

Entwurf, Auslegung und Realisierung eines verlustoptimierten elektrischen Antriebs für Hybridfahrzeuge

vorgelegt von
Dipl.-Ing.
Uwe Vollmer
aus Weil im Schönbuch

von der Fakultät IV-Elektrotechnik und Informatik
der Technischen Universität Berlin
zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor der Ingenieurwissenschaften
- Dr.-Ing. -

genehmigte Dissertation

Promotionsausschuss:

Vorsitzende:	Prof. Dr.-Ing. S. Diekerhoff
Gutachter:	Prof. Dr.-Ing. U. Schäfer
Gutachter:	Prof. Dr.-Ing. B. Ponick

Tag der wissenschaftlichen Aussprache: 29. Juni 2012

Berlin 2012
D 83

Danksagung

Diese Arbeit sei all jenen freundlichen Menschen gewidmet, die mir in der Zeit der Entstehung dieser Arbeit, Unterstützung in irgendeiner Form gewährt haben. Namentlich in ungeordneter Reihenfolge sei ein Teil dieser Menschen genannt. All jene die hierbei vergessen wurden, bitte ich um Nachsicht.

Prof. Dr.-Ing. Uwe Schäfer, Prof. Dr.-Ing. habil. Rolf Hanitsch, Arno Hellemann, Dr. Matthias Centner, Rayk Grune, Nico Mock, Dr. Juriy Plotkin, Lorenz Taus Beti, Alexander Kreim, Jan-Philipp von Klitzing, Andreas Amberger, Jürgen Federspiel, Dirk Fischer, Harald Zutsch, Dr. Thomas Wörther, Annette Reim, Jerry D Willingham, Barabara Stoll, Samuel D. Willingham, Sandra Hüpauff, Eva-Maria Totzek, Claus von Berg, Willy Schäfer, Dagmar Heyne, Prof. Dr. habil. Kay Mitusch, Frank Rosnizeck.

Inhaltsverzeichnis

0.	Nomenklatur.....	6
0.1	Formelzeichen.....	6
0.2	Indizes.....	7
1.	Einleitung.....	8
2.	Voraussetzungen.....	9
2.1	Verbrauchsmesszyklen.....	9
2.2	Hybridkonzepte.....	10
2.3	Überlegungen zum elektrischen Verhalten von PMSM.....	13
3.	Verluste.....	17
3.1	Gliederung und Bestimmung der Verluste in PMSM.....	17
3.1.1	Stromwärmeverluste.....	18
3.1.2	Ummagnetisierungsverluste.....	19
3.1.3	Stator-Zusatzverluste.....	21
3.1.4	Rotorverluste.....	22
3.2	Ummagnetisierungsverluste bei permanenter Vormagnetisierung.....	23
3.2.1	Zusammenhang zwischen Gleich- und Wechselanteil in der Magnetisierung.....	23
3.2.2	Versuchsaufbau.....	27
3.2.3	Vergleichsmessungen.....	27
3.3	Ummagnetisierungsverluste bei Überlagerung von Wechselfeldern.....	28
4.	Maschinenentwurf.....	29
4.1	Direkte Forderungen an die Maschine.....	30
4.1.1	Leistung.....	30
4.2	Randbedingungen.....	30
4.3	Entwurf und Auslegung.....	32
4.3.1	Rotor.....	32
4.3.2	Stator.....	37
4.3.3	Geometrische und konstruktive Daten.....	38
4.3.4	Materialwahl.....	41
4.3.5	Berechnung der Maschinenparameter.....	44
4.3.6	Numerische Berechnung des Magnetkreises.....	45
4.3.7	Kennfelder der Maschinenparameter zur Regelung.....	54
4.3.8	Berechnung der zu erwartenden Verluste.....	61
4.3.9	Montage und Kühlung.....	72
5.	Regelung.....	74
5.1	Regelstrecke.....	75
5.2	Erweitertes Motormodell.....	76
5.3	Kennfelder.....	78
5.4	Stromregelung mit Vorsteuerung.....	82
5.5	Momentführung.....	83
5.6	Regelungsstruktur.....	84
5.7	Simulationsergebnisse.....	84
6.	Prüfstand.....	88
6.1	Wechselrichter und Zwischenkreisspannung.....	88
6.2	Regelung.....	88
6.3	Belastungseinheit.....	89
6.4	Temperiereinheit.....	89
6.5	Messtechnik.....	89
6.6	Beschränkungen durch die Prüfstandskomponenten.....	89

7.	Vergleich der Berechnungs- und Messwerte des Motors	91
7.1	Maschinenparameter	92
7.1.1	Magnetflussverkettung und Luftspaltfluss	92
7.1.2	Längsinduktivität	93
7.1.3	Betriebsinduktivitäten	94
7.2	Verlustbestimmung und -vergleich	102
7.2.1	Stromwärmeverluste und Reibung	102
7.2.2	Ummagnetisierungsverluste	103
7.2.3	Leistung und Verluste in den Betriebspunkten	106
8.	Zusammenfassung	115
9.	Anhang	116
9.1	Literaturverzeichnis	117
9.2	Technische Daten	120
9.3	Quelltexte	124
9.4	Experimentelle Ummagnetisierungsverluste	137
9.5	Berechnete Betriebsparameter	151
9.6	Gemessene Betriebsparameter	156
9.7	Berechnete Maschinenverluste	157
9.8	Gemessene Verluste und Wirkungsgrade	165
9.9	Regelungskennfelder	168

0. Nomenklatur

0.1 Formelzeichen

A	Fläche, Querschnitt
B	Breite
B	Magnetische Flussdichte
c	allgemeine Konstante, allgemeiner Parameter
f	Frequenz
Ψ	Flussverkettung
γ	Vorsteuerwinkel
h	Höhe
\underline{i}, i	Zeitabhängiger Strom
\underline{I}, I	Stromeffektivwert
φ	Phasenwinkel
L	Länge
L	Selbstinduktivität
m	Strangzahl
m	Masse
p	Polpaarzahl
p	spezifische Verluste
P	Wirkleistung
q	Lochzahl
Q	Blindleistung
\underline{u}, u	Zeitabhängige Spannung
\underline{U}, U	Spannungseffektivwert
R	Ohmscher Widerstand
S	Scheinleistung
σ	Dreh Schub
ϑ	Polradwinkel
ϑ	(Absolute) Temperatur
w	Windungszahl
ω	Kreisfrequenz
Z	Leiterzahl

0.2 Indizes

l	Grundwelle, Grundschiwingung
a	außen
Cu	Kupfer
c	coerzitiv
d	Längsanteil
d	differentiell
δ	Luftspalt
e	Wirbelstrom (eddy current)
Fe	Eisen
gl	Gleichanteil
h	Hysterese
i	innen
i	intrinsisch
J	Joch
L	Leiter
M	Magnet
mech	mechanisch
N	Bemessungspunkt
N	Nut
P	Polrad
q	Queranteil
R	Reibung
r	radial
S	Stator
Sp	Spule
Str	Strang
ÜH	Überhang
V	Verlust
w	Wunsch, Sollwert in der Regelung
W	Wechselanteil
Z	Zahn
ZK	Zwischenkreis
Zus	Zusatz

1. Einleitung

Seit einiger Zeit kommen elektrische Antriebe für Straßenfahrzeuge, aufgrund der Engpässe bei den fossilen Energieträgern und in Hinblick auf die Umweltbelastung, in den Blickpunkt sowohl der Forschung, als auch der Öffentlichkeit. So werden z.B. Hybridfahrzeuge als eine Möglichkeit zur Reduktion des Energieverbrauchs und der Schadstoffemission gesehen.

Verbrauchsermittlung anhand der verschiedenen genormten Fahrzyklen ergeben tatsächlich Vorteile solcher Antriebe im Vergleich zu herkömmlichen Straßenfahrzeugantrieben. Tests unter realen Bedingungen zeigen jedoch, dass Hybridantriebe unter bestimmten Voraussetzungen keine Vorteile in Hinblick auf den Verbrauch haben, oder sogar höhere Verbräuche und damit verbunden höhere Emissionen aufweisen. Ein Grund für den Unterschied zwischen Herstellerangaben und Testmessungen liegt in den Fahrzyklen, die nur einen geringen Anteil an Hochgeschwindigkeitsfahrten haben. Ein wesentlicher Faktor für den sinnvollen Einsatz elektrischer Antriebe in Hybridfahrzeugen sind folglich die Verluste des Antriebs unter realen Bedingungen. Die Suche nach Möglichkeiten zur Reduktion der Verluste der elektrischen Komponenten, wie z.B. in [11] oder [13], vor allem aber nicht nur im Teillastbereich oder Leerlauf ist ein Forschungsziel.

Die in Hybridfahrzeugantriebe eingesetzten elektrischen Maschinen sollen große Drehmomente bei kleinen Drehzahlen bzw. im Stillstand des Fahrzeugs produzieren und durch Feldschwächung in der Lage sein, hohe Drehzahlbereiche bei reduzierter Leistung bzw. im Leerlauf zu erreichen. In der Mehrzahl werden in Hybridfahrzeugantrieben permanenterregte Synchronmaschinen (PMSM) verwendet. Diese Maschinen haben geringe Verluste und damit gute Wirkungsgrade in den erstgenannten Betriebspunkten. In der zweiten Betriebsart produzieren sie jedoch unvermeidbare Verluste.

In dieser Arbeit wird eine permanenterregte Synchronmaschine für Hybridfahrzeugantriebe untersucht, bei deren Entwurf das Hauptaugenmerk auf der Fähigkeit zur Feldschwächung liegen soll. Diese verbesserte Feldschwächung soll vor allem zur Reduktion der Verluste im Teillast- und Leerlaufbereich (Schleppverluste) eingesetzt werden. Die PMSM wird durch ein spezielles Induktivitätsverhältnis L_d/L_q gekennzeichnet, das im Gegensatz zu den sonst üblichen Motoren in elektrischen Fahrzeugantrieben größer als Eins ist. Außerdem ergibt sich die Möglichkeit, auf diese Art ausgelegte Maschinen über weite Bereiche mit einem hohen Leistungsfaktor zu betreiben, was zu einer weiteren Reduktion der Verluste beiträgt.

Die aktuell angewandte Strategie zur Regelung von PMSM geht davon aus, dass die Verluste im gesamten elektrischen Antriebsstrang genau dann minimal sind, wenn ein Minimum für den Strom für ein gegebenes Moment eingestellt wird. Dies muss bei unsymmetrischen PMSM keinesfalls so sein, da speziell im Teillastbetrieb bei hohen Drehzahlen Ummagnetisierungsverluste eine wesentliche Rolle spielen. Daher wird eine Verlustanalyse durchgeführt, um Punkte minimaler Verluste bei gefordertem Drehmoment und gegebener Drehzahl zu finden. Dies wird durch Berechnung der Verluste getrennt in Stator und Rotor durchgeführt. Dazu müssen bekannte Berechnungsalgorithmen an die Aufgabenstellung angepasst werden. Mit Kenntnis dieser Punkte wird eine Regelungsstrategie entwickelt, die die PMSM immer verlustoptimiert ansteuert.

2. Voraussetzungen

2.1 Verbrauchsmesszyklen

In den Bildern 2.1.1 und 2.1.2 sind die zeitlichen Verläufe der Fahrzyklen dargestellt, wie sie in Europa, bzw. Japan zur Verbrauchsermittlung von PKW zur Anwendung kommen.

Im europäischen Fahrzyklus ist klar ersichtlich die viermalige Wiederholung einer innerstädtischen Fahrsimulation zu erkennen, im japanischen Zyklus gibt es eine dreimalige Wiederholung einer solchen Simulation (10-mode). In beiden Fahrzyklen folgt jeweils die Simulation einer Überlandfahrt mit höherer Geschwindigkeit. Beiden Fahrzyklen ist das Fehlen der Simulation einer Hochgeschwindigkeitsfahrt längerer Dauer gemein.

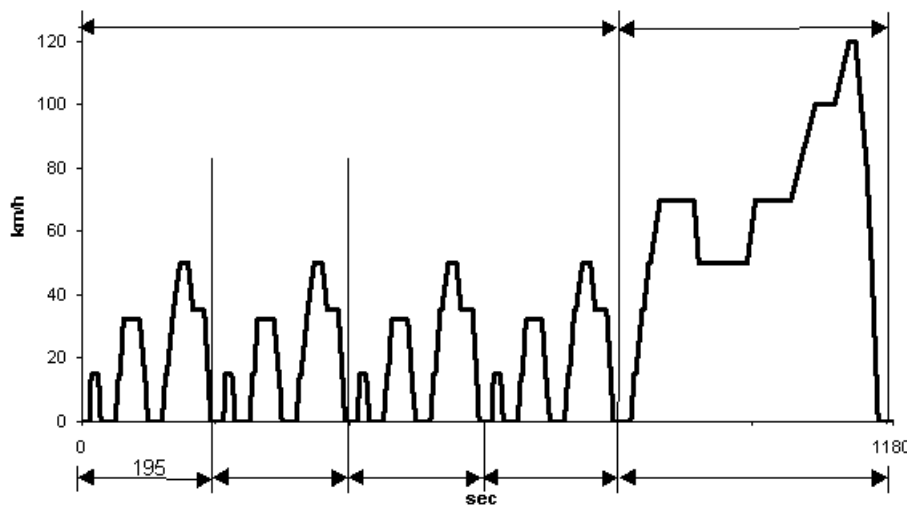


Bild 2.1.1 Europäischer Fahrzyklus

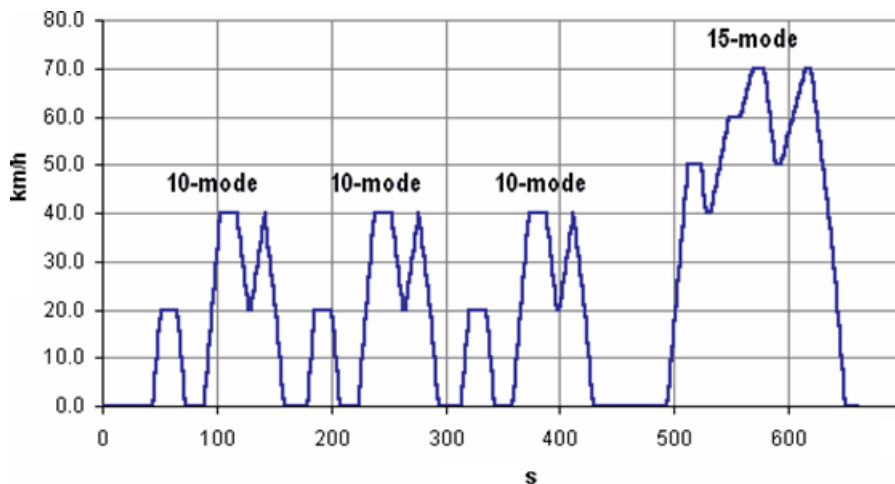


Bild 2.1.2 Japanischer Fahrzyklus

Bei der Verbrauchsermittlung von Hybridfahrzeugen würde eine Simulation einer Streckenfahrt mit hoher Geschwindigkeit im Vergleich baugleicher Fahrzeuge mit ausschließlich einem Verbrennungsmotor einen höheren Verbrauch des Hybridfahrzeugs, bzw. bestenfalls eine geringfügige Minderung des Kraftstoffverbrauchs des Hybridfahrzeugs ergeben. Dies wird durch die Verluste von PMSM im Teillastbetrieb, bzw. Leerlaufbetrieb bei hohen Drehzahlen erklärt.

2.2 Hybridkonzepte

Kennzeichen der Hybridfahrzeuge ist die Existenz mindestens zweier grundsätzlich unabhängiger Energiespeicher und Motoren. Die übliche Kombination besteht aus Verbrennungsmotor und Benzintank, sowie Elektromotor und Akkumulator.

Eine Reduktion des Kraftstoffverbrauchs und der Schadstoffemissionen wird durch folgende Betriebsarten hervorgerufen:

- Start-Stopp-Betrieb bei Fahrzeugstillstand z.B. an Ampeln (Reduktion der Leerlaufverluste des Verbrennungsmotors)
- Elektrischer Fahrbetrieb bei langsamer Fahrt
- Rekuperation (beim Bremsen wird elektrische Energie in die Batterie gespeist)
- Betrieb des Verbrennungsmotors im Bestpunkt bei vorgegebener Leistung
- Boost zur kurzzeitigen Erhöhung der Leistung des Verbrennungsmotors

Die drei erstgenannten Punkte sind vor allem im Stadtverkehr von Vorteil (erster Teil der Fahrzyklen), der vorletzte Punkt wird im Streckenverkehr genutzt (zweiter Teil der Fahrzyklen). Bei den meisten der bisherigen Hybridkonzepte ergibt sich jedoch ein Verbrauchsnachteil bei Hochgeschwindigkeitsfahrten, der, wie bereits erwähnt, aus den Verlusten der elektrischen Maschinen resultiert. Die bestehenden Hybridkonzepte werden im Folgenden, in Hinblick auf die im elektrischen Antriebsstrang entstehenden Verluste, zusammengefasst.

Serieller Hybrid:

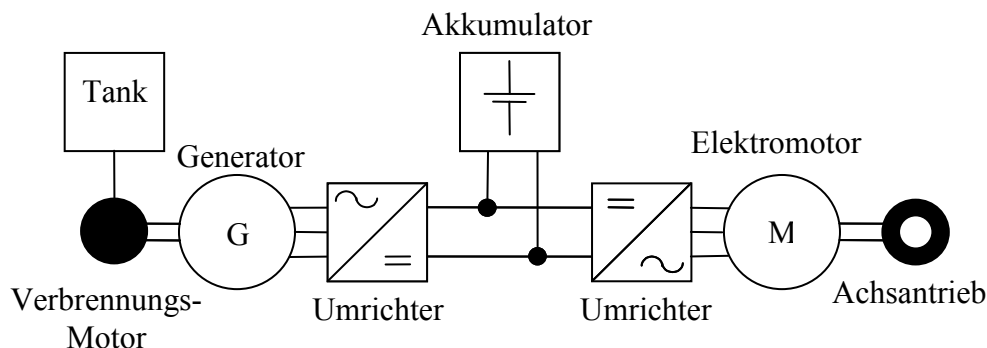


Bild 2.2.1: Serieller Hybrid [1]

Bei diesem Hybridkonzept wird die gesamte mechanische Energie aus dem Verbrennungsmotor, mittels eines Generators und eines Umrichters, in elektrische Energie gewandelt und anschließend durch einen Umrichter und einen Elektromotor in Antriebsleistung umgesetzt. Diese Art des Hybriden eignet sich nur wenig für Personenkraftwagen, da die vierstufige Energiewandlung einen schlechten Wirkungsgrad hat.

Parallelhybrid:

Der Parallelhybrid muss in verschiedene Typen unterteilt werden:

Drehzahlstarre Typen und Hybride mit Drehzahladdition. Die drehzahlstarren Typen können, wie in den folgenden Abbildungen aufgezeigt, weiter untergliedert werden.

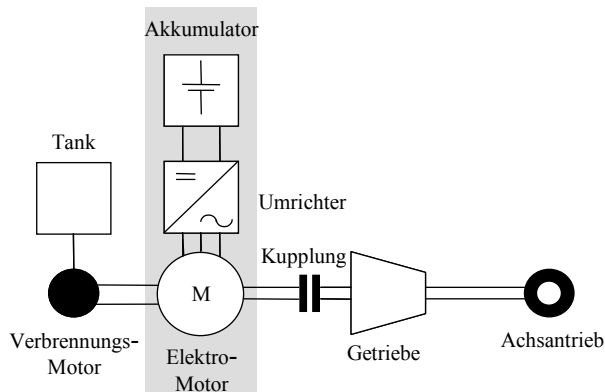


Bild 2.2.2: Drehzahlstarre parallele Hybride, Typ 1 [1]

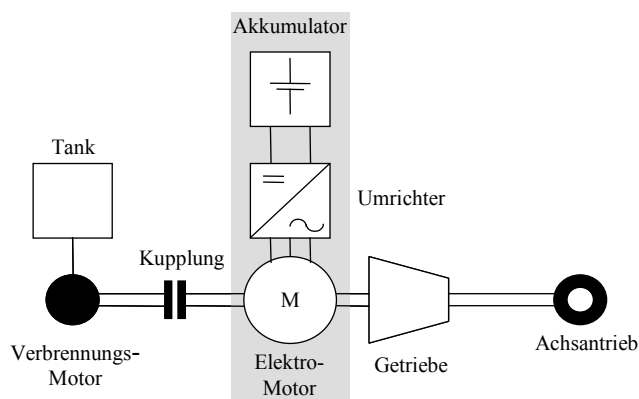


Bild 2.2.3: Drehzahlstarre parallele Hybride, Typ 2 [1]

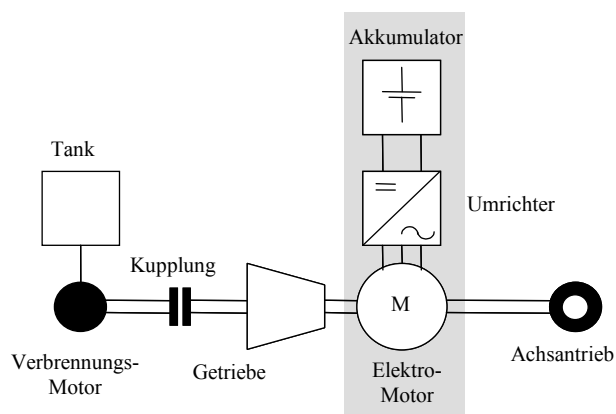


Bild 2.2.4: Drehzahlstarre parallele Hybride, Typ 3 [1]

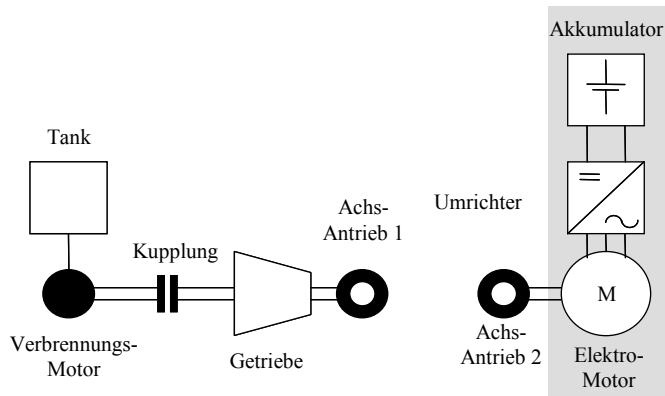


Bild 2.2.5: Drehzahlstarre parallele Hybride, Typ 4 [1]

Kombinationen der Typen sind bei den drehzahlstarren Parallelhybriden möglich.

Bei den drehzahlstarren Hybriden wird die elektrische Maschine auch bei hohen Fahrgeschwindigkeiten mit der Drehzahl des Antriebsstrangs mitgeschleppt, was bei PMSM zu Verlusten im Teillastbereich und Leerlauf führt.

Bei Hybriden mit Drehzahladdition kann der Verbrennungsmotor in Betriebsbereichen mit hohen Wirkungsgraden betrieben werden. Somit stellt sich auch bei Streckenfahrten eine Verbrauchsminderung ein, die jedoch durch die Teillastverluste der elektrischen Maschine, die zur Einstellung der Drehzahl des Verbrennungsmotors auf jeden Fall mitdrehen muss, zumindest teilweise kompensiert wird.

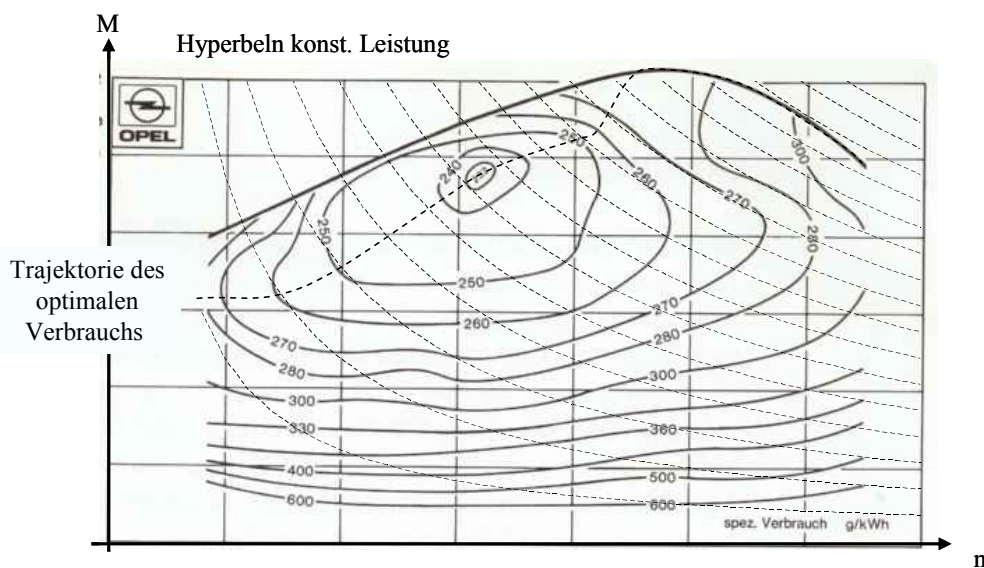


Bild 2.2.6: Beispiel für den spezifischen Verbrauch eines Verbrennungsmotors [1]

2.3 Überlegungen zum elektrischen Verhalten von PMSM

Bei den ersten permanenterregten Synchronmaschinen wurden die Magnete auf die Oberfläche des Rotors geklebt. Dies führt zu einem magnetisch symmetrischen Verhalten. So kann der Maschinentyp, bezüglich seines elektrischen und mechanischen Verhaltens, ohne Berücksichtigung von Nichtlinearitäten, wie folgt beschrieben werden.

$$u_d = R \cdot i_d + \frac{d}{dt}(L \cdot i_d) - \omega \cdot L \cdot i_q \quad (2.3.1a)$$

$$\text{bzw.} \quad u_d = R \cdot i_d + \frac{d\Psi_d}{dt} - \omega \cdot \Psi_q \quad (2.3.1b)$$

$$u_q = R \cdot i_q + \frac{d}{dt}(L \cdot i_q) + \omega \cdot (\Psi_M + L \cdot i_d) \quad (2.3.2a)$$

$$\text{bzw.} \quad u_q = R \cdot i_q + \frac{d\Psi_q}{dt} + \omega \cdot (\Psi_M + \Psi_d) \quad (2.3.2b)$$

$$M = \frac{m \cdot p}{2} \cdot \Psi_M \cdot i_q \quad (2.3.3)$$

Die Momentengleichung legt nahe, diesen Maschinentypus mit reinem Querstrom zu betreiben, da dabei die maximale mechanische Leistung bei kleinstmöglichem Strom und damit kleinen Stromwärmeverlusten erzeugt wird. Offensichtlich wird dabei jedoch der Leistungsfaktor kleiner Eins. Durch die Magnetanordnung und entsprechende Wicklungsauslegung kann die Querinduktivität klein gehalten werden und der Leistungsfaktor ist nahe Eins. Die Regelungsstrategie scheint somit gerechtfertigt zu sein.

Die Gleichungen (2.3.1) und (2.3.2) vereinfachen sich dann wie folgt.

$$u_d = -\omega \cdot L \cdot i_q \quad (2.3.4a)$$

$$\text{bzw.} \quad u_d = -\omega \cdot \Psi_q \quad (2.3.4b)$$

$$u_q = R \cdot i_q + \frac{d}{dt}(L \cdot i_q) + \omega \cdot \Psi_M \quad (2.3.5a)$$

$$\text{bzw.} \quad u_q = R \cdot i_q + \frac{d\Psi_q}{dt} + \omega \cdot \Psi_M \quad (2.3.5b)$$

Durch die Art der Auslegung dieses Maschinentyps kann das Spannungsniveau, mit der die Maschinen betrieben werden, relativ klein gehalten werden. Allerdings können dann große Leistungen nur mit großen Strömen erzielt werden. Diese Tatsache schränkt die Eignung dieser Maschinen für HEV (Hybrid Electrical Vehicle) ein.

Man kann diesen Maschinentyp allerdings auch für höhere Spannungen ausführen, was die Leistungsfähigkeit verbessert. Die bei höheren Drehzahlen auftretenden Ummagnetisierungs- und Magnetverluste sorgen dann allerdings für eine schlechtere Verlustbilanz, da die Verluste nur mit großen negativen Längsströmen verringert werden können. Dies führt zu erhöhten Stromwärmeverlusten und einem kleineren Leistungsfaktor. Daher scheint dieser Maschinentyp nur wenig für Antriebe in HEV geeignet zu sein.

Bei, auf der Oberfläche des Rotors angebrachten, Magneten besteht die Gefahr, dass der Klebstoff mit dem die Magnete fixiert werden, bei hohen Temperaturen an Festigkeit verliert. Bei hoher Drehzahl können sich dadurch die Magnete lösen. Dies ist nur mit Bandagen zu lösen, die fertigungstechnische Nachteile mit sich bringen und sich negativ auf den Magnetkreis auswirken. Aus fertigungstechnischen Gründen und aufgrund der erhöhten mechanischen Stabilität bei hohen Drehzahlen und Temperaturen werden PMSM für HEV bevorzugt mit vergrabenen Magneten ausgeführt.

Dies kann zu einer magnetischen Unsymmetrie führen, d.h. die Induktivität in der d-Achse unterscheidet sich von der Induktivität in der q-Achse. Diese Unsymmetrie kann nun für alternative Regelungsstrategien genutzt werden, da der Leistungsfaktor bei reinem Querstrom unter Umständen zu klein wird und außerdem durch die Unsymmetrie ein Reluktanzmoment entsteht.

Die Gleichungen dieser Maschinenausprägung müssen modifiziert werden.

$$u_d = R \cdot i_d + \frac{d}{dt}(L_d \cdot i_d) - \omega \cdot L_q \cdot i_q \quad (2.3.5a)$$

$$\text{bzw.} \quad u_d = R \cdot i_d + \frac{d\Psi_d}{dt} - \omega \cdot \Psi_q \quad (2.3.1b)$$

$$u_q = R \cdot i_q + \frac{d}{dt}(L_q \cdot i_q) + \omega \cdot (\Psi_M + \Psi_d) \quad (2.3.6a)$$

$$\text{bzw.} \quad u_q = R \cdot i_q + \frac{d\Psi_q}{dt} + \omega \cdot (\Psi_M + \Psi_d) \quad (2.3.2b)$$

$$M = \frac{m \cdot p}{2} \cdot [\Psi_M \cdot i_q + (L_d - L_q) \cdot i_d \cdot i_q] \quad (2.3.7a)$$

$$\text{bzw.} \quad M = \frac{m \cdot p}{2} \cdot [(\Psi_M + \Psi_d) \cdot i_q - \Psi_q \cdot i_d] \quad (2.3.7b)$$

Unsymmetrische PMSM können durch das Induktivitätsverhältnis L_d/L_q unterteilt werden. Bereits beschrieben wurden PMSM mit dem Verhältnis $L_d/L_q = 1$.

Allgemein können PMSM für HEV sehr unterschiedlich ausgelegt werden, wie z.B. in [18,] und [21] dargelegt ist, so dass ein Vergleich, wie er im Weiteren ausgeführt wird, ausschließlich qualitative Aussagen zulässt. Zunächst wird als Referenz für den Vergleich eine symmetrische Maschine mit Oberflächenmagneten herangezogen. Nachfolgend soll ein direkter Vergleich zweier unsymmetrischer Maschinen das unterschiedliche Verhalten solcher Maschinen verdeutlichen.

Maschinen mit dem Verhältnis $L_d/L_q < 1$ erzeugen bei negativem d-Stromanteil ein positives Reluktanzmoment, können also bei Feldschwächung mit einem kleineren Strangstrom i_1 betrieben werden, um dasselbe Moment wie eine symmetrische PMSM zu erzeugen.

Im Allgemeinen ist die Längsinduktivität L_d solcher Maschinen aufgrund der Magnetanordnung vergleichbar mit der Induktivität von PMSM mit Oberflächenmagneten derselben Höhe, gleicher Wicklung und gleicher Luftspalthöhe. Die Querinduktivität L_q ist dann im Vergleich deutlich größer.

Maschinen mit dem Verhältnis $L_d/L_q > 1$ erzeugen bei negativem d-Stromanteil ein negatives Reluktanzmoment, müssen also bei Feldschwächung mit einem größeren Strom i_1 betrieben werden, um dasselbe Moment zu erzeugen wie eine symmetrische PMSM. Andererseits kann bei ausreichender Stellreserve, durch einen positiven Längsstrom, ein positives Reluktanzmoment erzeugt werden. [19] [23]

Die Längsinduktivität L_d solcher Maschinen kann mit speziellen Rotorgeometrien größer sein, als die Induktivität von PMSM mit Oberflächenmagneten und derselben Wicklung. Die Querinduktivität L_q ist im Vergleich, unter den oben genannten Voraussetzungen, deutlich kleiner.

Für den Vergleich zweier unsymmetrischer Maschinen wird nun zunächst davon ausgegangen, dass beide gleich gewickelt sind und nur die Längsinduktivitäten unterschiedlich sind. Es wird jeweils ein Zeigerdiagramm für denselben Strom aufgetragen, d.h. Amplitude und Frequenz sind konstant (Bild 2.3.1 und 2.3.2). Dabei wird der Statorwiderstand R vernachlässigt. Anschließend wird die Längsinduktivität konstant gehalten und die Querinduktivität verändert (Bild 2.3.3). Der Vergleich des ersten (2.3.1) mit dem letzten Diagramm (2.3.3) stellt dann prinzipiell die Unterschiede zwischen zwei Maschinen mit umgekehrtem Induktivitätsverhältnis heraus.

