

# Kapitel 1

## Einleitung

Umrichter gespeiste geregelte Drehstromantriebe stellen in vielen Bereichen der industriellen Anwendung den Stand der Technik dar. Wegen ihres guten Wirkungsgrads, ihrer hohen Leistungsdichte und ihrer guten regelungstechnischen Eigenschaften kommt dabei der permanent erregten Synchronmaschine eine besondere Bedeutung zu. Unübersehbar sind hierbei folgende Trends:

- Der Bedarf an Linearmaschinen steigt seit geraumer Zeit stetig.
- Rotative (hochpolpaarige) Direktantriebe erlauben den Verzicht auf Getriebe, wodurch eine höhere Dynamik bei gleichzeitig geringerem Bauraumbedarf und geringeren Systemkosten erreicht werden kann.
- Die Systemkosten (Motor, Servoverstärker, Geber, Installationsaufwand usw.) insbesondere bei Anwendungen mit geringen Anforderungen an die Dynamik oder Positioniergenauigkeit sind einem steigenden Kostendruck unterworfen.
- Schnelldrehende Maschinen (niederpolpaarige Direktantriebe) werden mit immer höheren Drehzahlen betrieben. Hierbei kommen mittlerweile permanent erregte Synchronmaschinen in immer stärkerem Maße zum Einsatz.

Diese Arbeit setzt bei den beiden letzten Punkten an:

- Durch den Verzicht auf den Lagegeber können die Systemkosten deutlich gesenkt werden. Auch wenn dieser Ansatz seit mehreren Jahren auf vielfältige Weise verfolgt wird, hat sich im industriellen Umfeld noch keine Lösung in nennenswertem Umfang durchsetzen können. In dieser Arbeit werden hierzu neue Ansätze vorgestellt.
- Von einer sinusförmigen Speisung der schnelllaufenden permanent erregten Synchronmaschine in Verbindung mit einer zweiachsigen Regelung des Statorstrom-Raumzeigers verspricht man sich ein günstigeres thermisches Verhalten als bei blockförmig gespeisten Synchronmaschinen oder Asynchronmaschinen. Drehgeber für den entsprechenden Drehzahlbereich sind – falls überhaupt verfügbar oder einsetzbar – extrem kostspielig und daher für die Mehrheit der Anwendungen uninteressant. Daher sollen für diese Maschinen die Rotorlage und die Rotordrehzahl durch einen sensorlosen Ansatz bestimmt werden.

## Aufbau dieser Arbeit

Diese Arbeit gliedert sich in vier Schritte:

Zu Beginn (Kapitel 2) werden die allgemeinen Grundlagen, auf denen diese Arbeit basiert, erläutert. Hierzu gehört neben einer einleitenden Motivation die prinzipielle Regelungsstruktur, die auf dem hier verwendeten Maschinenmodell beruht. Ferner wird ein Überblick über die bekannten Verfahren zur sensorlosen Regelung gegeben. Ein Verfahren zur Lageschätzung beruht auf Asymmetrien in der Ständerinduktivität, auf deren Definition, Bedeutung und Bestimmung ebenfalls eingegangen wird. Das Kapitel endet mit einer Vorstellung des verwendeten Versuchsaufbaus.

Die Lage- und Drehzahlschätzung, der zentrale Teil dieser Arbeit, wird in den Kapiteln 3 und 4 behandelt:

Die Lageschätzung über einen Flusschätzer wird zu Beginn dargestellt. Durch die hier vorgestellte Korrektur der bestimmten Rotorlage kann die Drehzahlgrenze, ab dem dieses Verfahren eingesetzt werden kann, deutlich gesenkt werden. Im unteren Drehzahlbereich erfolgt die Lageschätzung über die bekannte Abhängigkeit der (differentiellen) Ständerinduktivität von der Rotorlage. Als neuer Ansatz wird hier ein aufgeschaltetes Testsignal über einen Korrelator ausgewertet. Für Maschinen, die keine nennenswerte Abhängigkeit der Ständerinduktivität von der Rotorlage besitzen, wird ein gesteuerter Anlauf vorgeschlagen. Auf den Übergang zwischen den Verfahren und die Bestimmung der Rotorlage bei der Inbetriebnahme wird am Ende des Kapitels eingegangen.

Die Drehzahlschätzung - behandelt in Kapitel 4 - erfolgt für den oberen Drehzahlbereich aus der Lageänderung. Für den unteren Drehzahlbereich sind diese Verfahren nicht geeignet; hier wird zusätzlich ein Beobachter eingesetzt.

