

# Antriebssysteme 2015

Elektrik, Mechanik,  
Fluidtechnik in der Anwendung



## VDI-Berichte 2268

# **Wirkungsgradoptimierung von permanenterregten Antriebssystemen mittels verlustminimierender Steuerverfahren**

Andreas Thul, Andreas Ruf, David Franck und Kay Hameyer,  
Institut für Elektrische Maschinen, RWTH Aachen University

## **Kurzfassung**

Bei der feldorientierten Regelung von permanentmagneterregten Synchronmaschinen mit Reluktanzmomentanteil ist eine Steuervorschrift zur Berechnung der Quer- und Längsstromsollwerte nötig. Gängige Steuerverfahren sind Maximum Torque per Ampere (MTPA) und Maximum Torque per Volt (MTPV), welche die Kupferverluste bzw. die induzierte Spannung minimieren. Weiterhin können statt der Kupferverluste auch die Gesamtverluste minimiert werden, wenn diese geeignet modelliert werden.

Es wird eine detaillierte Untersuchung des Potentials von verlustminimierenden Steuerverfahren vorgestellt. Dazu wird für eine Beispielmachine die erreichbare Verlustreduzierung im Vergleich zur stromminimierenden MTPA-Steuervorschrift analysiert. Dabei kommen zwei Varianten der Eisenverlustmodellierung zum Einsatz: ein einfaches analytisches Modell und die Berechnung der Verluste mit Hilfe von Finite-Elemente-Simulationen. Für letzteres wird ein detailliertes, dem Stand der Technik entsprechend erweitertes Eisenverlustmodell verwendet, welches eine Separation der Eisenverluste in verschiedene Anteile vornimmt. Zusammengefasst lässt sich sagen, dass für die Bewertung, inwieweit die Verluste für eine bestimmte Blechsorte beeinflussbar sind, die Betrachtung der Gesamteisenverluste allein nicht ausreichend ist. Stattdessen muss die Aufteilung in die einzelnen Anteile betrachtet werden, da diese durch die Steuervorschrift unterschiedlich stark beeinflussbar sind.

## **Einleitung**

Bei permanenterregten Synchronmaschinen mit ausgeprägter magnetischer Anisotropie des Rotors, wie sie beispielsweise als Antrieb moderner Arbeitsmaschinen eingesetzt werden, kann durch eine geeignete Ansteuerung das durch die Rotoranisotropie erzeugte

Reluktanzmoment mitgenutzt werden. Durch die Vorgabe des Vorsteuerwinkels, bzw. der Längs- und Querstromkomponenten des Statorstroms, kann die Aufteilung des elektromagnetisch erzeugten Drehmomentes in Synchron- und Reluktanzmomentanteil beeinflusst werden. Dazu wird eine Steuervorschrift benötigt, die zu einem gegebenen Sollmoment geeignete Vorsteuerwinkel identifiziert und unter diesen den hinsichtlich eines festzulegenden Kriteriums optimalen Wert auswählt. Hier bieten sich Verluste als Optimierungskriterium an. Die Minimierung der Kupferverluste führt zum Maximum Torque per Ampere (MTPA) - Verfahren, bei dem der stromminimale Vorsteuerwinkel ausgewählt wird. Sollen die Gesamtverluste minimiert werden, muss der Einfluss der Vorsteuerwinkelwahl auf die Eisenverluste abgebildet werden.

Zur Berücksichtigung der Eisenverluste existieren verschiedene Ansätze, die sich in der Komplexität der Verlustmodellierung unterscheiden. Einfache Modelle erweitern die Gleichungen des Grundwellenmodells um einen drehzahlabhängigen Eisenverlustwiderstand, um die Eisenverluste im Modell zu berücksichtigen [1-7]. Ein äquivalenter Ansatz stellt die Verwendung von Verlustparametern da, mit denen einfache Abhängigkeiten der Eisenverluste von der Drehzahl und den Strömen nachgebildet werden können [8-12]. Die Vernachlässigung von Harmonischen in den Flusskomponenten stellt jedoch eine erhebliche Vereinfachung dar [14]. Zur Verbesserung der Modellgenauigkeit werden in [11] und [13] die Maschinenverluste durch Messungen ermittelt und auf dieser Basis eine optimale Steuervorschrift ermittelt. Ziel dieser Untersuchung ist es, die Beeinflussbarkeit der unterschiedlichen Eisenverlustanteile näher zu analysieren sowie den Einfluss von Materialeigenschaften zu beleuchten. Hierzu ist ein auf Messauswertungen basiertes Verlustmodell nicht geeignet, da zum Einen der Aufbau und die Vermessung von mehreren Prototypvarianten mit unterschiedlichen eingesetzten Elektroblechen sehr aufwändig wäre und zum Anderen an der Maschine gemessene Eisenverluste schlecht in weitere Anteile separiert werden können. Daher werden stattdessen die Eisenverluste mittels Finite Elemente (FE)- Simulationen ermittelt. Dazu kommt das in [14] vorgestellte Eisenverlustmodell zum Einsatz, welches eine detaillierte Separation der Eisenverluste erlaubt. Somit kann die Beeinflussbarkeit der einzelnen Verlustanteile durch ein verlustminimierendes Steuerverfahren gezielt untersucht werden. Das Maschinenverhalten wird mittels des in [15] beschriebenen erweiterten Zweiachsenmodells beschrieben, welches ebenfalls aus der FE-Simulation heraus parametrisiert wird und alle wesentlichen Eigenschaften wie Sättigung, Kreuzkopplung und Nutungseffekte berücksichtigt. Untersuchungen an einer Prototypmaschine haben gezeigt, dass auf diese Weise das Maschinenverhalten in weiten Betriebsbereichen sehr gut vorhergesagt werden kann [16].