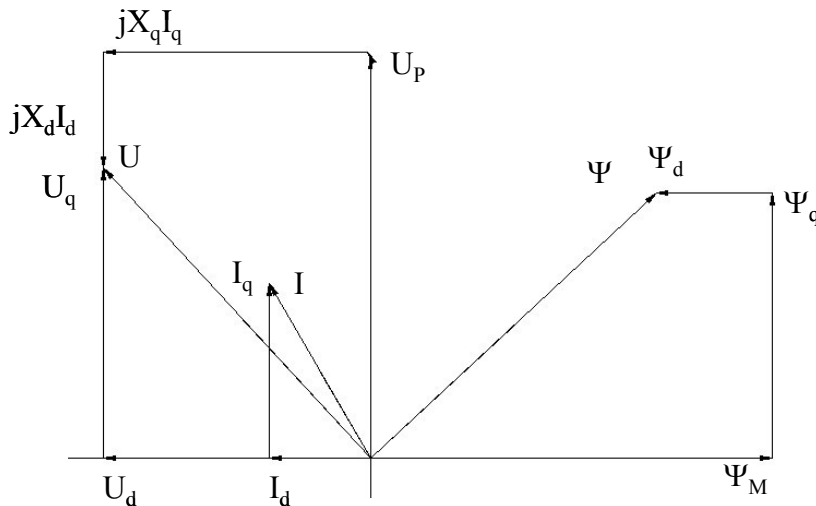


Bild 2.3.1: Zeigerdiagramm 1

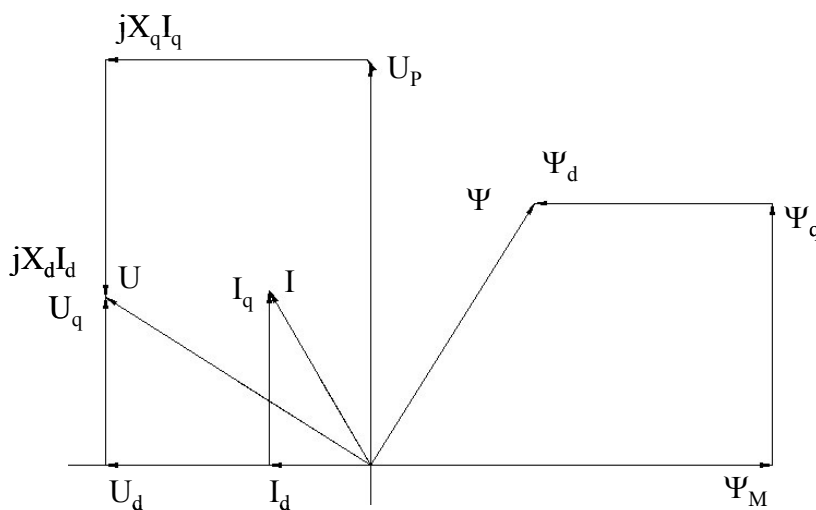


Bild 2.3.2: Zeigerdiagramm 2

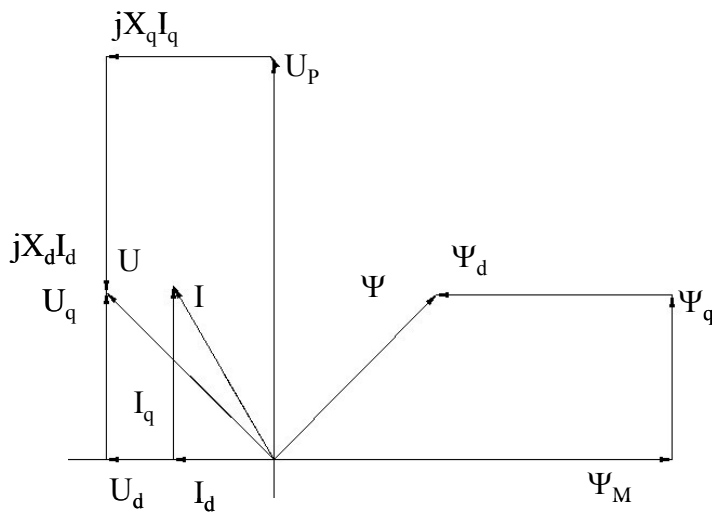


Bild 2.3.3: Zeigerdiagramm 3

Das Wesentliche in diesen Diagrammen ist der Unterschied in der Flussverkettung. Bei großen Drehzahlen können also, bei gleichem Strom und damit denselben Stromwärmeverlusten, die Ummagnetisierungsverluste stark reduziert werden. Die dargestellten Diagramme stammen aus analytischen Rechnungen, ohne Rücksicht auf Nichtlinearitäten. Für genauere Untersuchungen sind sowohl die Strom- und Frequenzabhängigkeiten der Induktivitäten, als auch der resultierenden Flussverkettung zu berücksichtigen. Dies kann nur mit numerischen Methoden erfolgen.

Weiterhin muss eine Untersuchung der Verluste stattfinden. Die Verlustberechnung in PMSM ist analytisch nur in grober Näherung zu durchzuführen. Numerische Verlustberechnung ist mit großem Zeitaufwand verbunden. Es bietet sich daher an, zunächst die Verlustmechanismen prinzipiell zu betrachten und dann Methoden anzuwenden bzw. zu entwickeln, die genauere Ergebnisse erwarten lassen, als eine analytische Verlustmodellierung und den Zeitaufwand in Grenzen halten. Die Gültigkeit solcher Methoden ist durch Messung zu belegen.

Diese Arbeit beschäftigt sich mit verlustarmen PMSM mit positivem Induktionsverhältnis für HEV. Die Reduktion der Verluste lässt sich in erster Linie durch eine Maschinenauslegung bewerkstelligen, die einerseits konstruktiv die Entstehung von Verlusten reduziert, andererseits, ebenfalls durch konstruktive Maßnahmen, neue Regelungsstrategien ermöglicht, die die Verluste minimieren.

Um den elektrischen Teil des Antriebs im Verlustminimum zu betreiben, müssen zusätzlich die Verluste in der Leistungselektronik, in den elektrischen Energiespeichern und den Zuleitungen berücksichtigt werden. Dies ist jedoch nicht Teil dieser Arbeit.

3. Verluste

3.1 Gliederung und Bestimmung der Verluste in PMSM

Zur Maschinenauslegung im Sinne von Kapitel 2.3 müssen zunächst die beteiligten Verlustmechanismen gegliedert und untersucht werden, um geeignete Maßnahmen zur Einschränkung der Verluste zu finden. Eine Gliederung der Verluste macht nur Sinn, wenn die rechnerischen Ergebnisse durch Messungen nachvollzogen werden können. Dies ist, wie nachfolgend dargelegt, auch bis auf eine Ausnahme der Fall. Mit der Verlustbestimmung in PMSM beschäftigen sich derzeit sehr viele Arbeiten, unter Anderen [9], [13], [16], [20], [22] und [26].

So wird in [20] eine Methode zur Erweiterung der Eisenverlust-Berechnung mit der Steinmetzformel durch einen Faktor vorgeschlagen, der den Fakt berücksichtigt, dass in elektrischen Maschinen ortsabhängig keineswegs reine Wechselmagnetisierung vorkommt. Dieser Faktor ist das Produkt aus dem Verhältnis der Achslängen, also der Amplituden der Flussdichte in Haupt-, und Nebenrichtung, der elliptischen Magnetisierung und einem experimentell ermittelten Faktor, der die Veränderung der Verluste in Abhängigkeit vom Scheitelwert der Flussdichte angibt. Der zeitliche Flussdichteverlauf wird gebietsweise durch numerische Methoden zweidimensional im Maschinenquerschnitt ermittelt. Aus diesem zeitlichen Verlauf werden dann die Grundwelle der Flussdichte und deren Harmonische in ihrer örtlichen Verteilung als elliptische Magnetisierung ausgewertet. Zur Gewinnung der gesamten Eisenverluste müssen die Einzelverluste schlussendlich über alle Harmonischen und alle Gebiete summiert werden. Ein Nachteil dieser Methode besteht in der notwendigen experimentellen Bestimmung des Faktors der die Veränderung der Verluste durch die elliptische Magnetisierung angibt. Dieser Faktor wird nach dieser Methode nur für die bezogene Grundwellenfrequenz ermittelt.

In [22] wird ein rein analytisches Verfahren vorgeschlagen, welches den Flussdichteverlauf im Luftspalt berücksichtigt, also nicht von sinusförmigem Verlauf der Flussdichte ausgeht. Für die Ableitung der Flussdichte nach der Zeit werden Näherungen verwendet. Dabei wird der Verlauf der Flussdichte im Luftspalt zusammengesetzt aus einem Teil, der durch die Magnete verursacht wird und einem Teil, der durch den Statorstrom erregt wird. Weiterhin wird für die Berechnung der Verluste die erweiterte Steinmetzformel angewandt, die einen zusätzlichen Term für die Zusatzverluste enthält. Diese Art der Verlustbestimmung kann geeignet sein, die Eisenverluste online in einer verlustminimierenden Regelung zu bestimmen.

Einen ähnlichen Ansatz macht [26]. Hier wird ebenfalls vom Flussdichteverlauf im Luftspalt ausgegangen. Im Unterschied zu [22] wird hier allerdings, ähnlich wie in [20], von Gebieten mit unterschiedlicher Magnetisierung im Eisen ausgegangen. Der Einfachheit halber wird hier die Flussdichte in radiale und tangentielle Komponenten zerlegt. Für die Zähne werden rein radiale Wechselkomponenten angesetzt, während für das Statorjoch rein tangentielle Wechselflussdichten vorausgesetzt werden.

In [13] wird ein analytisches Modell zur Verlustberechnung herangezogen, welches wie üblich die Eisenverluste durch einen Widerstand in den d-q-Teilmodellen parallel zu den induzierten Spannungen berücksichtigt. Der Wert der Widerstände wird hierbei durch Berechnung der Eisenverluste ermittelt. Die Flussdichten werden mittels FEM bestimmt und dann in der bekannten Steinmetzformel durch Ableitung berücksichtigt.

All diese Verfahren haben ihre Vor- und Nachteile. In dieser Arbeit wird ein weiteres Verfahren nach [2] vorgestellt, erweitert und angewandt.

3.1.1 Stromwärmeverluste

Stromwärmeverluste entstehen in PMSM ausschließlich in den Statorwicklungen. Die Beziehung, die diese Verluste eindeutig beschreibt, lautet:

$$P_{VCu} = R(\vartheta) \cdot I^2 \quad (3.1.1)$$

Der Strangwiderstand R ist temperaturabhängig. Ein eventuell auftretender Skin- bzw. Stromverdrängungseffekt, kann trotz hoher Frequenzen der Feldgrundwelle und damit der Strangströme, aufgrund der geringen Eindringtiefe und durch Ausführungen der Wicklungsleiter als mehrdrähtige Litze vernachlässigt werden.

$$R(\vartheta) = R(20^\circ\text{C}) \cdot \left(1 + \frac{\vartheta - 273^\circ\text{K}}{273^\circ\text{K}}\right) \quad (3.1.2)$$

Zur Berechnung der Stromwärmeverluste kann über ein thermisches Modell die Abhängigkeit des Statorwiderstands R von der Temperatur einfließen. Dies macht bei Berechnung der Verluste in Lastzyklen auch durchaus Sinn. Bei Bestimmung der Verluste in einzelnen Lastpunkten, genügt es zunächst die Spanne der möglichen Stromwärmeverluste zu kennen.

Die Isolation der Maschine wird in der Temperaturklasse H ausgeführt. Dies lässt unter Berücksichtigung eines thermischen Sicherheitsabstandes Temperaturen bis zu 150°C in der Maschinenwicklung zu. Daraus ergibt sich die Spanne, die der Widerstandswert umfasst.

$$\begin{aligned} R_{\min}(\vartheta) &= R(20^\circ\text{C}) \\ R_{\max}(\vartheta) &\approx 1,55 \cdot R(20^\circ\text{C}) \end{aligned} \quad (3.1.3)$$

Der Strom I ist der Effektivwert des Stator-Strangstroms $i(t)$. Für I gilt:

$$I^2 = I_d^2 + I_q^2 \quad (3.1.4)$$

Der Effektivwert des Stroms, der in die Berechnung einfließt, beinhaltet bedingt durch den Betrieb der Maschine an einem Umrichter Oberschwingungen. Der Grad des Oberschwingungsgehalts ist stark abhängig von den Induktivitäten der PMSM und der Schaltfrequenz des verwendeten Umrichters. Da die PMSM, wie in Kapitel 4 dargelegt, kurzschlussfest ausgelegt wird, und die Schaltfrequenz auf ungefähr den zehnfachen Wert der Grundschwingung eingestellt wird, treten kaum Oberschwingungen im Strom auf. Daher finden die Oberschwingungen in der Berechnung keine Berücksichtigung.

Zur messtechnischen Ermittlung der Verluste werden der Effektivwert des Stroms und die Wicklungstemperatur an verschiedenen Stellen in der Wicklung gemessen. Die Wicklungstemperatur geht gemittelt in die Verlustbestimmung ein.

3.1.2 Ummagnetisierungsverluste

Die physikalischen Zusammenhänge der Ummagnetisierungsverluste, wie Verschiebung der Blochwände und Umklappen der weißschen Bezirke, soll hier nicht untersucht werden, da dies keine neuen Erkenntnisse bei der Verlustbestimmung bringen wird. Daher wird eine elektrotechnische Sichtweise zur Beleuchtung der Ummagnetisierungsverluste herangezogen.

Ummagnetisierungsverluste treten nach der klassischen Verlustaufteilung ausschließlich im Stator von PMSM auf. Sie lassen sich in einfacher analytischer Form durch die bekannte Steinmetzformel ausdrücken.

$$P_{V,Fe} = m_S \cdot (c_h \cdot f \cdot B^n + c_e \cdot f^2 \cdot B^2) \quad (3.1.5)$$

mit

m_S	Masse des Statoreisens
$c_h(B, f)$	Materialparameter zur Bestimmung der Hystereseverluste
$c_e(B, f)$	Materialparameter zur Bestimmung der Wirbelstromverluste
$n(B)$	Materialparameter zur Bestimmung der Hystereseverluste

In der Formel werden die beiden klassischen Verlustmechanismen in Blechen im Elektromaschinenbau berücksichtigt.

Die Hystereseverluste sind durch die Frequenz f und das Flächenintegral $\int H dB$ eindeutig bestimmt. Dies wird näherungsweise durch das Produkt der Frequenz f , mit der Induktion B mit der Hochzahl n , ausgedrückt.

Die Wirbelstromverluste sind proportional zum elektrischen Widerstand im Blech und zur induzierten Spannung und somit zum Stromeffektivwert im Blech, der durch die Änderung des magnetischen Flusses hervorgerufen wird. Die Änderung des magnetischen Flusses wird in der Formel durch das Produkt der Quadrate der Frequenz und der Induktion dargestellt.

Aus den Abhängigkeiten der Parameter kann man erkennen, dass hier keine einfache Abhängigkeit der Verluste von der Flussdichte im Stator, sowie der elektrischen Frequenz der Flussverkettungs-Grundwelle vorliegt.

Der Parameter c_h berücksichtigt die Abhängigkeit der Form der Hystereseschleife von der Flussdichte, der Frequenz und den Materialeigenschaften. Eine immer vorhandene, zumindest schwache Anisotropie des Materials, kann durch den Faktor nicht berücksichtigt werden.

Im Parameter c_e steckt im Wesentlichen der Zusammenhang zwischen induzierter Spannung und Wirbelstrom im Blech. Dabei spielt sowohl die elektrische Leitfähigkeit, als auch die Blechdicke eine Rolle.

Bei der Berechnung der Ummagnetisierungsverluste mit dieser Formel müssen also für jeden Betriebspunkt die Parameter c_h , c_e und n neu bestimmt werden.

Genauer betrachtet wird in der Gleichung vorausgesetzt, dass für die Induktion, an allen Stellen im Blech, der gleiche Scheitelwert auftritt, was keineswegs der Fall ist. Weiterhin wird in der Formel das Auftreten von Oberwellen im magnetischen Fluss und elliptischer Magnetisierung in Teilen des Blechs und damit zusammenhängend die anisotrope Eigenschaft des Blechs nicht berücksichtigt. Daher können die Ummagnetisierungsverluste, auf diese Art und Weise berechnet, nur eine grobe Näherung darstellen. Dies ergibt die Notwendigkeit, verbesserte Methoden zur Verlustbestimmung zu nutzen und diese vorab zu erörtern, wie dies im Folgenden geschieht.

In der Dissertation von Bochnia [2], wird basierend auf den Dissertationen von Kochmann [3] und Nuscheler [4], eine Methode zur Berechnung von Verlusten im Blech elektrischer Maschinen vorgestellt, die hier zur Verlustbestimmung herangezogen wird.

Die in [2] vorgestellte Methode nutzt gemessene Verlustkurven des verwendeten Materials bei numerisch berechneter Flussdichte im Eisen und gegebener Frequenz zur Berechnung. Somit gehen die Materialeigenschaften und die Materialstärke automatisch in die Verlustbestimmung ein. Durch die Berechnung der Flussdichte mit der Methode der Finiten Elemente wird berücksichtigt, dass die Amplitude der Flussdichte vom Ort im Statoreisen abhängt. Je feiner das Netz der Elemente in der FE-Analyse ausgeführt wird, desto genauer kann die ortsabhängige Flussdichte ermittelt werden. Allerdings erhöht dies sowohl die Rechenzeit für die FE-Analyse selbst, als auch die anschließende Berechnungszeit der Verluste.

Das Berechnungsmodell wird zweidimensional rotationssymmetrisch erstellt, wie es dem Blechschnitt des Stators entspricht. 3-D-Effekte, wie sie z.B. an den Stirnseiten des Blechpakets auftreten, werden vernachlässigt. Aufgrund der Maschinengeometrie und der geringen Blechdicke dürfte dies allerdings nicht zu einem großen Fehler führen.

Denkbar wäre weiterhin, die Anisotropie des Materials zu modellieren. Da jedoch bei der Paketierung des Statorblechs darauf geachtet wird, dass keine magnetische Vorzugsrichtung entsteht, kann die Anisotropie, die nur in geringem Maße auftritt, durch eine geringfügig reduzierte relative Permeabilität in allen Punkten der Eisenkennlinie einfließen. Da dieser Effekt nur klein ist und fertigungstechnisch ohnehin Einflüsse auf die magnetischen Materialeigenschaften entstehen, die im Vergleich wesentlich größere Auswirkungen haben, wird darauf verzichtet dies in der Berechnung zu berücksichtigen.

Die FE-Rechnung kann stationär ausgeführt werden, da die Wirkung der Frequenz auf die Ummagnetisierungsverluste durch die Verlustkurven berücksichtigt wird. Die Reduktion der relativen Permeabilität durch große Frequenzen geht nicht in die Rechnung ein, falls die Berechnung der Flussdichte nicht mit den frequenzabhängigen Permeabilitätskennlinien durchgeführt wird.

Zur Berechnung der zeitlich veränderlichen Flussdichte in den Statorelementen muss die Berechnung schrittweise über eine Drehung des Rotors um mindestens 180° des elektrischen Winkels erfolgen. Dies entspricht einer räumlichen Drehung um π/p . Die Drehung muss mit relativ kleinen Schritten durchgeführt werden, um möglichst viele Harmonische in der Flussdichte bestimmen zu können. Auch hier gilt wieder, dass der zeitliche Aufwand mit der Verfeinerung des Winkelschritts sowohl bei der FE-Berechnung, als auch bei der Verlustbestimmung ansteigt. Natürlich wird auch die Genauigkeit der Resultate zunehmen. Bei bekannter Stator- und Rotorgeometrie kann die notwendige Winkelschrittweite durch die zu erwartenden Harmonischen in der Flussdichte bestimmt werden.

Die Resultate der FE-Rechnung wie sie vorab beschrieben wurde, werden nun verschiedenen Transformationen unterzogen und im Anschluss durch Korrekturfunktionen bzw. Korrekturfaktoren modifiziert.

- Die Induktionswerte über alle Winkelschritte werden einer Fourieranalyse unterzogen.
- Die Scheitelwerte der Grundwelle der Flussdichte in den Elementen werden in ein elliptisches Koordinatensystem transformiert.

- Mit der Flussdichte in den beiden elliptischen Hauptachsen werden die Werte der spezifischen Verluste durch Interpolation in den Verlustkurven bestimmt. Die Frequenz, bei der die Ummagnetisierungsverluste ermittelt werden, kann zur Interpolation in den Verlustkurven einfach vorgegeben werden.
- Aus den transformierten Flussdichtewerten wird eine Korrekturfunktion, in Abhängigkeit von den Scheitelwerten der Flussdichte in den Hauptachsen, für die Drehmagnetisierung bestimmt, da die Überlagerung orthogonaler Wechselmagnetisierungen nicht nach dem Prinzip der ungestörten Superposition stattfinden kann. [2]
- Aus den Amplituden der Harmonischen der Elementflussdichte wird mit dem Scheitelwert der Flussdichte ein Korrekturfaktor gewonnen, der die in den Verlustkurven nicht vorhandenen Oberwellen näherungsweise berücksichtigt.
- Die interpolierten spezifischen Verluste der Hauptachsen werden summiert und mit der Korrekturfunktion und dem Korrekturfaktor multipliziert. Dann werden die so gewonnen spezifischen Verluste der einzelnen Elemente, mit den entsprechenden Elementflächen und der aktiven Statorblechlänge multipliziert und die Elementverluste aufsummiert.

Die beschriebene Methode, hat im Gegensatz zur Ermittlung der Verluste mit der Steinmetzformel den Vorteil, geometrische Bedingungen und das Auftreten von Drehmagnetisierung und Harmonischen, in der Flussdichte zu berücksichtigen. Weiterhin gehen durch die numerische Berechnung der Flussdichte die nichtlinearen Eigenschaften des Materials in die Berechnung ein.

Der wesentliche Nachteil liegt im Zeitbedarf für die Rechnung, die sich um ein Vielfaches erhöht. Diese Methode eignet sich somit nicht zur Online-Berechnung der Verluste und kann nur a priori angewendet werden, um Kennfelder zu bestimmen, deren Gültigkeit und Genauigkeit durch Messungen verifiziert werden muss.

Die Berechnungen wurden in MATLAB durchgeführt. Im Anhang findet sich der Quellcode.

Für den Vergleich der gerechneten Daten mit den tatsächlichen Verlusten, sind so genannte Leerlaufmessungen durchzuführen. Die zu prüfende PMSM wird bei verschiedenen Drehzahlen angetrieben und die mechanischen Verluste mit einer Drehmomentmesswelle gemessen. Dabei sind vorab die Reibungsverluste annähernd zu bestimmen, da das zu messende Drehmoment relativ klein ist.

3.1.3 Stator-Zusatzverluste

Die klassischen Stator-Ummagnetisierungsverluste berücksichtigen nicht die Änderungen der magnetischen Verhältnisse im Statorblech aufgrund unterschiedlicher Lastfälle. Die Änderungen der Ummagnetisierungsverluste werden als Stator-Zusatzverluste subsumiert, oder noch weiter zusammengefasst als Zusatzverluste, die dann auch die im nächsten Kapitel aufgeführten Rotorverluste beinhaltet.

Die Zusatzverluste sind reine Rechengrößen, da es sich bei den Zusatzverlusten um die Differenz der im Statorblech ermittelten Verluste in einem Lastpunkt und der Ummagnetisierungsverluste in einem entsprechenden Leerlaufpunkt handelt.

Mit der in Kapitel 3.1.2 beschriebenen Methode lassen sich jedoch ohne weiteren Aufwand die gesamten Verluste im Statoreisen in allen Betriebspunkten ermitteln, da der Berechnung mit dieser Methode die Flussdichte in den Elementen zugrunde liegt.

3.1.4 Rotorverluste

In PMSM entstehen Rotorverluste auf dreierlei Arten. Auch im Rotor sind Verluste im Blech zu verzeichnen. Weiterhin entstehen in den Permanentmagneten Stromwärmeverluste durch Wirbelströme. Die Reibungsverluste, sei es Lagerreibung oder Luftreibung im Luftspalt und an den Stirnflächen des Rotors, können ebenfalls den Rotorverlusten zugeschlagen werden.

Die Reibungsverluste lassen sich aus Messungen bei kleinen Drehzahlen extrapolieren und sollen in den weiteren Betrachtungen zunächst vernachlässigt werden.

Die Verluste in den Permanentmagneten können kaum sinnvoll separiert werden. Der Wechselanteil der Flussdichte in den Magneten aufgrund der geometrischen Anordnung des Rotors bzw. des Stators (Nutung) und der Ströme im Stator ist relativ klein. Daher, und weil die Magnete zudem im Vergleich zum Blech eine schlechte elektrische Leitfähigkeit aufweisen und nur einen geringen Anteil am Volumen des Rotors einnehmen, werden auch diese Verluste nicht weiter berücksichtigt.

Die Rotor-Ummagnetisierungsverluste sind nur scheinbar zu vernachlässigen. PMSM mit vergrabenen Magneten weisen, wie in späteren Kapiteln zu sehen sein wird, in bestimmten Bereichen nennenswerte Wechselanteile in der Flussdichte im Blech auf. Je nach Polpaarzahl kann dies zu nicht vernachlässigbaren Wirbelstromverlusten im Blech führen. Die Hystereseverluste spielen dabei nur eine untergeordnete Rolle.

Die Ummagnetisierungsverluste im Rotor unterscheiden sich wesentlich von den Ummagnetisierungsverlusten im Stator. Im Stator treten ausschließlich Induktionen mit der Grundwellenfrequenz und deren Oberwellen auf. Im Rotor tritt die Grundwelle nicht auf, da der Rotor mit der Frequenz der Flussverkettung rotiert. Somit können nur Frequenzen auftreten, die aus Geometrie und Wicklungsart resultieren. Die Ursache für die größten Amplituden in der zeitlich veränderlichen Magnetisierung, ist die Nutung in Kombination mit dem von den Magneten erzeugten Magnetfluss. Jedoch treten alle Feldharmonischen, ob von den Magneten oder durch einen Statorstrom erzeugt, im Rotorfeld auf. Dies führt je nach Betriebspunkt zu unterschiedlichen Effekten und somit zu betriebspunktabhängigen Ummagnetisierungsverlusten.

Die Berechnung der Verluste mit der vorgestellten Methode von Bochnia e.a. muss daher modifiziert werden. Die Berechnung der Verluste muss, nach Identifikation der in der Flussdichte auftretenden Frequenzen und deren jeweiligen Harmonischen, für die identifizierten Frequenzen getrennt ausgeführt werden. Anschließend werden die Teilverluste addiert. Der Quelltext der Verlustberechnung in MATLAB befindet sich im Anhang.

Messtechnisch können die Rotorverluste für einen bestimmten Betriebspunkt, durch Messung der elektrischen und der mechanischen Leistung, zunächst im motorischen und darauf folgend im generatorischen Betrieb ermittelt werden. Die Differenz der Leistungen ergibt die Verlustleistung in beiden Betriebsarten. Die Differenz der Verlustleistungen stellt die Rotorverluste dar.

Nachdem die Rotorverluste identifiziert sind, können auch die Stator-Zusatzverluste aus den Messergebnissen berechnet werden.

3.2 Ummagnetisierungsverluste bei permanenter Vormagnetisierung

Durch die Magnete ist das Blech im Rotor in weiten Teilen vormagnetisiert. Die Wechselanteile in der Magnetisierung entstehen durch Feldharmonische. Auch bei einem unbestromten Stator können Wechselanteile aufgrund der variablen Reluktanz durch die Nutung hervorgerufen werden. Dies führt zu Zusatzverlusten bereits im unbestromten Zustand der PMSM. Wie im Weiteren gezeigt wird, sind die Amplituden dieser Wechselanteile aufgrund des Gleichanteils sehr klein. Daher werden die Verluste im Rotor in stromlosem Betrieb auch bei hohen Frequenzen der Wechselanteile relativ klein bleiben.

Um die Zusammenhänge nachzuvollziehen wurden Messungen durchgeführt, die in erster Linie die qualitativen Zusammenhänge darstellen sollen. Eine Bewertung der Güte der Messung wird nur durch Vergleich mit den Herstellerangaben vollzogen. Der Versuchsaufbau wird in einem folgenden Kapitel beschrieben.

3.2.1 Zusammenhang zwischen Gleich- und Wechselanteil in der Magnetisierung

Die folgenden Diagramme zeigen die Abhängigkeit der spezifischen Ummagnetisierungsverluste vom Anteil der konstanten Vormagnetisierung bei verschiedenen Frequenzen. Im Unterschied zu den Verlustmessungen der Hersteller wurde hier ein sinusförmiger Strom eingepreßt und keine sinusförmige Spannung. Dies liegt darin begründet, dass in den meisten elektrischen Maschinen üblicherweise sinusförmige Ströme angestrebt werden.