In Kapitel 5 wird die Anwendung vom gesteuerten Anlauf und Flusschätzer auf schnelllaufende Maschinen erörtert. Hierzu wurden die Verfahren in einem industriellen Servoregler implementiert. Als Applikationsbeispiel wurde u.a. eine Turbomolekularpumpe gewählt, die sensorlos feldorientiert geregelt bis in den Nennbereich von 90.000 U/min betrieben wurde. Die Eignung des Verfahrens in Zusammenhang mit Filtern wird erörtert und das Kapitel durch die Diskussion der Messergebnisse abgeschlossen.

# Kapitel 2

## Grundlagen

Für hochdynamische Antriebslösungen werden typischerweise permanenterregte Synchronmaschinen mit rotorflussorientierter Regelungsstruktur eingesetzt. Hierfür wird die Rotorlage benötigt, die mittels eines Gebers bestimmt wird. Ziel dieser Arbeit ist, Verfahren aufzuzeigen, die einen Verzicht auf diesen Geber ermöglichen.

Die Einsatzgebiete, in denen die hier vorgestellten Verfahren verwendet werden sollen, werden hier zu Beginn vorgestellt. Die sich hieraus ergebenden Kriterien, die ein geeignetes Verfahren erfüllen muss und die sich zwangsläufig aus den Anwendungen ergeben, werden im Anschluss erläutert.

Die bereits erwähnte Regelungsstruktur und das hierfür benötigte Maschinenmodell werden in den beiden anschließenden Abschnitten angegeben.

Im Anschluss wird ein Überblick über bekannte Verfahren zur sensorlosen Regelung gegeben.

Die in Kapitel 3 genannten Verfahren beruhen teilweise auf der Arbeitspunktabhängigkeit der Maschinenparameter. Diese Abhängigkeiten werden in Abschnitt 2.6 diskutiert und ein Verfahren zur Bestimmung dieser Parameter wird angegeben.

Abgeschlossen wird dieses Kapitel durch die Darstellung des Versuchsstands.

### 2.1 Einsatzgebiete für sensorlose Verfahren

Dem Einsatz von sensorlosen Verfahren liegt folgende Motivation zugrunde:

- Einsparen der Kosten für Geber und Zuleitung und deren Installation
- Einsparen von Bauraum
- Verzicht auf eine mechanisch und elektrisch störanfällige Zuleitung
- Überwachung eines mechanischen Gebers

Allerdings werden sensorlose Verfahren auf absehbare Zeit die Präzision von höherwertigen Gebern nicht erreichen. Das mittelfristige Einsatzgebiet ist bei handelsüblichen Antriebssystemen mit z.B. niedrigen Anforderungen an Dynamik oder Gleichlauf zu sehen. Der Einsatz für Präzisionsantriebe, wie z.B. bei Werkzeugmaschinen, wird mittelfristig nicht

zur Diskussion stehen. Zielbereich ist eher das Segment der Antriebstechnik, in dem – ohne höhere Kosten – der Übergang von gesteuerten auf geregelte Systeme (aus Gründen wie z.B. verbesserter Wirkungsgrad) vollzogen werden soll.

Neben diesen vorwiegend wirtschaftlich motivierten Argumenten für geberlose Systeme können auch die physikalischen Grenzen von Gebersystemen genannt werden: Optische Geber oder Resolver besitzen einen Arbeitsbereich bis etwa 20.000 U/min. Für Antriebe mit höheren Drehzahlen gibt es zwei Verfahren, die ohne Lager arbeiten und daher auch für schnelllaufende Maschinen eingesetzt werden können.

- Bei im Stator angeordneten Hallsensoren wird meist lediglich die Richtungsänderung des Magnetfelds ausgewertet. Um eine feldorientierte Regelung zu realisieren, wird die Rotorlage (z.B. mittels einer PLL) extrapoliert [Syt02].

Alternativ kann eine blockförmige Bestromung realisiert werden. Derartig gespeiste Maschinen werden als bürstenlose Gleichstrommotoren (Brushless DC, BLDC) bezeichnet, für die es zahlreiche Ansätze für die Regelung ohne mechanischen Geber gibt. Nachteilig sind hierbei ein niedrigerer Wirkungsgrad und die damit verbundene höhere Erwärmung (zumindest des Stators) sowie eine geringere Dynamik.