Im nächsten Abschnitt sollen zunächst einige Grundlagen zu dem verwendeten Steuerverfahren und zu dem verwendeten Eisenverlustmodell präsentiert werden. Anschließend erfolgt eine detaillierte Analyse für verschiedene Elektromotorsarten. Im letzten Abschnitt dieser Arbeit werden alle Ergebnisse zusammengefasst.

### **Steuervorschriften für permanentmagneterregte Synchronmaschinen**

Um in einem technischen Prozess die mechanische Leistung bedarfsgerecht aufgeteilt in Drehmoment und Drehzahl zur Verfügung zu stellen, kann die elektrische Maschine auf verschiedene Art und Weise gesteuert bzw. geregelt werden. Es gibt eine Vielzahl von Möglichkeiten, die Flussverteilung in der Form zu realisieren, dass das o.g. benötigte Drehmoment in der Maschine aufgebaut wird. Für den drehzahlvariablen Einsatz werden leistungselektronische Stellglieder verwendet, die es zum Einen ermöglichen die Stromvektoren beliebig zu regeln und zum Anderen Einschränkungen in den stellbaren Amplituden für den Strom und die Spannung mit sich bringen. Die am häufigsten verwendete Steuervorschrift ist eine Kombination der Maximum Torque per Ampere (MTPA) Steuervorschrift für den Grunddrehzahlbereich und der Maximum Torque per Voltage (MTPV) Steuervorschrift für den Feldschwächbereich [17]. Beide Steuervorschriften minimieren die Stromamplitude, um das gewünschte Drehmoment zu erreichen. MTPV im Feldschwächbereich berücksichtigt zusätzlich die maximal verfügbare Spannung, die sich aus der Zwischenkreisspannung und einer Regelreserve ergibt. Für den Fall einer permanentmagneterregten Synchronmaschine ist die Erregung durch die Permanentmagnete konstant bzw. nur von der Magnettemperatur abhängig. Um das bestromungsabhängige Betriebsverhalten zu untersuchen, ist es zweckmäßig, die Maschine im rotorflussfesten dq-Koordinatensystem zu beschreiben:

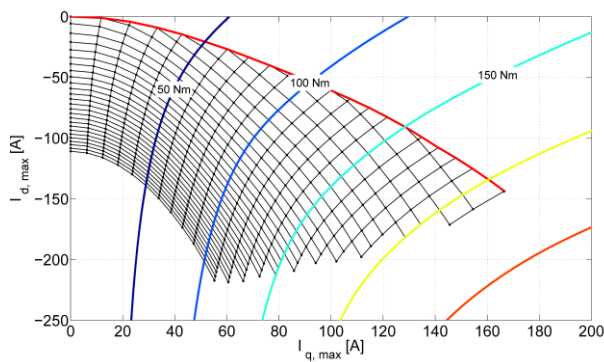
$$\begin{bmatrix} \hat{\Psi}_d \\ \hat{\Psi}_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{dd} & L_{dq} \\ L_{qd} & L_{qq} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{i}_d \\ \hat{i}_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \hat{\Psi}_{f,d} \\ \hat{\Psi}_{f,q} \end{bmatrix}$$

Die Induktivitäten und Flussverkettungen sind dabei keine Konstanten, sondern nach [15] stromabhängig zu modellieren. Das Drehmoment und die Gesamtflussverkettung ergeben sich zu:

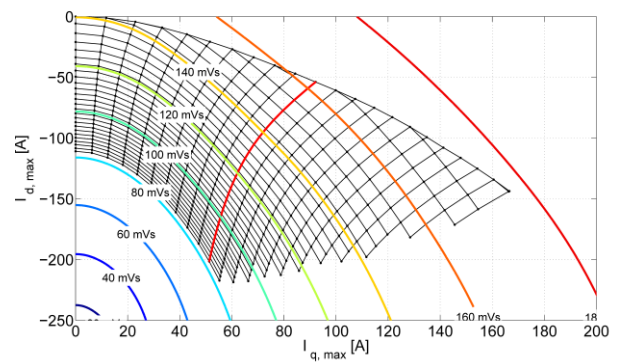
$$T = \frac{3}{2}p(\hat{\Psi}_d \hat{i}_q - \hat{\Psi}_q \hat{i}_d)$$

$$\hat{\Psi} = \sqrt{\hat{\Psi}_d^2 + \hat{\Psi}_q^2}$$

Durch eine Variation der dq-Bestromung ergeben sich die in Abbildung 1a) und b) bestromungsabhängigen Trajektorien von Drehmoment und Gesamtflussverkettung für eine Permanentmagneterregte Maschine mit V-förmig vergrabenen Magneten.



a) Stromabhängiges Drehmoment.



b) Stromabhängige Flussverkettung.

