

Title:	Charakterisierung und Auslegung von fremderregten Synchronmaschinen als Traktionsantrieb mit Hilfe der normierten Parameterebene
Authors:	Patrick Winzer, Martin Doppelbauer
Institute:	Karlsruhe Institute of Technology (KIT) Elektrotechnisches Institut (ETI) Hybrid Electric Vehicles (HEV)
Type:	Conference Proceedings
Published at:	Energieversorgung auf dem Weg nach 2050: Beiträge des Internationalen ETG-Kongresses, Berlin, Germany, November 5-6, 2013 Publisher: VDE-Verlag, Berlin Series: ETG-Fachbericht 139 ISSN: 0341-3934 Year: 2013 ISBN: 978-3-8007-3550-1
Hyperlinks:	<a href="https://www.vde-verlag.de/proceedings-de/453550177.html">https://www.vde-verlag.de/proceedings-de/453550177.html</a>

# Charakterisierung und Auslegung von fremderregten Synchronmaschinen als Traktionsantrieb mit Hilfe der normierten Parameter-ebene

## Characterisation and Dimensioning of electrically excited synchronous machines as traction drives by means of the normalised parameter plane

Dipl.-Ing. Patrick Winzer, Prof. Dr.-Ing. Martin Doppelbauer  
Elektrotechnisches Institut (ETI) – Hybridelektrische Fahrzeuge  
Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Kaiserstr. 12, 76131 Karlsruhe, 0721 608 41955, patrick.winzer@kit.edu

### Kurzfassung

In den neunziger Jahren haben einige Autoren gezeigt, dass sich die Drehmoment- und Leistungscharakteristik von permanentmagneterregten Synchronmaschinen durch geeignete Normierung auf nur zwei Parameter zurückführen lässt. Es wurde eine zweidimensionale Parameterebene eingeführt, in die jede permanentmagneterregte Synchronmaschine eingeordnet und so bewertet werden kann. Dadurch können insbesondere die Maximaldrehmomentkurven im Feldschwächbereich sowie der Leistungsfaktor und damit die Umrichtererausnutzung anschaulich beschrieben werden. Mit diesem Hilfsmittel lassen sich Maschinenentwürfe schon im Grobentwurf schnell und einfach charakterisieren und miteinander vergleichen.

In diesem Beitrag wird das Verfahren zur Anwendung auf fremderregte Synchronmaschinen erweitert. Im Gegensatz zu permanentmagneterregten Synchronmaschinen existiert bei diesen ein Freiheitsgrad mehr – so ist die Rotorerregung veränderlich und erlaubt eine bessere Anpassung des Maschinenverhaltens an das einer idealen Maschine.

Es wird gezeigt, wie die Parameter der fremderregten Maschine ihre Lage in der Parameterebene beeinflussen und welche Drehmoment- und Leistungscharakteristik resultieren. Daraus werden grundlegende Aussagen zum Grobentwurf gewonnen. Abschließend wird gezeigt, wie die Parameter einer fremderregten Synchronmaschine als Traktionsantrieb eines Elektrofahrzeugs mit Hilfe der Parameterebene gewählt werden können.

### Abstract

In the nineties, several authors showed that the torque and power characteristics of permanent magnet synchronous machines can be affiliated to only two parameters by suitable normalization. A two dimensional parameter plane was introduced, in which every permanent magnet synchronous machine can be classified and thus be evaluated. Thereby, especially the maximum torque curve in the field weakening region and the power factor and thus the inverter utilization can be described graphically. Using this tool, machine designs can be characterized and compared quickly and easily during the preliminary design process.

This paper expands the procedure to be applied to externally excited synchronous machines. As opposed to permanent magnet synchronous machines, they contain an additional degree of freedom – the rotor excitation is variable and allows a better adaption of the machine behavior to that of an ideal machine.

It will be shown how the parameters of an externally excited synchronous machine affect the position in the parameter plane and which torque and power characteristics result. Consequently, fundamental statements concerning the preliminary design process are gained. Finally it will be shown how the parameters of an externally excited synchronous machine as a traction drive can be chosen by means of the parameter plane.