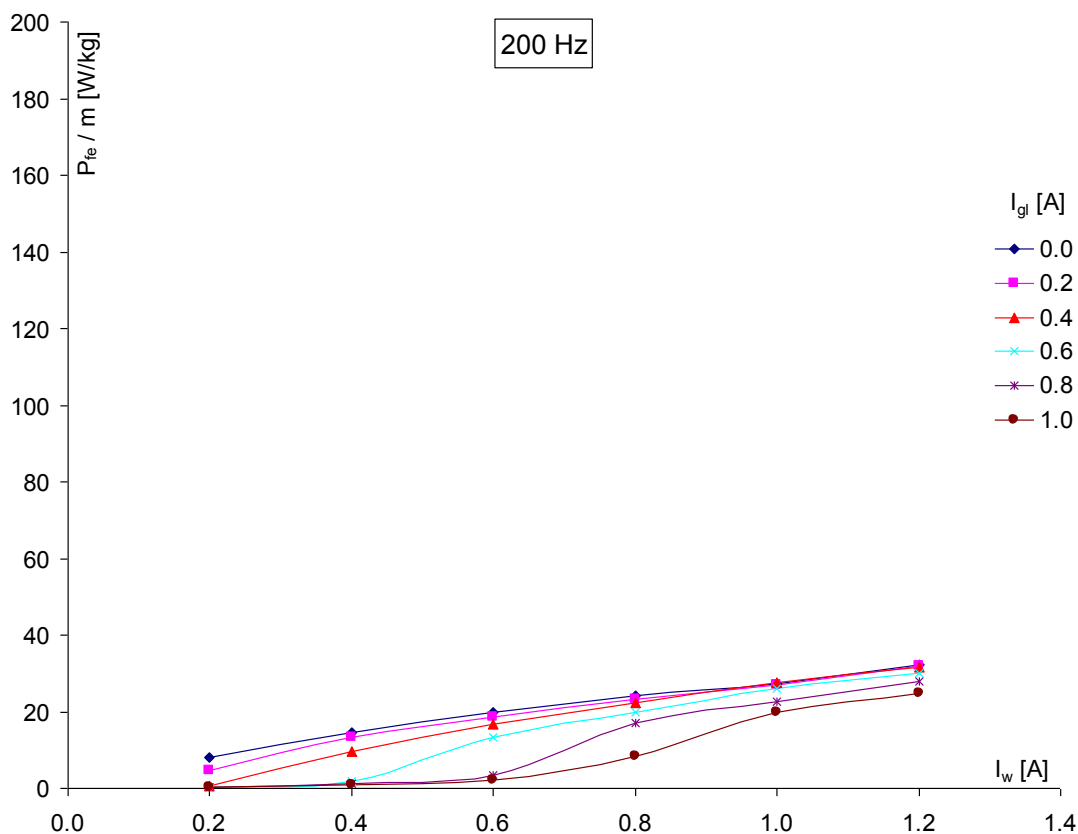


Bild 3.2.1: spezifische Ummagnetisierungsverluste bei Vormagnetisierung, 200 Hz

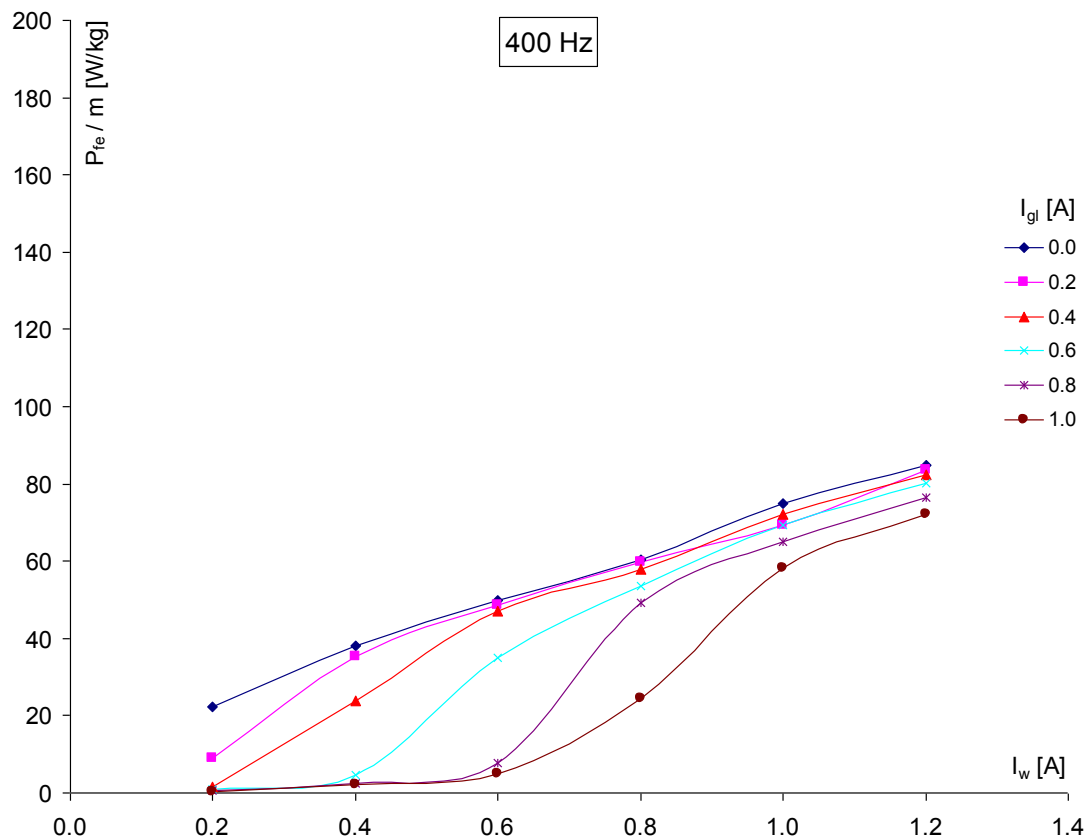


Bild 3.2.2: spezifische Ummagnetisierungsverluste bei Vormagnetisierung, 400 Hz

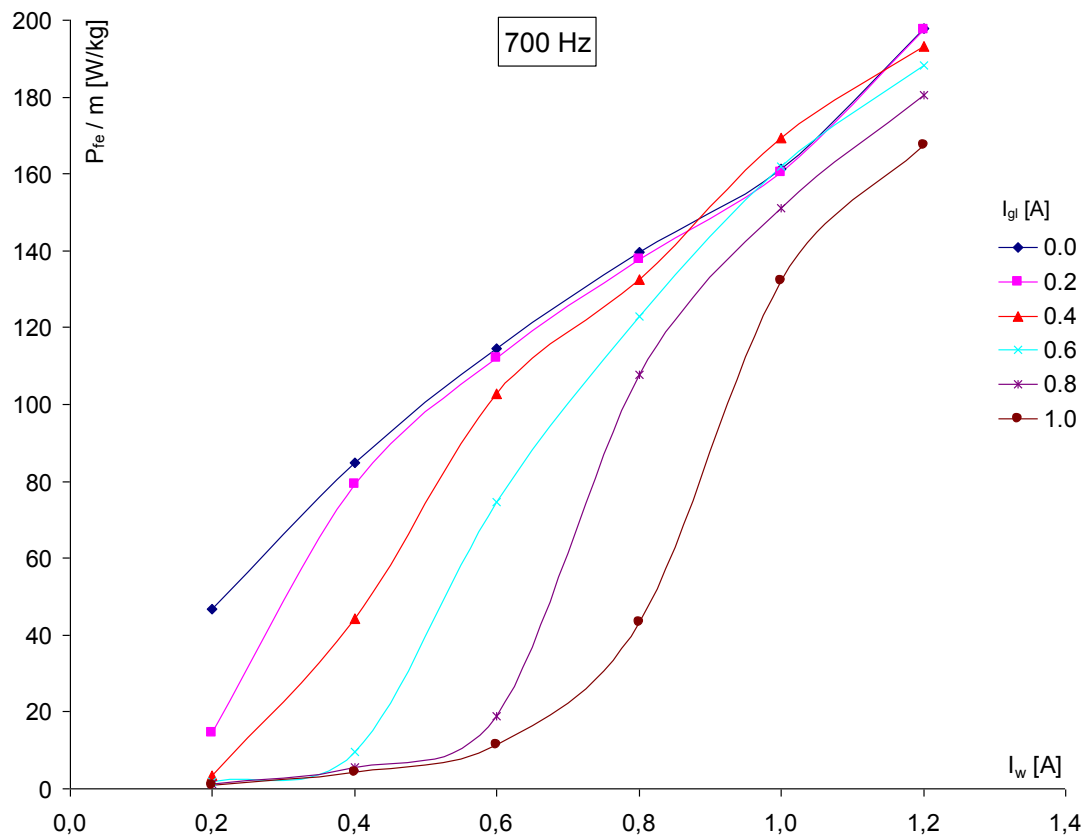


Bild 3.2.3: spezifische Ummagnetisierungsverluste bei Vormagnetisierung, 700 Hz

Schon bei den Messreihen mit 200 Hz ist der Effekt, der durch die Gleichstrom-Vormagnetisierung entsteht, zu erkennen. Der Anstieg der Verluste bei steigendem Wechselanteil im Strom wird durch den Gleichstromanteil begrenzt. So betragen bei einem Wechselanteil im Strom von 0,6 A und einem Gleichstromanteil von 0,8 A bei einer Frequenz von 400 Hz die spezifischen Ummagnetisierungsverluste $P_{fe} = 7,8 \text{ W/kg}$. Bei einer Halbierung des Gleichstromanteils betragen die spezifischen Verluste ungefähr das Sechsfache. Daraus folgt, dass bei Entsättigung des vormagnetisierten Blechs im Rotor einer PMSM die Verluste ansteigen. Dies ist vor allem bei großen Querströmen, sowohl in Teilen im Stator als auch im Rotor, der Fall.

In den folgenden Diagrammen wurde der Maßstab der spezifischen Verluste verändert. Bei derart hohen Frequenzen, die durchaus bei hohen Drehzahlen in PMSM mit großer Polpaarzahl auftreten, können schon bei relativ kleinen Wechselanteilen in der Induktion sehr hohe spezifische Verluste im Rotorblech entstehen. Eine Zuordnung des Wechselanteils der Flussdichte, zu den erregenden Wechselströmen findet sich im Anhang.

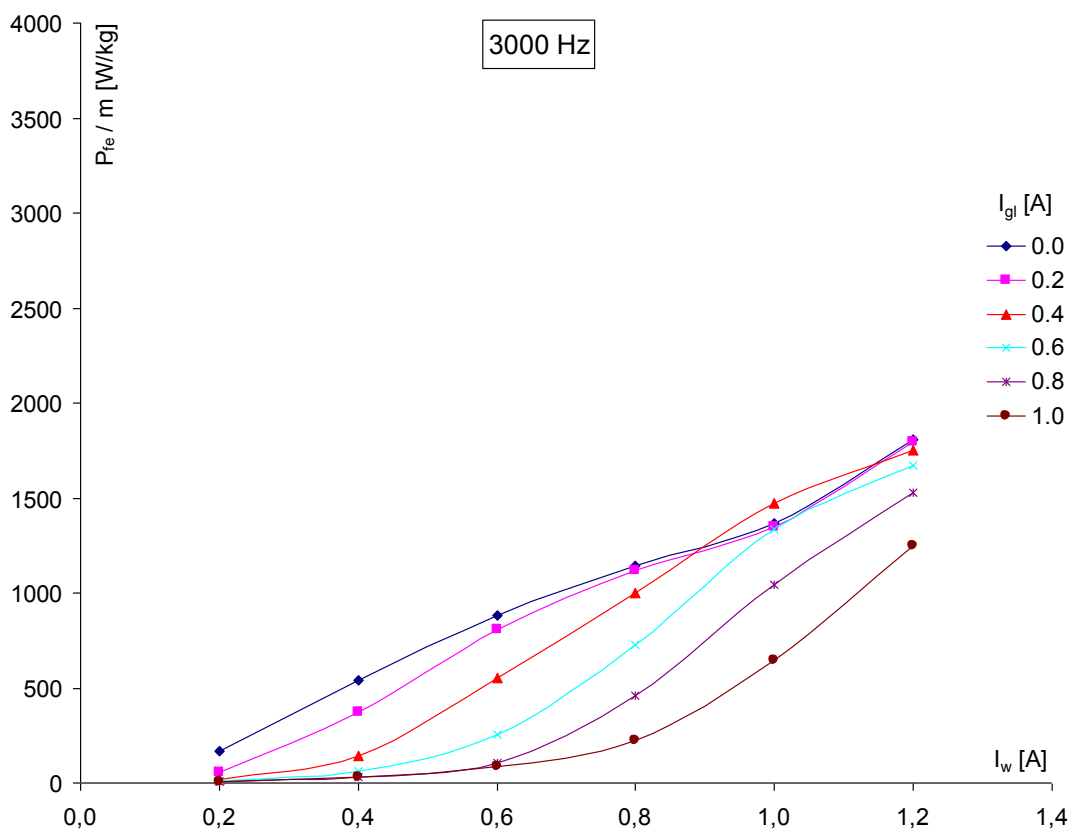


Bild 3.2.4: spezifische Ummagnetisierungsverluste bei Vormagnetisierung, 3000 Hz

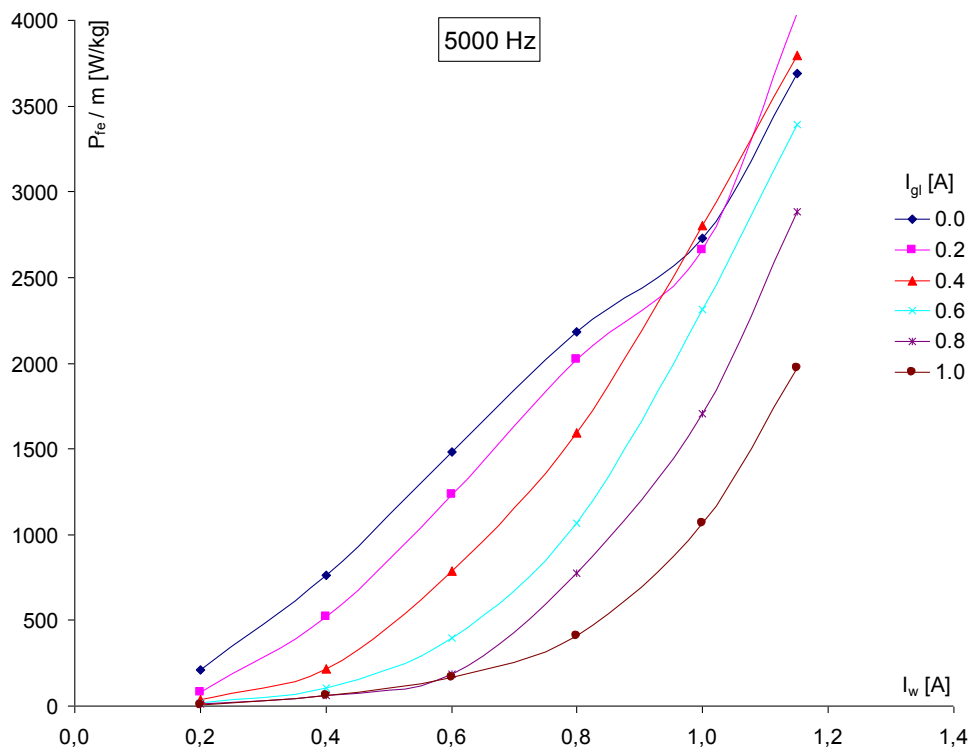


Bild 3.2.5: spezifische Ummagnetisierungsverluste bei Vormagnetisierung, 5000 Hz

Der aus den Diagrammen abzulesende Effekt ändert sich mit steigender Frequenz qualitativ gesehen nicht. Dies wird durch das folgende Diagramm belegt, bei dem die gemittelten Werte aller Messungen auf den Spitzenwert normiert wurden.

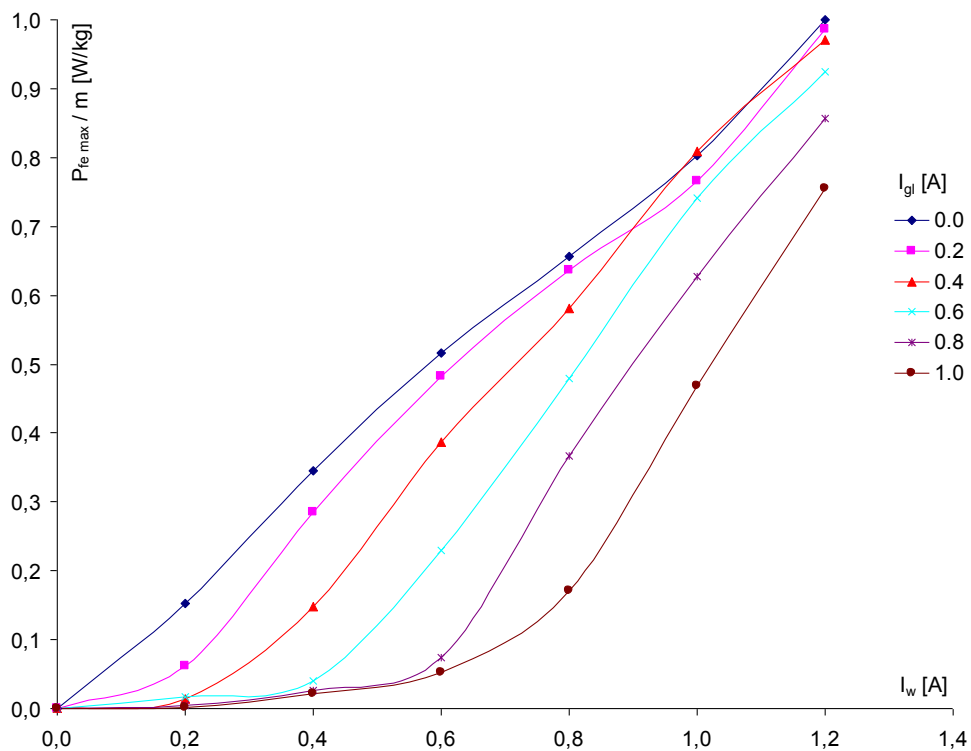


Bild 3.2.6: spezifische Ummagnetisierungsverluste bei Vormagnetisierung, Mittelwert

Die Tabellen mit den Messwerten zu diesen Diagrammen, sowie weitere Tabellen mit Messwerten weiterer Frequenzen, sind im Anhang zu finden.

3.2.2 Versuchsaufbau

Die Messprobe besteht aus einem Blechpaket von 15 geschichteten Ringen mit dem Außenradius $r_a = 0,015$ m und dem Innenradius $r_i = 0,01$ m der Blechqualität M270-35A.



Bild 3.2.7: bewickelter Eisenkern

Die Erregerwicklung besteht aus 100 Windungen mit Shellack isoliertem Kupferdraht mit der Querschnittsfläche $0,14 \text{ mm}^2$. Die Messwicklung besteht aus 10 Windungen desselben Drahtes.

Die Messungen wurden mit Messgeräten des Typs Metrahit 29S der Firma Metrawatt-Gossen durchgeführt.

3.2.3 Vergleichsmessungen

Vergleichsmessungen mit eingepprägten sinusförmigen Spannungen zeigen, dass die Werte der Verlustmessungen nahe bei den Herstellerangaben liegen, solange die Frequenzen oder, bei höheren Frequenzen, die Flussdichten klein sind. Dies liegt am Versuchsaufbau aus gestanzten Blechringen. An den Stanzkanten entstehen elektrische Kurzschlüsse, in denen Wirbelströme entstehen, die zum einen die Ummagnetisierungsverluste erhöhen und zum anderen die erreichbare Flussdichte reduzieren. Dies geht aus der Tabelle im Anhang hervor. Daher sind, wie bereits erwähnt, nur Messungen mit kleinen Frequenzen vergleichbar.

Für die Berechnungen wurden, aus bereits genannten Gründen, die Messwerte mit eingepprägten Strömen verwendet. Die dabei ermittelten Verluste werden sich, aufgrund der unterschiedlichen Geometrien und des unterschiedlichen konstruktiven Aufbaus, von denen in der realen PMSM sicher unterscheiden. Eine Vorabberechnung der Verluste kann folglich in erster Linie nur zur Abschätzung der Verluste und zur Bestimmung des qualitativen Verlaufs der Gesamtverluste dienen. Für eine Regelung, wie sie im Weiteren beschrieben wird, genügt die Kenntnis des qualitativen Verlaufs der Verluste, da immer nur nach einem Minimum gesucht wird und der absolute Wert prinzipiell keine Rolle spielt.

3.3 Ummagnetisierungsverluste bei Überlagerung von Wechselfeldern

Im Betrieb mit d-Strom und/oder q-Strom treten alle Harmonischen auf, die durch die Wicklung der Maschine hervorgerufen werden. Hier ist im Einzelfall zu untersuchen, welche Frequenzen dominant für die Ummagnetisierungsverluste sind. Tatsächlich muss hier der Einfluss der Nutharmonischen von den übrigen Oberwellen separiert werden, da die Ursache für die Wechselanteile in der Induktion eine Kombination aus Wicklungsharmonischen und Nutharmonischen erzeugt durch die Permanentmagnete darstellt.

Die Form der Hysteresekurve im Eisen hängt von den Frequenzen und den Amplituden der Feldstärkekomponenten ab. Dies ergibt, bei Überlagerung von unterschiedlichen Frequenzen, qualitativ betrachtet ähnliche Effekte, wie bei Erregung des Feldes mit einer Frequenz und Vormagnetisierung. Messungen an der Blechprobe aus Kapitel 3.2, in demselben Versuchsaufbau durchgeführt, zeigen, dass die Verluste ohne Gleichanteil in der Vormagnetisierung nicht einfach addiert werden können, wenn wie bei den Messungen von den felderregenden Strömen ausgegangen wird. Bei Verlustrechnungen mit der vorab vorgestellten Methode, werden jedoch die Amplituden der Flussdichte zur Berechnung herangezogen. In diesen Wechselanteilen ist der prinzipiell auftretende Effekt bereits enthalten.

Folglich werden die auftretenden Wechselanteile der Induktion nach Ursache separiert und die Berechnung der Verluste jeweils für die Grundwelle der Wechselinduktion und deren Harmonische getrennt ausgeführt und danach aufsummiert.

Die auftretenden Frequenzen können sehr groß sein. So sind die relativ großen Ummagnetisierungsverluste im Wesentlichen durch die hohen Frequenzen zu erklären. Die Induktionsverteilung, wie sie in Kapitel 4 zu sehen ist, besteht hauptsächlich aus Gleichanteilen. Im Besonderen an Stellen, an denen die Induktion groß ist, sind nur kleine Wechselanteile zu erwarten.

4. Maschinenentwurf

Mit Kriterien für den Maschinenentwurf von PMSM für HEV befassen sich zurzeit einige Arbeiten wie z.B. [14], [15], [19], [23], [24] und [25].

In [14] werden die für den Betrieb von PMSM in HEV wichtigen Zusammenhänge zwischen Dauer-, Spitzenleistung, Gewicht, Wirkungsgrad und der Drehzahlspannung als freie Variable untersucht. Das Resultat, eine optimale Drehzahlspannung im Bereich zwischen 3 und 4, gibt die ersten Hinweise auf die notwendige Fähigkeit zur Feldschwächung beim Design von PMSM. Weiterhin wird in dieser Arbeit ein Algorithmus zur Optimierung der Maschinenparameter vorgestellt.

Eine sehr wichtige Arbeit zur Untersuchung von Maschinen mit ausgeprägten Polen und daher mit einem Induktivitätsverhältnis von $L_d/L_q > 1$ stellt [19] dar. Diese Arbeit und weitere Arbeiten derselben Forschergruppe sind motiviert von der Erweiterung der Fähigkeit zur Feldschwächung von PMSM. Diese Fähigkeit ist ein wichtiges Ziel für PMSM in HEV, da im Betrieb große Drehmomente in der Hauptsache bei kleinen Drehzahlen gefragt sind während gleichzeitig ein großer Drehzahlbereich abgedeckt werden muss.

Es wird in dieser Arbeit [19] festgestellt, dass Maschinen mit einem Induktivitäts-Verhältnis größer Eins, gegenüber Maschinen mit einem Verhältnis kleiner Eins, zwar eine etwas kleinere Maximalleistung und ebenfalls ein kleineres maximales Drehmoment aufweisen, jedoch größere Drehzahlen erreichen können und im Bereich hoher Drehzahlen, den beide Maschinen erreichen können, eine höhere Leistung und ein größeres Drehmoment aufweisen.

Es werden in dieser Arbeit [19] mehrere Rotorstrukturen von Maschinen mit $L_d/L_q > 1$ vorgestellt. Die erste Rotorstruktur teilt den Rotor axial in zwei Teile. Ein Teil stellt eine herkömmliche PMSM mit Oberflächenmagneten dar, während der zweite Teil als Synchron-Reluktanz-Maschine ausgeführt ist, mit einer maximalen Induktivität in der Hauptrichtung der Permanentmagnete. Es sollen Induktivitätsverhältnisse von ca. 2,8 mit solchen Anordnungen erreichbar sein.

Weitere Rotorgeometrien werden ebenfalls in [19] dargestellt. Es handelt sich hierbei sowohl um Rotoren mit Oberflächenmagneten, als auch um solche mit vergrabenen Magneten, jeweils mit Flussbarrieren im Eisenteil des Rotors zur Führung des d-Flusses und zur Erhöhung der Reluktanz in q-Richtung. Für diese Vorschläge wurden Induktivitätsverhältnisse von 2 bzw. 2,7 angegeben. Offensichtlich ist bei allen vorgeschlagenen Anordnungen, dass der konstruktive Aufwand zur Fertigung des Rotors und zur Sicherung der Magnete und der Blechpakete bei hohen Umfangsgeschwindigkeiten groß ist. Sollten für diese Konstruktionen Bandagierungen des Rotors notwendig werden, wird sich dies negativ auf das Induktivitätsverhältnis und das Drehmoment der Maschinen auswirken.

In [23] werden unterschiedliche Rotoranordnungen hinsichtlich ihrer Eignung auf Feldschwächung untersucht. Es werden Designempfehlungen abgeleitet, die bei der ersten Dimensionierung der PMSM Anwendung finden sollen.

In [15] wird der Einfluss von Magnetgeometrie und Rotorform auf die Flussdichteverteilung im Luftspalt und somit die Harmonischen in der induzierten Spannung und im Drehmoment untersucht. Dabei wird im Wesentlichen festgestellt, dass eine Variation des Luftspalts zur Verringerung dieser Harmonischen beiträgt.

4.1 Direkte Forderungen an die Maschine

4.1.1 Leistung

Zurzeit wird beim Entwurf von Hybridkonzepten unterschieden zwischen dem so genannten Microhybrid, Mildhybrid, dem Fullhybrid und dem Powerhybrid.

- Der Microhybrid ist ein Parallelhybrid vom Typ 1. In der Regel liegt die Dauerleistung des Elektromotors beim Microhybrid bei ca. 5 kW. Der Drehzahlbereich des Elektromotors liegt ohne Getriebe im Bereich des Verbrennungsmotors. Mit Getriebe kann der Drehzahlbereich bis zum dreifachen Drehzahlbereich des Verbrennungsmotors ansteigen.
- Der Mildhybrid entspricht bis auf die Leistung dem Microhybrid. Die Dauerleistung des Mildhybrid liegt bei ca. 20 kW.
- Für den Fullhybrid sind alle Varianten der gängigen Hybridkonzepte geeignet. Die Leistung des Motors liegt üblicherweise im Bereich von ca. 50 kW bis ca. 70 kW. Der Drehzahlbereich, den der Elektromotor abdecken muss, liegt im Bereich des Verbrennungsmotors.
- Der Powerhybrid entspricht dem Fullhybrid, wobei die Leistungen des Elektromotors hierbei bis zu 150 kW gehen.

In dieser Arbeit werden folgende Festlegungen für den Betriebsbereich der PMSM getroffen:

- | | |
|---------------------------|-----------------------------|
| • Dauerleistung | $P_N = 50 \text{ kW}$ |
| • Dauermoment | $M_N = 150 \text{ Nm}$ |
| • Betriebsdrehzahlbereich | $0 - 6600 \text{ min}^{-1}$ |
| • Grunddrehzahlbereich | $0 - 3300 \text{ min}^{-1}$ |
| • Maximaldrehzahl | 9900 min^{-1} |

Unter dem Grunddrehzahlbereich wird hier der Drehzahlbereich verstanden, in dem das Bemessungsmoment bei voller Zwischenkreisspannung ohne Feldschwächung eingestellt werden kann.

4.2 Randbedingungen

In Hybridfahrzeugen gibt es zwei voneinander unabhängige Energiespeicher. Der Energiespeicher für den elektrischen Teil des Antriebsstrangs ist im Regelfall eine Batterie. Die Batteriespannung schwankt je nach Ladezustand und Belastung. Dies kann eventuell durch leistungselektronische Stellglieder ausgeglichen werden.

Grundsätzlich ist in Hinblick auf den Drehzahlbereich und die ohmschen Verluste ein hohes Spannungsniveau wünschenswert. Die Spannungsobergrenze wird durch Sicherheitsaspekte in HEV und den aktuell erhältlichen Leistungshalbleitern festgelegt.

Aus praktischen Gründen, die Maschine soll auf einem Prüfstand vermessen werden der aus einem Maschinenumrichtersatz mit maximal 500 V Gleichspannung gespeist wird, wird das Spannungsniveau auf die Prüfbedingungen reduziert.

Der Bauraum innerhalb des Antriebsstrangs eines KFZ ist stark begrenzt. Grundsätzlich sind verschiedene Einbauorte, abhängig vom Hybridtyp, denkbar. Bei der Aufgabenstellung wurde keine Festlegung für den Einbauort getroffen. Daher kann bei der Festlegung der Maschinenform frei gewählt werden. Es empfiehlt sich jedoch davon auszugehen, dass die Integration der elektrischen Maschine in den Antriebsstrang im Bereich des Verbrennungsmotors bzw. des Getriebes vorzusehen ist.

Aus dem oben genannten ergeben sich Statordurchmesser im Bereich von 200 mm bis 250 mm. Die Länge des elektrischen Motors sollte möglichst kurz sein. Zunächst wird jedoch davon ausgegangen, dass die Rotormaße ungefähr quadratisch sind, d.h. der Rotordurchmesser in etwa der Rotorlänge entspricht.

Eine wesentliche Bedingung für den Einsatz von elektrischen Maschinen in HEV, ist das Fehlverhalten der elektrischen Maschine. Im Wesentlichen darf der Betrieb des Fahrzeugs durch einen Fehler der elektrischen Maschine nicht zur vollständigen Stilllegung des Fahrzeugs führen. Unabhängig vom Hybridkonzept muss der elektrische Motor gegebenenfalls mitlaufen, ohne den Fahrzeugbetrieb zu sehr zu behindern. Für elektrische Maschinen bedeutet dies, dass durch den Fahrzeugbetrieb keine Bedingungen auftreten dürfen, die zur Zerstörung des elektrischen Motors führen.

Zur Zerstörung der PMSM können Überdrehzahlen, zu große elektrische Ströme und damit zu starke Erwärmung der Maschine sowie zu große Spannungen führen. Die größte Gefährdung der PMSM geht von Überströmen aus, die z.B. durch Wicklungsschlüsse bzw. Kurzschlüsse der Halbleiter der Leistungselektronik verursacht werden.

Die Maschinenauslegung wird daher so durchgeführt, dass bei einem Kurzschluss an den Klemmen der PMSM nicht mehr als der Bemessungsstrom in den Wicklungen der Maschine fließen kann. Der Kurzschlussstrom hängt von der magnetischen Flussverkettung, der Maschineninduktivität in Magnetisierungsrichtung L_d und vom Wicklungswiderstand R ab.

$$I_k = \frac{\Psi_M}{\sqrt{2} \cdot \sqrt{L_d^2 + \frac{R^2}{\omega^2}}} = \frac{\Psi_M}{\sqrt{2} \cdot \sqrt{L_d^2 + \frac{R^2}{(2\pi n)^2}}} \quad (4.2.1)$$

Wird die Längsinduktivität nach dem folgenden Kriterium ausgelegt, wird der Kurzschlussstrom nie größer als der Bemessungsstrom.

$$L_d \geq \lim_{\omega \rightarrow \infty} \frac{\omega \cdot \frac{\Psi_M}{\sqrt{2}} - U_N}{\omega \cdot I_N} = \frac{\Psi_M}{\sqrt{2} \cdot I_N} \quad (4.2.2)$$

4.3 Entwurf und Auslegung

4.3.1 Rotor

In Kapitel 2.5 wurde festgelegt, dass das Verhältnis der Induktivitäten L_d/L_q größer als Eins sein soll. Solche Verhältnisse sind bei Synchronmaschinen mit ausgeprägten Polen gegeben.

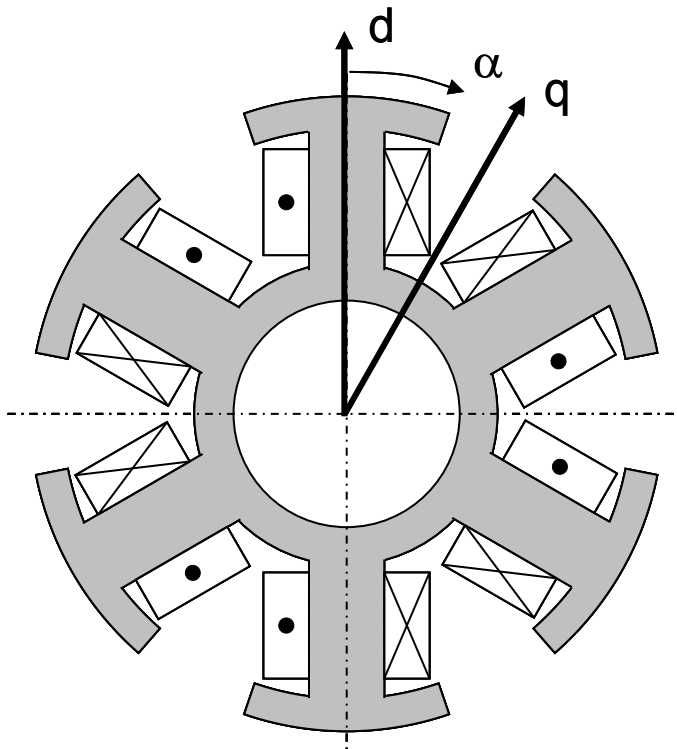


Bild 4.3.1: Beispiel für eine SM mit ausgeprägten Polen [1]

In Bild 4.3.1 sind die Längs- und die Querachse beispielhaft für einen Pol eingezeichnet. Solche Maschinen weisen einen folgenden Verlauf der Flussdichte im Luftspalt auf:

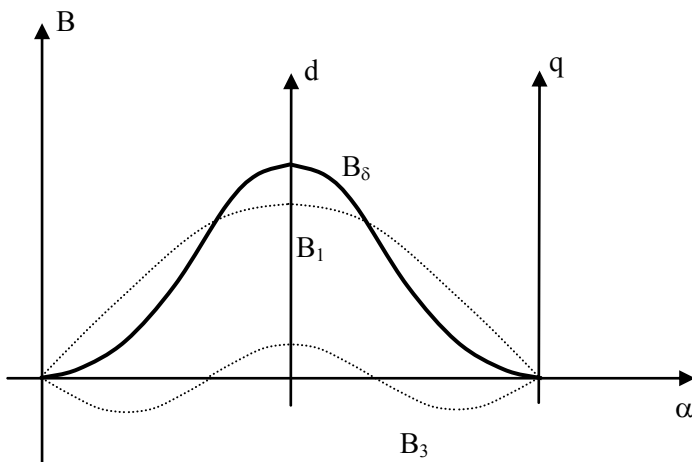


Bild 4.3.2: Verlauf der Luftspaltinduktion bei PMSM mit ausgeprägten Polen

Die dritte Harmonische der Luftspaltinduktion hat gegenüber der Grundwelle ein negatives Vorzeichen. Ein solcher Flussdichteverlauf im Luftspalt kann durch unterschiedliche Maßnahmen in der Rotorgeometrie erzeugt werden. Im Folgenden werden die Maßnahmen im Einzelnen erläutert. Im Anschluss wird eine Rotorgeometrie vorgestellt, die eine Kombination dieser Maßnahmen darstellt.

- Luftspaltvariation

Die Variation des Luftspaltes über einen Pol führt zu einer Verteilung der Luftspaltflussdichte, wie sie aus großen Synchrongeneratoren bekannt ist.

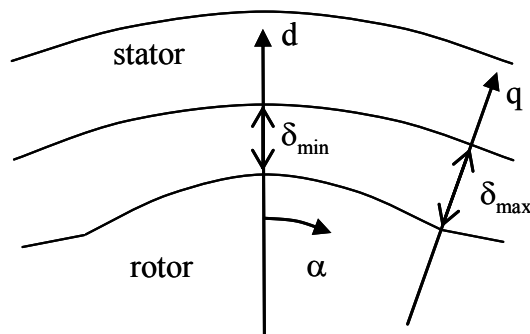


Bild 4.3.3: Luftspaltvariation

- Flusskonzentration

Bekannte Anordnungen zur Flusskonzentration sind die Spoke-Anordnung (Speichen-Anordnung) und geteilte vergrabene Magnete.

