}_{Spule}^R | Momentenbeitrag einer Spule im Rotorsystem |
| $\vec{M}_{k,Spule}^R$ | Momentenbeitrag der Spule k im Rotorsystem |
| $\vec{M}_{Gewicht}^R$ | Durch das Gewicht des Flansches oder einer Last verursachtes Drehmoment im Rotorsystem |
| \vec{M}_0^R | normiertes Drehmoment einer Spule bezogen auf das Rotorsystem |
| $\vec{M}_{Gewicht}^S$ | Durch das Gewicht des Flansches oder einer Last verursachtes Drehmoment im Statorsystem |
| \vec{M}_0 | normiertes Drehmoment einer Spule bezogen auf das a,b,c-System |
| $\vec{M}_{0,Sektor}$ | normiertes Sektordrehmoment im a,b,c-System |
| N | Faktor für Strom (Vektorsortierverfahren) |
| \vec{O}_{Spule}^S | normierter Ortsvektor der Spule im Statorsystem |
| \vec{O}_{Spule}^R | normierter Ortsvektor der Spule im Rotorsystem |
| $R_{Rotorkugel}$ | Radius der Rotorkugel |
| R | Elektrischer Widerstand |
| S | Abkürzung für sinus (zur Vereinfachten Darstellung) |
| ΔT | Simulationsschrittweite |
| $T_{R \rightarrow S}$ | Transformationsmatrix vom Rotor- ins Statorkoordinatensystem |
| $T_{S \rightarrow R}$ | Transformationsmatrix vom Stator- ins Rotorkoordinatensystem |
| U | Elektrische Spannung |
| U_{DC} | Zwischenkreisspannung |
| W | Arbeit |
| \vec{a} | Beschleunigung (translatorisch) |

| | |
|--|--|
| \vec{a} | Drehrichtung (normierter Drehvektor $\Delta\vec{\gamma}$) |
| \vec{a}_{soll} | Sollbeschleunigung |
| a_{max} | max. Beschleunigung (translatorisch) |
| $\vec{a}^R, \vec{b}^R, \vec{c}^R$ | Koordinatenachsen des a,b,c-Systems bezogen auf das Rotorsystem |
| $\vec{e}_{\text{Pos,Kipp}}^S$ | Regelabweichung des Positionsreglers zur Korrektur der Lage der Rotorhochachse |
| g | Gravitationskonstante |
| i | Strom |
| $k_\alpha, k_\beta, k_\gamma$ | Koeffizienten für eine Kombination von drei Sektoren; geben an, wie stark die Sektoren bestromt werden müssen, um ein Moment von 1 Nm zu erzeugen. |
| m | Masse |
| \vec{p}_{Spule}^R | Ortsvektor einer Spule im Rotorsystem |
| r_{Last} | Abstand des Schwerpunktes der Last vom Mittelpunkt des Rotors |
| $\vec{s}, \Delta\vec{s}$ | Strecke |
| \vec{s}_0 | Startposition |
| t | Zeit |
| \vec{v} | Geschwindigkeit |
| v_{max} | max. Geschwindigkeit |
| \vec{v}_0 | Anfangsgeschwindigkeit |
| x | Position des Flächenmotors in x-Richtung |
| $\vec{x}_{\text{Rotor}}^S,$ $\vec{y}_{\text{Rotor}}^S,$ \vec{z}_{Rotor}^S | Ortsvektor der x-,y- und z-Achse des Rotorsystems bezogen auf das Statorsystem |
| $\vec{x}_{\text{Rotor}}^R,$ $\vec{y}_{\text{Rotor}}^R,$ \vec{z}_{Rotor}^R | Ortsvektor der x-,y- und z-Achse des Rotorsystems bezogen auf das Rotorsystem |

| | |
|--------------------------------|--|
| \vec{z}_{Rotor} | Ausrichtung der Rotorhochachse im Statorsystem |
| α | Verdrehung des Schwenkbügels um die y-Achse des Statorsystems |
| $\alpha_x, \alpha_y, \alpha_z$ | Winkelbeschleunigung um die jeweilige Achse |
| $\vec{\alpha}^R$ | Winkelbeschleunigung im Rotorsystem |
| $\vec{\alpha}^S$ | Winkelbeschleunigung im Statorsystem |
| β | Winkel zwischen Rotorhochachse und der y-Achse des Statorsystems |
| $\Delta\vec{\gamma}$ | Drehvektor |
| $\Delta\gamma$ | Drehwinkel (Betrag des Drehvektors $\Delta\vec{\gamma}$) |
| φ | Drehwinkel des Rotors um seine Hochachse |
| φ_{kip} | Verkipprichtung des Rotors |
| φ_{rel} | relativer Längengrad bezogen auf eine Magnetkante |
| ϑ | Breitengrad bezogen auf das Rotorsystem |
| ϑ_{kip} | Verkippwinkel des Rotors |
| ϑ_{rel} | relativer Breitengrad bezogen auf eine Magnetkante |
| ψ | Differenz zwischen φ und φ_{kip} : $\psi = \varphi - \varphi_{kip}$ |
| $\vec{\omega}^S$ | Winkelgeschwindigkeit im Statorsystem |
| $\vec{\omega}^R$ | Winkelgeschwindigkeit im Rotorsystem |
| $\vec{\omega}_{Soll}^S$ | Soll-Winkelgeschwindigkeit im Statorsystem |
| $\vec{\omega}_{Soll,Kipp}^S$ | Komponente von $\vec{\omega}_{Soll}^S$ zur Korrektur der Lage der Rotorhochachse |
| $\vec{\omega}_{Soll,Dreh}^S$ | Komponente von $\vec{\omega}_{Soll}^S$ zur Korrektur des Drehwinkels φ um die Rotorhochachse |