## 1 Einleitung

Die Umrichterspeisung von dreiphasigen elektrischen Maschinen unter gezielter Ausnutzung des Feldschwächbereichs ist verglichen mit der Geschichte elektrischer Maschinen ein relativ junges Kapitel [1]. Erst Mitte der 1980er Jahre begann man mit der Erforschung dieses Betriebsbereiches, z.B. durch [2]. Es folgten einige Arbeiten, in denen der Einfluss der Maschinenparameter untersucht wurde, z.B. [3]. Darauf aufbauend gelang es schließlich Soong [4], eine Parameterebene einzuführen, die von nur

zwei Maschinenparametern aufgespannt wird: Dem Verhältnis aus Quer- zu Längsinduktivität  $\zeta = L_q/L_d \geq 1$  und der auf die Statorflussverkettung im Eckpunkt bezogene Permanentmagnetflussverkettung  $\psi$ . In diese Ebene kann jede mögliche permanentmagneterregte Synchronmaschine (PSM) mit  $L_q \geq L_d$  eingeordnet werden. Jedem Punkt dieser Ebene kann eine eigene Betriebscharakteristik (Drehmoment bzw. Leistung über Drehzahl) zugeordnet werden. Durch Einordnen von Maschinen in diese Parameterebene kann ihr Verhalten anschaulich dargestellt werden. Ebenso können Maschinen mit Hilfe dieser Ebe-

ne entworfen werden, indem ausgehend von der gewünschten Charakteristik und den geforderten Eckdaten die benötigten Maschinenparameter berechnet werden. Weiterführende Arbeiten (z.B. [5]) haben diese Ebene für PSMs mit  $L_q < L_d$  erweitert.

In diesem Beitrag wird das Verfahren auf fremderregte Synchronmaschinen (FESM) übertragen. Bei diesen existiert mit dem Erregerstrom ein Freiheitsgrad mehr. Dadurch kann für jede Drehzahl die Rotorerregung, die bei der PSM durch die Permanentmagnete fest vorgegeben ist, so eingestellt werden, dass sich unter Einhaltung der Strom- und Spannungsnebenbedingungen das maximal mögliche Drehmoment einstellt. Die Parameterebene bleibt dabei zweidimensional, da die Rotorerregung stets drehzahlabhängig optimal eingestellt wird.

Im zweiten Abschnitt werden die Grundgleichungen der normierten Parameterebene eingeführt. Anschließend wird die Parameterebene der FESM vorgestellt, in der einige wichtige Maschineneigenschaften dargestellt werden. Abschließend wird an einem Beispiel gezeigt, wie die Parameterebene beim Maschinenentwurf genutzt werden kann.

## 2 Normierungsgleichungen

Die von Soong [4] eingeführte Parameterebene wird durch das Verhältnis aus Quer- zu Längsinduktivität  $\zeta = L_q/L_d$  und die auf die Statorflussverkettung im Eckpunkt bezogene Permanentmagnetflussverkettung  $\psi$  aufgespannt. In [1] wurde nachgewiesen, dass diese beiden Parameter die Charakteristik jeder Synchronmaschine mit den nachfolgenden Annahmen vollständig beschreibt.

Eine FESM unterscheidet sich von einer PSM dadurch, dass der vom Rotor erzeugte Teil der Statorflussverkettung nicht fest, sondern variabel ist. Setzt man die maximal mögliche Erregerflussverkettung der FESM mit der Permanentmagnetflussverkettung der PSM gleich, können FESMs im Grunddrehzahlbereich und im Eckpunkt wie eine PSM betrachtet werden, da in diesen Bereichen stets voller Erregerstrom gestellt wird, um maximales Drehmoment zu erhalten. Die Normierungsvorschriften von Soong lassen sich also in gleicher Weise auf FESMs anwenden, wobei  $\Psi_{PM}$  durch  $\Psi_{err,max}$  ersetzt wird (siehe Gleichung (11)).

### 2.1 Annahmen

Grundsätzlich müssen einige Annahmen getroffen werden, um die Betriebscharakteristik von Synchronmaschinen auf zwei Parameter zu reduzieren [5]:

- Die Maschine ist verlustfrei, insbesondere wird der Statorwiderstand vernachlässigt.
- Das Eisen wird als magnetisch linear angenommen, sodass konstante Induktivitäten  $L_d$  und  $L_q$  in d- und q-Richtung definiert werden können.
- Oberwelleneffekte und sonstige parasitäre Eigenschaften werden nicht berücksichtigt.

Darüber hinaus wird nur eine beschränkte Teilmenge von Betriebspunkten betrachtet:

- Es werden stationäre Betriebspunkte betrachtet.
- Es werden lediglich Betriebspunkte maximalen Drehmoments über der Drehzahl betrachtet.

### 2.2 Gleichungssystem

Ausgehend von der Speisung mit idealen Stromquellen im amplitudeninvarianten d/q-System nach Schröder [6] und den oben aufgeführten Annahmen ergeben sich die folgenden Maschinengleichungen.