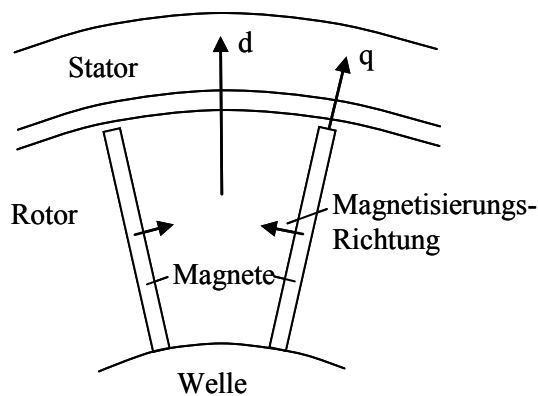


Bild 4.3.4: Spoke-Anordnung

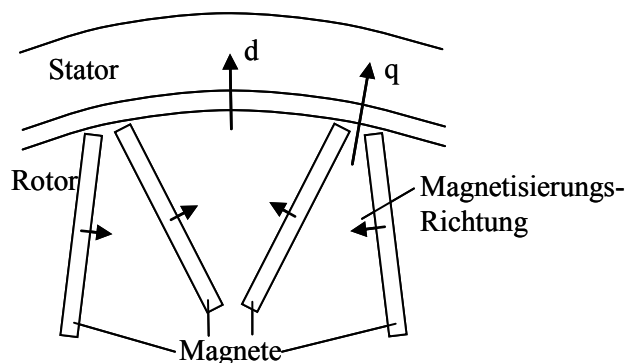


Bild 4.3.5: geteilte Magnete

Der Flussgewinn kann über das Verhältnis der aktiven Magnetfläche zur Polfläche geschätzt werden. Eine genauere Bestimmung des Polflusses muss durch numerische Feldberechnung geschehen. Der für die Induktivität wesentliche Effekt einer geringen magnetischen Reluktanz bei unverminderter Flussverkettung in der Maschine beruht auf der geringen notwendigen Magnethöhe

- Variation der Polfläche

Der Verlauf der Luftspaltflussdichte, wie oben beschrieben, kann durch Verkleinerung des Polwinkels β_M erreicht werden.

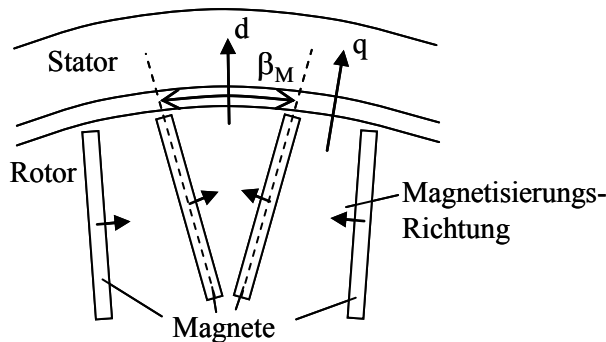


Bild 4.3.6: Polflächenvariation

Aus Bild 4.3.2 lässt sich ablesen, dass der Polwinkel ungefähr $1/2$ bis $2/3$ der Polteilung betragen sollte. Wird der Polwinkel zu klein, werden die Statorzähne zu stark gesättigt. Wird der Polwinkel zu groß, wird das Verhältnis L_d/L_q nicht sehr ausgeprägt sein. Zu beachten ist bei der Festlegung des Polwinkels auch die Spulenweite der Statorwicklung. Je kleiner die Spulenweite, desto kleiner sollte auch der Polwinkel werden.

Aufgrund der gewählten Wicklung, die im folgenden Kapitel erläutert wird, wurde der Polwinkel wie folgt gewählt:

$$\beta_M = \frac{2}{3} \cdot \frac{\pi}{p} \quad (4.3.1)$$

- Flussführung

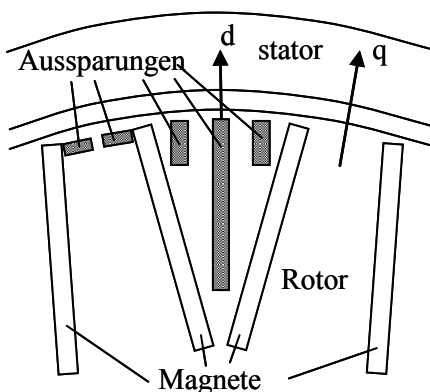


Bild 4.3.7: Flussführung

Durch gezielt angebrachte Aussparungen im Rotoreisen kann die Reluktanz in Richtung der q-Achse gezielt vergrößert werden ohne dabei den Fluss in d-Richtung zu behindern.

- Kombination aller Maßnahmen

Um das bestmögliche Resultat zu erzielen, müssen die oben beschriebenen Maßnahmen kombiniert werden. Die grundsätzliche Magnetanordnung, die hierbei gewählt wurde, ist die Flusskonzentration mit geteilten Magneten.

Bild 4.3.8 zeigt ein Viertel des Motorquerschnitts, entsprechend zweieinhalb magnetischen Polen. Die schmalen schwarzen Flächen stellen die Magnete dar. Die hellgrauen Flächen sind Aussparungen im Rotoreisen zur Flussführung. Die Breite dieser Aussparungen sollte mindestens das Doppelte der Luftspaltlänge haben. Der Luftspalt sollte für hohe Induktivitätswerte möglichst klein sein. Technisch machbar ist ein minimaler Luftspalt von ca. 0,5 mm. Gewählt wurde aus Fertigungsgründen ein Luftspalt $\delta = 0,8$ mm. Das Verhältnis der größten Luftspaltlänge zur kleinsten Luftspaltlänge beträgt 6:1.

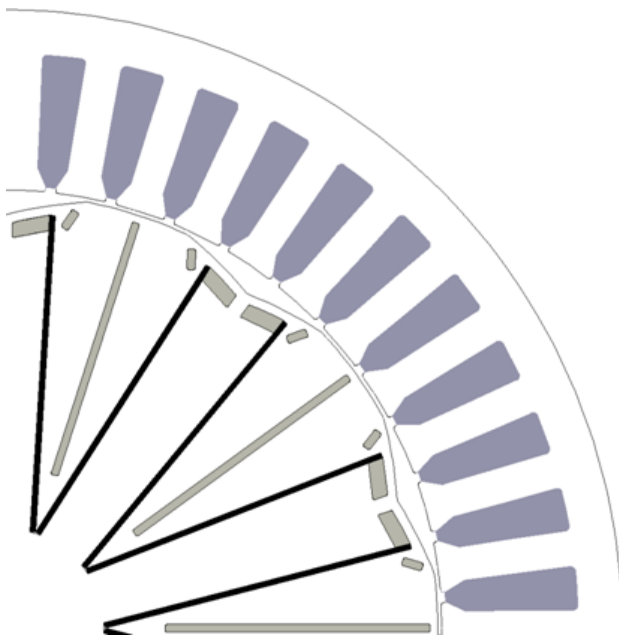


Bild 4.3.8: Querschnitt

Wie bereits erwähnt, soll der Rotordurchmesser ungefähr der Rotorlänge entsprechen. Daraus folgt für das Rotorvolumen:

$$V_{Rotor} = \pi \frac{d_R^2}{4} l_R = \frac{\pi}{4} d_R^3 \quad (4.3.2a)$$

$$\rightarrow d_R = \sqrt[3]{\frac{4}{\pi} V_{Rotor}} \quad (4.3.2b)$$

$$\text{Aus } M = \frac{P}{2\pi n} = 2 \cdot \sigma \cdot V_{Rotor} \quad (4.3.3a)$$

ergibt sich:

$$d_R = \sqrt[3]{\frac{4}{\pi} V_{Rotor}} = \sqrt[3]{\frac{2M}{\pi\sigma}} \quad (4.3.3b)$$

Der Drehschub σ nimmt Werte von bis zu 20 kPa bei PMSM für Hybridfahrzeuge an.

$$\rightarrow d_R = l_R \cong 0,17 \text{ m} \quad (4.3.4)$$

Für den Drehschub gilt die folgende Beziehung:

$$\sigma = \frac{A_{eff} \cdot \hat{B}_{\delta 1} \cdot \xi_1}{\sqrt{2}} \quad (4.3.5)$$

mit :

$$A_{eff} = \frac{m \cdot 2p \cdot q \cdot 2w_{sp} \cdot I_{Str}}{\pi d_{\delta}} \quad (4.3.6)$$

Der Strombelag A_{eff} kann auch über die maximale Stromdichte in den Leitern und der den Leitern zur Verfügung stehenden Fläche berechnet werden. Dazu müssen einige Annahmen getroffen werden. Die maximale Stromdichte pro Leiter darf bei flüssigkeitsgekühlten Maschinen dieser Größe den Wert von ca. $S_{max} = 7 \dots 8 \text{ A/mm}^2$ nicht überschreiten. Es wird der kleinere Wert gewählt. Der Kupferfüllfaktor in den Nuten wird zumindest bei Prototypen maximal den Wert von ca. $k_{Cu} = 1/3$ erreichen. Die Fläche des Statorquerschnitts kann bis zu einem Drittel mit Nutfläche versehen werden. Mit diesen Annahmen und der Vorgabe des maximalen Außenradius des Stators von 0,12 m kann der Strombelag bestimmt werden.

$$A_{eff} = \frac{\pi(r_s^2 - r_{\delta}^2) \cdot S_{max} \cdot k_{Cu}}{3 \cdot \pi d_{\delta}} \cong 32,8 \frac{kA}{m} \quad (4.3.7)$$

Mit Scheitelwerten der Luftspaltflussdichte von ca. $B_{\delta 1} = 0,8 \text{ T}$ lassen sich somit die angestrebten Werte des Drehschubs erzielen. Dies erfordert allerdings mittlere Luftspaltflussdichten von ca. 0,5 T. Da dies aufgrund des angestrebten Verlaufs der Luftspaltflussdichte nach Bild 4.3.2 und Eisensättigungswerten von ca. 1,6 T in den Statorzähnen nur schwer zu erreichen sein wird, wird bei der Festlegung der Geometrie von einem Scheitelwert der Grundwelle der Luftspaltflussdichte von $B_{\delta 1} = 0,7 \text{ T}$ ausgegangen.

Damit ergibt sich für den Drehschub:

$$\sigma = \frac{A_{eff} \cdot \hat{B}_{\delta 1} \cdot \xi_1}{\sqrt{2}} \cong 16,25 \text{ kPa} \quad (4.3.8)$$

Der Wert des Wicklungsfaktor^s der Grundwelle ξ_1 liegt nahe bei Eins.

Um das angestrebte Moment zu erreichen und mit der Annahme, dass die Wickelköpfe aufgrund einer angestrebten höheren Polpaarzahl nicht sehr groß werden und daher quadratische Außenmaße erzielt werden können, wird die Rotorlänge entgegen der ersten Festlegung auf $l_R = 0,2 \text{ m}$ vergrößert.

Somit ergibt sich folgendes Dauermoment:

$$M = 2 \cdot \sigma \cdot V_{Rotor} = 2 \cdot \sigma \cdot \pi \cdot r_R^2 \cdot l_R = 147,5 \text{ Nm}$$

4.3.2 Stator

Es gibt keinerlei konstruktive Maßnahmen im Stator, die das Induktivitätsverhältnis positiv beeinflussen könnte. Daher konzentriert sich die Wicklungsauslegung zum einen auf die Vorgaben bezüglich der Fehlerfälle, speziell den Fall von Leiterschlüssen außerhalb der Maschine wie in Kapitel 4.2 dargelegt. Andererseits muss die Wicklung zum vorgegebenen Spannungsniveau passen, muss den für die angepeilte Leistung notwendigen Strom führen können und sollte Oberwellen möglichst gut unterdrücken.

Zunächst wird der Statoraußendurchmesser auf $d_s = 0,24$ m festgelegt. Die wesentlichen Gleichungen für die Polpaarzahl sind zum einen die Momentengleichung

$$M = \frac{m \cdot p}{2} \cdot [\Psi_M \cdot i_q + (L_d - L_q) \cdot i_d \cdot i_q],$$

die, lässt man zunächst das Reluktanzmoment unbeachtet und formt die Flussverkettung der Magnete mit der Statorwicklung nach dem Fluss Φ_M der Magnete um, folgende Form erhält:

$$M = \frac{m \cdot w_{Str} \cdot \xi_1 \cdot p}{2} \cdot \hat{\Phi}_M \cdot i_q \quad (4.3.9)$$

mit der gesamten Windungszahl eines Strangs: $w_{Str} = 2 \cdot p \cdot q \cdot w_{Sp}$ (4.3.10)

der Lochzahl q , und der Zahl der Spulenwindungen w_{Sp} .

Zum anderen die Gleichung für die induzierte Spannung:

$$\hat{u}_i = 2\pi \cdot n \cdot p \cdot w_{Str} \cdot \xi_1 \cdot \hat{\Phi}_M \quad (4.3.11)$$

In beiden Gleichungen taucht sowohl die Strangwindungszahl als auch die Polpaarzahl auf.

Aus der Zwischenkreisspannung $U_{ZK} = 500$ V ergibt sich bei Raumzeigermodulation und einer Eckdrehzahl von $n = 3300$ min⁻¹ mit den angenommenen Werten für die mittlere Luftspaltflussdichte für das Produkt der Polpaarzahl mit der Strangwindungszahl:

$$p \cdot w_{Str} = 2 \cdot p^2 \cdot q \cdot w_{Sp} \approx \frac{U_{ZK}}{\sqrt{6} \cdot 2\pi \cdot n \cdot \xi_1 \cdot \hat{\Phi}_M} \cong 150 \quad (4.3.12)$$

Dies ermöglicht mehrere Kombinationen von p und w_{Str} . Da p im Sinne einer Flusskonzentration groß gewählt werden soll, kommen für p nur die Zahlen $p = 5$ und $p = 6$ in Frage. Dies ergibt für die Windungszahl: $w_{Str} = 30$ bzw. $w_{Str} = 25$.

Bei diesen Polpaarzahlen kommen zur Unterdrückung der Oberwellen nur Bruchlochwicklungen mit Lochzahlen größer Eins in Frage. Die Lochzahl kann allerdings auch nicht größer als 2 gewählt werden, da die Statorstruktur andernfalls zu filigran würde. Aus diesem Grund erfolgt die Festlegung der Polpaarzahl auf $p = 5$.

Gewählt wurde eine Bruchlochwicklung mit der Lochzahl $3/2$. Diese Lochzahl ermöglicht Wicklungsfaktoren entsprechend einer Wicklung mit der Lochzahl 3, ohne dabei konstruktiv zu filigran zu werden. Die dabei entstehenden schmalen und hohen Nuten erhöhen die Streuinduktivität sowohl der Längs als auch der Querinduktivität. Dies ist in Hinblick auf das Fehlerverhalten der Maschine sinnvoll, verringert jedoch leider das Verhältnis der Induktivitäten. Der Wicklungsfaktor der Grundwelle beträgt bei dieser Wicklung $\xi_1 = 0,945$.

4.3.3 Geometrische und konstruktive Daten

Es wird festgelegt:

- Statorlänge, Rotorlänge $l_s = 200 \text{ mm}$
- Statoraußendurchmesser $d_{s,a} = 240 \text{ mm}$
- Statorinnendurchmesser $d_{s,i} = 170 \text{ mm}$
- Luftspalt $\delta = 0,8 \text{ mm}$
- Maximaler Rotordurchmesser $d_{R,max} = 168,4 \text{ mm}$
- Minimaler Rotordurchmesser $d_{R,min} = 160,4 \text{ mm}$

Die Nutzahl ergibt sich aus der Strangzahl, der Polpaarzahl und der Lochzahl zu:

$$N = 2 \cdot p \cdot m \cdot q = 45 \quad (4.3.13)$$

Der Effektivwert der Spannung an den Klemmen der Maschine bei Raumzeigermodulation ohne Übermodulation oder Aufschaltung der 3. Harmonischen und einer Zwischenkreis-Spannung von $U_{ZK} = 500 \text{ V}$ beträgt $U_N = 354 \text{ V}$. Daraus lässt sich bei einem geschätzten Leistungsfaktor $\cos \varphi_N \cong 0,8$ und einem ebenso geschätzten Wirkungsgrad $\eta_N \cong 0,92$ bei der Eckdrehzahl von $n_N = 3300 \text{ min}^{-1}$, der Leiterstrom I_N abschätzen.

$$I_N = \frac{P_N}{\sqrt{3} \cdot U_N \cdot \cos \varphi_N \cdot \eta_N} = 115 \text{ A} \quad (4.3.14)$$

Daraus folgt für den Leiterquerschnitt A_L :

$$A_L = \frac{I_N}{S_{\max}} = \frac{115 \text{ A}}{7 \frac{\text{A}}{\text{mm}^2}} = 16,5 \text{ mm}^2 \quad (4.3.15)$$

Und somit für den Nutquerschnitt:

$$A_{\text{Nut}} = Z_N \cdot \frac{A_L}{k_{Cu}} = 4 \cdot \frac{16,5 \text{ mm}^2}{0,33} = 200 \text{ mm}^2 \quad (4.3.16)$$

mit:

Z_N	Zahl der Leiter pro Nut
k_{Cu}	Kupferfüllfaktor

Die Leiter werden aus parallel gezogenen Drähten hergestellt. Einerseits darf aus Fertigungsgründen der Drahtquerschnitt nicht zu klein werden, andererseits ist ein kleiner Drahtquerschnitt wünschenswert, um die Nutöffnung so klein wie möglich zu machen. Dies hat in Hinblick auf die zu erwartenden Zusatzverluste vor allem im Rotor Vorteile. Eine kleine Nutöffnung wird die Amplitude der Wechsellagerung im Rotor, hervorgerufen von den Permanentmagneten in Kombination mit der Nutung, klein halten.

Ein Leiter wird aus 17 Einzeldrähten mit dem Außendurchmesser $r_a = 1,12 \text{ mm}$ aufgebaut. Dies ermöglicht eine Nutöffnung von 2 mm Breite.

Um aufgrund der magnetischen Unsymmetrie und der Statornutung verstärkt auftretende Rastmomente zu vermeiden, wird der Stator um eine Nutbreite geschrägt ausgeführt.

Im Rotor werden, wie aus Bild 4.3.8 hervorgeht, Ausschnitte im Blech zur Flussführung vorgesehen. Die Positionierung und Form der Ausschnitte wurde mit Variationsrechnungen optimiert. Der Optimierungsvorgang soll hier nicht detailliert beschrieben werden, lediglich die Ideen, die hinter der Anordnung liegen und die Wahl der Grobmaße der Ausschnitte werden erläutert.

Wie bereits erwähnt, ergibt sich ein optimaler Polbedeckungswinkel von 120° schon aus der Anschauung. In Bild 4.3.8 ist zu erkennen, dass auf diese Art und Weise entweder zwei oder drei Zähne an der Führung des Flusses der Permanentmagnete beteiligt sind. Dies entspricht bei einem Wickelschritt von 4 Nuten (zum Beispiel: Nut 1 \rightarrow Nut 5) und, durch die Bruchlochwicklung bedingt, einer Spulenzahl 1 bzw. 2 pro Magnetpol gerade der Spulenweite eines Strangs. Somit „sehen“ die einzelnen Stränge den vollen Magnetfluss der Permanentmagnete. Andererseits stehen die Strangspulen, die an der Bildung eines Querflusses beteiligt sind, einem vergrößerten Luftspalt gegenüber. Die Variation des Luftspalts beginnt jedoch bereits bei einem deutlich kleineren Winkel als dem Polbedeckungswinkel. Da zur gleichmäßigen Führung des Magnetflusses der Permanentmagnete nur zwei Statorzähne nötig sind, kann die Breite des nicht reduzierten Luftspaltes auf eben die Breite von zwei Zähnen beschränkt bleiben.

Die Aussparungen in der symmetrischen Mitte der Permanentmagnete eines Magnetpols dienen der Erhöhung der Reluktanz in q-Richtung. Die Breite dieser Aussparungen wurde zu 1,5 mm gewählt, was ungefähr dem doppelten Luftspalt entspricht. Die Länge wurde so gewählt, dass durch einen Querfluss Sättigung im Rotoreisen schon bei relativ kleinen Querströmen entsteht.

Die Aussparungen in der q-Achse direkt an den Magneten, dienen der Verlängerung des magnetischen Kurzschlussweges für die Permanentmagnete. Außerdem erhöhen diese Aussparungen die Reluktanz in der q-Achse dadurch, dass die Stege zum Luftspalt hin und der Steg zwischen den Aussparungen selbst durch den Magnetkurzschluss gesättigt werden und natürlich durch die Tatsache der großen Reluktanz der Aussparungen selbst. Die Höhe dieser Aussparungen wurde willkürlich zu 3 mm gewählt. Die Länge wurde so gewählt, dass die Stegbreite in der q-Achse 3 mm beträgt.

Die kleinen schrägen Aussparungen dienen der Flussführung des Flusses der Permanentmagnete und der Erhöhung der Reluktanz des Weges in q-Richtung. Bei einer Wahl des Polbedeckungswinkels kleiner als 120° können diese Aussparungen eventuell weggelassen werden. Die Breite dieser Aussparungen beträgt, wie die langen Aussparungen zwischen den Magneten, 1,5 mm. Die Länge wurde so gewählt, dass der Abstand zum Luftspalt hin bzw. zu den Magneten hin 1,5 mm beträgt.

Die mechanische Stabilität dieser Anordnung gegenüber großen Fliehkräften bei großen Drehzahlen wurde mit einer einfachen Modellrechnung überschlägig bestimmt.

Die Zugfestigkeit des Blechs wird vom Hersteller zu $\sigma = 520$ MPa angegeben.

Die größte mechanische Beanspruchung liegt in den Stegen zwischen Luftspalt und den Aussparungen zur Verringerung des Magnetkurzschlusses. Daher wird folgendes Modell angesetzt:

Der Masse des Blechs zwischen den Magneten wird vereinfacht als Masse einer Dreiecksform mit den folgenden Maßen und Winkeln angesehen. Die wirksamen Kräfte sind ebenfalls eingezeichnet. Es wird wie üblich davon ausgegangen, dass die radial wirksame Kraft am Schwerpunkt des Dreiecks angreift.

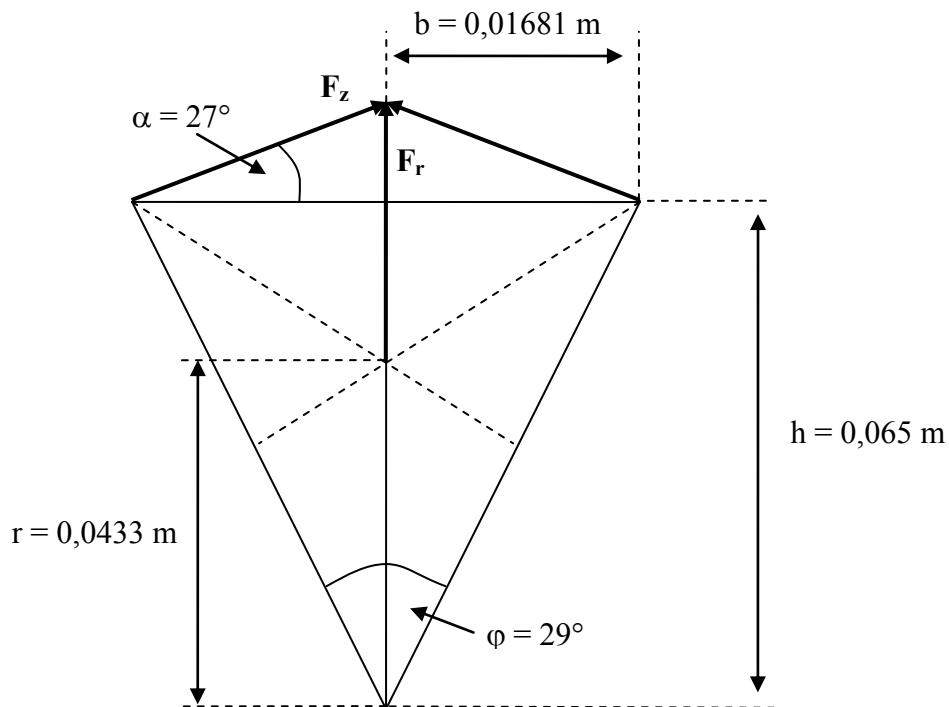


Bild 4.3.9: Vereinfachtes mechanisches Modell zur Berechnung der Fliehkräfte

Zu den in Bild 4.3.9 angegebenen Maßen kommt noch die Länge des Blechpakets, das auf $l = 0,2 \text{ m}$ festgelegt wurde.

Die Masse eines solchen Keils ergibt sich zu:

$$m = A \cdot l \cdot \rho \quad (4.3.17)$$

$$\text{Mit } A = h \cdot b = 1,093 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2 \quad (4.3.18)$$

$$\text{und } \rho = 7650 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

berechnet sich die Masse zu:

$$m = 1,672 \text{ kg}$$

Die radiale Kraft, die auf einen solchen Keil wirkt, hängt von der Drehzahl wie folgt ab:

$$F_r = m \cdot r \cdot 4\pi^2 \cdot n^2 \quad (4.3.19)$$

Für die maximale Betriebsdrehzahl von $n = 6600 \text{ min}^{-1}$ stellt sich somit eine radiale Kraft von $F_r = 34,58 \text{ kN}$ ein.

Diese Kraft wird in der Hauptsache von den beiden Stegen am Luftspalt aufgenommen. Der Winkel der Zugrichtung beträgt ca. $\alpha = 27^\circ$.

Daraus lässt sich die notwendige Stegdicke wie folgt berechnen:

$$s = \frac{F_r}{2 \cdot \sin(\alpha) \cdot l \cdot \sigma} = 0,37 \text{ mm} \quad (4.3.20)$$

Die Stegdicke wurde mit vierfacher Sicherheit auf $1,5 \text{ mm}$ festgelegt.

Für die Überdrehzahl von 9900 min⁻¹ resultiert eine radiale Kraft von $F_r = 77,81$ kN. Um diese Kraft mit dem Steg aufnehmen zu können, muss eine Stegbreite von $s = 0,82$ mm vorhanden sein. Damit ergibt sich auch bei Überdrehzahl noch beinahe die doppelte Sicherheit.

Weitere Festlegungen bezüglich der Maschinengeometrie wurden mit Hilfe der analytischen Software PC-BDC 6.5 aus dem Softwarepaket SPEED getroffen. Dies bezieht sich z.B. auf Berechnungen des Magnetkreises zur Bestimmung der Magnetmaße, der Zahnbreite, der Jochhöhe, etc. Die Ergebnisse der Berechnungen werden später im Kapitel Berechnung der Maschinenparameter vorgestellt.

4.3.4 Materialwahl

- Magnetsorte

Die Magnete werden Kapitel 4.3.2 folgend eine kleine Magnethöhe aufweisen, um eine kleine Reluktanz in d-Richtung zu erzielen. Dies bedeutet, dass die Magnete eine hohe intrinsische Koerzitivfeldstärke haben müssen, um bei großen negativen d-Strömen, wie z.B. dem Kurzschlussstrom, und hohen Betriebstemperaturen im Motor nicht entmagnetisiert zu werden. Dies bedeutet andererseits, dass bezüglich der Remanenzinduktion nicht die Magnetsorten mit den größten Werten gewählt werden können.

Gewählt wurden Magnete der Firma Vacuumschmelze der Sorte Vacodym 677 AP mit einer Koerzitivfeldstärke von $H_{ci} = 2465$ kA/m und einer Remanenzinduktion von $B_r = 1,13$ T (Daten im Anhang).

- Isolationsmaterial

Um sicher zu stellen, dass die Maschine bis an die vorgegebenen Grenzen betrieben werden kann, wurde als Isolationsklasse die Klasse H gewählt. Dies ergibt für die Wicklung einen ausreichenden Sicherheitsabstand zur maximalen Betriebstemperatur, die aufgrund der Magnete zu 150° C festgelegt wird.

Bei der Herstellung der Wicklung wurden shelllackisolierte Drähte mit einer Isolationsdicke von 6 µm und Nutisolationspapier der Sorte Nomex 0,3 verwendet.

- Blechsorte

Da die Maschine prinzipiell verlustarm ausgelegt werden soll und bei hohen elektrischen Frequenzen betrieben wird, muss speziell das Motorenblech verlustarm gewählt werden, was mit Sicherheit zu sehr dünnen Blechen führt.

Gewählt wurde eine 3% Siliziumlegierung der Sorte M 270-35 A. Datenblätter befinden sich im Anhang.

Aus der Magnetisierungskurve des Blechs ergibt sich eine weitere Forderung für die Auslegung des Magnetkreises. Um mit einem möglichst kleinen induktiven Blindstrom hohe Drehzahlen zu erreichen, ist es sinnvoll, die mittlere Flussdichte im Statoreisen auf Werte von ca. 1,4 T zu begrenzen wie aus Bild 9.2.2 ersichtlich ist. Aus den Bildern der Analyse der Flussdichte mittels der Methode der finiten Elemente wird in späteren Kapiteln deutlich, dass diese Flussdichte in den Zähnen des Stators und im Joch auftreten wird. Es ist also sinnvoll, die von den Magneten hervorgerufene Flussdichte in diesen Bereichen auf 1,4 T zu beschränken. Damit wird die Maschine magnetisch nicht voll ausgenutzt, was bereits aus dem relativ kleinen Drehschub ersichtlich ist. Durch die Auslegung mit $L_d/L_q > 1$ wird jedoch ein positiver d-Strom zu einer vollen magnetischen Ausnutzung und zu einem Reluktanzmoment führen.

Das gewählte Blech ist mit einem Backlack überzogen. Die Blechpakete werden unter Druck, $1...4 \text{ N/mm}^2$, gemäß Herstellerangaben bei 200° C mindestens 90 min gebacken, um die gewünschten Blechpakete herzustellen.

Das Statorpaket wird komplett gebacken wogegen der Rotor in Teilpakete aufgeteilt wird, da es nicht möglich ist 200mm lange ca. 60mm breite und ca. 1mm hohe Magnetplatten zu fertigen. Da Magnete der Höhe 1mm der gewählten Magnetsorte durch Schleifen gerade noch in den Maßen 50 mm x 60 mm x 1mm zu erwerben waren, wurde die Paketlänge der Teilpakete zu 50 mm gewählt.

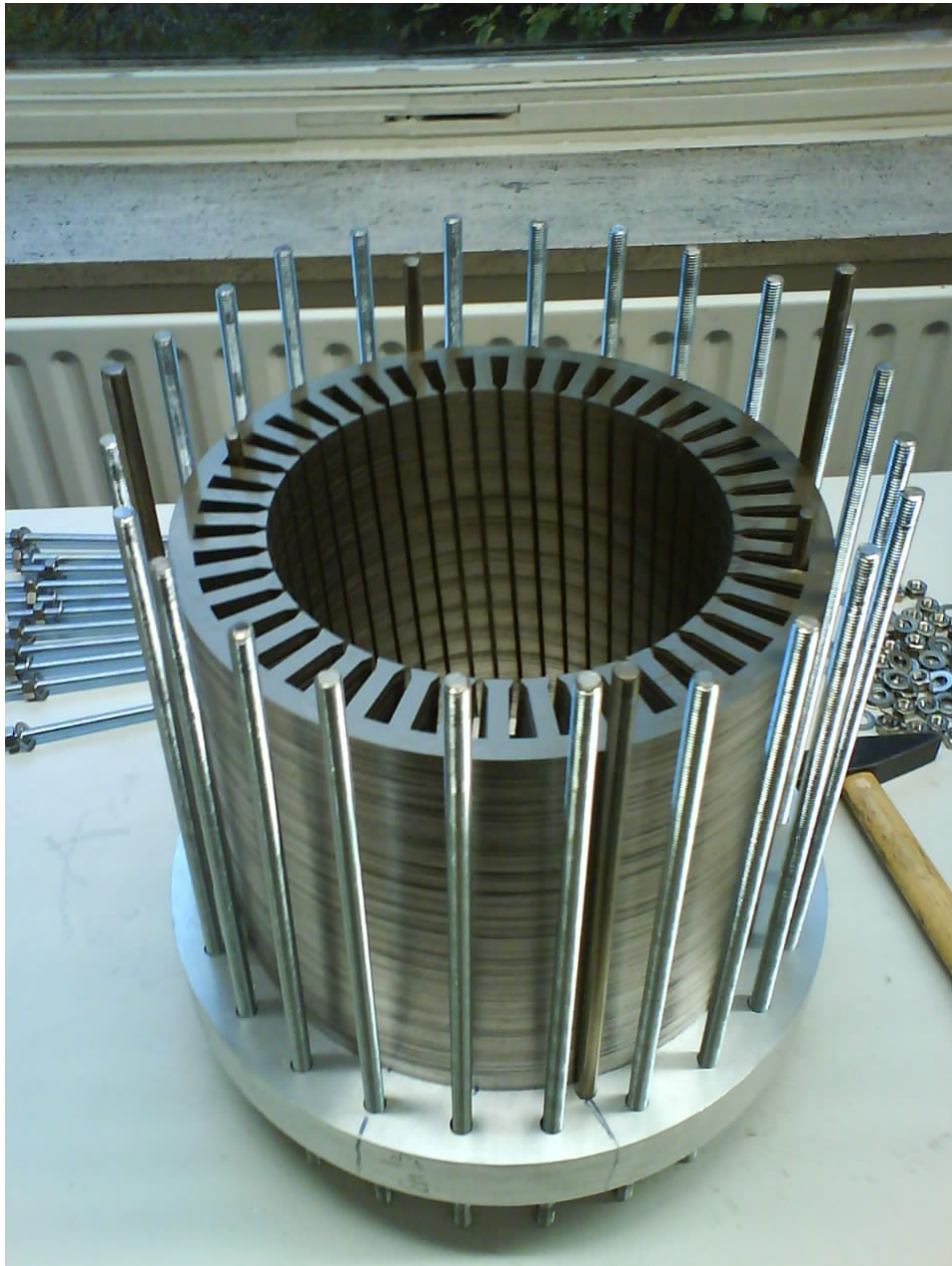


Bild 4.3.10: Statorbleche mit Führungsstäben (2 innen, 4 außen) und Gewindestangen (24)

In Bild 4.3.10 ist deutlich die Nutschrägung zu erkennen.