Bild 1: Betriebsgrößen mit überlagerten Betriebspunkten für verschiedene Bestromungen.

In Abbildung 1a) wird deutlich, dass das Drehmoment sowohl von der q- als auch d- Bestromung abhängig ist. Dies resultiert aus der Reluktanzwirkung und führt dazu, dass das Drehmoment mit verschiedenen dq-Bestromungskombinationen erreicht werden kann. Die o.g. stromminimierende Steuervorschrift lässt sich als Optimierungsproblem formulieren:

$$\begin{aligned} \min_{\hat{i}_{d,i,j}, \hat{i}_{q,i,j} \in \mathbb{R}} \quad & J(\hat{i}_{d,i,j}, \hat{i}_{q,i,j}) = \sqrt{\hat{i}_{d,i,j}^2 + \hat{i}_{q,i,j}^2} \\ \text{s. t.} \quad & T = \frac{3}{2} p (\hat{\Psi}_d \hat{i}_q - \hat{\Psi}_q \hat{i}_d) \quad , \forall i = 1, \dots, m \\ & \hat{u}_j = \omega_j \hat{\Psi}_1 \leq \hat{u}_{\max} \quad , \forall i = 1, \dots, n \end{aligned}$$

mit dem Drehmomentvektor  $T_1, T_2, \dots, T_m$  mit  $m \in \mathbb{N}$  und dem Drehzahlvektor  $n_1, n_2, \dots, n_n$  mit  $n \in \mathbb{N}$ . Die gemäß diesem Gütekriterium optimalen Betriebspunkte sind in Abbildung 1a) und b) dem Drehmoment und der Flussverkettung überlagert. In Abbildung 1a) ist der Grunddrehzahlbereich durch die Trajektorie mit zunehmendem Drehmoment gekennzeichnet. Mit steigender Drehzahl nimmt die induzierte Spannung zu und eine Feldschwächung wird notwendig. Die Betriebspunkte im Feldschwächbereich sind als Netz unterhalb der MTPA-Trajektorie dargestellt. In Abbildung 1b) ist der Verlauf der Betriebspunkte mit steigender Drehzahl und konstantem Moment gekennzeichnet.

Bei dem am häufigsten verwendeten Optimierungsproblem werden der Stromraumzeiger und damit die Kupferverluste minimiert. Weitere bestromungs- bzw. flussabhängige Verluste sind die Eisenverluste, die bei der o.g. Steuervorschrift nicht berücksichtigt werden. Hierzu wird das Optimierungsproblem um die Eisenverluste erweitert:

$$\begin{aligned} \min_{\hat{i}_{d,i,j}, \hat{i}_{q,i,j} \in \mathbb{R}} \quad & J(P_{\text{Verl},i,j}) = P_{\text{Cu},i,j} + P_{\text{Fe},i,j} \\ \text{s. t.} \quad & T = \frac{3}{2} p (\hat{\Psi}_d \hat{i}_q - \hat{\Psi}_q \hat{i}_d) \quad , \forall i = 1, \dots, m \\ & \hat{u}_j = \omega_j \hat{\Psi}_1 \leq \hat{u}_{\max} \quad , \forall i = 1, \dots, n \end{aligned}$$

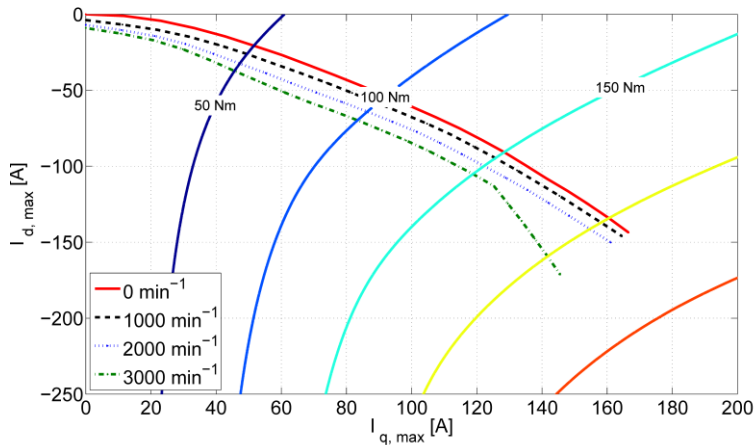


Bild 2: Verlustminimierende Trajektorien.

Die Betriebspunkte werden im Vergleich zu der Referenzsteuervorschrift im Grunddrehzahlbereich verschieden und damit drehzahlabhängig gewählt. Die Vergrößerung des negativen d-Stroms und damit der Feldschwächung reduziert die Eisenverluste und vergrößert die Kupferverluste in der Form, dass die Gesamtverluste minimiert werden (Abbildung 2). Dies kommt besonders dort zum Tragen, wo die Eisenverluste gegenüber den Kupferverlusten dominant sind, dem Teillastbereich.