In der FESM bildet sich eine Statorflussverkettung gemäß

$$\Psi_d = \Psi_{err} + L_d \cdot I_d \quad (1a)$$

$$\Psi_q = L_q \cdot I_q \quad (1b)$$

$$\Psi = \sqrt{\Psi_d^2 + \Psi_q^2} \quad (1c)$$

aus. Da das Feld mit der elektrischen Kreisfrequenz  $\omega$  rotiert, werden die Spannungen

$$U_d = -\omega \Psi_q = -\omega (L_q \cdot I_q) \quad (2a)$$

$$U_q = \omega \Psi_d = \omega (\Psi_{err} + L_d \cdot I_d) \quad (2b)$$

$$U = \sqrt{U_d^2 + U_q^2} = \omega \Psi \quad (2c)$$

induziert. Die von der Spannung und der Drehzahl unabhängige Drehmomentgleichung lautet:

$$M = \frac{3}{2} p \cdot (\Psi_{err} + (L_d - L_q) \cdot I_d) \cdot I_q \quad (3)$$

Da das System verlustfrei angenommen wird, kann mit

$$P = M \cdot \frac{\omega}{p} = \frac{3}{2} \cdot (U_d \cdot I_d + U_q \cdot I_q) \quad (4)$$

sowohl die elektrische als auch die mechanische Leistung  $P$  ausgedrückt werden, wobei  $p$  die Polpaarzahl ist.

### 2.3 Betriebsbereiche

Nach Gleichung (2c) ist die Statorspannung proportional zur Statorfrequenz und nach  $\omega_{mech} = \omega/p$  zur Drehzahl. Für niedrige Drehzahlen kann der Strom daher nach der MTPA-Strategie [6] (Maximum Torque Per Ampere) eingestellt werden, die mit dem zulässigen Strom das größtmögliche Drehmoment erzielt. Dieser Betriebsbereich wird als Grunddrehzahlbereich bezeichnet. Wird bei steigender Drehzahl die maximal stellbare Spannung erreicht, endet der Grunddrehzahlbereich und der Feldschwächbereich beginnt. Dieser Punkt wird als Eckpunkt bezeichnet. Es treten gleichzeitig maximaler Strom, maximales Drehmoment und maximale Spannung auf. Bei weiterer Erhöhung der Drehzahl muss die Statorflussverkettung durch eine geeignete Methode reduziert werden, um die Maximalspannung nicht zu überschreiten.

## 2.4 Wahl der Bezugswerte

Bei der Normierung nach Soong [4] werden der Strom  $I$  und die Spannung  $U$  auf die Größen  $I_B$  und  $U_B$  bezogen, sodass stets gilt:

$$i = \frac{I}{I_B} \leq 1 \quad (5a)$$

$$u = \frac{U}{U_B} \leq 1 \quad (5b)$$

Diese Bezugswerte können beispielsweise der maximale Dauerstrom von Maschine bzw. Umrichter und die maximal stellbare Maschinenspannung sein.

Der Bezugswert für die Statorflussverkettung  $\Psi_B$  wird nach den Gleichungen (1a-c) berechnet, indem für die Statorstromkomponenten die MTPA-Strategie für den Bezugsstrom  $I_B$  angewendet wird. Da dies die größte vorkommende Statorflussverkettung ist, kann keine größere bezogene Statorflussverkettung als 1 auftreten. Die Bezugs-Winkelgeschwindigkeit  $\omega_B$  wird nach

$$\omega_B = \frac{U_B}{\Psi_B} \quad (6)$$

berechnet und markiert den Eckpunkt [1]. Für die Bezugsgrößen für die Leistung  $P$ , das Drehmoment  $M$  und die Induktivität  $L$  können folgende Beziehungen abgeleitet werden:

$$P_B = \frac{3}{2} \cdot U_B \cdot I_B \quad (7)$$

$$M_B = \frac{3}{2} p \cdot \Psi_B \cdot I_B \quad (8)$$

$$L_B = \frac{U_B}{\omega_B \cdot I_B} = \frac{\Psi_B}{I_B} \quad (9)$$

Die elektrischen Bezugsgrößen stellen auf einen Strang bezogene Amplitudenwerte dar. Als normierte Größen werden somit  $u$  für die Spannung  $U$ ,  $i$  für den Strom  $I$ ,  $\psi$  für die Flussverkettung  $\Psi$ ,  $l$  für die Induktivität  $L$ ,  $m$  für das Drehmoment  $M$ ,  $p$  für die Leistung  $P$  (nicht zu verwechseln mit der Polpaarzahl) und  $n$  für die elektrische Winkelgeschwindigkeit  $\omega$  eingeführt. Die Größen, die die Parameterebene aufspannen [4], berechnen sich zu:

$$\zeta = L_q/L_d \quad (10)$$

$$\psi = \frac{\Psi_{err,max}}{\Psi_B} \quad (11)$$

Die normierten Maschinengleichungen lauten damit [4]

$$u_d = -n \cdot l_q \cdot i_q \quad (12a)$$

$$u_q = n \cdot (\psi_{err} + l_d \cdot i_d) \quad (12b)$$

$$m = (\psi_{err} + (l_d - l_q) \cdot i_d) \cdot i_q \quad (13)$$

$$p = m \cdot n \quad (14)$$

wobei  $0 < \psi_{err} < \psi$  eingestellt werden kann. Der Parameter  $\zeta$  wurde in [4] für PSMs mit  $L_q \geq L_d$  definiert. Um in diesem Beitrag für FESMs mit  $L_q \leq L_d$  dieselbe Definition verwenden zu können, wird zur besseren Darstellbarkeit in Diagrammen mit dem Kehrwert  $\zeta^{-1}$  gearbeitet.