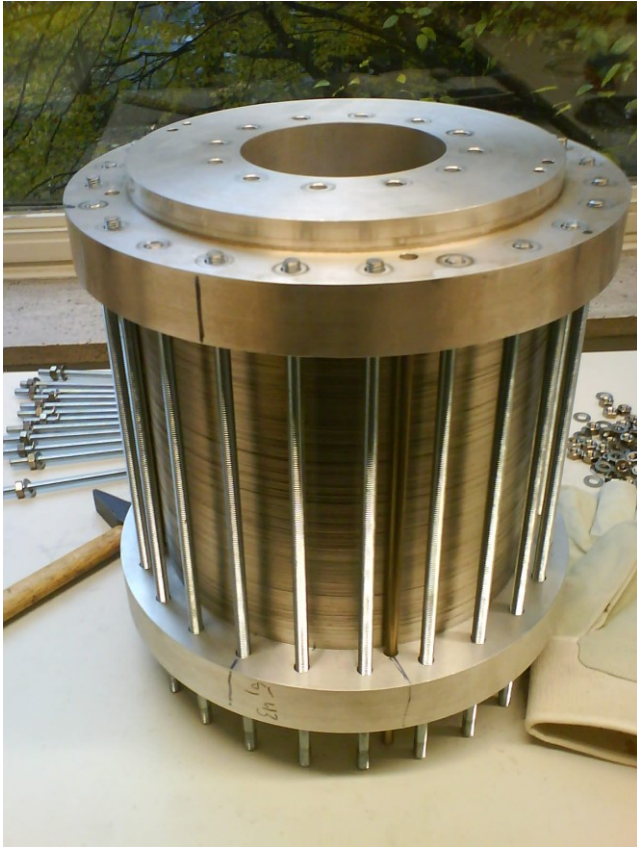


Bild 4.3.11: Statorpaket in den Druckplatten

Um den Druck für den Backvorgang zu erzeugen, wurden Druckplatten aus Aluminium gefertigt. Der Druck wird durch die Gewindestangen (24) am äußeren Rand der Platten und eine Gewindestange zentral (nicht auf dem Bild) erzeugt.



Bild 4.3.12: Rotorblechpaket

4.3.5 Berechnung der Maschinenparameter

Aus allen in den voran stehenden Kapiteln getroffenen Voraussetzungen wurden mit dem Softwarepaket SPEED weitere Maschinenparameter festgelegt und dabei durch analytische Rechnung überprüft, ob die Forderungen, wie sie in vorangehenden Kapiteln dargelegt wurden, zu erfüllen sind. Diese Berechnungen ergaben keinen Widerspruch zu den Festlegungen.

Es wurden folgende Maschinendaten festgelegt:

Stator:

Jochhöhe h_J :	8,5 mm
Zahnbreite b_Z :	6,3 mm
Nuttiefe h_N :	26,5 mm

Rotor

Überhang der Magnete l_{UH} :	5 mm
Höhe der Magnete h_M :	1 mm
Magnetbreite b_M :	60 mm

Mit diesen Festlegungen wurden mit SPEED für den Typenpunkt folgende Werte berechnet:

Betriebsdaten

Zwischenkreisspannung U_{ZK} :	500 V
Bemessungsdrehzahl n_N :	3300 min ⁻¹
Bemessungsstrom I_N (reiner q-Strom):	111,5 A
Drehmoment M_N :	162,7 Nm
Induzierte Strangspannung $U_{i, Str}$:	173,8 V
Strangspannung U_{Str} :	213,5 V
Stranglängsspannung U_d :	124,6 V
Strangquerspannung U_q :	173,3 V
Bemessungsscheinleistung S_N :	71,4 kVA
Bemessungswirkleistung elektrisch $P_{N, el}$:	58,3 kW
Bemessungsleistung P_N :	56,0 kW
Leistungsfaktor $\cos(\phi)$:	0,82
Wirkungsgrad η_N :	96,0%
Stromwärmeverluste $P_{V, Cu}$:	883,8 W
Ummagnetisierungsverluste $P_{V, Fe}$:	1089,5 W
Reibungsverluste $P_{V, Reib}$:	345,5 W

Maschinenparameter

Strangwiderstand R :	18,4 mΩ
Längsinduktivität L_d :	1,04 mH
Querinduktivität L_q :	0,67 mH
Mittlere Luftspaltinduktion durch die Magnete B_δ :	0,44 T
Scheitelwert der Grundwelle der Luftspaltinduktion durch die Magnete $B_{\delta 1}$:	0,75 T
Maximale Zahninduktion B_Z :	1,4 T
Maximale Jochinduktion B_J :	1,4 T
Drehmomentkonstante k_T :	1,05 Nm/A

Da in SPEED nur einige wenige Geometrien zur Berechnung zur Verfügung stehen und diese nicht mit der Geometrie dieser Maschine übereinstimmen, waren einige Anpassungen notwendig. In SPEED ist es möglich, den Polwinkel zu beeinflussen. Dies wurde nötig, um den Flussverlauf anzupassen. Darüber hinaus rechnet SPEED ohnehin mit den Induktivitätswerten aus einer vereinfachten statischen Magnetkreisberechnung, d.h. Sättigungseffekte etc. haben auf die Berechnung nur geringen Einfluss. Dennoch wurden die Festlegungen bezüglich der Geometrie zur numerischen Berechnung der Maschine herangezogen.

Im Weiteren wurden alle festgesetzten Maschinendaten zu einer vereinfachten numerischen Berechnung der Leistungsdaten und Maschinenparameter in ANSYS herangezogen.

4.3.6 Numerische Berechnung des Magnetkreises

Wie schon bei der Verlustberechnung wurde ein zweidimensionales, rotationssymmetrisches statisches Modell erstellt. Die Ergebnisse dieser Berechnungen wurden ohne weitere Berücksichtigung dreidimensionaler Effekte auf die Maschinengeometrie extrapoliert.

Die Ergebnisse dieser Berechnungen sollen im Weiteren vorgestellt werden.

Im ersten Schritt wurde die Luftspaltinduktion, erzeugt ausschließlich durch die Magnete, für die Rotorstellung wie in Bild 4.3.8 dargestellt, berechnet um den Verlauf der Flussdichte zu untersuchen. Die Grafiken zeigen den Verlauf der Luftspaltinduktion jeweils über ein Polpaar. In den Grafiken ist klar ersichtlich, dass wie vorhergesagt die dritte Oberwelle der Induktion eine wesentliche Rolle spielt. Selbstverständlich ist der Einfluss der Statorwicklung zu erkennen, die dafür sorgt, dass auch geradzahlige Harmonische auftauchen. Die spektrale Verteilung dieses Induktionsverlaufs ist für den jeweiligen Fall im direkten Anschluss dargestellt.

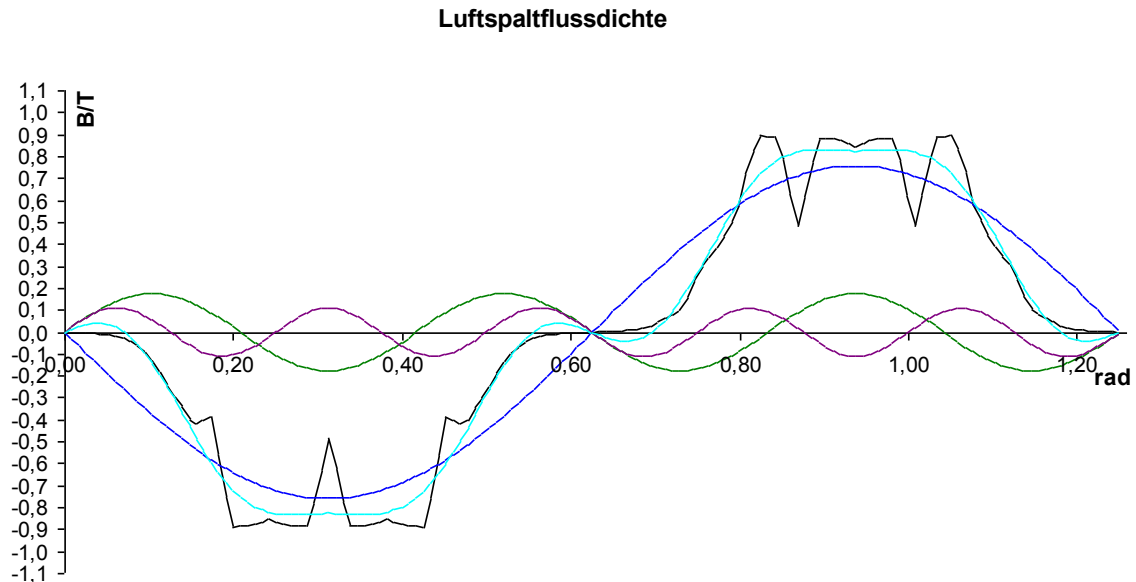


Bild 4.3.13: Luftspaltinduktion durch die Magnete

Außer dem berechneten Verlauf der Luftspaltinduktion sind hier jeweils die Grundwelle und die 3. sowie die 5. Harmonische dargestellt, sowie die Summe der Grundwelle und der beiden Harmonischen. Wie aus der Summation klar zu erkennen ist, nähern diese Anteile den Luftspaltverlauf bereits relativ gut an.

Mittelt man die Induktion, ergibt sich eine mittlere Luftspaltinduktion von $B = 0,436 \text{ T}$ und ein Scheitelwert der Grundwelle von $B_{\delta 1} = 0,758 \text{ T}$ in guter Übereinstimmung mit den Ergebnissen aus SPEED. Der Spitzenwert für den negativen Teil beträgt $0,88 \text{ T}$, der für den positiven Teil $0,9 \text{ T}$.

Harmonische im Luftspaltinduktionsverlauf

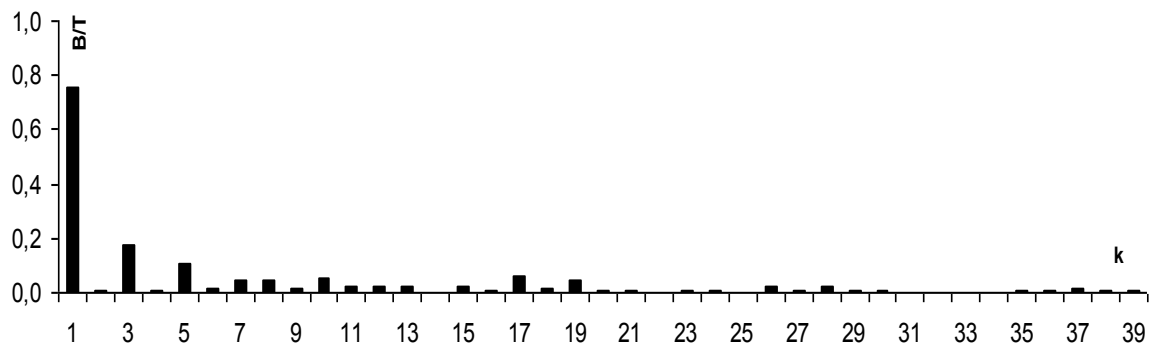


Bild 4.3.14: Amplitude der Harmonischen in der Luftspaltinduktion durch die Magnete

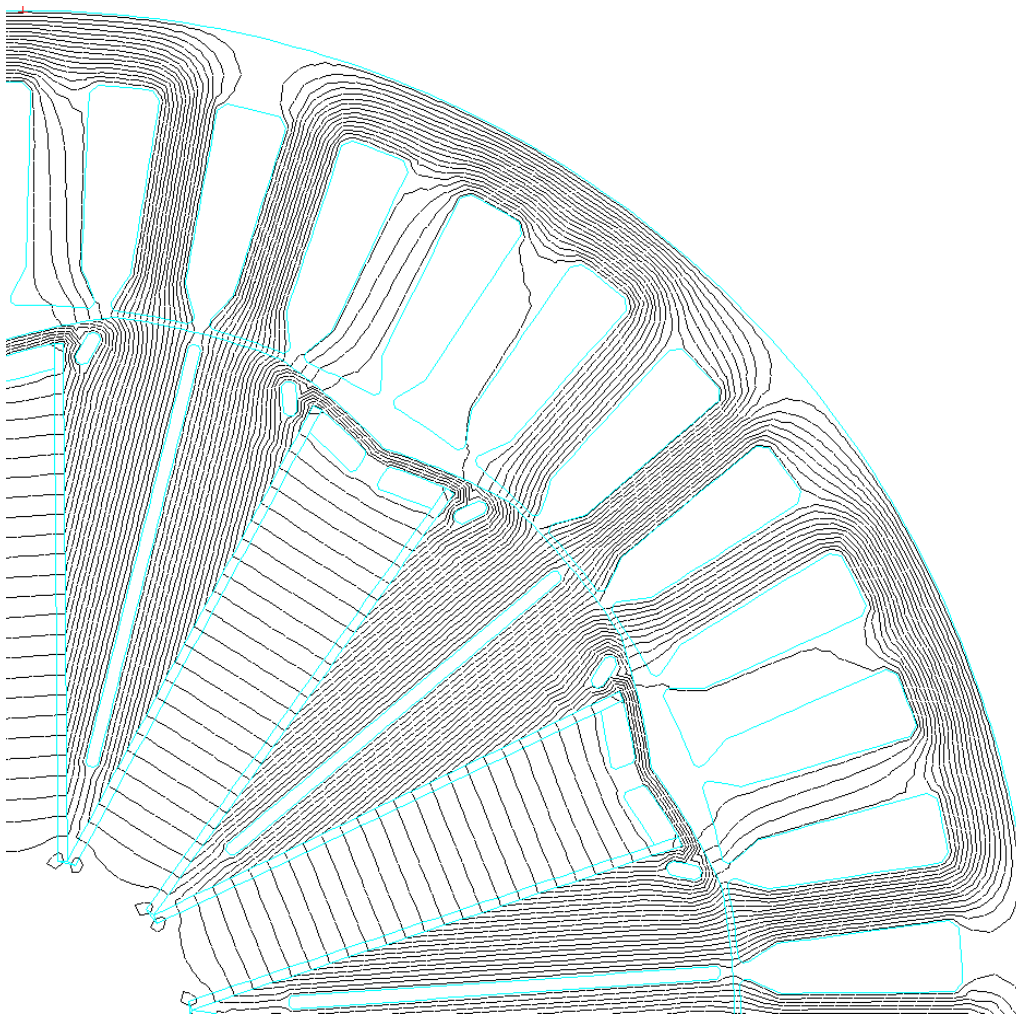


Bild 4.3.15: Feldlinienverlauf durch die Magnete

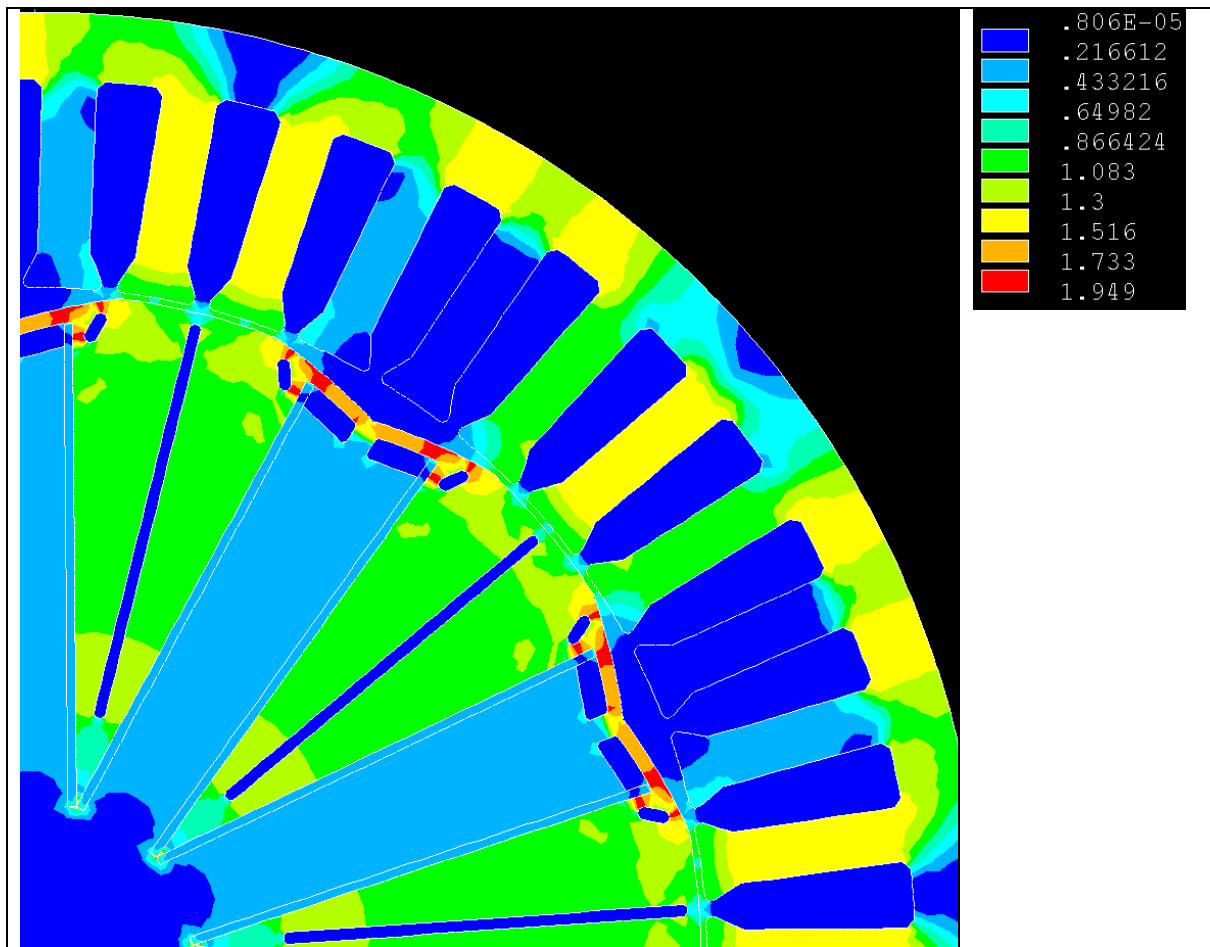


Bild 4.3.16: Verteilung der Flussdichte durch die Magnete im Motorquerschnitt

Die Tabelle in der rechten Spalte von Bild 4.3.16 gibt die Bereiche der Flussdichtewerte an, die durch die Farben in der linken Spalte dargestellt werden. Bei der Überprüfung von Einzelwerten ergab sich wie gewünscht eine maximale Flussdichte in den Zähnen und im Joch von $B = 1,4\text{T}$.

Der Motor lässt sich somit wie gewünscht mit relativ wenig induktivem Strom in der Feldschwächung betreiben, wie sich aus dem Diagramm des Blechherstellers in Bild 9.2.2 ergibt.

Sowohl im Feldlinienverlauf als auch in der Flussdichteverteilung sind deutlich die Effekte der Maßnahmen zu sehen, die dem Ziel des speziellen Induktionsverhältnisses dieses Motors dienen. Die Stege zwischen den Magneten und dem Luftspalt sind ebenso magnetisch gesättigt wie die Stege der kleinen Aussparungen zu den Magneten hin bzw. zum Luftspalt hin. Dies führt den Fluss in der gewünschten Form, wie in Bild 4.3.16 zu sehen ist.

Klar ist auch, dass ein Teil der Magnete aus diesem Grund nichts zur Momentbildung beiträgt. Dies bedeutet, dass ein etwas höherer Aufwand in Bezug auf das Magnetmaterial betrieben werden muss. Eine Auslegung einer Maschine mit vergleichbaren Leistungsdaten mit SPEED ergab, dass ca. 25% mehr Magnetmasse in dieser Maschine verbaut werden muss, um zu vergleichbaren Leistungsdaten zu kommen.

Nicht nur der Anteil der Magnete die zur Flussführung dienen und nichts zur Momentbildung beitragen, ist für die notwendige Erhöhung des Magnetanteils verantwortlich. Die Magnete werden bei sehr kleinen Flussdichten betrieben. Der Mittelwert liegt unbestromt bei $0,25\text{ T}$.

All diese Betrachtungen wurden ausschließlich für eine mechanische Winkellage des Rotors angestellt. Weitere Berechnungen führen hier nicht zu Ergebnissen die für diese Arbeit von Interesse sind.

Ersetzt man in der Berechnung die Magnete durch Luft ergibt sich der Verlauf der Flussdichte im Luftspalt durch einen reinen d-Strom. In den folgenden Diagrammen fällt sofort auf, dass im Vergleich zur Flussdichte durch die Magnete die 3. Harmonische ungefähr die gleiche Amplitude und dasselbe Vorzeichen hat, die 5. Harmonische im Unterschied dazu jedoch eine wesentlich kleinere Amplitude aufweist und gegenüber der durch die Magnete hervorgerufenen 5. Harmonischen umgekehrtes Vorzeichen hat. Dies ist natürlich in der Wicklung begründet. Auch hier treten gradzahlige Harmonische auf. Die mittlere Flussdichte im Luftspalt beträgt hierbei $B = 0,448 \text{ T}$ und der Scheitelwert der Grundwelle $B_{\delta 1} = 0,778 \text{ T}$.

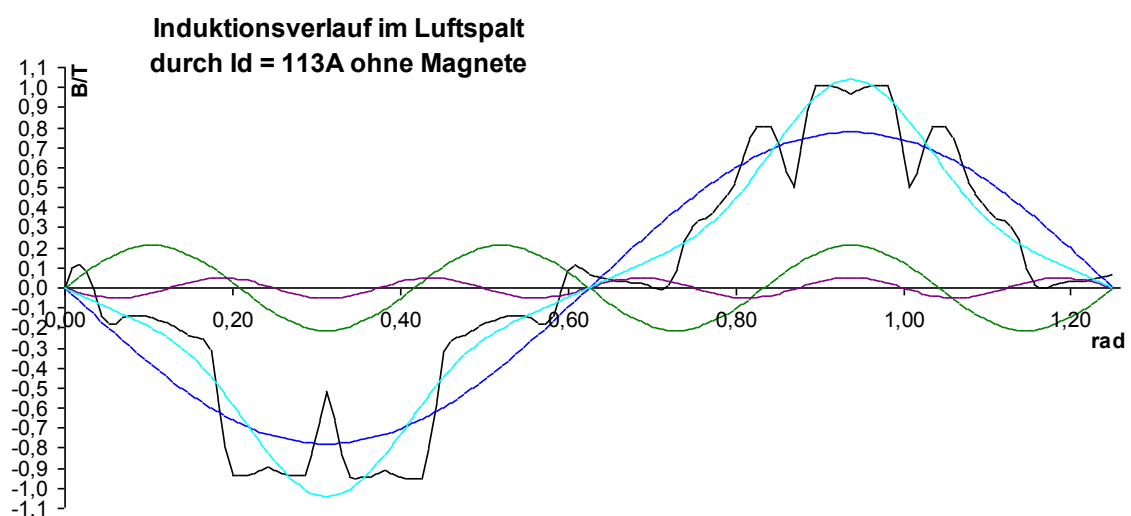


Bild 4.3.17: Verlauf der Flussdichte bei $I_d = 113 \text{ A}$ ohne Magnete

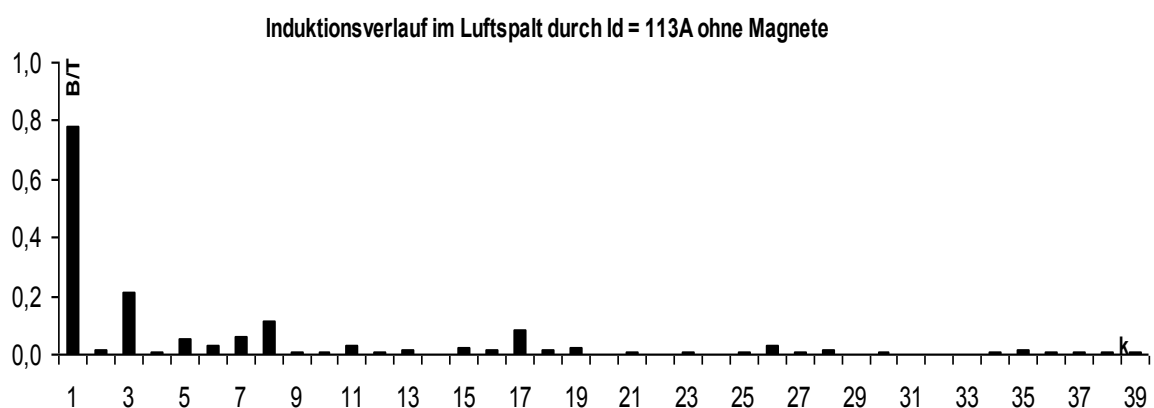


Bild 4.3.18: Amplitude der Harmonischen durch einen Erregerstrom $I_d = 113 \text{ A}$ ohne Magnete

Es folgt der Verlauf für einen negativen d-Strom, der ungefähr dem Strom entspricht der das Statorblech vollkommen entmagnetisieren und somit die Ummagnetisierungsverluste im Betrieb weitgehend eliminieren würde.

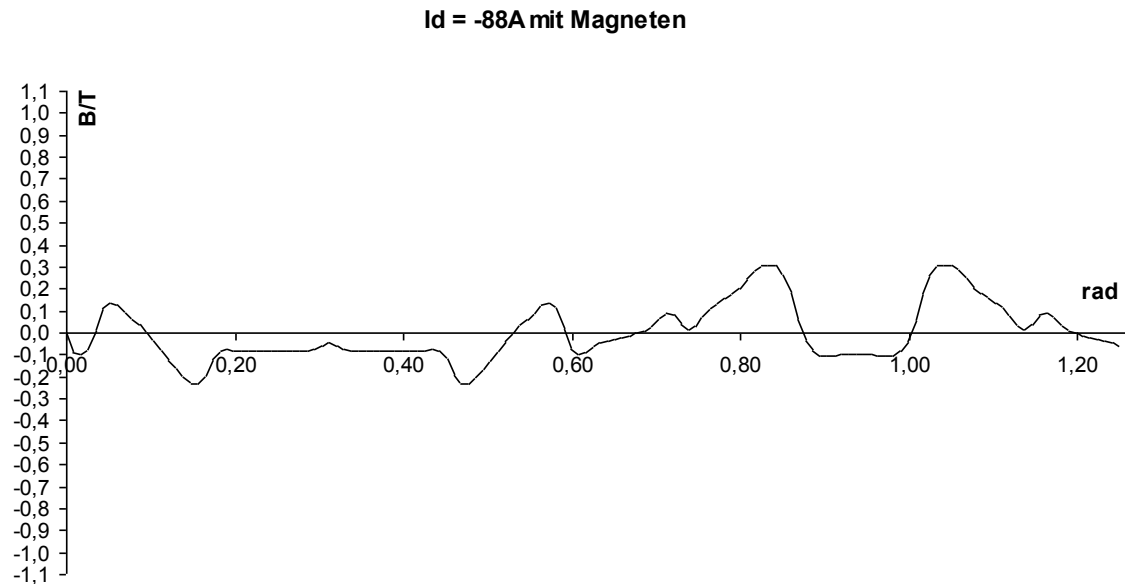


Bild 4.3.19: Luftspaltdichte bei Entmagnetisierungsstrom $I_d = -88A$

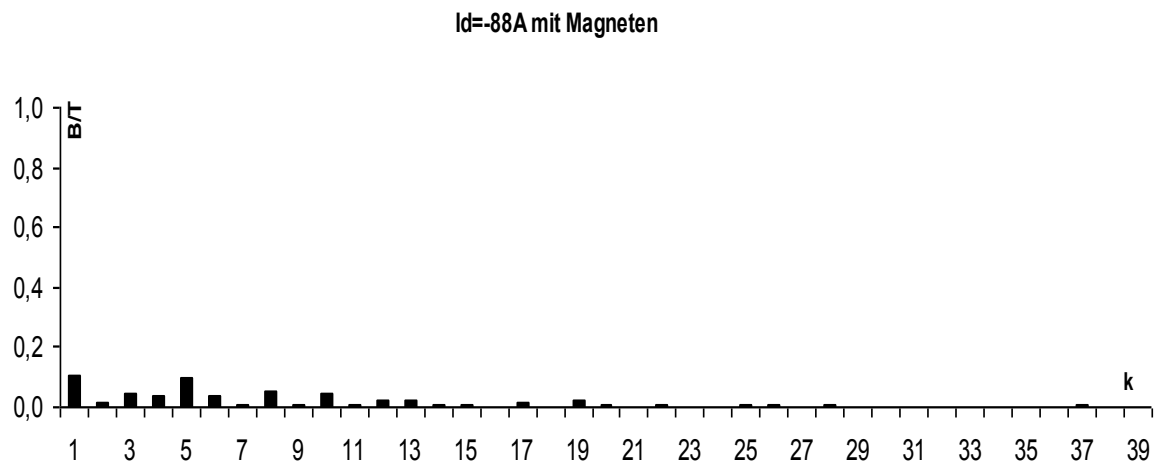


Bild 4.3.20: Harmonische im Luftspalt $I_d = -88A$ mit Magneten

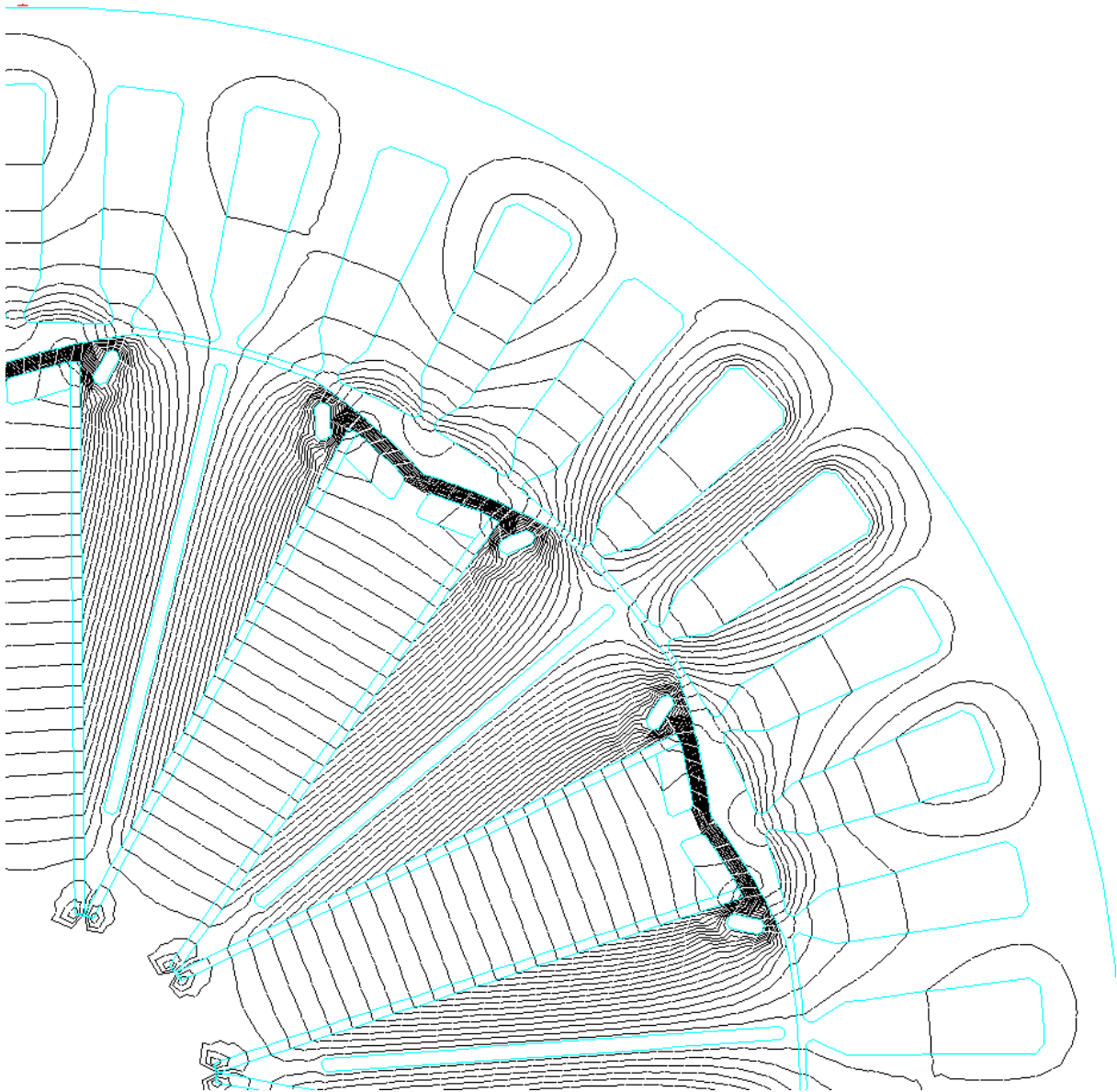


Bild 4.3.21: Feldlinienverlauf bei $I_d = -88A$

Offensichtlich sind nur noch wenige Feldlinien der Magnete mit dem Strom in den Nuten verkettet. Das Feld der Magnete wird zu großen Teilen in den Steg verdrängt und sorgt somit für Sättigung des Blechs was wiederum für eine Reduktion der Ummagnetisierungsverluste in diesen Bereichen sorgt, da der Wechselanteil der Induktion bedingt eben durch die Sättigung sehr klein bleiben muss.