Zur Berechnung der Eisenverluste kommt das in [14] beschriebene Eisenverlustmodell zum Einsatz. Die Eisenverluste werden dort für jeden Betriebspunkt ausgehend von der in der Finite-Elemente-Simulation berechneten Flussverteilung in der Maschine berechnet. Neben den klassischen Hysterese- und Wirbelstromverlusten  $P_{Hyst}$  und  $P_{Eddy}$  wird dabei das Verlustmodell um die Zusatz- oder Excessverluste  $P_{Ex}$  und die durch die Nichtlinearität des Eisenkreises verursachten Verluste höherer Ordnung  $P_{nl}$  ergänzt. Die vier Teilverluste werden dabei gemäß der folgenden Gleichungen berechnet:

$$P_{Hyst} = a_1 \left( 1 + \frac{B_{min}}{B_{max}} (r_{hyst} - 1) \right) B_{max}^\alpha f_1$$

$$P_{Eddy} = a_2 \sum_{n=1}^{\infty} \hat{B}_n^2 (nf)^2$$

$$P_{nl} = a_2 a_3 \hat{B}^{a_4+2} f^2$$

$$P_{Ex} = a_5 \left( 1 + \frac{B_{min}}{B_{max}} (r_{Ex} - 1) \right) \sum_{n=1}^{\infty} \hat{B}_n^{1,5} (nf)^{1,5}$$

Für die Wirbelstrom- und Zusatzverluste werden dabei auch Harmonische in der Flussdichte berücksichtigt. Diese werden bestimmt, indem die Flussdichteverteilung für jeden Betriebspunkt über eine elektrische Periode simuliert und dann für alle Flussdichten eine

Fourieranalyse durchgeführt wird. Die Verlustparameter  $a_1$  bis  $a_5$  und  $\alpha$  werden durch Epsteinmessungen des verwendeten Elektrobandes bestimmt. Mittels der Faktoren  $r_{hyst}$  und  $r_{Ex}$  wird zusätzlich berücksichtigt, dass in der Maschine rotierende Flussverteilungen auftreten, welche in Epsteinmessungen nicht nachgebildet werden können.

### Analyse des verlustminimierenden Steuerverfahrens

Zunächst erfolgt ein Vergleich der Ergebnisse mit einem einfachen Eisenverlustmodell, welches konstante Verlustparameter verwendet. In beiden Fällen wird für die Bestimmung der Betriebspunkte das Drehmoment aus der FE-Simulation verwendet, sodass die restliche Maschinenmodellierung in beiden Fällen gleich ist. Anschließend wird das neue Steuerverfahren bei verschiedenen Elektrobändern untersucht.

Für alle Untersuchungen wird eine permanentmagneterregte Synchronmaschine mit vergrabenen Magneten betrachtet, die für den Einsatz als Traktionsantrieb in Elektrofahrzeugen gedacht ist. Die für die Modellierung relevanten Maschinenparameter werden in Tabelle 1 zusammengefasst. Die Maschine wird zweidimensional modelliert, die Simulation erfolgt mit der hauseigenen FE-Bibliothek iMOOSE/pyMOOSE.

Tabelle 1: Kenngrößen der untersuchten Maschine.

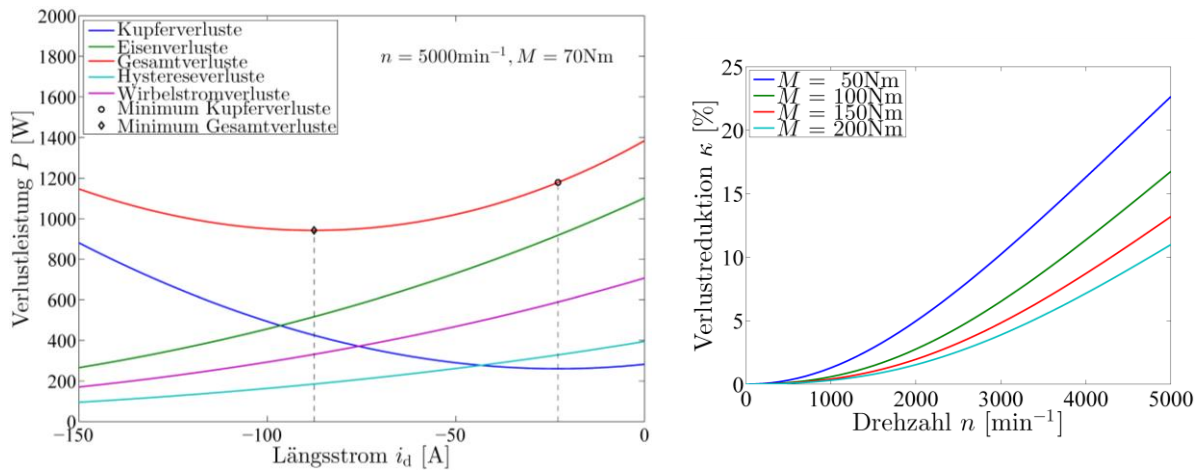
Parameter	Formelzeichen	Wert
Polpaarzahl	$p$	4
Statorwiderstand	$R_s$	22,46 m $\Omega$
Erregerflussverkettung	$\Psi_F$	0,1274 Vs
Längsinduktivität	$L_d$	0,52 mH
Querinduktivität	$L_q$	0,96 mH
Hystereseverlustkoeffizient	$c_{Hyst}$	7,87 $\Omega^{-1}s^{-1}$
Wirbelstromverlustkoeffizient	$c_{Eddy}$	0,0067 $\Omega^{-1}$