## 2.5 Eigenschaften der Normierung

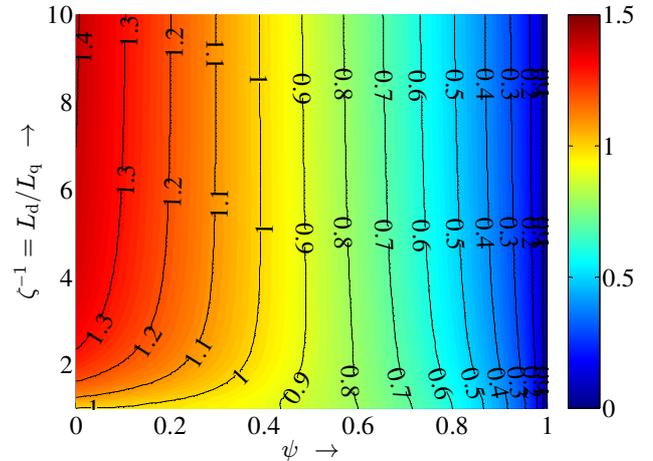
Durch die Normierung hat der Umrichter stets eine normierte Maximalleistung (Scheinleistung) von 1. Diese tritt unter anderem im Eckpunkt auf, da dort  $u = 1$  und  $i = 1$  gilt. Weiterhin sind normierte Leistung, normiertes Drehmoment und Leistungsfaktor im Eckpunkt identisch, da dort ferner  $n = 1$  gilt.

Bei Erhöhung der Drehzahl über den Eckpunkt hinaus sind Leistungsfaktor und Leistung identisch, solange  $i = 1$  gilt.

Im Grunddrehzahlbereich entspricht das normierte Drehmoment dem Leistungsfaktor, da Schein- und Wirkleistung unter Berücksichtigung der Annahmen direkt zur Drehzahl proportional sind.

In diesem Beitrag werden Maschinen an verschiedenen Stellen mit einer idealen Maschine verglichen. Diese hat bis zum Eckpunkt ein Drehmoment von 1 und jenseits davon eine Leistung von 1. Der Leistungsfaktor der idealen Maschine ist stets 1.

In der Literatur sind auch andere Bezugswerte für die Normierung zu finden. So wird in [5] statt auf den Maximalstrom auf das im Eckpunkt auftretende Drehmoment normiert. Obwohl sich bei dieser Methode die beiden Hauptparameter  $\zeta^{-1}$  und  $\psi$  nicht ändern, kann ein normierter Strom  $i > 1$  auftreten. Der Leistungsfaktor ist nicht direkt ablesbar. Der klareren Darstellung halber wird in diesem Beitrag die vorgestellte Normierung nach Soong [4] verwendet.



**Bild 1** Verlauf von  $l_d = \zeta^{-1} \cdot l_q$  in der Parameterebene

## 3 Normierte Parameterebene von fremderregten Synchronmaschinen

Zur Berechnung beliebiger Kennfelder in der normierten Parameterebene, wie sie in diesem Abschnitt gezeigt und diskutiert werden, sind zwei Rechenschritte notwendig. Zunächst muss für jedes Wertepaar  $\psi$  und  $\zeta^{-1}$  eine Gleichung vierten Grades gelöst werden [1], um die unbekannt normierten Maschineninduktivitäten  $l_d$  und  $l_q$  zu erhalten. Dabei kann dieselbe Gleichung wie in [1] verwendet werden, da im Grunddrehzahlbereich und am

Eckpunkt stets die volle Rotorerregung eingestellt wird und sich eine FESM somit mathematisch nicht von einer PSM unterscheidet, wie in Abschnitt 2 erklärt wurde. **Bild 1** zeigt den so berechneten Verlauf von  $l_d = \zeta^{-1} \cdot l_q$  in der Parameterebene.