Anhang C Kenndaten und Bilder der Motoren

C 1 Maße und Kenndaten des Flächenmotorprüfstandes

| | |
|---|---|
| Größe eines Läufermagnetes (Länge x Breite x Höhe) | 50mm x 50mm x 7,5 mm |
| Größe der Läuferplatte (7 x 7 Magnete) | 350mm x 350 mm |
| Magnetmaterial | NeFeB |
| Gewicht der bewegten Masse | 47 kg |
| Anzahl der Statorspulen | 3 x 3=9 Stück |
| Durchmesser Statorpolfuß | 30 mm |
| minimaler Abstand zwischen 2 Statorpolen | 33 mm |
| maximaler Verfahrweg (bei vollständiger Überdeckung der Läuferplatte) | 250 mm |
| Luftspalt zwischen Statorpolen und Magnetplatte | ca. 2 mm |
| Nennstrom pro Spulenwicklung | 4 A |
| Maximalstrom pro Spulenwicklung | 5 A |
| gemessene Induktivität der Spulenwicklung | 6-10 mH |
| Ohmscher Widerstand der Spulenwicklung | 1 Ω |
| Messsystem | Lineare Wegmessung für x/y-Achsen 5 μ m (ohne Interpolationseinheit) |
| maximale Vorschubkraft eines Statorpols über einer Magnetkante in Abhängigkeit des Stromes | ca. 12 N/A |
| maximale Gesamtvorschubkraft (3x3 Anordnung)* | ca. 100 N |

| | |
|---------------------------|------------------------|
| maximale Beschleunigung* | ca. 1 m/s ² |
| maximale Geschwindigkeit* | ca. 1 m/s |

* Diese Angaben sind Werte, die in allen Arbeitspunkten erreicht werden können. In bestimmten Positionen des Läufers werden diese Werte übertroffen.

C 2 Bilder des Flächenmotorprüfstands

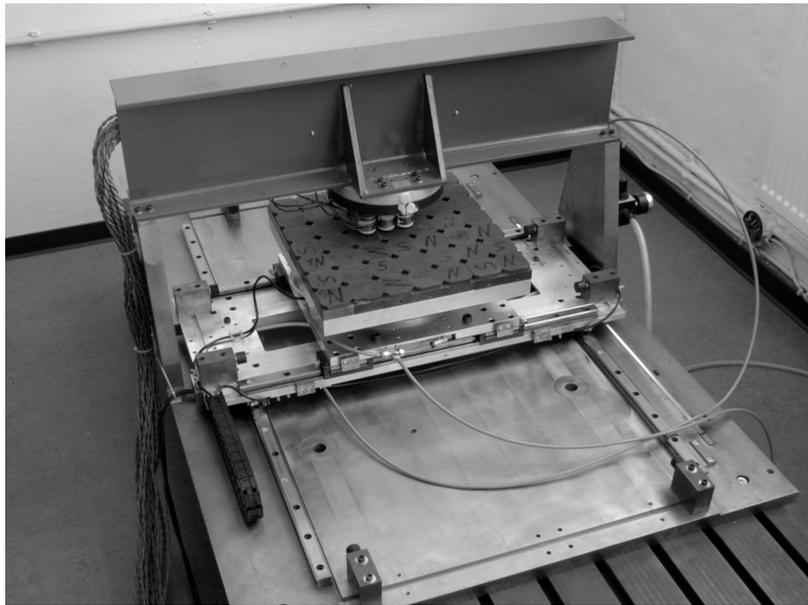


Bild C.1 Flächenmotor mit Druckluftschläuchen für Bremssystem
(Erläuterungen siehe Skizze in Kapitel 3)

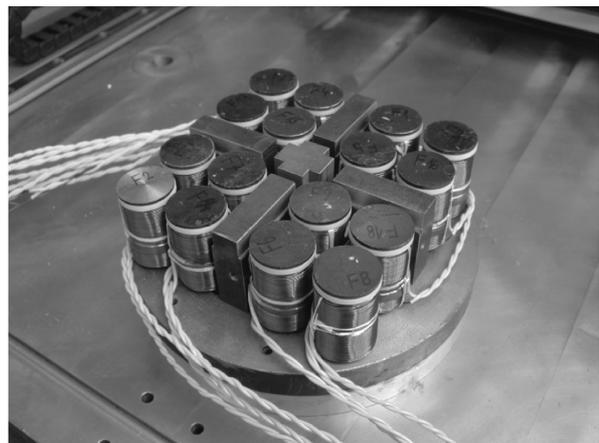


Bild C.2 Vollschrmetrische Anordnung mit 9 Statorpolwicklungen (links) und alternative Anordnung mit 16 Statorpolwicklungen und Magnetflussleitstücken (rechts)

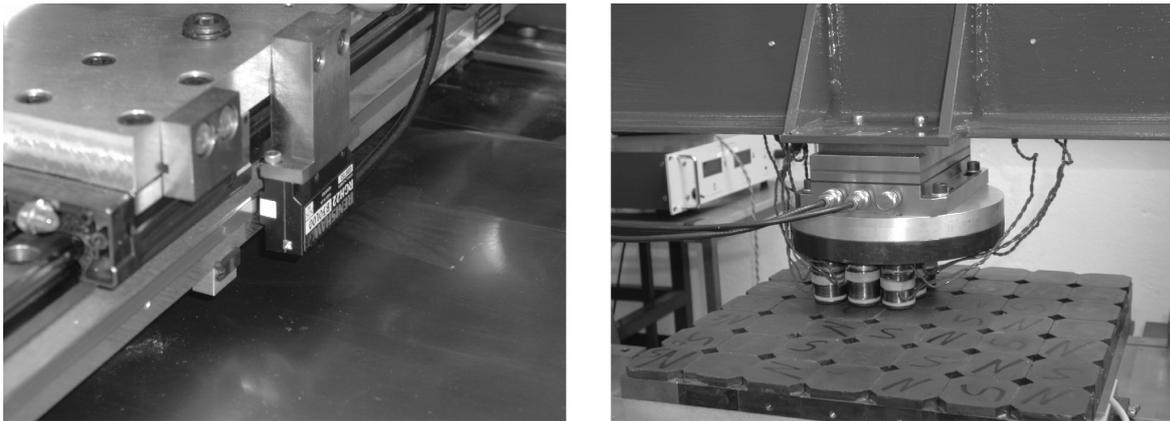


Bild C.3 Positionsmesssystem (links) und Kraftmessplattform (rechts)