Als Vergleichsmodell wird hier die Berechnung der Eisenverluste nach [11] herangezogen. Dabei werden die Eisenverluste gemäß der Gleichungen

$$P_{FE} = \frac{3}{2} \cdot c_{\omega} \cdot \left( (L_d \cdot i_d + \Psi_F)^2 + (L_q \cdot i_q)^2 \right) \text{ und}$$

$$c_{\omega} = c_{Hyst} \cdot \omega_{el} + c_{Eddy} \cdot \omega_{el}^2$$

bestimmt. Die Werte der Koeffizienten sind mit in Tabelle 1 aufgeführt. Das Modell erlaubt eine Aufteilung in die klassischen Anteile Wirbelstrom- und Hystereseverluste. In Abbildungen 3a sind diese für eine feste Drehzahl und ein festes Drehmoment zusammen



a) Verlustkomponenten

b) erreichbare Verlustreduzierung

Bild 3: Verlustminimierende Steuervorschrift mit Grundwellen-Verlustmodell.

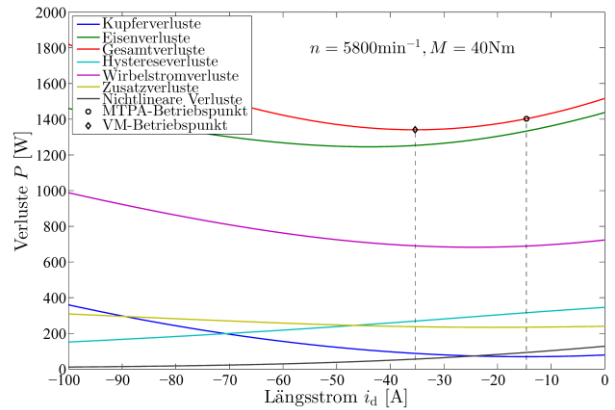
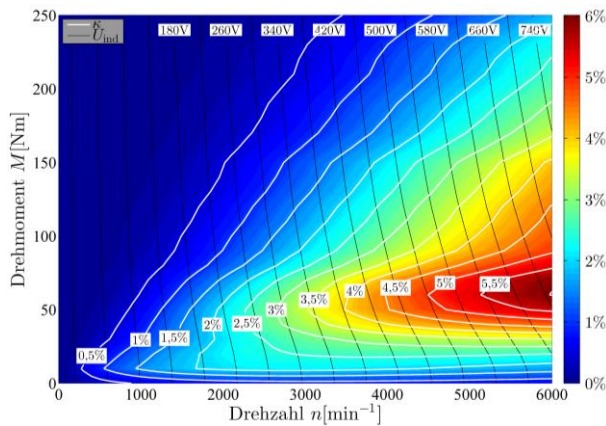
mit den Kupferverlusten in Abhängigkeit des feldschwächenden Längsstroms  $i_d$  dargestellt. Der Querstrom ist jeweils so gewählt, dass die Maschine das Sollmoment erzeugt. Beide Eisenverlustanteile sinken mit zunehmender Feldschwächung stetig, da die Flussverkettung direkt in die Verlustgleichungen eingeht. Dementsprechend liegt der verlustminimale Betriebspunkt deutlich weiter in der Feldschwächung als der stromminimale Betriebspunkt. Die im Betriebsbereich der Maschine erreichbare relative Verlustreduzierung

$$\kappa = \frac{P_{Verl.,VM} - P_{Verl.,MTPA}}{P_{Verl.,MTPA}}$$

ist in Abbildung 3b für verschiedene Drehmomente dargestellt. Je höher die Drehzahl, desto größer ist die erreichbare Verlustreduzierung im Vergleich zum MTPA-Verfahren.

In gleicher Weise lässt sich die Verlustreduzierung für das erweiterte Eisenverlustmodell bestimmen. Die Parameter des Verlustmodells sind für das verwendete Elektroband M330-35A in Tabelle 2 angegeben. Die erreichbare relative Verlustreduzierung im Betriebsbereich der Maschine ist in Abbildung 4a dargestellt. Die Werte fallen im Vergleich zum Grundwellenmodell mit maximal 6 % deutlich geringer aus. Die in Abbildung 4b dargestellte Aufteilung der Verluste zeigt, dass insbesondere die Wirbelstromverluste durch das Grundwellenmodell nicht adäquat abgebildet werden können. Zwar führt ein negativer Längsstrom zu einer Reduzierung der Flussverkettungsgrundwelle, allerdings treten in diesem Bereich aber verstärkt Oberwellen in der Feldverteilung auf [14], die zu insgesamt höheren Wirbelstromverlusten führen. Ein Vergleich mit Abbildung 3a zeigt, dass bei Verwendung einer verlustminimierenden Strategie basierend auf dem Grundwellenmodell faktisch sogar höhere Verluste auftraten, als wenn die MTPA-Strategie zum Einsatz käme.





a) erreichbare Verlustreduzierung

b) Verlustkomponenten

Bild 4: Verlustminimierende Steuervorschrift mit erweitertem Verlustmodell.