Ausgehend davon werden im zweiten Schritt die Drehmomentkennlinien aller Wertepaare  $\psi$  und  $\zeta^{-1}$  über der normierten Drehzahl berechnet. Ein numerischer Optimierungsalgorithmus berechnet für jede Drehzahl das größtmögliche Drehmoment unter Variation der Statorstromkomponenten  $i_d$  und  $i_q$  und der Erregerflussverkettung  $\psi_{err}$ , wobei folgende Nebenbedingungen eingehalten werden müssen:

$$\sqrt{i_d^2 + i_q^2} \leq 1 \quad (15a)$$

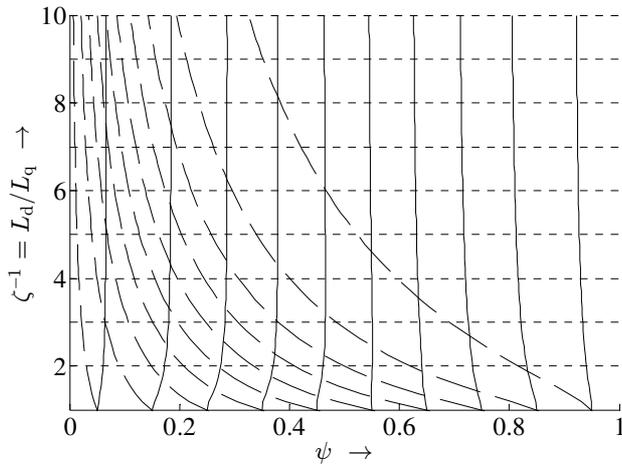
$$\sqrt{u_d^2 + u_q^2} \leq 1 \quad (15b)$$

$$0 \leq \psi_{err} \leq \psi \quad (15c)$$

Aus den so erhaltenen Kennlinien können die in diesem Abschnitt besprochenen Kennfelder der normierten Parameterebene abgeleitet werden.

### 3.1 Einfluss der Parameteränderung

In **Bild 2** ist der Einfluss der Maschinenparameter auf die Lage in der Parameterebene abgebildet.



**Bild 2** Lageänderung durch Veränderung von Maschinenparametern:  $L_q$  (durchgezogen),  $L_d$  (gestrichelt),  $\psi_{err,max}$  bzw.  $I_B$  (gepunktet)

Die Veränderung der Werte für  $L_d$  bzw.  $L_q$  sorgt primär für eine Veränderung des Parameters  $\zeta^{-1}$  nach Gleichung (10) und damit für eine vertikale Bewegung in Bild 2. Dennoch wird auch der Parameter  $\psi$  nach Gleichung (11) beeinflusst: Durch die sich verändernde Induktivität der Maschine verändert sich auch die drehmomentoptimale Bestromung der Maschine gemäß der MTPA-Vorschrift nach [5]. Beides wirkt sich auf die Bezugs-Statorflussverkettung nach Gleichungen (2) und (6) aus. Somit verändert sich bei Variation der Maschineninduktivität auch die bezogene maximale Rotorflussverkettung  $\psi$  der Ma-

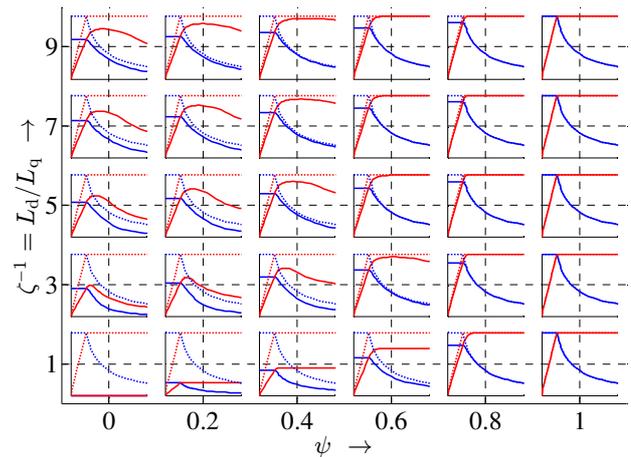
schine. Dies resultiert in den schräg nach oben laufenden Linien in Bild 2 (durchgezogen für Veränderung von  $L_q$ , gestrichelt für Veränderung von  $L_d$ ).

Bei Erhöhung der maximalen Rotorflussverkettung  $\psi_{err,max}$  bzw. Reduktion des Statorstroms  $I_B$  vergrößert sich lediglich der Parameter  $\psi$  nach Gleichung (11). Die Lage in der Parameterebene ändert sich entsprechend der gepunkteten Linien in Bild 2 nach rechts.

Die maximale Umrichterspannung  $U_B$  hat keinen Einfluss auf die Lage in der Parameterebene: Die Gleichungen (10) und (11) bleiben unverändert, da eine Erhöhung der Spannung keine Veränderung der Bezugs-Flussverkettung nach der Argumentation in Abschnitt 2.4 hat. Lediglich die Bezugs-Winkelgeschwindigkeit ändert sich nach Gleichung (6). Eine Veränderung der Spannung, zum Beispiel durch den sich ändernden Ladestand der Batterie bei Traktionsantrieben, ändert also nicht die grundsätzliche Maschinencharakteristik sondern lediglich einige Bezugswerte, insbesondere  $\omega_B$  und damit die Eckdrehzahl.