C 3 Maße und Kenndaten des Kugelmotors

| | |
|---|--|
| Durchmesser der Rotorkugel | 275 mm |
| Anzahl der Magnete auf dem Rotor | 112 |
| Größe der Magnete | 22,5° x 22,5° absolute Größe von Position abhängig (siehe Kapitel 3) |
| Magnetmaterial | NeFeB |
| Gewicht der Hohlkugel mit Magneten | 36 kg |
| Gewicht des Flansches | 4 kg |
| Lagerart | hydrostatisch (Öl) |
| Spaltbreite zwischen Lagertasche und Rotor ⁺ | 40 µm |
| Steifigkeit der Lagerung ⁺ | 1000 N/µm in x- und y-Richtung 2500 N/µm in z-Richtung |
| Anzahl der Statorpole | 96 |
| Lufspalt zwischen Rotor und Statorpolen ⁺ | ca. 1 mm |
| Länge der Statorpole | 50 mm |
| Außendurchmesser des Gehäuses | 500 mm |

| | |
|--|---|
| Messsystem | Drehgeber für Rotorhochachse, Schwenkbügel mit Linearmaßstab für Verkippachse, Drehgeber für Bügelverkippung |
| Auflösung bei Drehung um Rotorachse | 2048 Striche/Umdrehung 2 versetzte Abtastköpfe 400fach interpoliert: 1/9000° Genauigkeit |
| Auflösung des Schwenkbügels | 44000 Striche/Umdrehung 2 versetzte Abtastköpfe 25fach interpoliert: 1/12000° Genauigkeit |
| Auflösung für Verkippung des Schwenkbügels | 2048 Striche/Umdrehung 2 versetzte Abtastköpfe 400fach interpoliert: 1/9000° Genauigkeit |
| Nennstrom pro Spulenwicklung | 4 A |
| Maximalstrom pro Spulenwicklung | 5 A |
| nutzbares Drehmoment ⁺⁺ | 40 Nm |
| maximale Winkelgeschwindigkeit ⁺⁺ | 720°/s |
| maximale Winkelbeschleunigung ⁺⁺ | 80° s ⁻² |

⁺ Auslegungswerte, die aufgrund der Fertigungstoleranzen variieren können

⁺⁺ Werte, die in allen Positionen erreichbar sein sollen

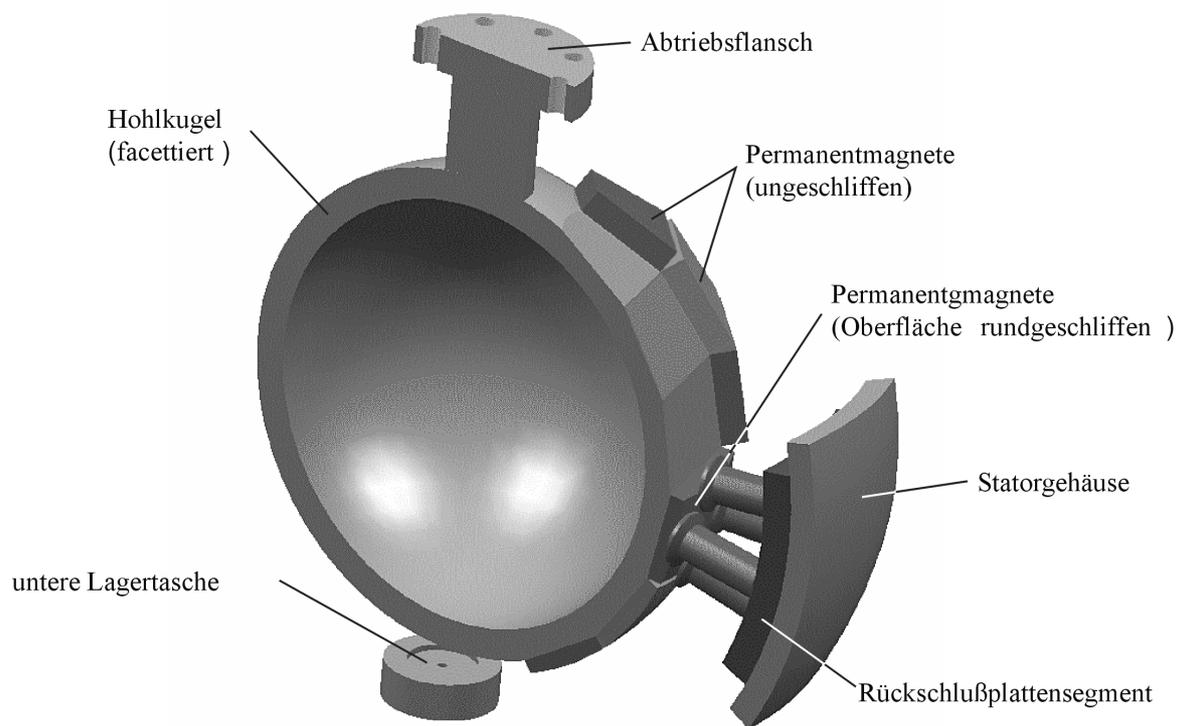
C 4 Skizzen und Bilder des Kugelmotorprüfstands