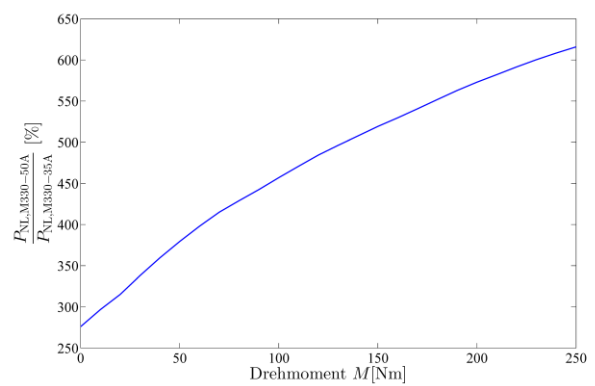
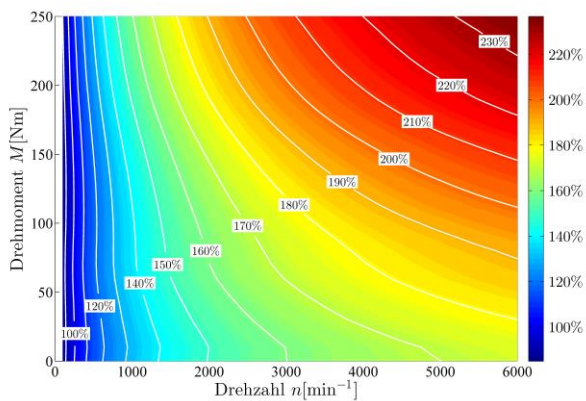
Tabelle 2: Parameter des erweiterten Eisenverlustmodells für verschiedene Elektrobänder.

Parameter	Material		
	M330-35A	M330-50A	M235-35A
$a_1$	$18,531 \cdot 10^{-3}$	$11,436 \cdot 10^{-3}$	$13,877 \cdot 10^{-3}$
$a_2$	$62,751 \cdot 10^{-6}$	$107,232 \cdot 10^{-6}$	$44,766 \cdot 10^{-6}$
$a_3$	$32,547 \cdot 10^{-3}$	$13,05 \cdot 10^{-3}$	$168 \cdot 10^{-3}$
$a_4$	5	8	2,945
$a_5$	$0,4 \cdot 10^{-3}$	$1,158 \cdot 10^{-3}$	$0,524 \cdot 10^{-3}$
$\alpha$	2	2	1,979

### Untersuchung des Materialeinflusses

Im Folgenden wird untersucht, inwieweit die verlustminimierende Steuervorschrift von den Eigenschaften des Magnetkreises abhängig ist. Dazu wird anstelle des bisher verwendeten Elektrobandes M330-35A die Verwendung der beiden Sorten M330-50A und M235-35A simuliert. Die materialabhängigen Parameter des Eisenverlustmodells sind für alle drei Sorten in Tabelle 2 aufgeführt.

Zunächst wird die Sorte M330-50A untersucht. Wie in Abbildung 5a zu sehen ist, treten im Vergleich zur Sorte M330-35A insgesamt höhere Eisenverluste auf. Da Hystereseverluste, Wirbelstrom- und Zusatzverluste bei gleicher Bestromung linear von den Koeffizienten  $a_1$ ,  $a_2$  und  $a_5$  abhängen, kann für den MTPA-Betrieb die Änderung dieser Verluste bei einem Wechsel der Blechsorte anhand der Koeffizientenänderung abgeschätzt werden. Demnach werden sich die Wirbelstromverluste um den Faktor 1,71 und die Zusatzverluste um den Faktor 2,89 erhöhen, während die Hystereseverluste um den Faktor 0,62 verringert werden.



a) Verhältnis der Gesamteisenverluste

b) Verhältnis der Verluste höherer Ordnung

Bild 5: Vergleich der Eisenverluste für die Elektrobandsorten M330-50A und M330-35A.

Die Verluste höherer Ordnung müssen im Postprocessing der FEA neu berechnet werden, da sie bestromungsabhängig sind. Ihre Verluständerung für den MTPA-Betrieb ist in Abbildung 5b dargestellt. Wird nun die verlustminimierende Steuervorschrift angewendet, so ist die im Vergleich zur MTPA-Strategie erreichbare Verlustreduzierung, wie in Abbildung 6 zu sehen, deutlich größer, als dies für die Sorte M330-35A der Fall ist. Die aufgrund der größeren Blechdicke erhöhten Wirbelstromverluste hätten eigentlich erwarten lassen, dass das verlustminimierende Steuerverfahren hier schlechter abschneiden würde, da die vermehrten Feldoberwellen ja unabhängig von der Elektrobandwahl auftreten. Allerdings sind die Verluste höherer Ordnung ebenfalls deutlich größer und diese lassen sich durch vermehrte Feldschwächung wiederum besser beeinflussen.