### 3.2 Kennlinien in der Parameterebene

Für jede Parameterkombination aus  $\zeta^{-1}$  und  $\psi$  können mit dem eingangs vorgestellten Verfahren Kennlinien berechnet werden. Diese sind beispielhaft für einige Kombinationen in **Bild 3** gegeben.



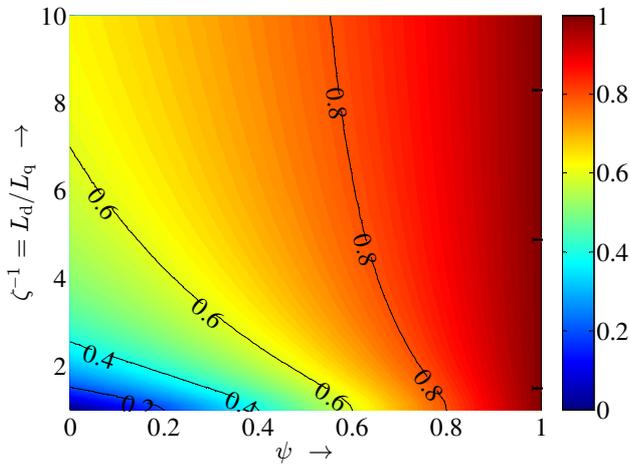
**Bild 3** Kennlinien des Drehmoments (blau) und der Leistung (rot) verschiedener Maschinen, abhängig von ihrer Position in der Parameterebene (farbig gestrichelt: Kennlinien einer idealen Maschine zum Vergleich)

In der untersten Reihe sind Maschinen mit  $L_d = L_q$  dargestellt, die sich in der maximal verfügbaren normierten Rotorflussverkettung  $\psi$  unterscheiden. In der Spalte ganz links sind Maschinen zu sehen, die über keine Rotorerregung verfügen. Diese Reluktanzmaschinen können mit Hilfe der Parameterebene als Sonderfall fremderregter Synchronmaschinen betrachtet werden. Alle anderen Kennlinien-Beispiele sind „echte“ FESMs mit  $L_d > L_q$ . Aus Bild 3 kann geschlossen werden, dass sich die Maschinencharakteristik sowohl bei einer Erhöhung von  $\zeta^{-1}$  als auch von  $\psi$  der einer idealen Maschine annähert.

Aus der Vielzahl aller möglichen Kennlinien-Diagramme innerhalb der Parameterebene können verschiedene Kenngrößen extrahiert und grafisch dargestellt werden, wie nachfolgend gezeigt.

### 3.3 Grunddrehzahl-Drehmoment

In **Bild 4** ist das normierte Grunddrehzahl-Drehmoment  $m_0$  in der Parameterebene dargestellt.



**Bild 4** Normiertes Grunddrehzahl-Drehmoment  $m_0$

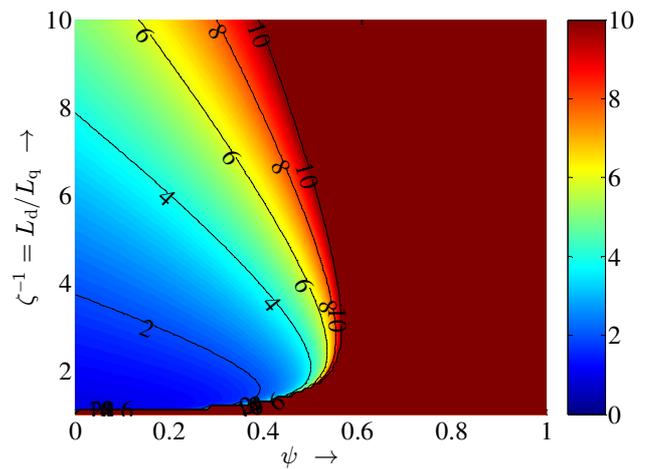
Aus **Bild 4** lässt sich grundsätzlich ablesen, dass das Grunddrehzahl-Drehmoment  $m_0$  sowohl mit  $\psi$  als auch mit  $\zeta^{-1}$  monoton steigt.

Weiterhin ist erkennbar, dass Maschinen mit  $\zeta^{-1} = 1$  ein Grunddrehzahl-Drehmoment von  $m_0 = \psi$  erzeugen. Dies ergibt auch die Analyse von Gleichung (13), wenn  $i_q = 1$  gesetzt wird. Für zunehmende Werte von  $\zeta^{-1}$  steigt auch das Grunddrehzahl-Drehmoment. Hierbei ist jedoch zu beachten, dass eine alleinige Erhöhung von  $L_d$  nicht ausreicht, um die Lage in der Parameterebene vertikal zu größeren  $\zeta^{-1}$  zu verschieben, siehe **Bild 2**.