- Rotorlagegeber mit höherer Auflösung werden meist über magnetoresistive Sensoren, die die Richtung eines Magnetfeldes bestimmen, realisiert. Industriell verfügbar sind diese Sensoren bis zu einer Drehzahl von 40.000 U/min. Diese Lösungen sind allerdings extrem kostspielig.

## 2.2 Randbedingungen für den Einsatz geberloser Systeme im industriellen Umfeld

### Messaufnehmer

Die heutzutage am Markt verfügbaren Frequenzumrichter besitzen meist als einzige Messaufnehmer zwei oder drei Stromsensoren sowie die Erfassung der Zwischenkreisspannung. Eine Strangspannungserfassung wird für die (geberbehaftete) feldorientierte Regelung nicht benötigt.

### a-priori-Kenntnis der Maschinenparameter

Gerade die elektrischen Parameter wie Statorwiderstand, Ständerinduktivität oder magnetischer Fluss können aufgrund von Fertigungstoleranzen innerhalb der gleichen Baureihe in geringem Maße schwanken. Es ist natürlich wünschenswert, nicht jede Maschine vor der Inbetriebnahme explizit vermessen zu müssen, sondern ein Verfahren einsetzen zu können, welches trotz dieser Schwankungen zuverlässig arbeitet. Der Statorwiderstand ist zudem stark temperaturabhängig. Verfahren sollten entsprechend robust sein oder sich entsprechend adaptieren.

Der konstruktive Aufbau der Maschine (Polpaarzahl, Anordnung der Permanentmagnete am Rotor, Lochzahl usw.) dagegen ist i.A. bei einer Baureihe konstant und darf insofern als bekannt vorausgesetzt werden.

### Robustheit

Die Robustheit der Regelung im Sinne von [Föl94] bezüglich Temperatur oder Last ist eine sofort einleuchtende Forderung. Dieses muss natürlich auch bei einer ungenau erfolgten Lage- oder Drehzahlschätzung gelten.

### Rechenleistung

In heutigen Servoumrichtern werden meist 16-Bit-Prozessoren mit Festkommaarithmetik eingesetzt. Als Forderung an den Schätzalgorithmus sind hieraus in Bezug auf Rechenaufwand und Speicherbedarf kompakte Algorithmen und numerische Stabilität zu nennen. Dieses erfordert bei Beobachtersystemen eine niedrige Systemordnung und die Kenntnis über den Bereich der Zustandsgrößen. Letzteres ist allerdings bei der Verwendung physikalisch deutbarer Größen meist gegeben.

### Initialisierung der Rotorlage

Beim Start der feldorientierten Regelung von Synchronmaschinen ist die Kenntnis der Rotorlage bezogen auf die Strangrichtung<sup>1</sup> erforderlich.

Bei der Detektion dieses Winkels muss auf die an die Maschinenachse gekuppelte Mechanik Rücksicht genommen werden, d.h. dass der Rotor keine unkontrollierten Bewegungen ausführen darf. Eine Initialisierung der Regelung hat vorzugsweise im Stillstand bei einer gegebenen Rotorlage stattzufinden.

## 2.3 Modellierung der permanenterregten Synchronmaschine ohne Berücksichtigung parasitärer Effekte

Die polradflussorientierte Regelung, die im nächsten Abschnitt erläutert wird, beruht auf einem einfachen Maschinenmodell, das im Folgenden vorgestellt wird. Die Abhängigkeit der Statorinduktivität vom Magnetisierungszustand bzw. der Rotorlage ist verhältnismäßig gering. Sie wird bei der folgenden Modellbildung der Maschine, die im Hinblick auf die Wahl der Regelungsstruktur und deren Auslegung erfolgt, nicht betrachtet.

Ausgehend von der Spannungsgleichung in Raumzeigerdarstellung

$$\underline{u}_S = R_S \underline{i}_S + \frac{d\underline{\psi}_S}{dt} \quad (2.1)$$

wird hier die Ständerflussverkettung  $\underline{\psi}_S$  in den festen Beitrag des Polrades  $\underline{\Psi}_P$  und den der Ständerwicklung  $L_S \underline{i}_S$  zerlegt. Durch eine Orientierung an einem statorfesten, orthogonalen, auf eine Polteilung bezogenen Koordinatensystem ( $\alpha, \beta$ -System, *statororientiertes Modell*, gekennzeichnet durch den hochgestellten Index  $S$ ) kann der Rotorfluss als  $\underline{\Psi}_P^S = \Psi_P e^{j\varepsilon_{RS}}$  angegeben werden, wobei  $\varepsilon_{RS}$  den Winkel zwischen der Richtung des

<sup>1</sup>Die auf die Polpaarzahl bezogene Rotorlage wird auch als die „elektrische Rotorlage“ bezeichnet.