Bild C.4 Querschnitt durch den Kugelmotor mit Bezeichnung der einzelnen Elemente



Bild C.5 Statorgehäuse mit innen liegenden Rückschlussegmenten und Statorpolen

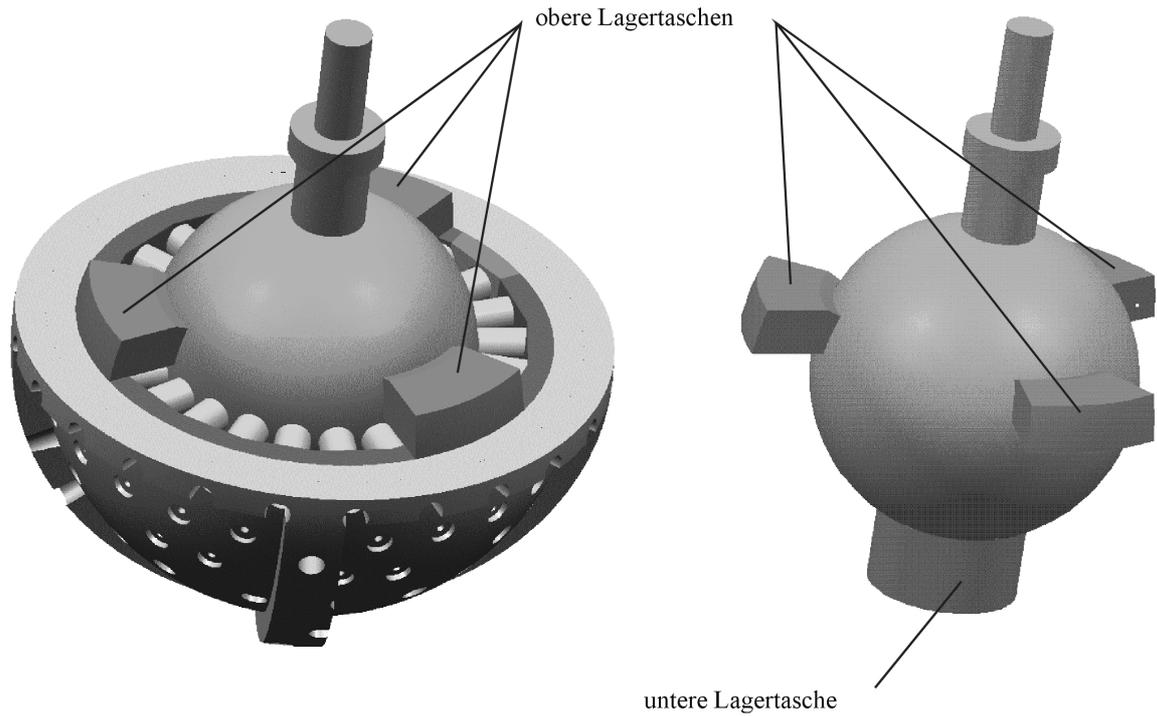


Bild C.6 Anordnung der hydrostatischen Lagertaschen

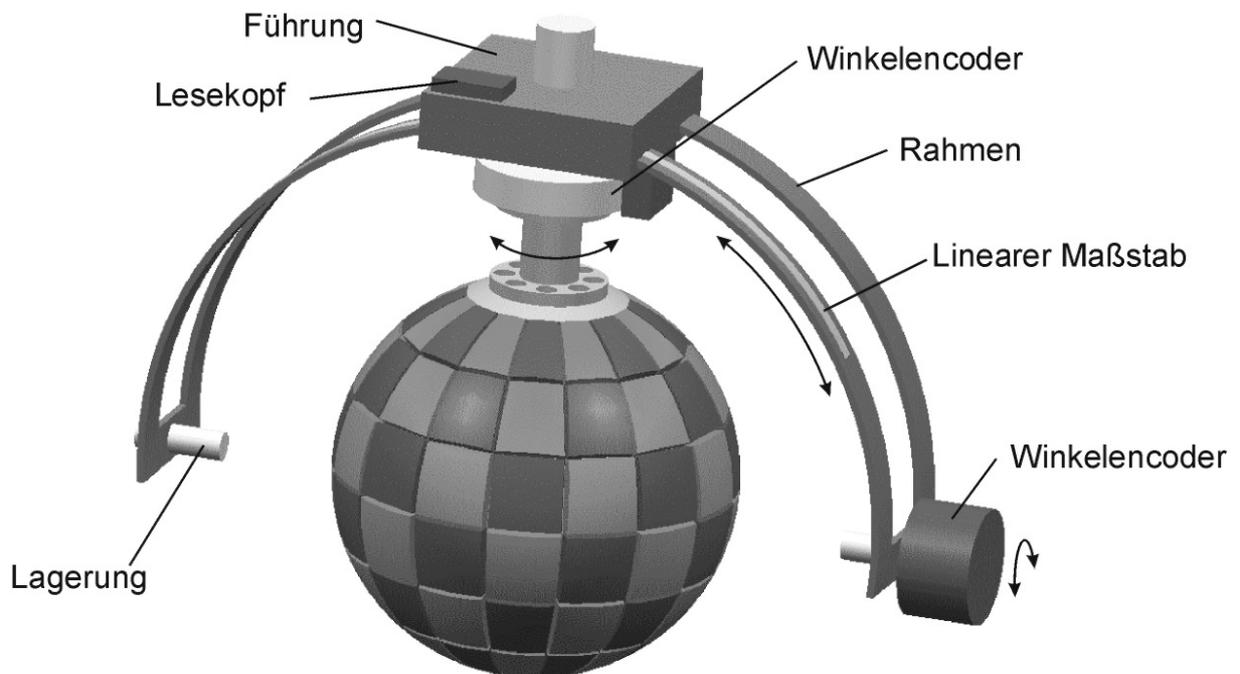


Bild C.7 Messsystem des Kugelmotors mit zwei Drehgebern und einem linearen Wegmesssystem