Aus der Verteilung der Flussdichte wird klar, dass bei einem solchen Betrieb die Ummagnetisierungsverluste sehr klein werden. In einem späteren Kapitel werden die hierbei entstehenden Stromwärmeverluste den Ummagnetisierungsverlusten gegenüber gestellt und ein Minimum an Gesamtverlusten gesucht, dass, wie sich zeigen wird, nicht bei dem hier verwendeten Entmagnetisierungsstrom liegt.

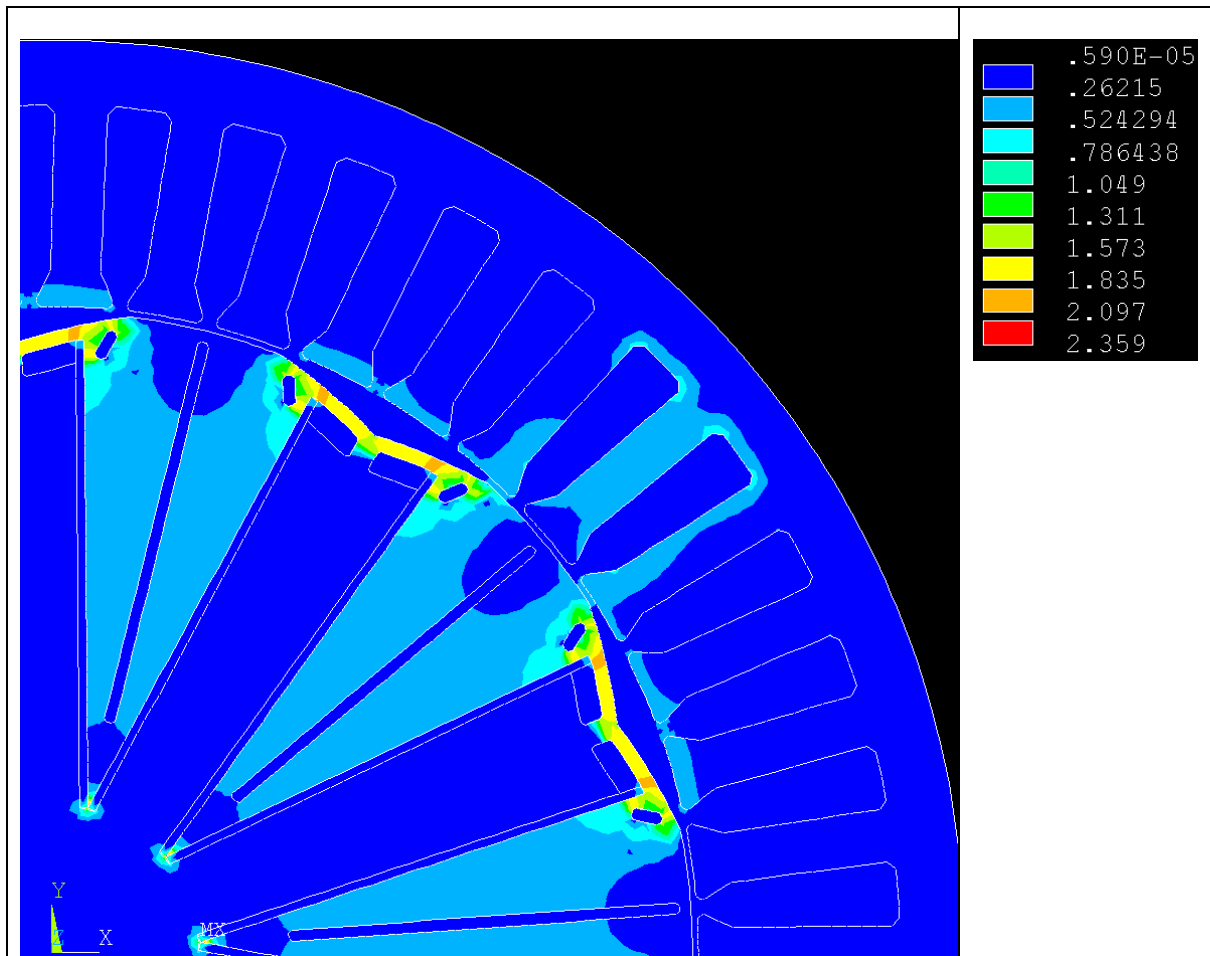


Bild 4.3.22: Induktionsverteilung bei $I_d = -88A$

In Bild 4.3.22 fällt sofort auf, dass die Flussdichte in den Magneten beinahe null ist. Dies stellt jedoch selbst bei Temperaturen bis ca. 150°C kein Problem dar, da das Knie der Entmagnetisierungskurve (Bild 9.2.1) weit im 3. Quadranten der Magnetkennlinie liegt. Es wären sogar negative Werte der Flussdichte bis zu -0,2T in den Magneten möglich ohne die Magnete zu entmagnetisieren.

Die nächsten Diagramme und Bilder stellen den Fall eines reinen Querstromes mit $I_q = 113 A$ dar, ähnlich dem in SPEED berechneten. Für diesen Fall werden auch die numerisch ermittelten Betriebsdaten und Maschinenparameter angegeben. Dafür wurde das Luftspaltmoment mit einem in ANSYS vorhandenen Makro für ein Winkelrastraster von 2° mechanisch über eine elektrische Periode berechnet und der Mittelwert bestimmt. Das ANSYS-Makro „TORQC2D“ berechnet ein kreisförmiges Linienintegral des Maxwellschen Spannungstensors um einen von Luft umgebenen Körper. Die Ergebnisse werden im Anschluss an den Flussdichteverlauf und die Flussdichteverteilung dargestellt.

Wie die Diagramme auf der nächsten Seite zeigen, reduziert sich die mittlere Flussdichte im Falle des dargestellten Querstroms auf $B = 0,368 T$ und der Scheitelwert der Grundwelle auf $B_{\delta 1} = 0,476 T$. Der Anteil der geradzahligen Harmonischen am Flussdichteverlauf wird wie zu erwarten deutlich größer.

Flussdichteverlauf bei $I_q = 113A$

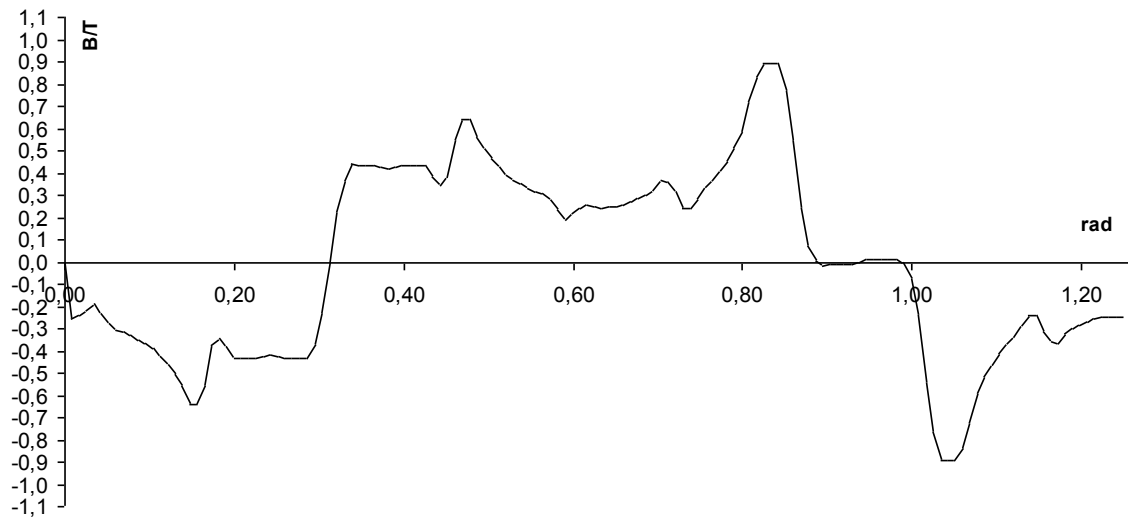


Bild 4.3.23: Induktion im Luftspalt bei Nennquerstrom $I_q = 113A$

Auf eine Darstellung der Grundwelle und der Harmonischen wie in den voranstehenden Diagrammen wird verzichtet, da hier der Anteil der geradzahligen Harmonischen und der Anteil der Harmonischen höherer Ordnung eine wesentlich größere Rolle spielt und zudem die Phasenlage der Harmonischen nicht mehr nur 0° oder 180° in Bezug auf die Grundwelle beträgt.

$I_q=113A$

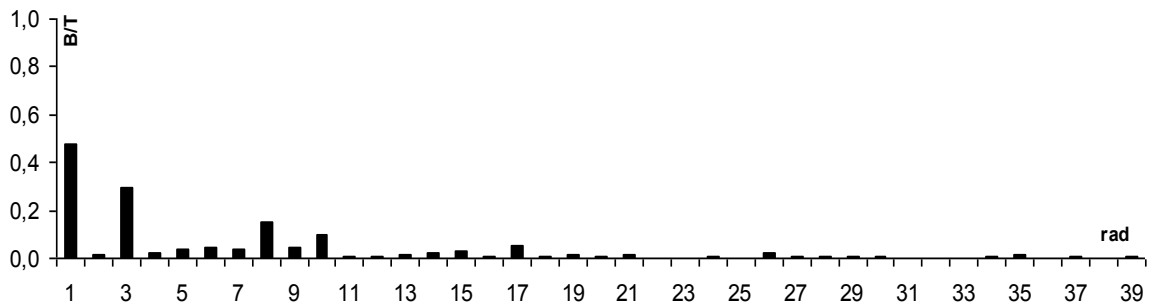


Bild 4.3.24: Harmonische in der Luftspaltinduktion bei Nennquerstrom $I_q = 113A$

Die in den folgenden Bildern gezeigte Flussdichte im Querschnitt des Motors und der Feldlinienverlauf verdeutlichen, dass die Reduktion der mittleren Luftspaltflussdichte aufgrund der zu erwartenden Sättigung entsteht.

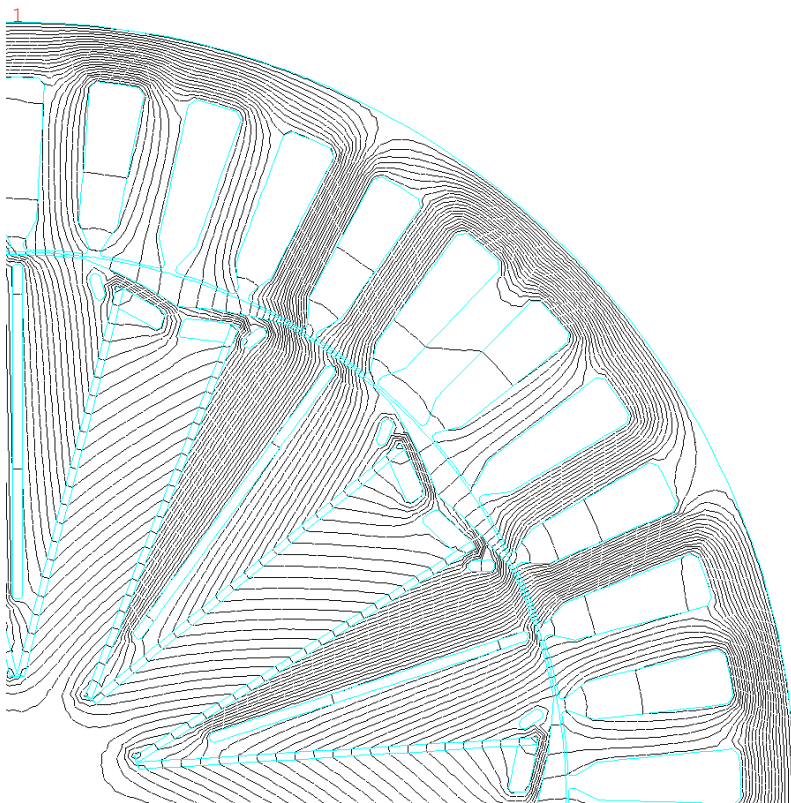


Bild 4.3.25: Feldlinienverlauf bei Nennquerstrom $I_q = 113A$

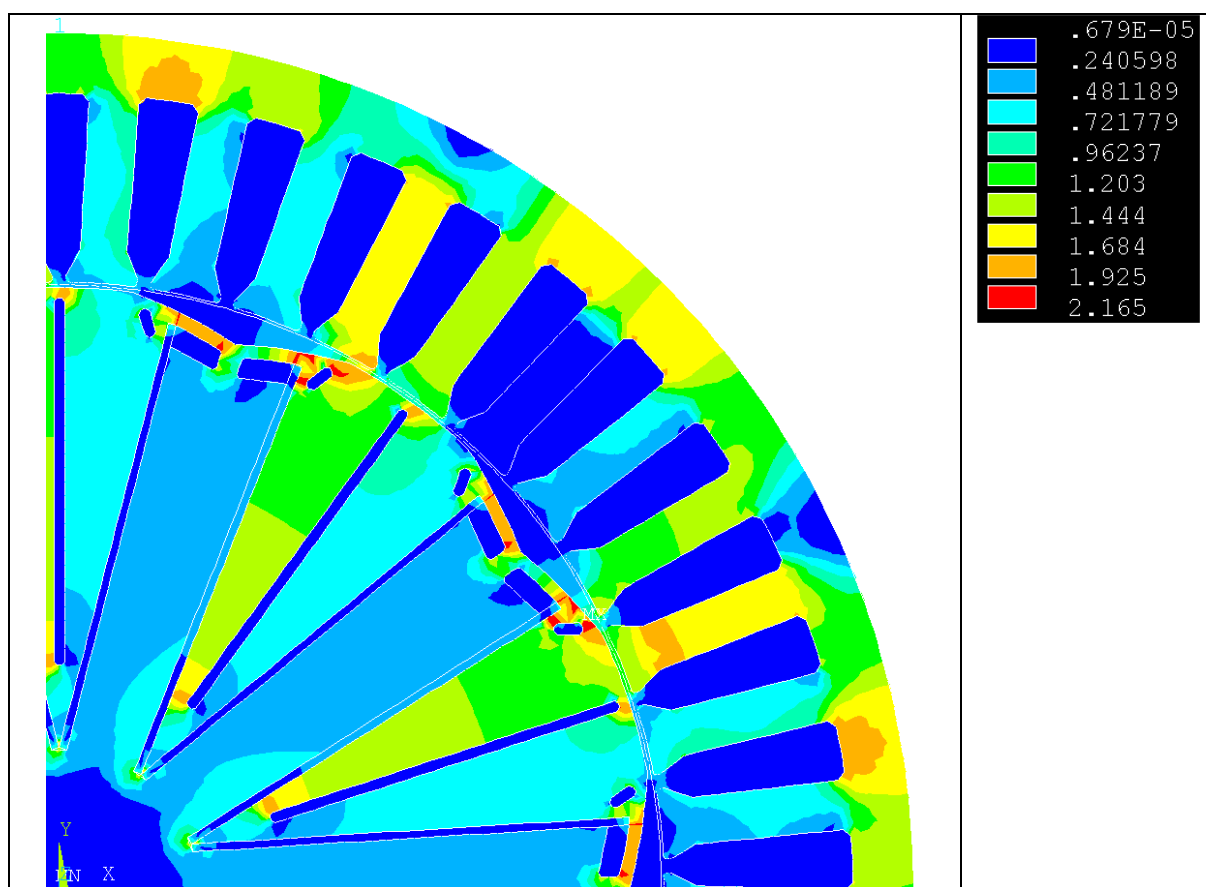


Bild 4.3.26: Induktionsverteilung bei $I_q = 113A$

Die Maschinenparameter, wie vorab erläutert berechnet, betragen:

Maschinenparameter	$I = 0A$	$I_q = 113A$	$I_d = -88A$
Längsflussverkettung Ψ_d	0,142 Vs	0,126 Vs	0,003 Vs
Querflussverkettung Ψ_q	-	0,099 Vs	-
Längsinduktivität L_{dd}	1,035 mH	0,779 mH	1,153 mH
Querinduktivität L_{qd}	0,675 mH	0,527 mH	0,695 mH
Querinduktivität L_q	-	0,618 mH	-
Mittlere Luftspaltinduktion B_δ	0,436 T	0,368 T	0,0004 T
Scheitelwert der Grundwelle der Luftspaltinduktion $B_{\delta 1}$	0,758 T	0,476 T	0,107 T
Drehmoment	-	151 Nm	-
Drehmomentkonstante k_T	--	0,944 Nm/A	-

Bei den Werten für den unbestromten Fall handelt es sich bei den Induktivitätswerten selbstverständlich um die differentielle Induktivität. Dies soll durch den Zusatz im Index verdeutlicht werden. In den anderen Fällen wird für die Querinduktivität sowohl der differentielle als auch der Absolutwert angegeben. Für die Längsinduktion wird, da es sich um eine permanenterregte Maschine handelt nur der differentielle Wert angegeben.

4.3.7 Kennfelder der Maschinenparameter zur Regelung

Die berechneten Werte für unterschiedliche Lastfälle sollen hier grafisch dargestellt werden. Die Tabellenwerte finden sich im Anhang. Zur Auslegung der Regelung werden diese Tabellenwerte herangezogen. Nach Messung der Maschine können diese gerechneten Werte durch gemessene Werte ersetzt werden.

Das Darstellungsprinzip ist für alle Parameter eine Kurve über der Fläche, die von den Maximalwerten des Längsstroms i_d und des Querstroms i_q aufgespannt wird. Das Raster der Berechnung liegt bei beiden Stromwerten bei 20A. Der Längsstrom i_d wurde von +60A bis -160A gerastert, der Querstrom i_q von 0A bis 360A. Wie schon erwähnt, wurden alle Parameter in Schritten von 2° über eine volle elektrische Periode berechnet und dann gemittelt.

Betrachtet man die Fläche des Längsflusses Ψ_d im Raum, erkennt man sofort den linearen Zusammenhang zwischen Längsstrom i_d und Längsfluss Ψ_d im Bereich bis $i_d = 0A$ und für $i_q = 0A$. Für $i_d > 0A$ tritt Sättigung im Statorblech auf und der Zusammenhang wird nicht-linear. Für $i_q > 0A$ tritt dieser Effekt bereits bei Strömen $i_d < 0A$ auf, wie bereits aus der Flussdichte Verteilung für den Nennquerstrom zu erkennen war. Dies entspricht den Erwartungen, die an das ANSYS-Modell gestellt wurden.

Klar erkennbar ist auch, dass die Längsflussverkettung bei ungefähr $i_d = -120A$ null wird. Folglich treten hier im Statorblech keine Ummagnetisierungsverluste mehr auf, was den analytischen Berechnungen entspricht. Folglich sind Ströme bis maximal $i_d = -120A$ sinnvoll. Allerdings liegt der Wert von i_d , bei dem das Verlustminimum erreicht wird unter dem Betrag von 120A, wie in einem späteren Kapitel aufgezeigt wird.

Die Abhängigkeiten von den Strömen bei der Querflussverkettung sind grundsätzlich gleicher Art mit umgekehrten Rollen von i_d und i_q im Vergleich zu den Abhängigkeiten der Längsflussverkettung, wie aus Bild 4.3.29 ersichtlich wird.

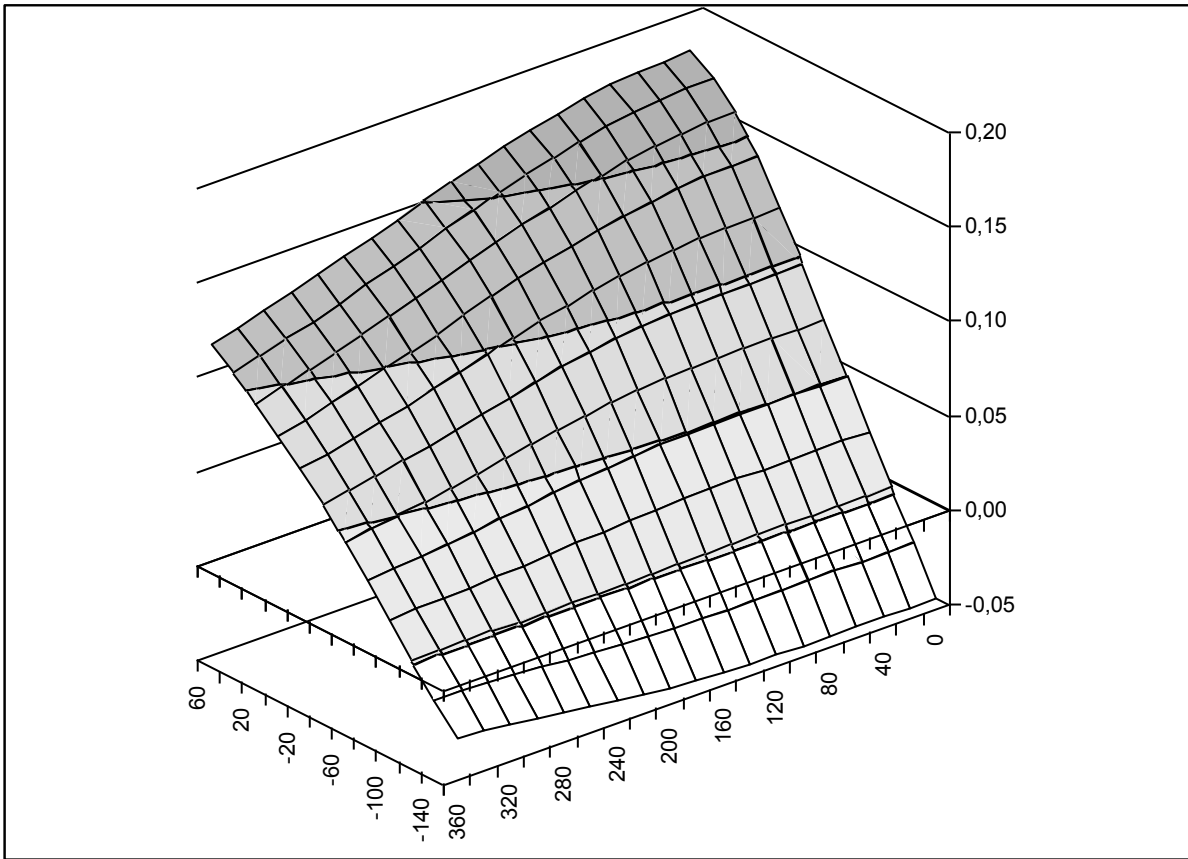


Bild 4.3.27: Längsflussverkettung Ψ_d in Vs über i_d und i_q

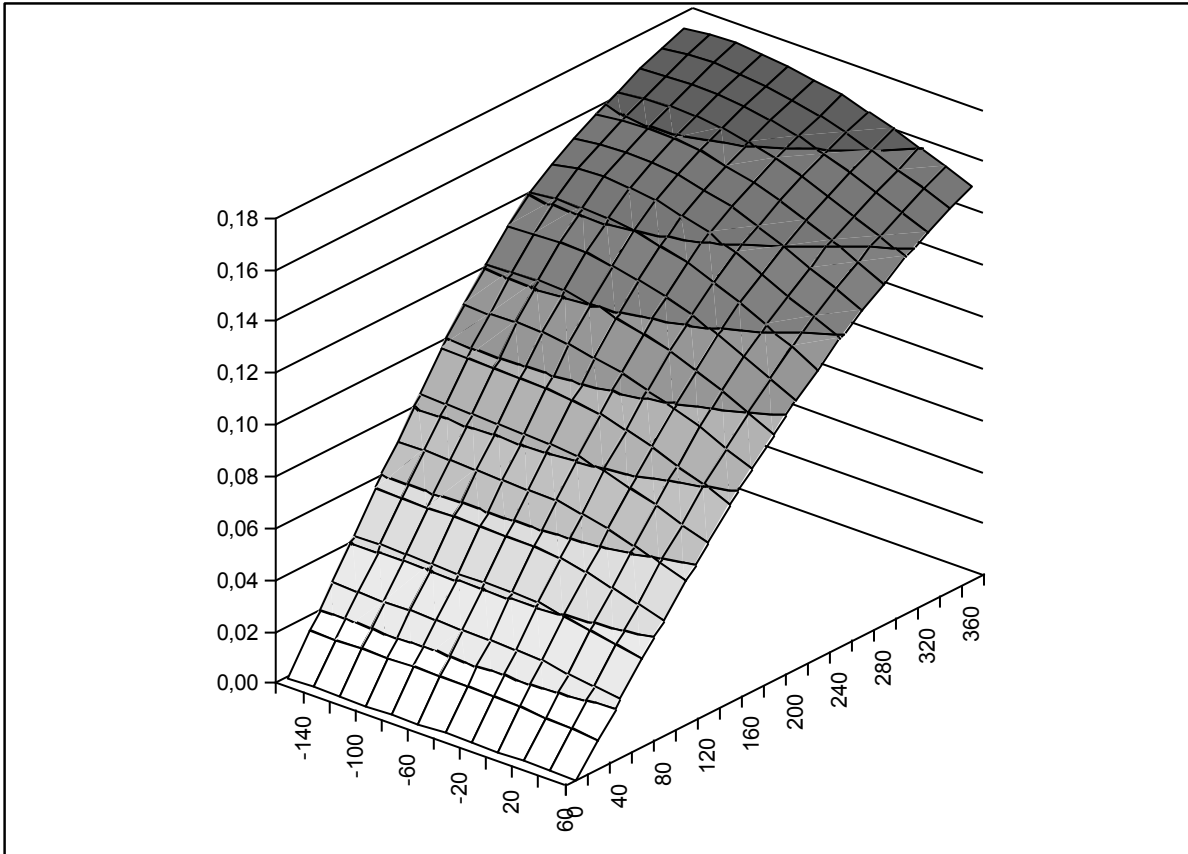


Bild 4.3.28: Querflussverkettung Ψ_q in Vs über i_d und i_q

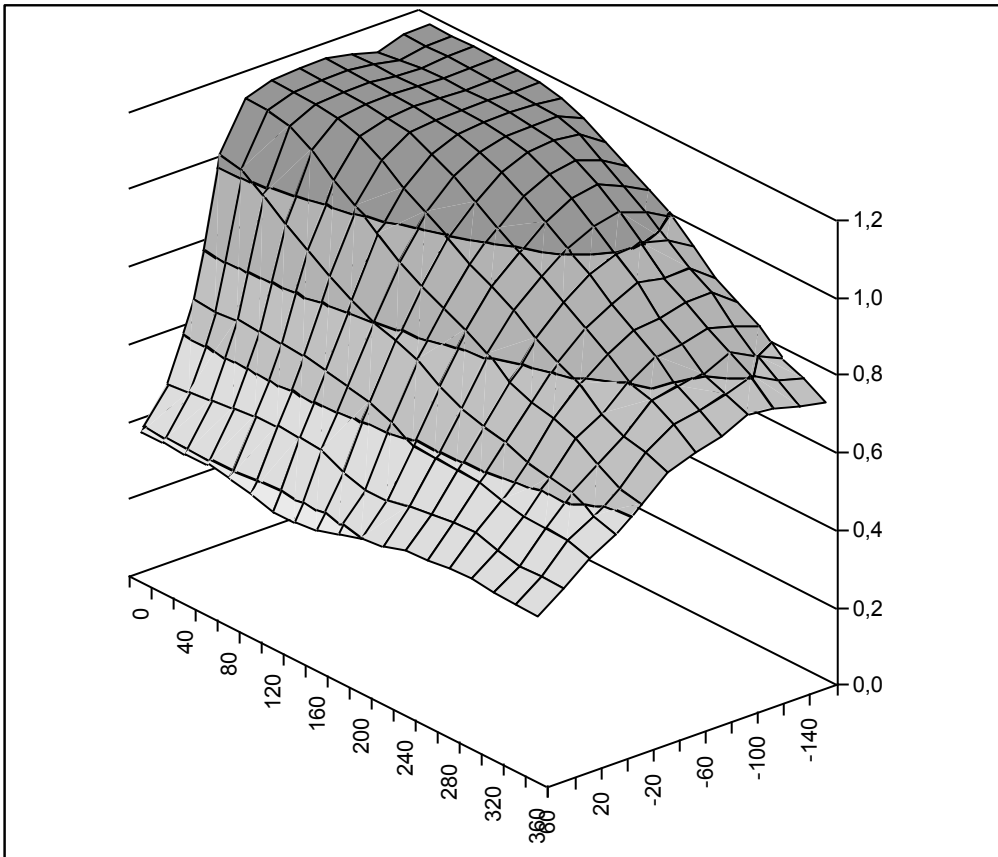


Bild 4.3.29: Differentielle Längsinduktivität L_{dd} in mH über i_d und i_q

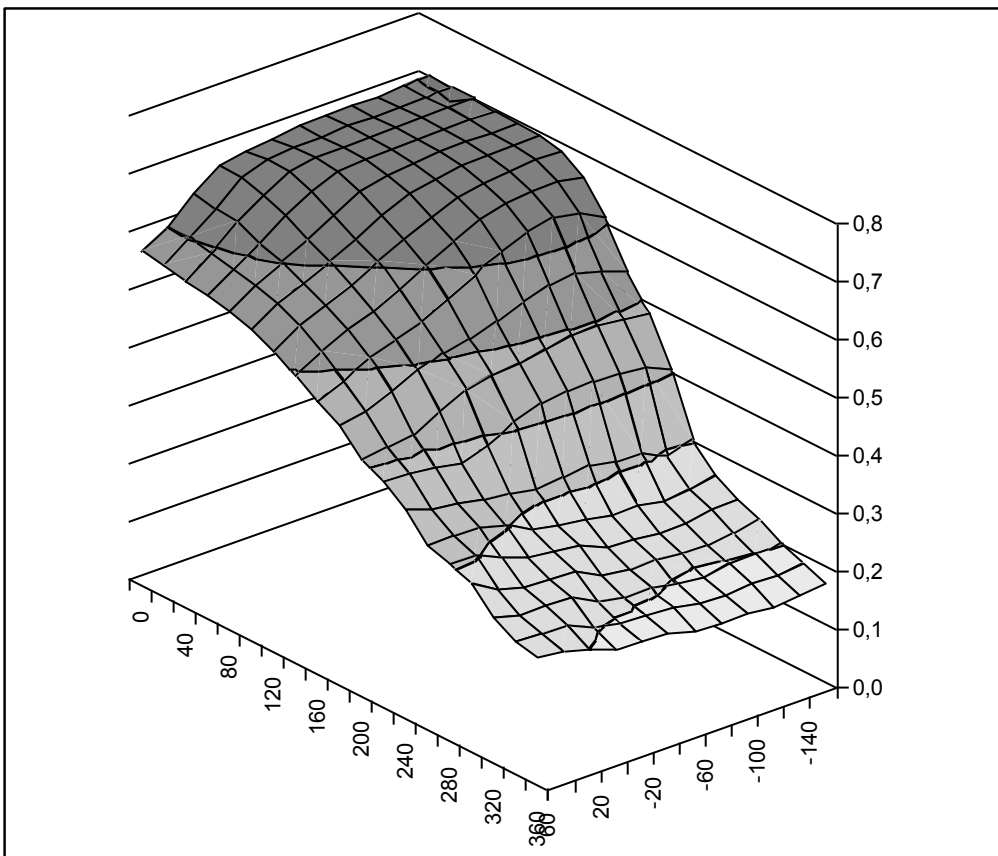


Bild 4.3.30: Differentielle Querinduktivität L_{qd} in mH über i_d und i_q

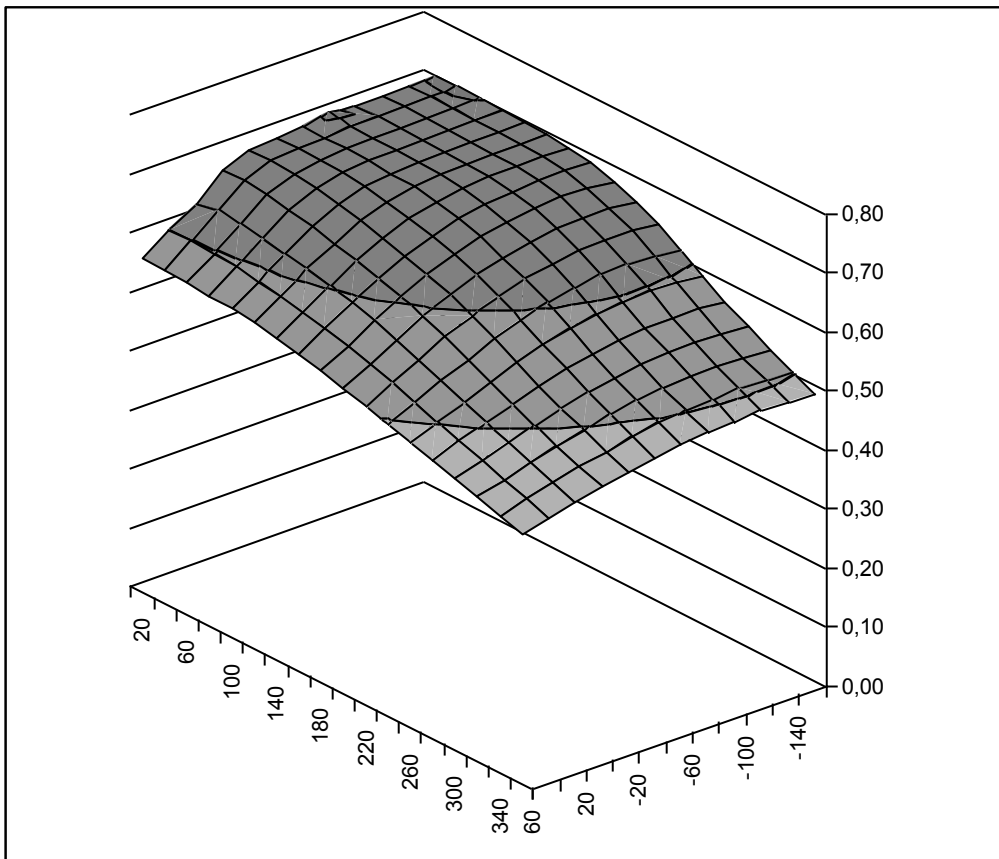


Bild 4.3.31: Querinduktivität L_q in mH über i_d und i_q

Allen drei Flächen ist ein Bereich relativ konstanter Induktivität gemeinsam. Dies sind die Bereiche, in denen das Statorblech weitgehend ungesättigt ist.