Rotorflusses und der Magnetisierungsrichtung des Stranges  $a$  der Ständerwicklung bezeichnet. Der Raumzeiger des Polradflusses repräsentiert die Induktionswelle des Polrads;  $\varepsilon_{RS}$  bezeichnet somit auch den Winkel zwischen Rotor und Stator. Die Flussverkettung der Statorwicklung<sup>2</sup> lautet damit

$$\underline{\psi}_S^S = \Psi_P e^{j\varepsilon_{RS}} + L_S \underline{i}_S^S. \quad (2.2)$$

Wird ferner  $\omega_{RS}$  als die zeitliche Ableitung der Polradlage eingeführt, kann die Spannungsgleichung als

$$\underline{u}_S^S = R_S \underline{i}_S^S + L_S \frac{d\underline{i}_S^S}{dt} + j\omega_{RS} \Psi_P e^{j\varepsilon_{RS}} \quad (2.3)$$

angegeben werden. Werden Strom und Spannungszeiger am Polrad bzw. Polradfluss orientiert<sup>3</sup>, was mathematisch der Transformation

$$\underline{u}_S^R = \underline{u}_S^S e^{-j\varepsilon_{RS}}, \quad \underline{i}_S^R = \underline{i}_S^S e^{-j\varepsilon_{RS}} \quad (2.4)$$

entspricht, ergibt sich die Ständerspannungsgleichung zu:

$$\underline{u}_S^R = R_S \underline{i}_S^R + L_S \frac{d\underline{i}_S^R}{dt} + j\omega_{RS} \Psi_P + j\omega_{RS} L_S \underline{i}_S^R \quad (2.5)$$

Aus der Leistungsbetrachtung der permanentenregten Synchronmaschine ergibt sich das gebildete elektromagnetische Drehmoment:

$$m_M = m_{el} = \frac{3}{2} p \Psi_P \Im\{\underline{i}_S^S e^{-j\varepsilon_{RS}}\} \quad (2.6)$$

$$= \frac{3}{2} p \Psi_P \Im\{\underline{i}_S^R\} \quad (2.7)$$

$$= \frac{3}{2} p \Psi_P i_{Sq} \quad (2.8)$$

Durch Aufstellen der das Verhalten der Mechanik beschreibenden Gleichung

$$\frac{J}{p} \frac{d\omega_{RS}}{dt} = m_M - m_L \quad (2.9)$$

wird der Zusammenhang zwischen den mechanischen Größen hergestellt.

In dieser Beschreibung ist das Drehmoment zur  $q$ -Komponente des Stroms proportional, was regelungstechnisch von Vorteil ist, da die Signalverarbeitung stationär mit konstanten Signalen arbeiten kann.

Nachteilig ist allerdings die Kopplung von Real- und Imaginärteil des Stromzeigers durch den letzten Summanden in der Gleichung 2.5, die aber durch eine Entkopplung aufgehoben werden kann.

Der Wirkungsplan des hier vorgestellten Modells ist in Abbildung 2.1 gegeben.

<sup>2</sup>So weit erforderlich wird durch ein hochgestelltes  $S$  bzw.  $R$  kenntlich gemacht, ob die jeweilige Größe im statororientierten oder rotororientierten Koordinatensystem angegeben ist.

<sup>3</sup>Hierfür werden auch die Bezeichnungen Feld-, Rotor- oder Läuferorientierung verwendet. Als Koordinaten werden die  $d$ - und die  $q$ -Achse ( $d$ : direct axis;  $q$ : quadrature axis) gewählt.