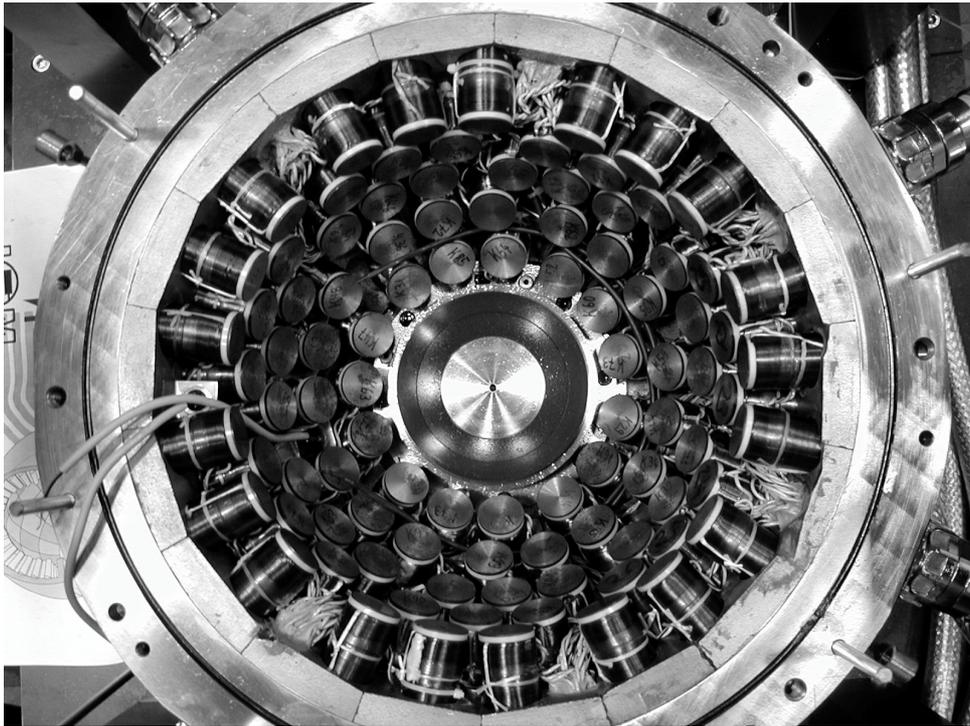


Bild C.8 Offenes Statorgehäuse mit Statorpolen und Spulenwicklung sowie der unteren hydrostatischen Lagertasche