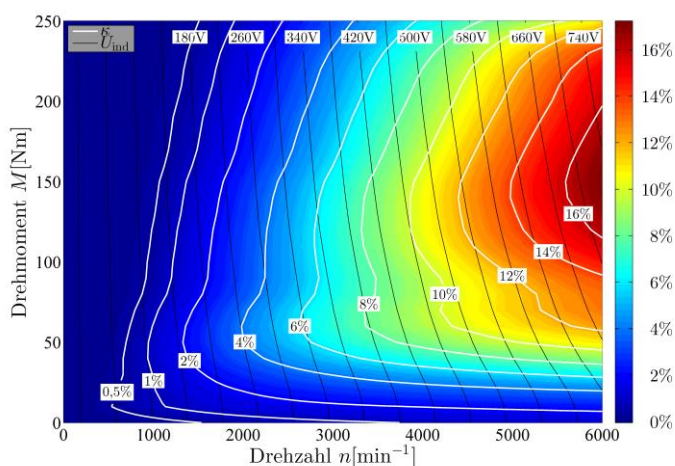
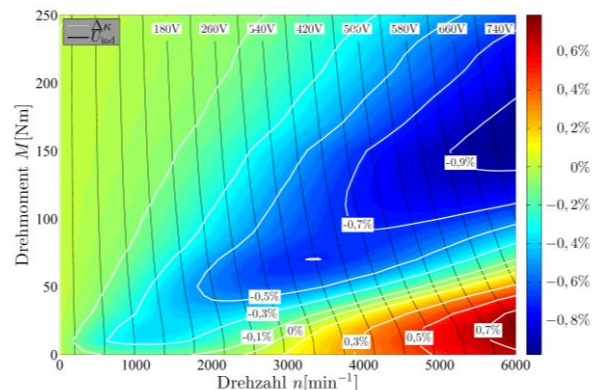
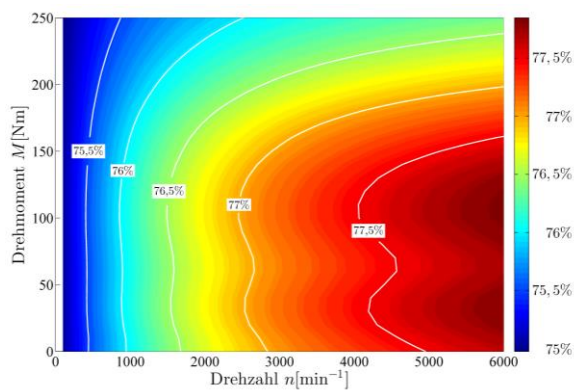


Bild 6: Erreichbare Verlustreduzierung für die Elektrobandsorte M330-50A.



a) Verhältnis der Gesamteisenverluste

b) Differenz der erreichbaren Verlustreduktion

Bild 7: Vergleich der Eisenverluste für die Elektrobandsorten M235-35A und M330-35A.

Für die Sorte M235-35A können aufgrund der Garantiewerte und der Verlustkoeffizienten im Vergleich zum Ausgangsmaterial insgesamt geringere Verluste erwartet werden, was eine Betrachtung der Verluste im MTPA-Betrieb (Abbildung 7a) auch bestätigt. Der geringere Eisenverlustanteil lässt zunächst erwarten, dass die Verlustreduzierung durch den Wechsel der Steuervorschrift insgesamt geringer ausfällt. Die in Abbildung 7b dargestellte Differenz der erreichbaren Verlustreduzierung zeigt jedoch, dass die eingesparten Verluste nicht übermäßig verringert sind. Im Bereich niedriger Drehmomente und hoher Drehzahlen können sogar mehr Verluste eingespart werden. Der Grund hierfür ist, dass für die Sorte M235-35A sich vor allem die nicht durch die Steuervorschrift beeinflussbaren Wirbelströme verringern. Andere Verlustanteile steigen hingegen sogar an. Bezüglich der Beeinflussbarkeit ist für dieses Material die Aufteilung in die einzelnen Verlustanteile daher günstiger. Zusammengefasst lässt sich sagen, dass für die Bewertung, inwieweit die Verluste für eine bestimmte Blechsorte beeinflussbar sind, die Betrachtung der Gesamteisenverluste allein nicht ausreichend ist. Stattdessen muss die Aufteilung in die einzelnen Anteile betrachtet werden, da diese durch die Steuervorschrift unterschiedlich stark beeinflussbar sind.