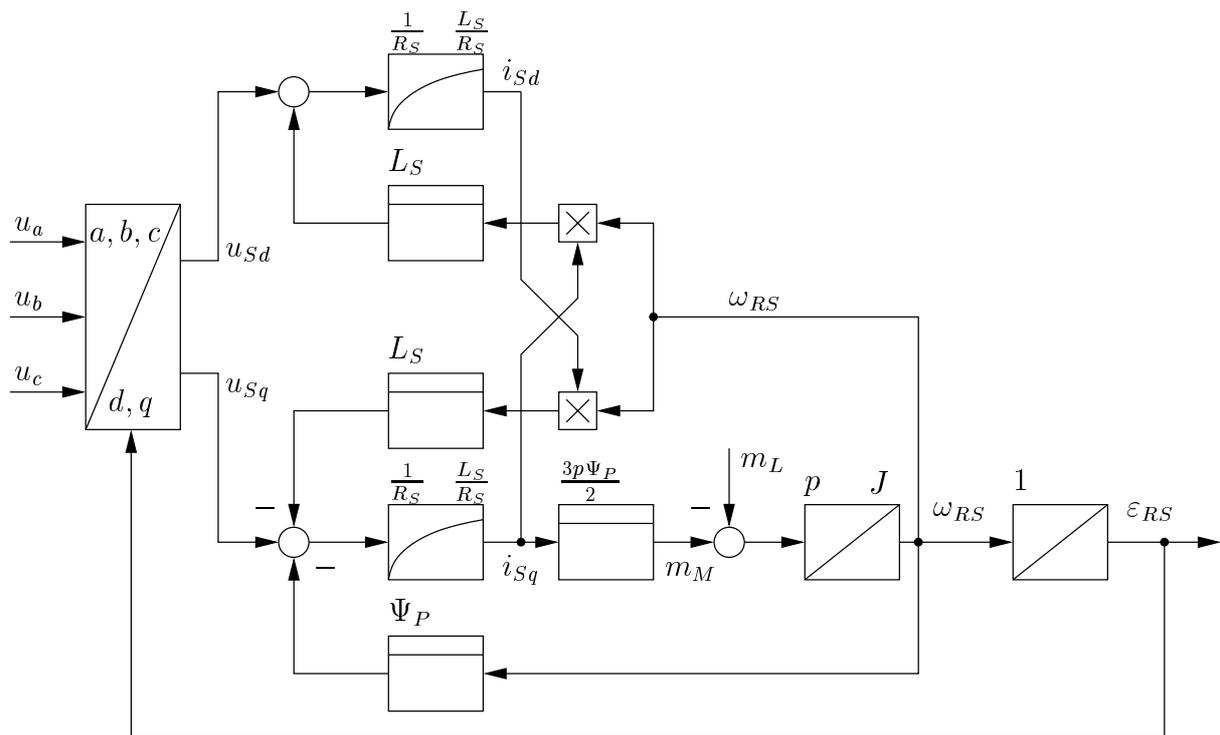


Abbildung 2.1: Wirkungsplan des verwendeten Modells einer fest erregten Synchronmaschine in polradfesten Koordinaten

## 2.4 Polradorientierte Regelung

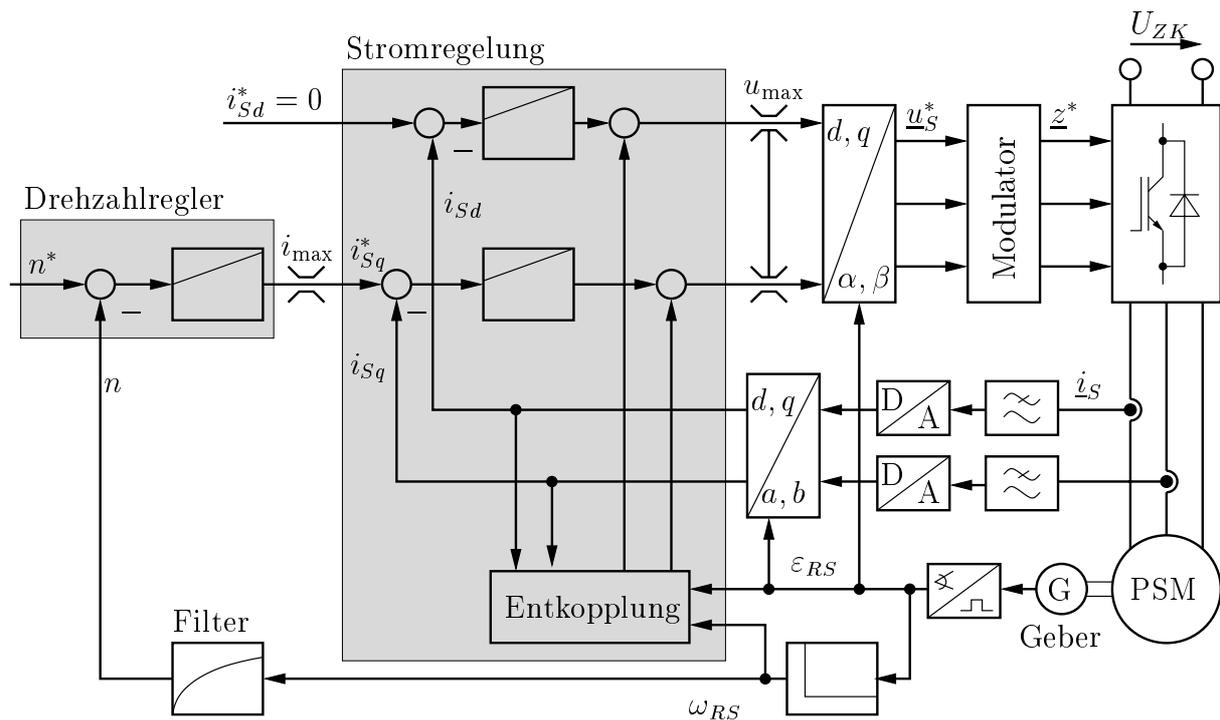
Auf die in Kapitel 2.3 beschriebene Modellbildung aufsetzend hat sich die in Abbildung 2.2 skizzierte Regelungsstruktur in  $d, q$ -Koordinaten bewährt. Ihr zugrunde liegt ein kaskadierter Entwurf mit der Stromregelung für die d- bzw. q-Komponente in der inneren Kaskade und einer überlagerten Drehzahlregelung.