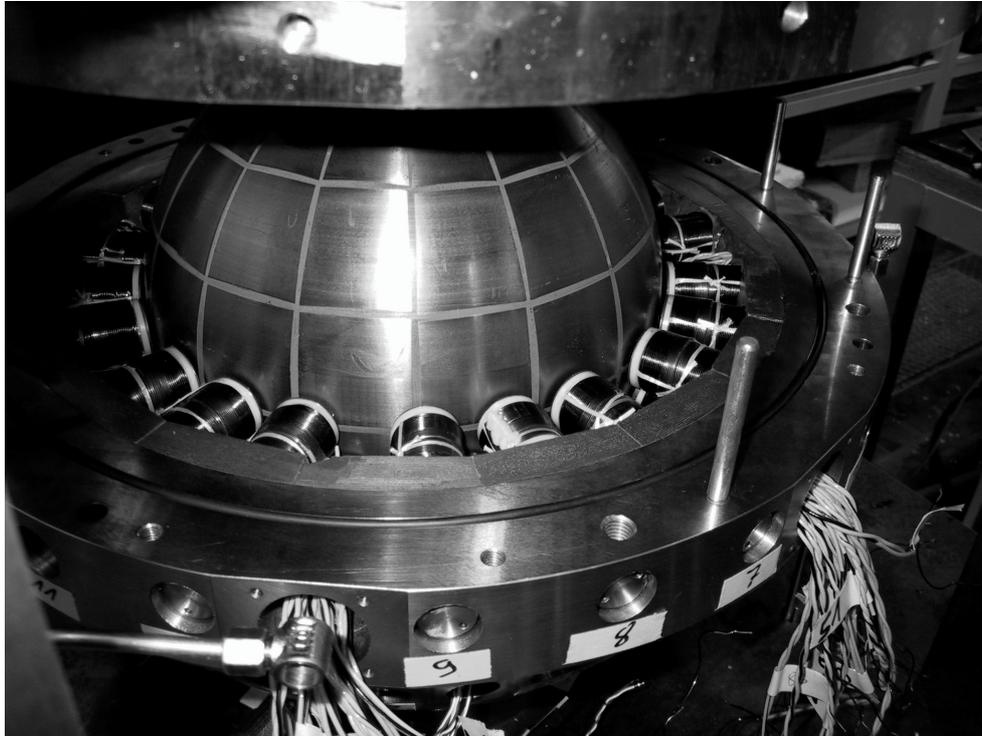


Bild C.9 Rotor in Statorgehäuse vor Montage der oberen Lagertaschen

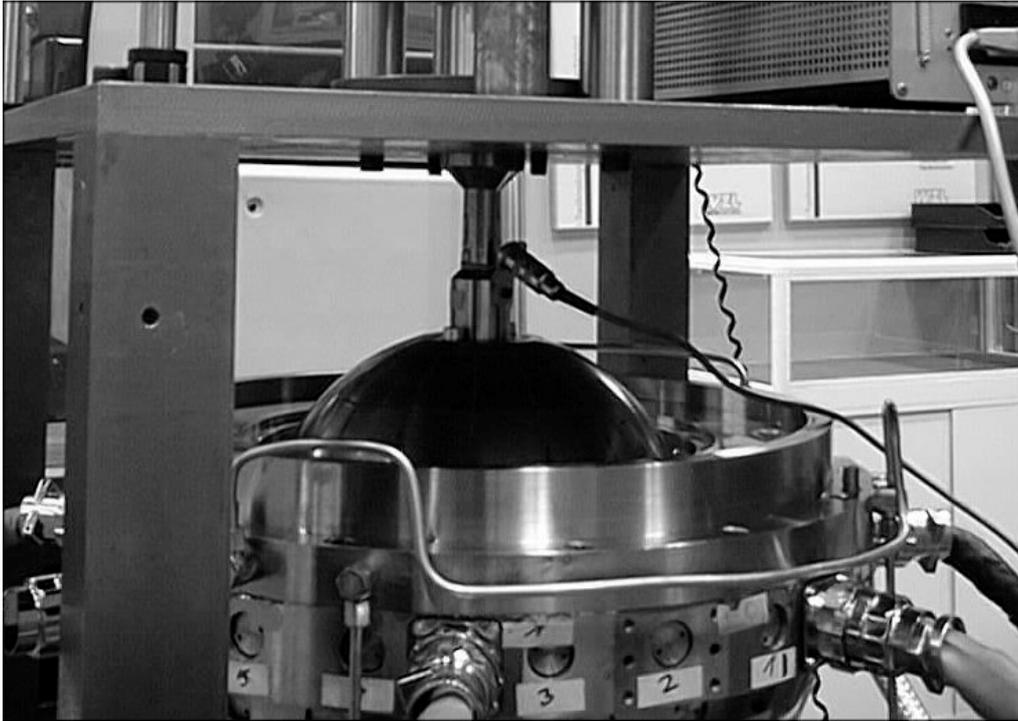


Bild C.10 Kugelmotor mit Klemmung um die Rotorflanschachse

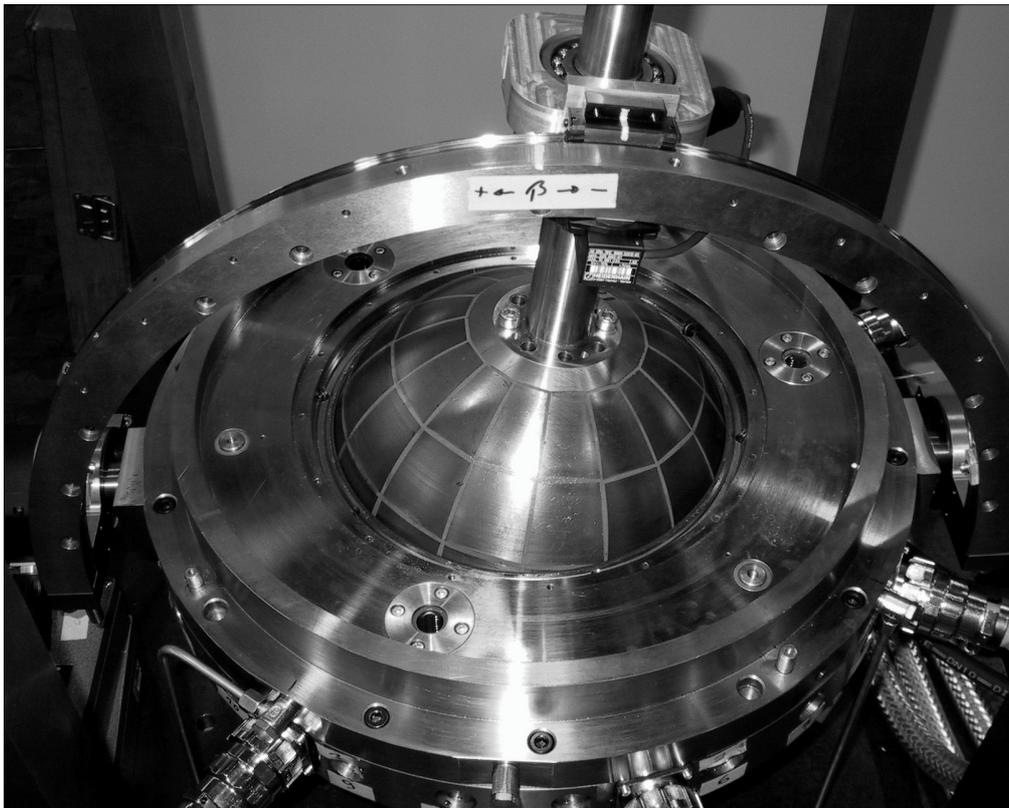


Bild C.11 Kugelmotor mit Schwenkbügel für die Positionsmessung

Anhang D Kenndaten und Bilder der Antriebskomponenten

D 1 Kenndaten der Leistungselektronik

| | |
|---|---|
| Zwischenkreisspannung | ± 24 V |
| Nennstrom je Netzteile (PULS SL40.301) | 40 A |
| Maximalstrom je Netzteil | 50 A |
| Anzahl der Netzteile | je 2 parallel für pos. und neg. Spannung |
| Versorgung der Netzteile | aus 3 Phasennetz, keine Rückspeisung |
| Zwischenkreiskondensatoren | 56000 μ F |
| Maximale Leistung der Bremschopperwiderstände | 1000 W |
| Nennstrom pro Stromrichterkanal | 4 A |
| Maximalstrom pro Stromrichterkanal | 5 A |
| Anzahl der Stromrichterkanäle insgesamt | 96 Stück |
| Anzahl der Stromrichterkanäle pro Karte | 4 Stück |
| Schaltfrequenz der Stromrichterkanäle | 17,5 kHz (über zentrales Signal variierbar) |
| Strommessung der Kanäle | Messshunt (0,1 Ω) |
| MOSFETs der Halbbrückenschaltung | STP45N10 (TO220 Gehäuse) |
| | |