Beim Vergleich von **Bild 2** mit **Bild 4** lassen sich sowohl Bereiche feststellen, bei denen sich eine Erhöhung von  $L_d$  positiv auf das Grunddrehzahl-Drehmoment  $m_0$  auswirkt (z.B.  $\psi = 0,2$ ,  $\zeta^{-1} = 2$ ), als auch solche mit negativem Einfluss (z.B.  $\psi = 0,8$ ,  $\zeta^{-1} = 2$ ). Eine Verringerung von  $L_q$  wirkt sich hingegen stets positiv auf das Grunddrehzahl-Drehmoment  $m_0$  aus.

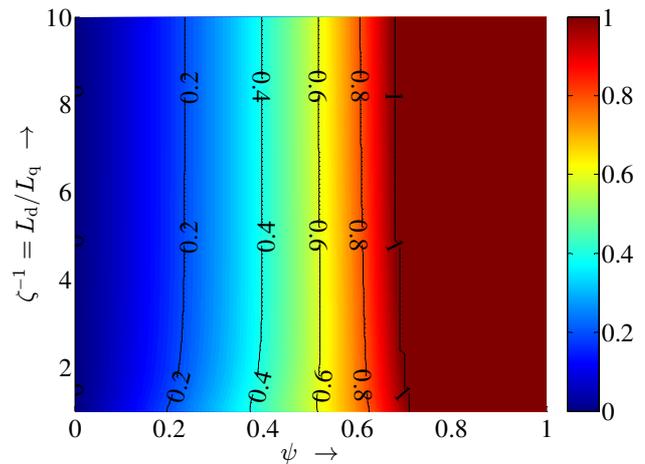
### 3.4 Konstantleistungsbereich

In **Bild 5** ist der Konstantleistungsbereich in der Parameterebene dargestellt. Der Konstantleistungsbereich einer Maschine ist als der Bereich definiert, an dem die Maschinenleistung  $p$  größer oder gleich der Leistung im Eckpunkt  $p_0 = m_0$  ist (vergleiche **Bild 3**). Als Kenngröße wird dabei die normierte Drehzahl  $n$  angegeben, bei der die Leistung wieder unter  $p_0$  fällt.



**Bild 5** Konstantleistungsbereich, aufgetragen zwischen 0 und 10. Im dunkelroten Bereich finden sich Werte  $\geq 10$ .

Aus **Bild 5** kann abgelesen werden, dass der Konstantleistungsbereich zum einen für Maschinen mit  $\zeta^{-1} = 1$  als auch für Maschinen mit  $\psi \rightarrow 1$  maximal wird. Eine theoretische Analyse ergibt, dass der Konstantleistungsbereich für diese Bereiche unendlich groß wird. Diese Bereiche der Parameterebene sind für Traktionsantriebe besonders interessant, da bei diesen ein ausgeprägter Feldschwächbereich vorausgesetzt wird.



**Bild 6** Verhalten bei sehr hoher Drehzahl:  $i = -i_d$  für  $n \rightarrow \infty$

### 3.5 Statorstrom bei sehr hoher Drehzahl

Aus den Gleichungen (2a-c) lässt sich ablesen, dass für  $n \rightarrow \infty$  die Statorflussverkettung gegen 0 gehen muss, damit keine unzulässig hohe Spannung induziert wird. Um den q-Anteil der Statorflussverkettung gegen 0 zu bringen ist es notwendig, den q-Anteil des Statorstroms auf 0 zu senken.

Für den d-Anteil existiert ein Freiheitsgrad: So kann entweder die Rotorerregung zurückgefahren oder diese durch einen negativen d-Strom kompensiert werden. Für  $\psi_{err} \rightarrow 0$  muss auch  $i_d \rightarrow 0$  eingestellt werden, damit  $\Psi_d$  in Gleichung (1a) gegen 0 geht. Alternativ kann  $\psi_{err} > 0$

beibehalten werden, jedoch muss dann  $i_d = -\psi_{err}/l_d$  eingestellt werden, um  $\psi_{err}$  zu kompensieren. Durch analytische oder numerische Optimierung der Maschinen-gleichungen hinsichtlich größtmöglichen Drehmoments kann festgestellt werden, dass letztere Möglichkeit vorteilhaft ist. In **Bild 6** ist dargestellt, welchen Wert  $-i_d$  für  $n \rightarrow \infty$  bei drehmomentoptimaler Ansteuerung annimmt. Ab  $\psi \cong 0,7$  wird der volle Statorstrom erreicht,  $\psi_{err}$  muss dann nach Gleichung (12b) für  $n \rightarrow \infty$  auf  $\psi_{err} = l_d$  reduziert werden.