Als Messgrößen werden hier

- 2 Strangströme (z.B.  $i_{Sa}, i_{Sq}$ ) für die Stromregelung (ausreichend, da der Sternpunkt der Statorwicklungen i.A. nicht angeschlossen ist),
- die Lage des Polradflusses  $\varepsilon_{RS}$  und
- die Rotordrehzahl  $n$  für die überlagerte Drehzahlregelung

benötigt<sup>4</sup>. Die Ströme werden über im Umrichter integrierte Sensoren gemessen. Über einen auf der Motorwelle montierten Lagegeber – Inkremental- oder Absolutwertgeber; aufgrund des niedrigen Preises werden meist Resolver eingesetzt – wird die Rotorlage bestimmt. Die Rotorgeschwindigkeit wird dann über die Differenzierung des Winkelsignals gewonnen.

<sup>4</sup>Wird der Umrichter am Drehstromnetz betrieben, wird typischerweise auch die Zwischenkreisspannung  $U_{ZK}$  gemessen.



**Abbildung 2.2:** Blockschaltbild einer rotorflussorientierten Regulationsstruktur

Die Lage des Polradflusszeigers – die Lage der Maxima der Flussdichte im Luftspalt – kann nicht direkt gemessen werden. Sie entspricht aber nahezu der mechanischen Rotorlage. Abweichungen zwischen der Rotorlage und der Lage des Polradflusszeigers ergeben sich z.B. durch die Statornutung, da hier das magnetische Feld den durch die Statornutung vorgegebenen diskreten Richtungen folgt. Die Folge sind Oberschwingungen im erzeugten Drehmoment bzw. der Drehzahl des geregelten Systems, da der (gemessene) Transformationswinkel um die Lage des Rotorflusszeigers schwankt. Verfahren zur Unterdrückung dieser Störungen werden z.B. in [Sch04] diskutiert.

Bei dem Verzicht auf mechanische Geber wird auch von *sensorloser Regelung* gesprochen. Ziel ist es also, geeignete Schätzverfahren für Rotor(fluss-)lage und Drehzahl zu finden. Die Regulationsstruktur – Drehzahlregelung, unterlagerte Stromregelung in rotorflussorientierten Koordinaten und Entkopplung – ist in der Antriebstechnik weit verbreitet und bekannt und soll auch hier erhalten bleiben.

Die Stromregler werden hierbei nach den bekannten Verfahren (z.B. aus [Föl94] nach den als *symmetrisches Optimum* bekannten Einstellregeln) ausgelegt. Ein Fehler  $\Delta\epsilon_{RS}$  in der zur Transformation verwendeten Rotorlage ( $\epsilon_{RS}$ ) hat verhältnismäßig geringe Auswirkungen auf den Betrag des Stroms (Faktor  $\cos(\Delta\epsilon_{RS})$ ) und die dadurch verursachten Verluste (Faktor  $\cos^2(\Delta\epsilon_{RS})$ ). Bei einem Fehler von  $20^\circ$  in der Lageschätzung sind immerhin noch 94% des Stroms drehmomentbildend.

Wird die Rotorlage nicht über einen Geber, sondern über einen Schätzalgorithmus ermittelt, so wird zur Auslegung des Drehzahlreglers in der Drehzahlrückführung neben dem Filter noch ein Totzeitglied eingefügt, mit dem die Verzögerung durch den Schätz-