Der Unterschied zwischen differentieller und absoluter Querinduktivität lässt sich am Einfachsten durch die Steigung der Hysteresekurve des Blechs erklären. Während die differentielle Induktivität nur bei kleinen Auslenkungen des Magnetfeldes und damit des Querstroms bestimmt wird, ist die absolute Induktivität als Steigung zwischen zwei punktsymmetrischen Punkten im ersten und im dritten Quadranten in der BH-Ebene zu erklären, wie sie z.B. bei sinusförmigen Strömen vorkommt. Für die Regelung bedeutet dies, dass für ein Grundwellenmodell die absolute Induktivität eingesetzt werden muss. Um jedoch Umrichtereffekte richtig zu modellieren, muss die differentielle Induktivität herangezogen werden.

Für die Längsinduktivität kommt nur die differentielle Induktivität in Betracht, da durch die Magnete meist nur im ersten Quadranten gearbeitet wird.

Im folgenden Diagramm wird nun der Quotient zwischen differentieller Längs- und absoluter Querinduktivität gebildet, der Einfluss auf das Betriebsverhalten hat. Im Sinne der angestrebten Maschinenauslegung ist, wie in vorangehenden Kapiteln dargelegt, ein möglichst großer Quotient erwünscht.

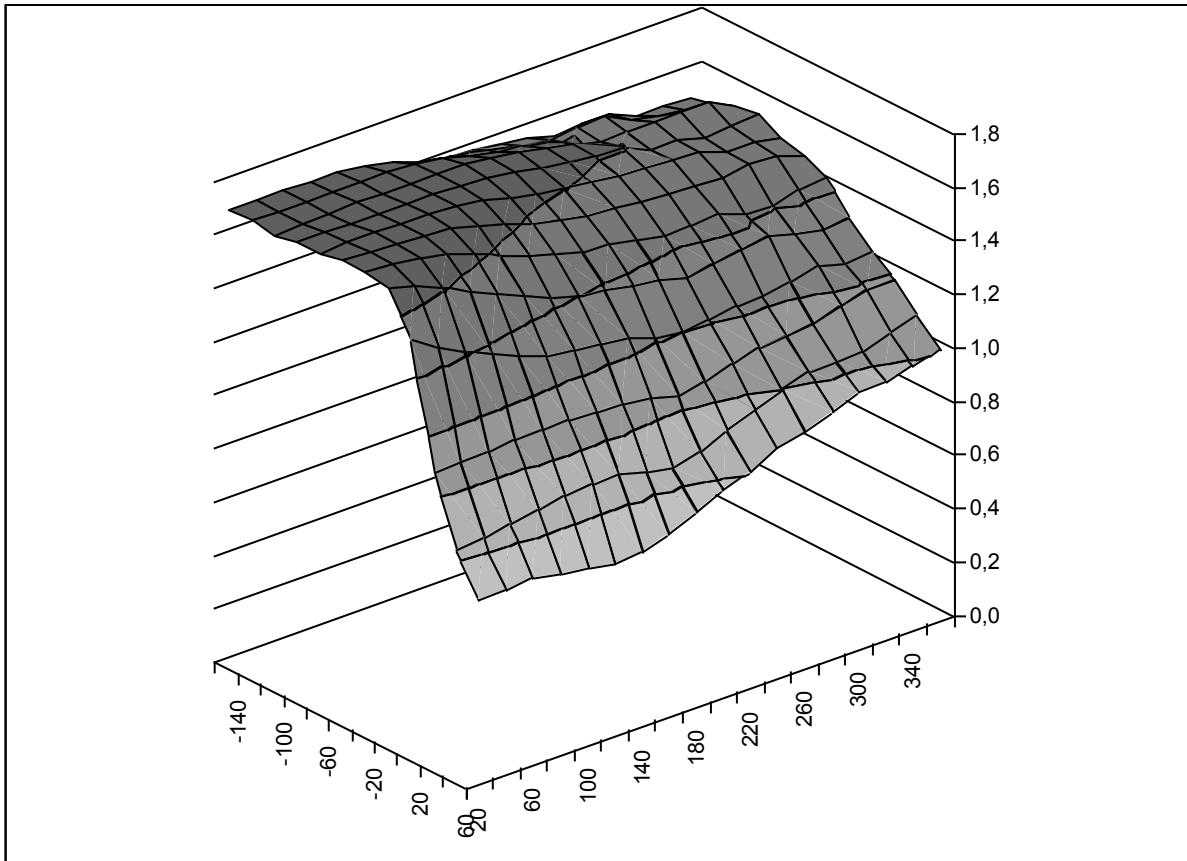


Bild 4.3.32: Induktivitätsverhältnis L_{dd}/L_q über i_d und i_q

Die Graustufen geben die Bereiche des Verhältnisses an. Bei Längsströmen $i_d < 20\text{A}$ bleibt das Verhältnis stets größer Eins. Auch hier gibt es einen Bereich, der als konstant anzusehen ist. Und auch hier wird dieser Bereich dadurch bestimmt, dass das Statorblech ungesättigt ist.

Das folgende Diagramm zeigt das Drehmoment über den Strömen. Da sich ein bestimmtes Moment bei unterschiedlichen Strompaaren einstellen kann, wird die Aufgabe in einer verlustoptimierten Regelung darin bestehen, das Strompaar zu bestimmen, bei dem die kleinsten Gesamtverluste auftreten. Wie dies geschieht, wird im Kapitel zur Regelung beschrieben.

Ein weiteres Drehmoment-Diagramm zeigt bei Querströmen von 0A bis 360A in einem 20A-Raster die mechanische Winkelabhängigkeit bei einer Drehung um eine elektrische Periode. Es ist dabei klar der Einfluss der Geometrie und der gewählten Wicklung zu erkennen. Bei der ausgeführten Maschine wurde wie bereits beschrieben, eine Nutschrägung um eine Nutbreite angewandt, die die Rastmomente vollständig eliminiert.

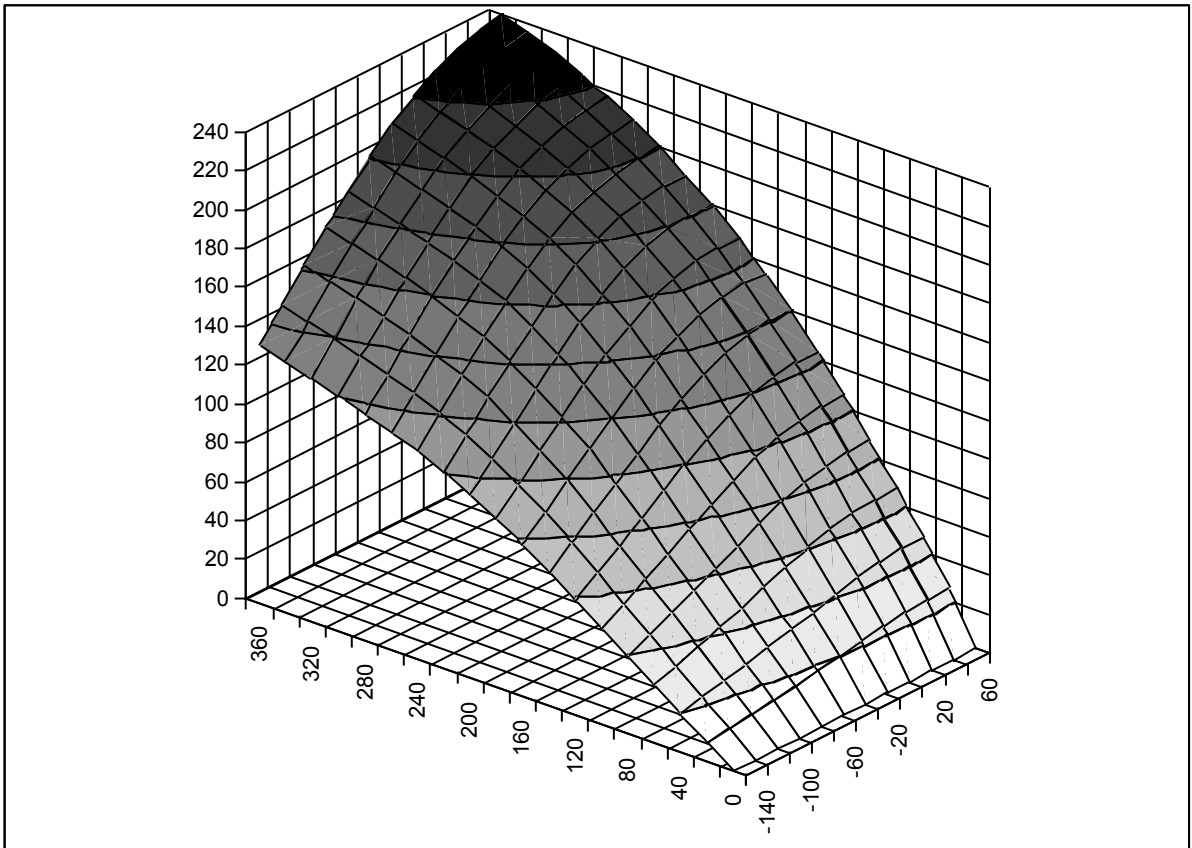


Bild 4.3.33: Drehmoment M in Nm über i_d und i_q

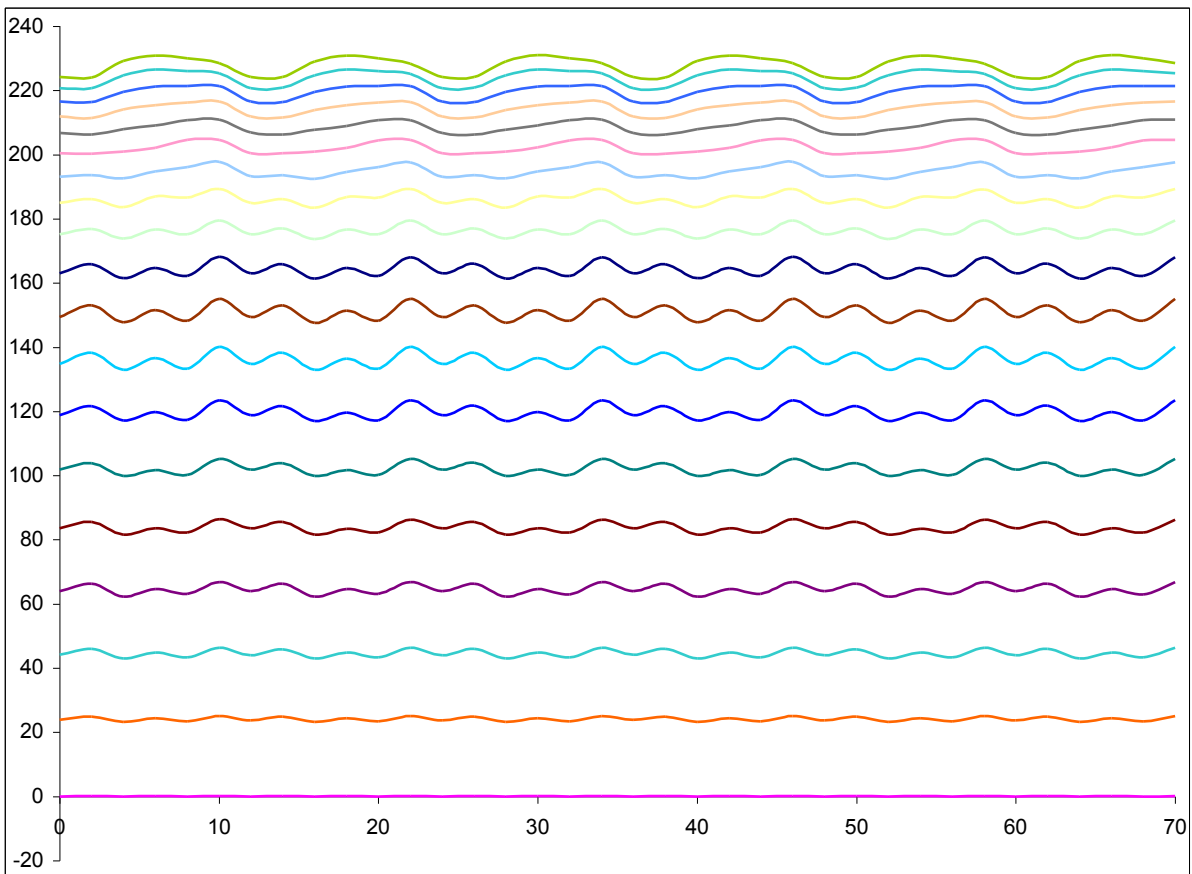


Bild 4.3.34: Nutrastmomente in Nm über eine elektrische Periode bei i_q von 0A bis 360A

Der Vollständigkeit halber soll hier noch die gesamte Flussverkettung im Motor bei den bekannten Strompaaren dargestellt werden. Diese Flussverkettung hat keinen Einfluss auf die in der Regelung benötigten Betriebsparameter, ist jedoch ein Maß für die rotatorisch induzierte Spannung und somit für die Ummagnetisierungsverluste im Motor. Im folgenden Kapitel werden die Diagramme der Ummagnetisierungsverluste zu sehen sein, die eine Ähnlichkeit zum hier dargestellten Diagramm aufzeigen.

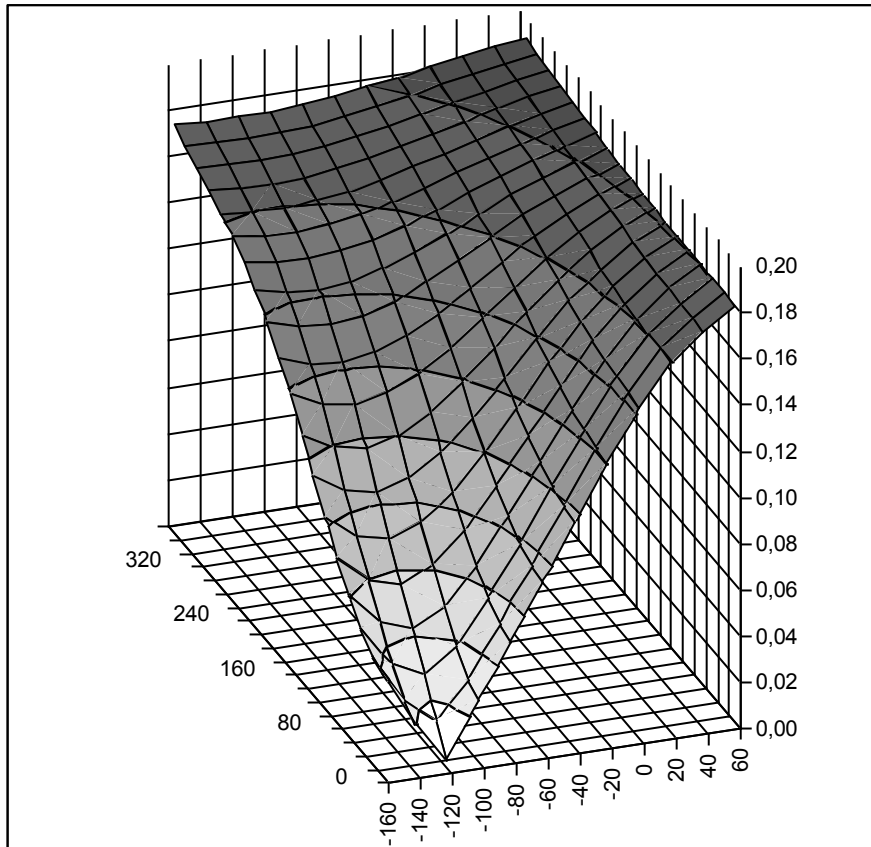


Bild 4.3.35: Flussverkettung Ψ in Vs über i_d und i_q

4.3.8 Berechnung der zu erwartenden Verluste

Die Berechnung der Verluste erfolgte auf zwei Arten: Analytische Berechnung wie anschließend beschrieben und Berechnung durch die in Kapitel 3 beschriebenen Methoden. Die Ergebnisse der analytischen Rechnung werden hier nur stichpunktartig zum Vergleich herangezogen.

Die im Folgenden beschriebene Methode der Verlustermittlung bzw. zur Verlustminimierung zieht mangels Berechnungsgrundlage die Rotorverluste nicht und die Stator-Zusatzverluste nur näherungsweise in Betracht.

Nimmt man für die Verluste die bekannten Verlustterme zur Berechnung, ergibt sich folgende Formel:

$$P_V = P_{V,Cu} + P_{V,Fe} = P_{V,Cu} + P_{V,Fe,h} + P_{V,Fe,e} \quad (4.3.21)$$

Mit den Termen:

$$P_{V,Cu} = \frac{3 \cdot i^2 \cdot R}{2} = \frac{3 \cdot (i_d^2 + i_q^2) \cdot R}{2} \quad (4.3.22)$$

$$P_{V,Fe,h} = m \cdot c_h \cdot f \cdot \hat{B}^n \quad (4.3.22)$$

$$P_{V,Fe,e} = m \cdot c_e \cdot f^2 \cdot \hat{B}^2 \quad (4.3.24)$$

Unter der Voraussetzung linearer magnetischer Verhältnisse kann für \hat{B} folgender Ansatz zur Berücksichtigung der Flussdichte unter Last bzw. bei Feldschwächung gewählt werden:

$$\hat{B} = \hat{B}(i_d, i_q) = \hat{B}(0,0) \cdot \frac{\sqrt{(\Psi_M + L_d \cdot i_d)^2 + L_q^2 \cdot i_q^2}}{\Psi_M} \quad (4.3.25)$$

Dies stellt selbstverständlich eine Näherung dar, bei der im Falle der Statorblech-Sättigung zu große Werte berechnet werden. Da jedoch, wie bereits in Kapitel 3 diskutiert, die Steinmetzformel ohnehin eine grobe Näherung darstellt und die Rotorverluste unberücksichtigt bleiben, scheint dieser Ansatz nicht unvernünftig zu sein. Zu weiteren Vereinfachung wird hier die Hochzahl n im Hysteresis-Term der Steinmetzformel mit der gleichen Begründung zu $n = 2$ gesetzt. Dies ergibt mit der Abkürzung B_0 für $\hat{B}(0,0)$ den folgenden Ausdruck.

$$\begin{aligned} P_V &= \frac{3 \cdot (i_d^2 + i_q^2) \cdot R}{2} + m_s \cdot c_h \cdot f \cdot B_0^2 \cdot \frac{(\Psi_M + L_d \cdot i_d)^2 + L_q^2 \cdot i_q^2}{\Psi_M^2} \\ &+ m_s \cdot c_e \cdot f^2 \cdot B_0^2 \cdot \frac{(\Psi_M + L_d \cdot i_d)^2 + L_q^2 \cdot i_q^2}{\Psi_M^2} \\ &= \frac{3 \cdot (i_d^2 + i_q^2) \cdot R}{2} + \frac{m_s \cdot f \cdot B_0^2}{\Psi_M^2} \cdot (c_h + c_e \cdot f) \cdot [(\Psi_M + L_d \cdot i_d)^2 + L_q^2 \cdot i_q^2] \end{aligned} \quad (4.3.26)$$

Unabhängige Variable sind hier nur i_d , i_q und f . B_0 ist eine Konstante, R wird als fester Parameter angesehen, während Ψ_M , L_d , L_q , c_h und c_e betriebspunktabhängig also von i_d , i_q und f abhängige Variable sind. Die Abhängigkeit von Ψ_M , L_d und L_q von f ist allerdings relativ klein und soll nicht weiter berücksichtigt werden. Die Abhängigkeit von Ψ_M , L_d und L_q vom Betriebspunkt kann mit Hilfe von Interpolation in durch numerische Analyse ermittelte Kennfelder, in die Formel eingehen.

Auch die Berücksichtigung der Abhängigkeit von c_e und c_h könnte durch Interpolation in Kennfeldern geschehen. Darauf wurde verzichtet, da die Abhängigkeit der Verluste im Gegensatz zur Frequenz und zur Flussdichte nur linear ist.

Führt man nun in den oben stehenden Term das Drehmoment in Abhängigkeit von i_d und i_q ein, lässt sich, wie in [16] vorgeschlagen, eine unabhängige Variable eliminieren.

$$M = \frac{3p}{2} (\Psi_M \cdot i_q + (L_d - L_q) \cdot i_q \cdot i_d) \quad (4.3.27)$$

Formt man diesen Term nach i_d um, lässt sich i_d in der Verlustformel eliminieren, und M kann als Vorgabeparameter angesehen werden.

$$i_d = \frac{\left(\frac{2M}{3p} - \Psi_M \cdot i_q \right)}{(L_d - L_q) \cdot i_q} = \frac{2M}{3p \cdot (L_d - L_q) \cdot i_q} - \frac{\Psi_M}{(L_d - L_q)} \quad (4.3.28)$$

Dies in die Verlustformel eingesetzt, ergibt eine Abhängigkeit der Verluste einzig von i_q .

$$\begin{aligned} P_V(i_q) &= \frac{3 \cdot R}{2} \left[\left(\frac{2M}{3p \cdot (L_d - L_q) \cdot i_q} - \frac{\Psi_M}{(L_d - L_q)} \right)^2 + i_q^2 \right] \\ &+ \frac{m_s \cdot f \cdot B_0^2}{\Psi_M^2} \cdot (c_h + c_e \cdot f) \cdot \left[\left(\Psi_M + L_d \cdot \left(\frac{2M}{3p \cdot (L_d - L_q) \cdot i_q} - \frac{\Psi_M}{(L_d - L_q)} \right) \right)^2 + L_q^2 \cdot i_q^2 \right] \\ &= \frac{3 \cdot R}{2} \left[\left(\frac{2M}{3p \cdot (L_d - L_q) \cdot i_q} - \frac{\Psi_M}{(L_d - L_q)} \right)^2 + i_q^2 \right] \\ &+ \frac{m_s \cdot f \cdot B_0^2}{\Psi_M^2} \cdot (c_h + c_e \cdot f) \cdot \left[\Psi_M^2 + 2 \cdot \Psi_M \cdot L_d \cdot \left(\frac{2M}{3p \cdot (L_d - L_q) \cdot i_q} - \frac{\Psi_M}{(L_d - L_q)} \right) \right. \\ &\quad \left. + L_d^2 \cdot \left(\frac{2M}{3p \cdot (L_d - L_q) \cdot i_q} - \frac{\Psi_M}{(L_d - L_q)} \right)^2 + L_q^2 \cdot i_q^2 \right] \end{aligned} \quad (4.3.29)$$

Führt man noch die Abkürzungen

$$a = \frac{2M}{3p \cdot (L_d - L_q)}, \quad b = \frac{\Psi_M}{(L_d - L_q)} \quad \text{und} \quad c = \frac{m_s \cdot f \cdot B_0^2}{\Psi_M^2} \cdot (c_h + c_e \cdot f) \quad \text{ein, ergibt sich:}$$

$$\begin{aligned} P_V(i_q) &= \frac{3 \cdot R}{2} \left[\frac{a^2}{i_q^2} - \frac{2ab}{i_q} + b^2 \right] \\ &+ c \cdot \left[\Psi_M^2 + 2 \cdot \Psi_M \cdot L_d \cdot \left(\frac{a}{i_q} - b \right) + L_d^2 \cdot \left(\frac{a^2}{i_q^2} - \frac{2ab}{i_q} + b^2 \right) + L_q^2 \cdot i_q^2 \right] \end{aligned} \quad (4.3.30)$$

$$\text{Für } i_d \text{ gilt: } i_d = \frac{a}{i_q} - b \quad (4.3.31)$$

Differenziert man nun P_V nach i_q und sucht die i_q , für die dP_V/di_q zu null wird, kann aus i_q i_d bestimmt werden. Auf diese Art bekommt man ein Wertepaar i_d und i_q , für das die Verluste minimal werden. Dieser Ansatz wurde in MATLAB programmiert. Der Quelltext befindet sich im Anhang.

Zur Berechnung müssen nun noch die Koeffizienten in der Steinmetzformel c_e und c_h bestimmt werden. Dies geschieht mit der Verlusttabelle des Blechherstellers, die im Anhang zu finden ist. Unter der Tabelle ist die Verlustkurve für $B = 1,4$ T dargestellt in Abhängigkeit von der Frequenz. Für die Kurve wurde eine Trendlinie durch ein Polynom zweiter Ordnung erstellt. Die Koeffizienten müssen für die Verlustberechnung in MATLAB durch B_0^2 dividiert werden.

Auch nach der Methode von Bochnia e.a. können Stromwertepaare gewonnen werden für die die Verluste bei gegebener Drehzahl und gewähltem Moment minimal werden. Dies wird in einem späteren Kapitel beschrieben. Die rein analytisch berechneten Ergebnisse, wie vorab beschrieben, werden dann zum Vergleich im Sinne der Plausibilität herangezogen.

Zunächst werden die Verluste getrennt nach Entstehungsort graphisch dargestellt, wobei hier nur einige ausgewählte Diagramme eingestellt werden. Alle gerechneten Werte sind als Tabellen im Anhang abgelegt.

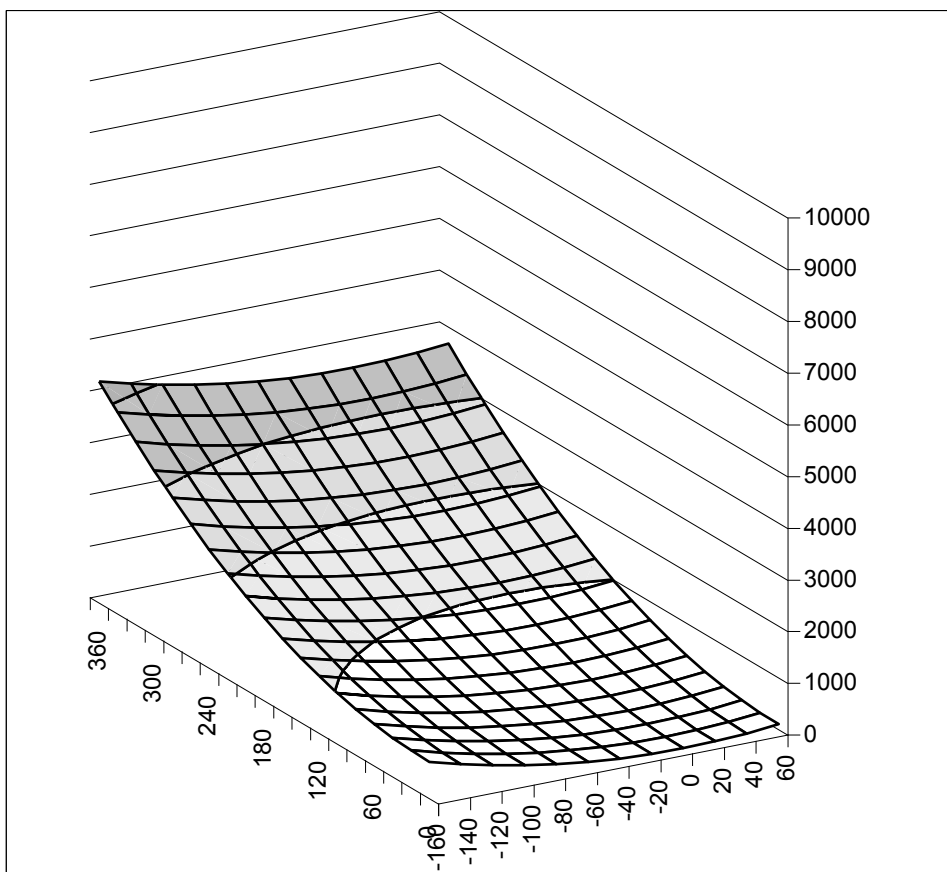


Bild 4.3.36: Stromwärmeverluste [W] über i_d und i_q

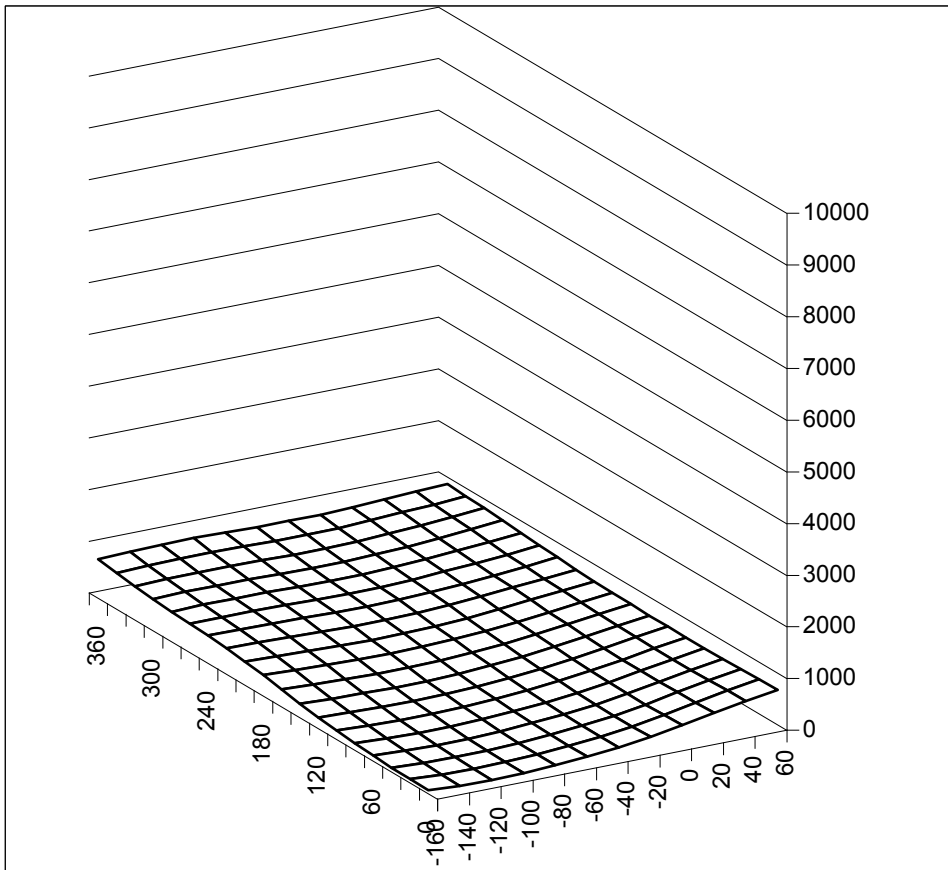


Bild 4.3.37: Ummagnetisierungsverluste [W] bei $n = 2400 \text{ min}^{-1}$ über i_d und i_q

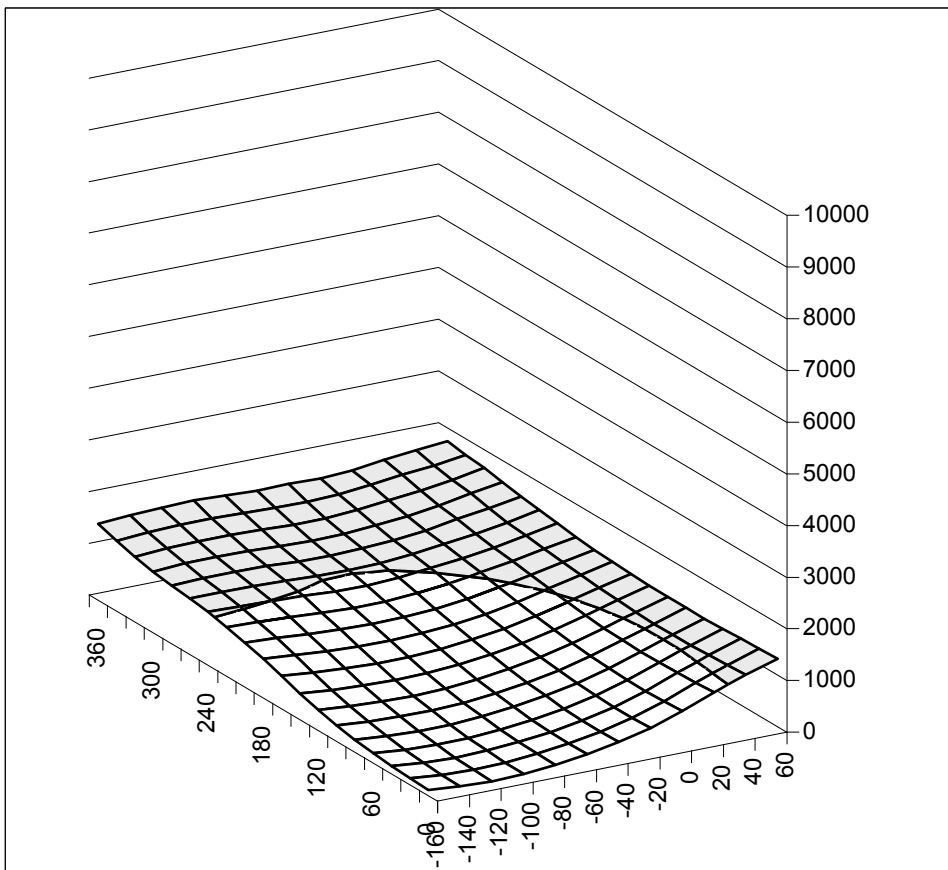


Bild 4.3.38: Ummagnetisierungsverluste [W] bei $n = 3600 \text{ min}^{-1}$ über i_d und i_q