## 4 Auslegung mit Hilfe der normierten Parameterebene

An einem Beispiel soll gezeigt werden, wie anhand der Anforderungen an die Leistungscharakteristik der FESM und der Rahmendaten des elektrischen Systems die Parameter für eine zu entwerfende fremderregte Synchronmaschine bestimmt werden können.

Im Normalfall werden FESMs als Traktionsmaschinen in der Schenkelpol-Bauform gebaut [7]. Üblicherweise ergibt sich dadurch  $\zeta^{-1} \cong 2$ . Um einen Leistungsfaktor im Grunddrehzahlbereich von mindestens 0,7 zu erreichen, muss nach Abschnitt 2.5 und Bild 4  $\psi \cong 0,65$  oder größer gewählt werden. Aus Bild 5 ist direkt ersichtlich, dass der Konstantleistungsbereich deutlich größer als 10 sein wird.

Es soll eine sechspolige 50kW-Maschine mit einer Eckdrehzahl von  $4000 \text{ min}^{-1}$  für einen Umrichter entworfen werden, dessen maximale Ausgangsstromamplitude  $I_B = 200A \cdot \sqrt{2}$  betrage. Mit dem zu erwartenden Leistungsfaktor ergibt sich nach Gleichung (7) eine Bezugsspannung

$$U_B = \frac{2}{3} \cdot \frac{50\text{kW}}{0,7 \cdot I_B} = 168,36\text{V} \quad (16)$$

Daraus folgt für  $\Psi_B$  und  $L_B$  nach Gleichungen (6) und (9):

$$\Psi_B = \frac{U_B}{3 \cdot 4000\text{min}^{-1} \cdot \frac{1\text{min}}{60\text{s}} \cdot 2\pi} = 0,134\text{Vs} \quad (17)$$

$$L_B = \frac{\Psi_B}{I_B} = 473,68\mu\text{H} \quad (18)$$

Die bezogenen Induktivitäten  $l_d$  und  $l_q$  lassen sich nach [1] berechnen oder aus Bild 1 ablesen zu

$$l_d = 0,74 \quad (19a)$$

$$l_q = 0,37 \quad (19b)$$

Damit die Maschine die geforderten Eckdaten und gewünschte Charakteristik erfüllt, muss sie folgende Parameter besitzen:

$$L_d = l_d \cdot L_B \approx 350\mu\text{H} \quad (20a)$$

$$L_q = l_q \cdot L_B \approx 175\mu\text{H} \quad (20b)$$

$$\Psi_{err,max} = \psi \cdot \Psi_B \approx 87\text{mVs} \quad (21)$$

## 5 Zusammenfassung

Im vorliegenden Beitrag wurde die von Soong [4] eingeführte Parameterebene für fremderregte Synchronmaschinen erweitert. Es wurde diskutiert, wie sich das Maschinenverhalten bei Variation der tatsächlichen sowie der bezogenen Parameter verändert. Abschließend wurde die praktische Anwendung der Parameterebene beim Grobentwurf der FESM beispielhaft gezeigt.

## 6 Literatur

- [1] Soong, W.L.: Design and Modeling of Axially-Laminated Interior Permanent Magnet Motor Drives for Field-Weakening Applications. Dissertation, University of Glasgow, 1993
- [2] Jahns, T.M.; Kliman, G.B.; Neumann, T.W.: Interior Permanent-Magnet Synchronous Motors for Adjustable-Speed Drives, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. IA-22, No. 4, 1986, pp. 738-747
- [3] Schiferl, R.; Lipo, T.A.: Power capability of salient pole permanent magnet synchronous motors in variable speed drive applications, Industry Applications Society Annual Meeting, 1988, Conference Record of the 1988 IEEE, Vol. 1, pp. 23-31
- [4] Soong, W.L.; Miller, T.J.E.: Theoretical limitations to the field-weakening performance of the five classes of brushless synchronous AC motor drive, Sixth International Conference on Electrical Machines and Drives, 1993, pp.127-132
- [5] Bianchi, N.; Bolognani, S.: Unified approach to the analysis and design of an AC motor drive for flux-weakening operations, Industry Applications Conference, 1998, Vol. 1, pp. 95-102
- [6] Schröder, D.: Elektrische Antriebe - Regelung von Antriebssystemen, 3. Auflage, Berlin, Heidelberg, Springer Berlin Heidelberg, 2009
- [7] Vignaud, A., Fennel, H., Hakvoort, H., Hackmann, W.: "Efficient Electric Powertrain with Externally Excited Synchronous Machine without Rare Earth Magnets using the Example of the Renault System Solution", Vienna Motor Symposium, 2012