D 2 Skizzen und Fotos der Leistungselektronik

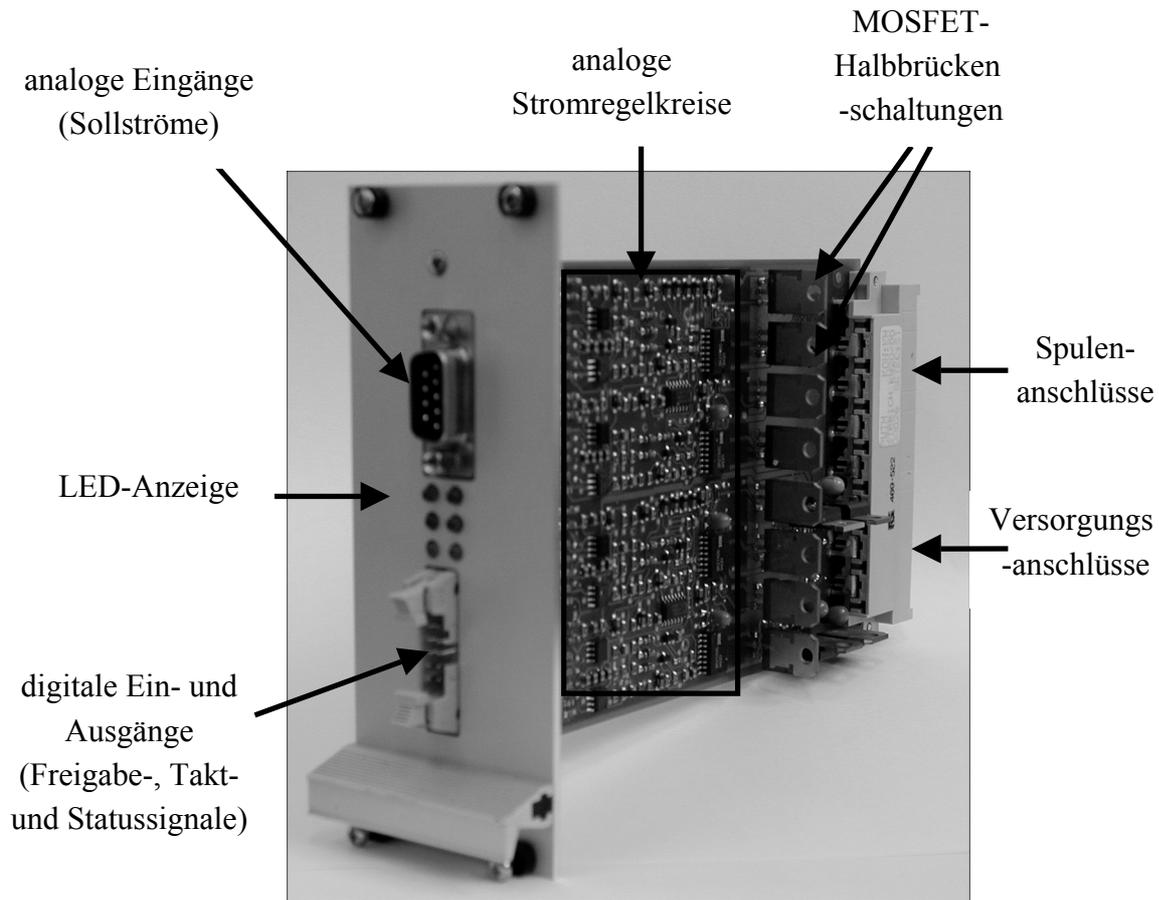


Bild D.1 Stromrichterplatine mit 4 Kanälen ohne montierten Kühlkörper

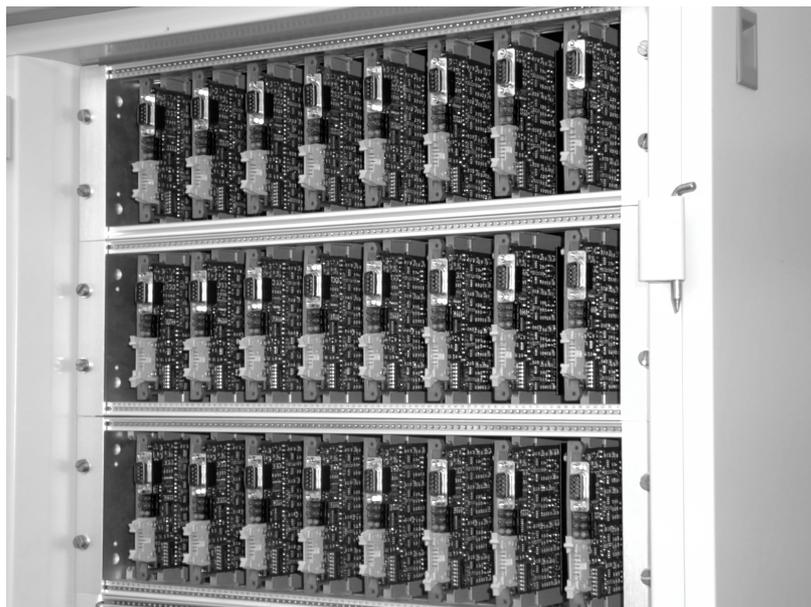


Bild D.2 Stromrichterrack mit 24 Platinen für insgesamt 96 einzelne Kanäle

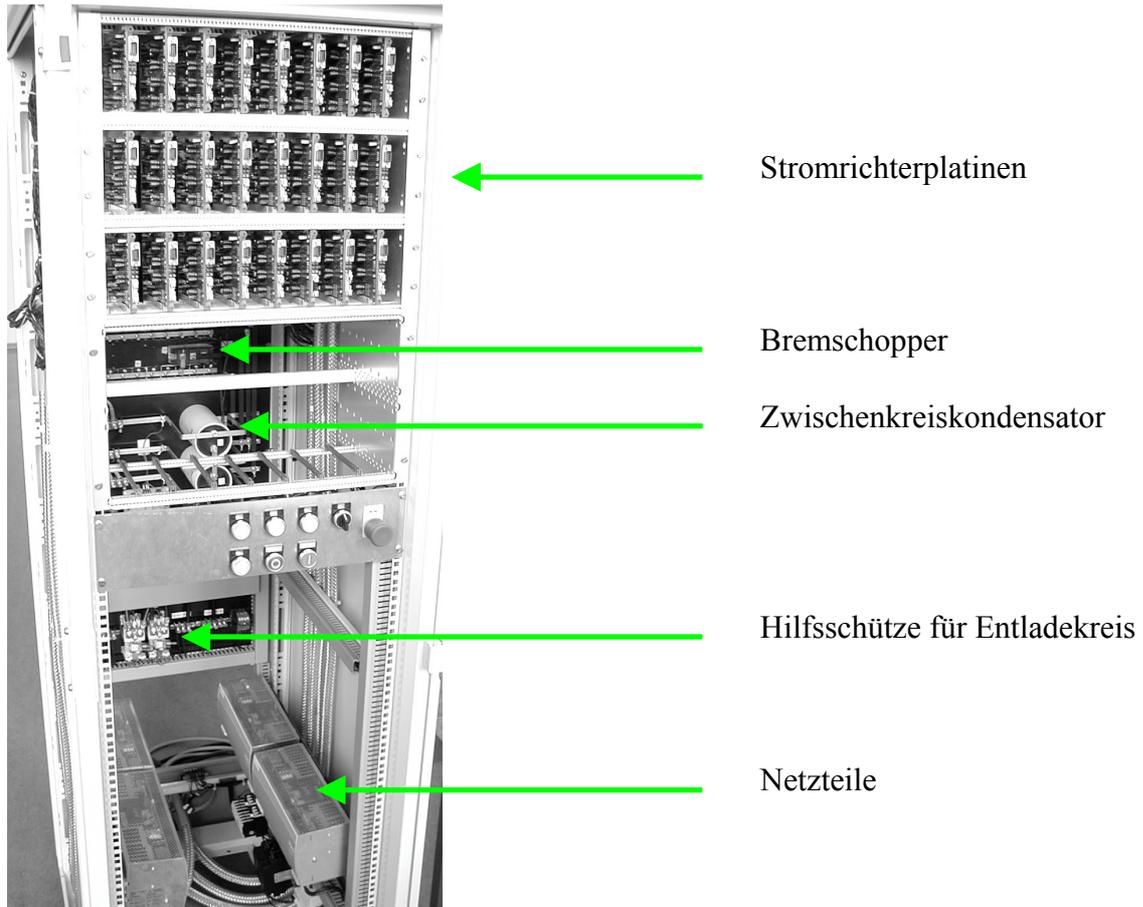


Bild D.3 Stromrichterschrank mit Stromrichterplatten und Leistungsversorgung

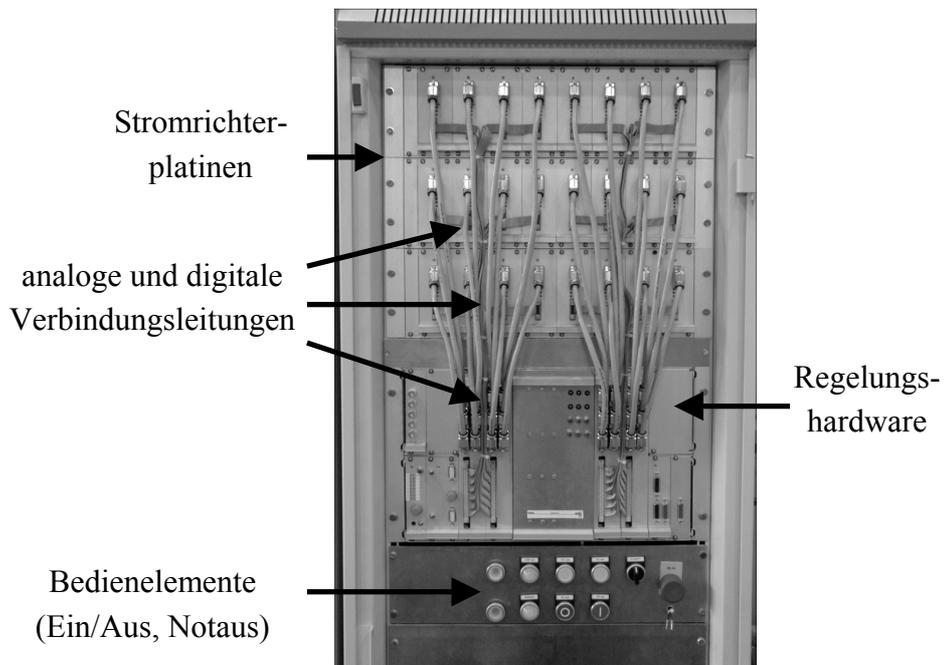


Bild D.4 Verkabelung von Stromrichterplatten und Regelungshardware

D 3 Die Regelungshardware

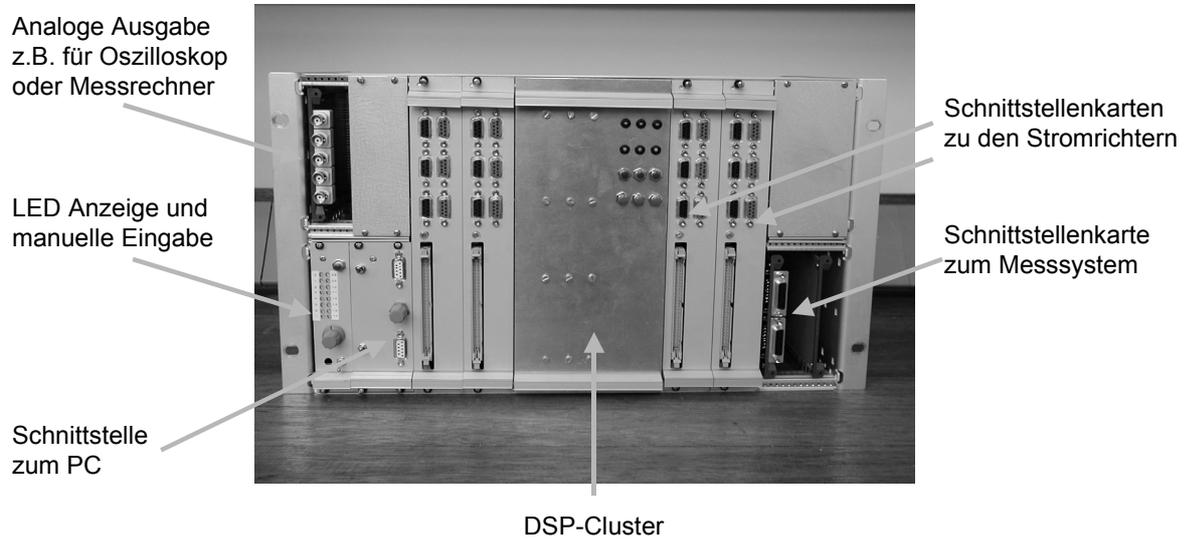


Bild D.5 Regelungshardware mit DSP-Cluster und Schnittstellenkarten

Lebenslauf

Angaben zur Person

Klemens Kahlen
geboren am 22.7.69 in Aachen
Familienstand: verheiratet, 1 Kind
Staatsangehörigkeit: deutsch

Schulbildung

1975-1979 Carl-Orff-Grundschule in Weinheim
1979-1985 Gymnasium (BIZ) in Hemsbach
1985-1988 Hohenstaufen-Gymnasium in
Kaiserslautern

Wehrdienst

1988-1989 Grundwehrdienst in Zweibrücken

Studium

1989-1996 Studium der Elektrotechnik an der
RWTH Aachen

Praktische Tätigkeiten vor und während des Studiums

1987 Ferientätigkeit bei BBC in Saarbrücken
1988 Mechanisches Grundpraktikum bei Garbe
Lahmeyer in Aachen
1988 Elektrotechnisches Grundpraktikum bei Tehalit in
Heltersberg
1990 Ferientätigkeit bei ABB Drives in Lampertheim
1993 Fachpraktikum bei SECV in Melbourne

Berufliche Tätigkeit / Promotion

1996-2002 wissenschaftlicher Assistent am Institut
für Stromrichtertechnik und Elektrische
Antriebe (ISEA) der RWTH Aachen

2002 Promotion

seit Juni 2002 OBERINGENIEUR AM ISEA