### Zusammenfassung

Die in dieser Arbeit ausgeführte Untersuchung von verlustminimierenden Steuervorschriften hat gezeigt, dass eine genaue Kenntnis der Eisenverluste für eine tatsächliche Verlustreduzierung von großer Bedeutung ist. Die Verwendung einfacher Verlustmodelle überschätzt die erreichbare Verlustreduzierung deutlich, da durch Oberfelder verursachte Wirbelstromverluste nicht berücksichtigt werden. Das hier verwendete Eisenverlustmodell erlaubt eine wesentlich präzisere Analyse der Eisenverluste, ohne dabei auf Messungen an der Maschine angewiesen zu sein. Somit kann während des Maschinenentwurfs bereits eine

realistische verlustminimierende Steuervorschrift für simulative Untersuchungen verwendet werden. Eine Untersuchung von unterschiedlichen Elektrobandsorten hat gezeigt, dass für die Bewertung, inwieweit mit dem gewählten Material durch geeignete Steuervorschriften Eisenverluste vermindert werden können, eine Betrachtung der Gesamteisenverluste nicht ausreichend ist. Vielmehr muss berücksichtigt werden, dass die Einzelanteile der Eisenverluste nicht im gleichen Maße durch Feldschwächung beeinflussbar sind.

## Literatur

- [1] F. Fernandez-Bernal, A. Garcia-Cerrada, and R. Faure: "Determination of parameters in interior permanent-magnet synchronous motors with iron losses without torque measurement," *Industry Applications, IEEE Transactions on*, vol. 37, no. 5, pp. 1265–1272, Sep 2001.
- [2] G.-X. Zhou, H.-J. Wang, D.-H. Lee, and J.-W. Ahn, "Study on efficiency optimizing of pmsm for pump applications," in *Power Electronics, 2007. ICPE '07. 7th International Conference on*, Oct 2007, pp. 912–915.
- [3] M. Cao and N. Hoshi, "Electrical loss minimization strategy for interior permanent magnet synchronous motor drives," in *Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC), 2010 IEEE*, Sept 2010, pp. 1–6.
- [4] J. Stumper, A. Dotlinger, J. Jung, and R. Kennel, "Predictive control of a permanent magnet synchronous machine based on real-time dynamic optimization," in *Power Electronics and Applications (EPE 2011), Proceedings of the 2011-14th European Conference on*, Aug 2011, pp. 1–8.
- [5] T. Windisch and W. Hofmann, "Loss minimization of an ipmsm drive using pre-calculated optimized current references," in *IECON 2011 - 37th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society*, Nov 2011, pp. 4704–4709.
- [6] S. Odhano, R. Bojoi, A. Boglietti, G. Griva, and S. Rosu, "Maximum efficiency per torque direct flux vector control of induction motor drives," in *Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2014 IEEE*, Sept 2014, pp. 1293–1300.
- [7] J. Goss, M. Popescu, D. Staton, R. Wrobel, J. Yon, and P. Mellor, "A comparison between maximum torque/ampere and maximum efficiency control strategies in ipm synchronous machines," in *Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2014 IEEE*, Sept 2014, pp. 2403–2410.
- [8] J. Lee, K. Nam, S. Choi, and S. Kwon, "Loss-minimizing control of pmsm with the use of polynomial approximations," *Power Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 24, no. 4, pp. 1071–1082, April 2009.

- [9] C. Mademlis and N. Margaris, "Loss minimization in vector-controlled interior permanent-magnet synchronous motor drives," *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 49, no. 6, pp. 1344–1347, Dec 2002.
- [10] D. Pohlenz and J. Bocker, "Efficiency improvement of an ipmsm using maximum efficiency operating strategy," in *Power Electronics and Motion Control Conference (EPE/PEMC), 2010 14th International*, Sept 2010, pp. T5–15–T5–19.
- [11] C. Mademlis and N. Margaris, "Loss minimization in vector-controlled interior permanent-magnet synchronous motor drives," *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 49, no. 6, pp. 1344–1347, Dec 2002.
- [12] H. Aorith, J. Wang, and P. Lazari, "A new loss minimization algorithm for interior permanent magnet synchronous machine drives," in *Electric Machines Drives Conference (IEMDC), 2013 IEEE International*, May 2013, pp. 526–533.
- [13] A. Rabiei, T. Thiringer, and J. Lindberg, "Maximizing the energy efficiency of a pmsm for vehicular applications using an iron loss accounting optimization based on nonlinear programming," in *Electrical Machines (ICEM), 2012 XXth International Conference on*, Sept 2012, pp. 1001–1007.
- [14] S. Steentjes, M. Lessmann, and K. Hameyer, "Advanced iron-loss calculation as a basis for efficiency improvement of electrical machines in automotive application," in *Electrical Systems for Aircraft, Railway and Ship Propulsion (ESARS), 2012*, Oct 2012, pp. 1–6.
- [15] T. Herold, D. Franck, E. Lange, and K. Hameyer, "Extension of a d-q model of a permanent magnet excited synchronous machine by including saturation, cross-coupling and slotting effects," in *Electric Machines Drives Conference (IEMDC), 2011 IEEE International*, May 2011, pp. 1363–1367.
- [16] A. Ruf, A. Thul, S. Steentjes, and K. Hameyer, "Loss minimizing control strategy for electrical machines considering iron loss distribution," in *2015 IEEE International Electric Machines and Drives Conference (IEMDC)*, May 2015, pp. 974–980.
- [17] De Doncker, Rik, Pulle, Duco W.J., and Veltman, André "*Advanced Electrical Drives*," Dodrecht: Springer, 2011