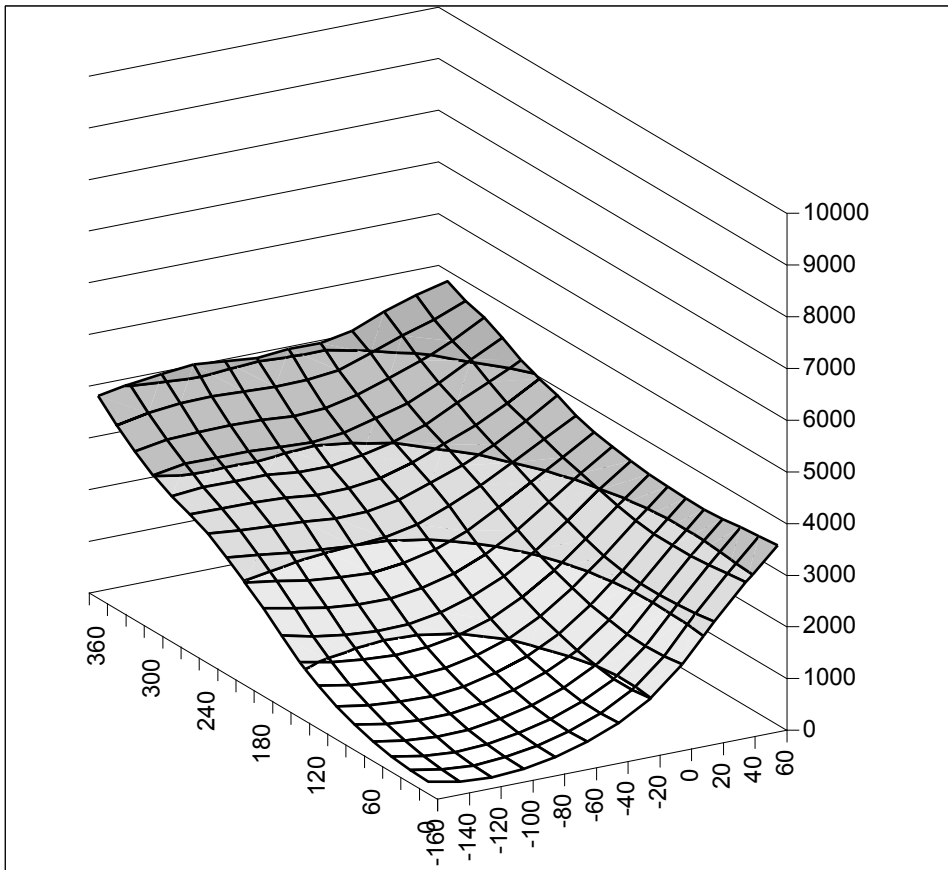


Bild 4.3.39: Ummagnetisierungsverluste [W] bei $n = 6000 \text{ min}^{-1}$ über i_d und i_q

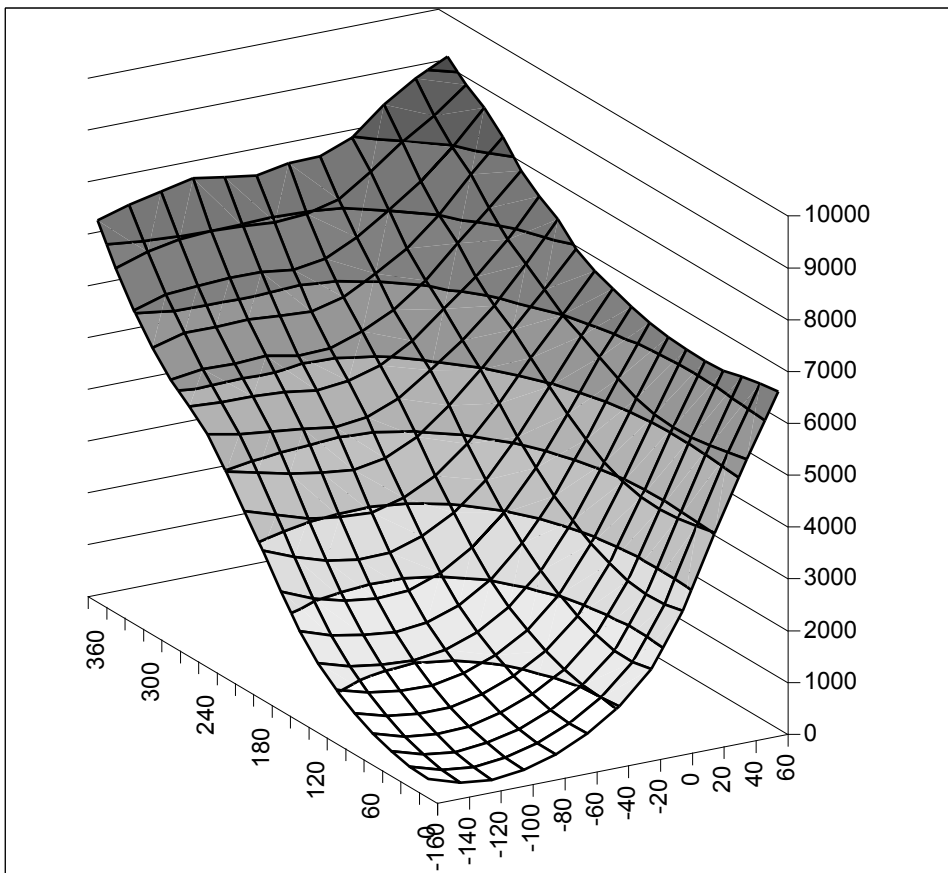


Bild 4.3.40: Ummagnetisierungsverluste [W] bei $n = 8400 \text{ min}^{-1}$ über i_d und i_q

Der prinzipiell dem Gesamtfluss im Motor ähnliche Verlauf ist deutlich zu erkennen. Eine Abweichung gibt es im Bereich großer q -Ströme, wo entgegen der Erwartung bei $i_d = -80\text{A}$ ein lokales Maximum entsteht, während bei kleinen und mittleren q -Strömen der Verlauf dem zu erwartenden Verlauf entspricht. Bei steigenden Querströmen verschiebt sich das lokale Minimum von $i_d = -120\text{A}$ zu $i_d = -80\text{A}$. Dies ist eine in Hinblick auf eine Minimierung der Verluste positive Eigenschaft, da somit die Stromwärmeverluste nicht zu sehr steigen.

Theoretisch ergibt sich bei $i_d = -120\text{A}$ und $i_q = 0\text{A}$ Feldfreiheit im Statorblech. Dies entspricht jedoch, wie auch aus den Feldlinienbildern für $I_d = 88\text{A}$ zu erkennen ist, nicht den in Realität zu erwartenden Feldverläufen.

Dennoch lassen sich die Ummagnetisierungsverluste für diesen Fall bei $n = 8400\text{ min}^{-1}$ von $2,6\text{ kW}$ im unbestromten Fall auf $0,1\text{ kW}$ bei $i_d = -120\text{A}$ und $i_q = 0\text{A}$ reduzieren. Die Stromwärmeverluste betragen dabei ca. $0,4\text{ kW}$. Somit lässt sich die Summe von Kupfer- und Ummagnetisierungsverlusten hier auf unter 20% der Werte der Leerlaufverluste senken.

An dieser Stelle sollen nun noch die wie in Kapitel 3 beschrieben bestimmten Rotorverluste eingeführt werden, bevor die Gesamtverluste dargestellt werden.

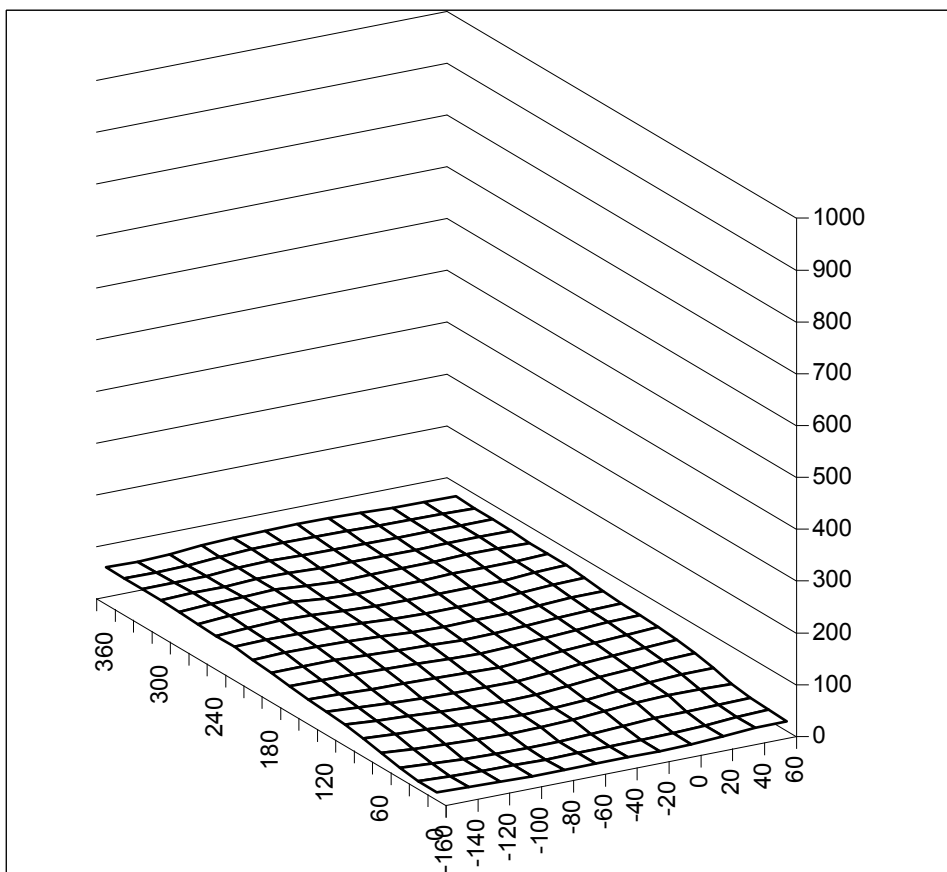


Bild 4.3.41: Rotor-Ummagnetisierungsverluste $[W]$ bei $n = 2400\text{ min}^{-1}$ über i_d und i_q

Bereits bei kleinen Drehzahlen können die Rotor-Ummagnetisierungsverluste, kurz Rotorverluste, Werte bis zu ca. 70W annehmen. Völlig offensichtlich ist die einfache und als linear anzunehmende Abhängigkeit vom Querstrom.

Bei $n = 3600\text{ min}^{-1}$ zeigt sich dann, dass der Zusammenhang zwischen Querstrom und Verlusten nicht mehr linear verläuft. Zusätzlich ist hier eine Abhängigkeit vom d -Strom zu sehen die sich bei höheren Drehzahlen verstärkt.

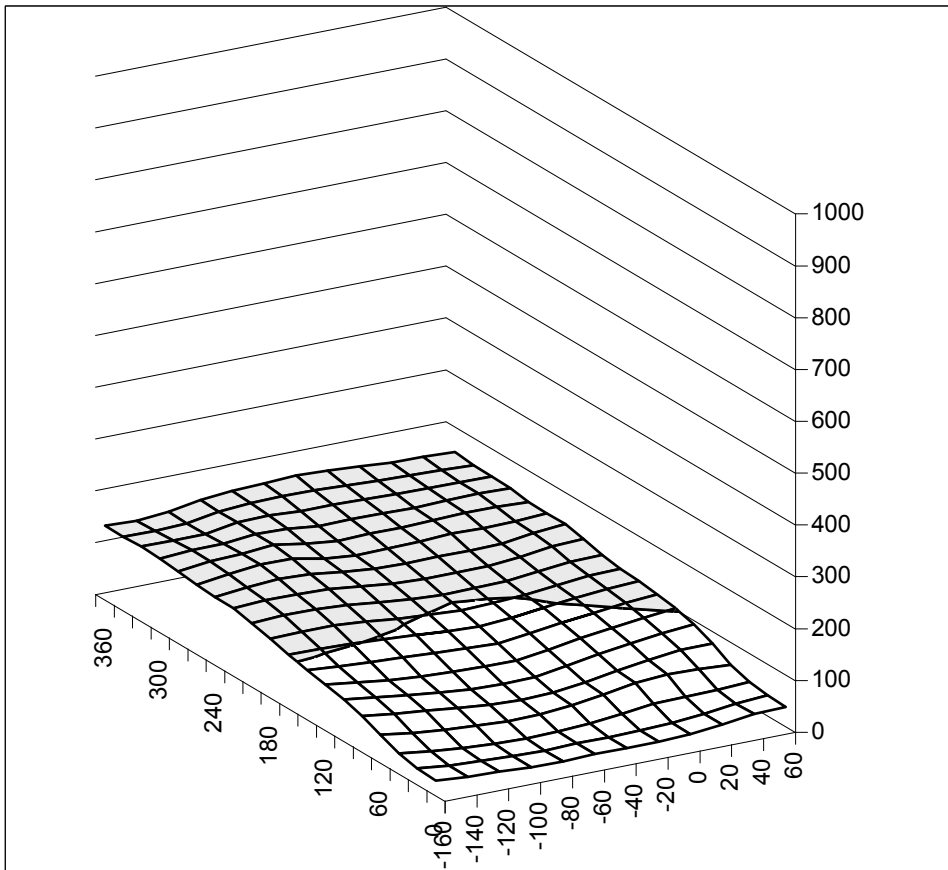


Bild 4.3.42: Rotor-Ummagnetisierungsverluste [W] bei $n = 3600 \text{ min}^{-1}$ über i_d und i_q

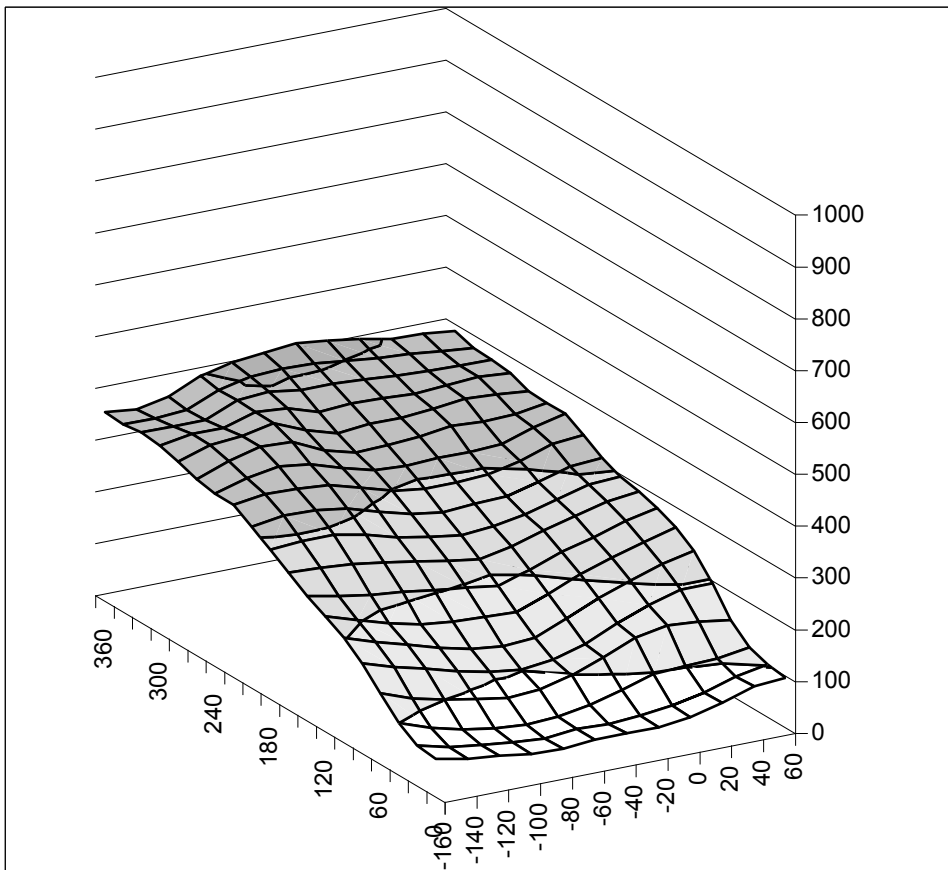


Bild 4.3.43: Rotor-Ummagnetisierungsverluste [W] bei $n = 6000 \text{ min}^{-1}$ über i_d und i_q

Beide Tendenzen zeigen sich nun verstärkt. Leider ist das Verfahren der Berechnung für sehr große Ströme und Frequenzen offensichtlich numerisch noch nicht optimal, so dass Rechengenauigkeiten eine genauere Beurteilung nicht ermöglichen. Dies wird im nächsten Diagramm deutlich.

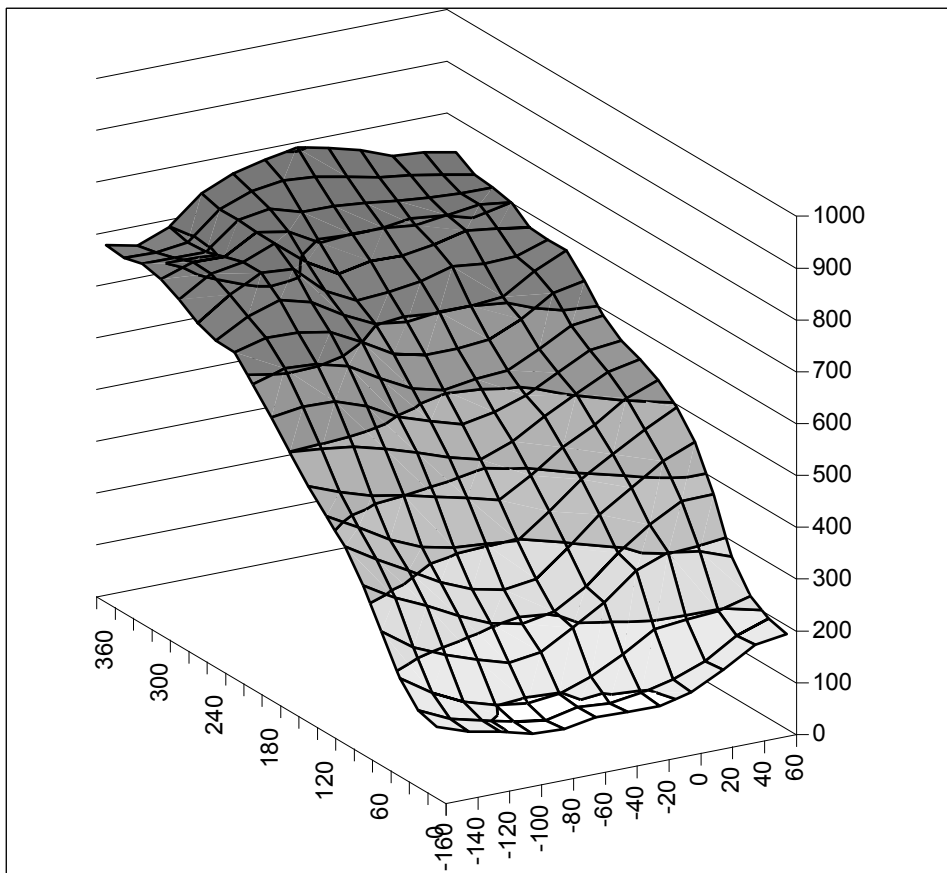


Bild 4.3.44: Rotor-Ummagnetisierungsverluste [W] bei $n = 8400 \text{ min}^{-1}$ über i_d und i_q

Grundsätzlich ist der Verlauf der Verluste den Stator-Ummagnetisierungsverlusten nicht unähnlich. Dies ist eine Eigenschaft, die der Minimierung der Gesamtverluste entgegenkommt.

Nimmt man die analytische Berechnung, um für den Bemessungspunkt ($n = 3300 \text{ min}^{-1}$, $M = 150 \text{ Nm}$) das Minimum der Verluste bzw. das Strompaar für das Minimum zu ermitteln, stellen sich folgende Werte ein:

$$i_d = -20\text{A}, i_q = 165\text{A},$$

$$P_{V, \text{Cu}} = 771 \text{ W},$$

$$P_{V, \text{Fe}} = 653\text{W},$$

$$P_V = 1424\text{W}$$

Nimmt man zum Vergleich die nach Bochnia e.a. berechneten Werte für das oben angegebene Strompaar, erhält man nach Interpolation zwischen den Tabellenwerten:

$$P_{V, \text{Cu}} = 766 \text{ W},$$

$$P_{V, \text{Fe}} = 627\text{W},$$

$$P_V = 1393\text{W}$$

Im Anschluss sollen nun die Gesamtverluste ohne Reibungsverluste betrachtet werden.

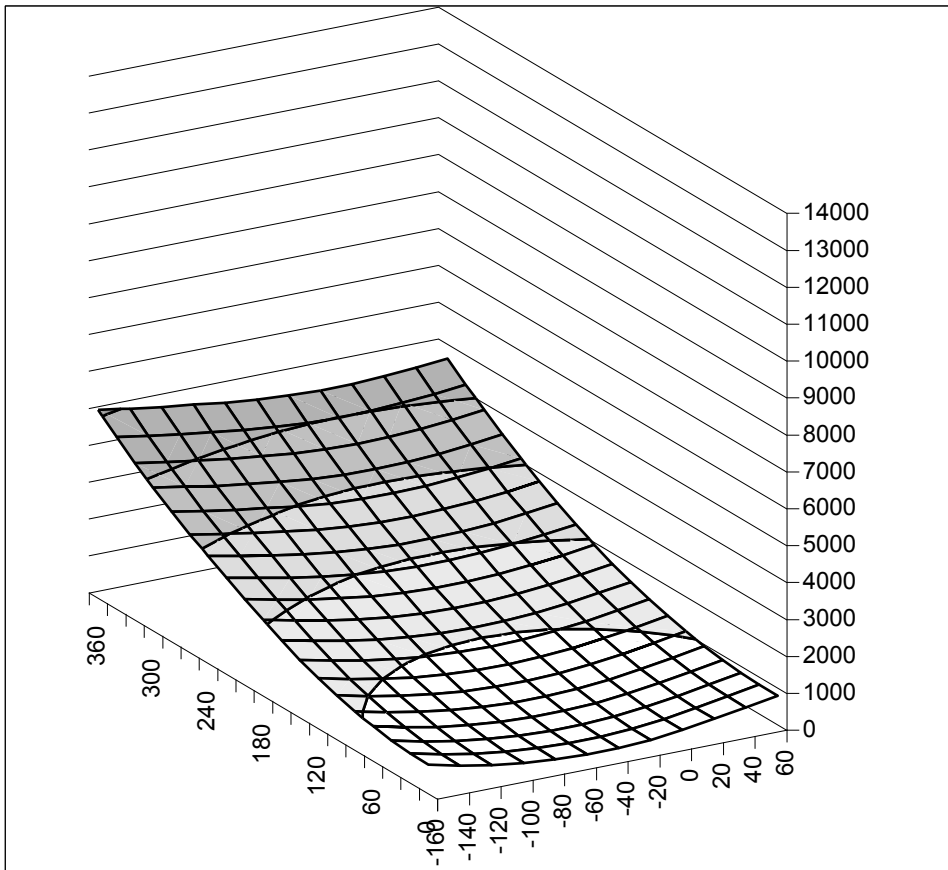


Bild 4.3.45: Gesamtverluste $[W]$ bei $n = 2400 \text{ min}^{-1}$ über i_d und i_q

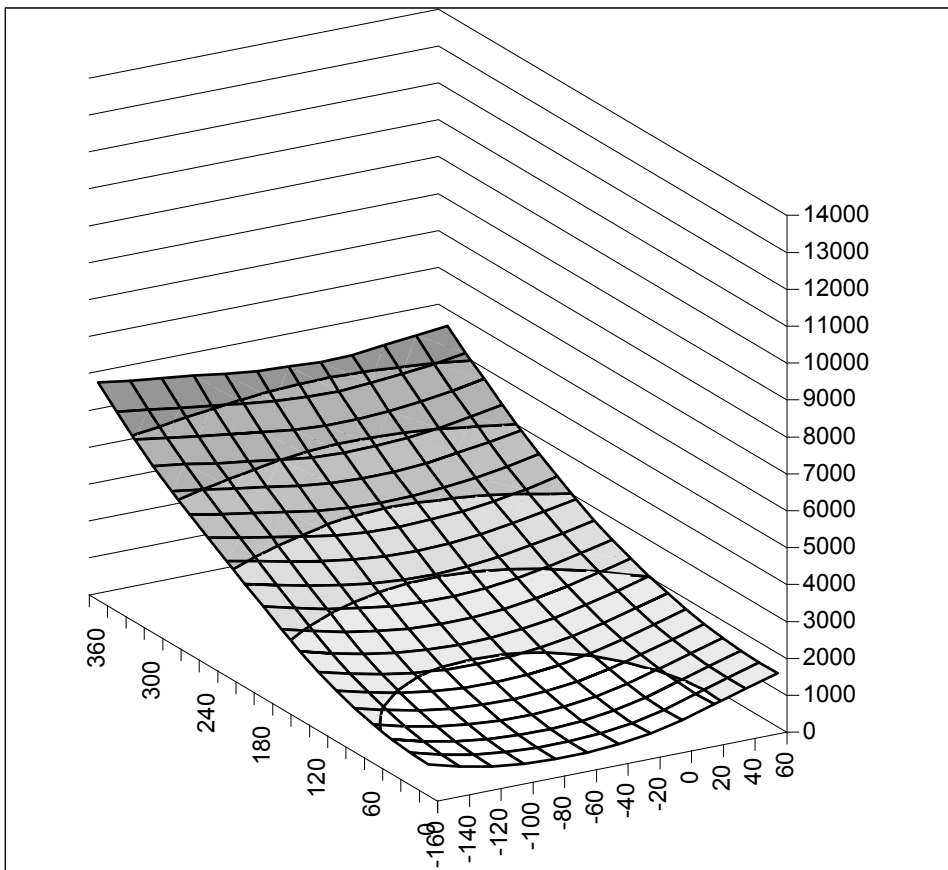


Bild 4.3.46: Gesamtverluste $[W]$ bei $n = 3600 \text{ min}^{-1}$ über i_d und i_q

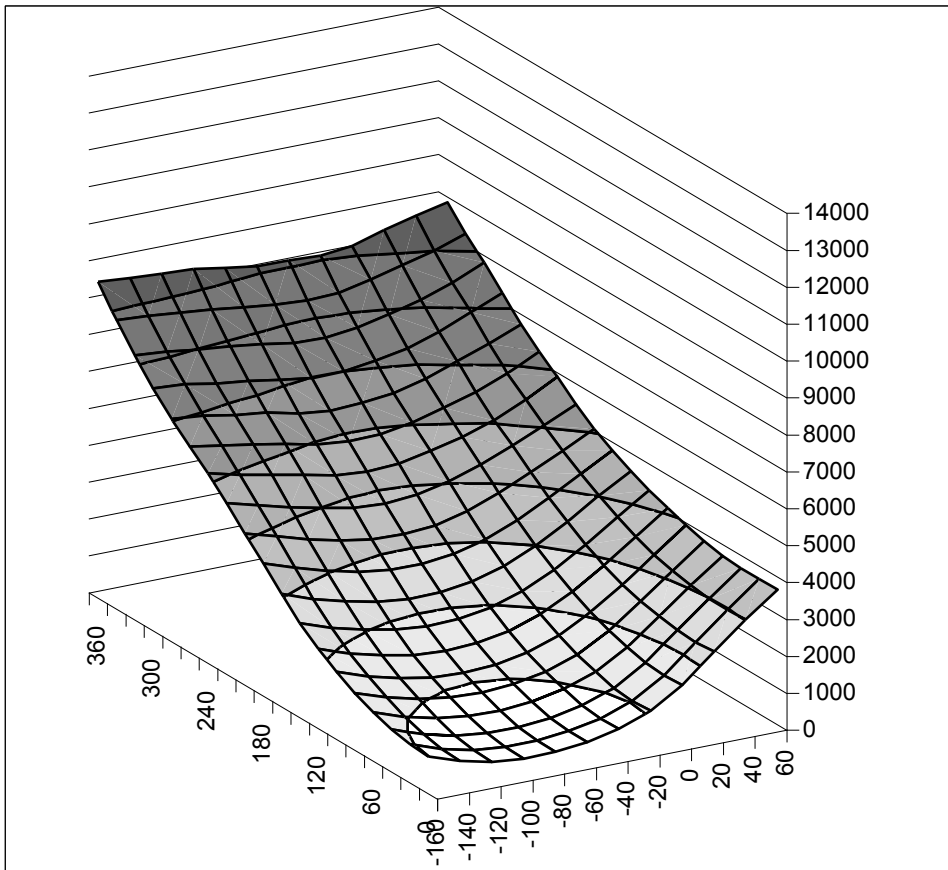


Bild 4.3.47: Gesamtverluste $[W]$ bei $n = 6000 \text{ min}^{-1}$ über i_d und i_q

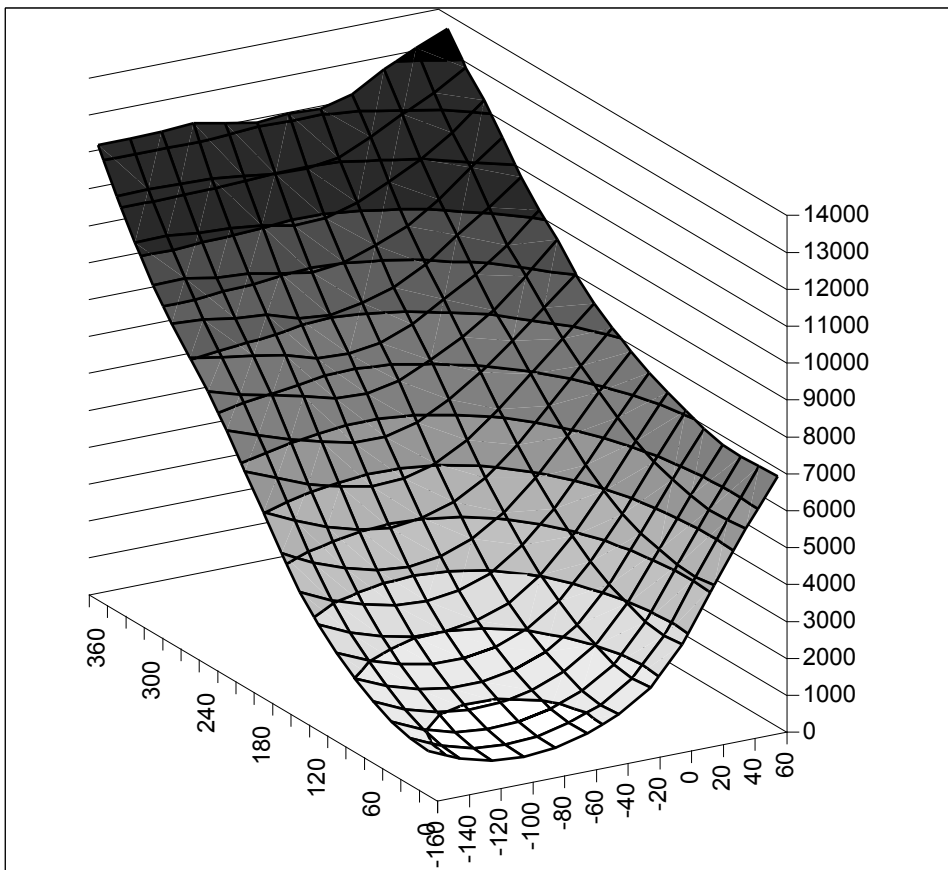


Bild 4.3.48: Gesamtverluste $[W]$ bei $n = 8400 \text{ min}^{-1}$ über i_d und i_q

Grundsätzlich ist zu erkennen, dass sich die lokalen Minima innerhalb einer Kurve in einer Fläche, die einer bestimmten Drehzahl zugeordnet ist, nicht sehr stark verschieben, wenn man die Abhängigkeit von i_d betrachtet.

Anders ausgedrückt, mit einer Regelungsstrategie, die bei einer Drehzahl von $n = 3600 \text{ min}^{-1}$ immer einen d-Strom $i_d = -40\text{A}$ einstellt, liegt man sicher nicht weit vom Minimum der Verluste. Dasselbe gilt für $n = 6000 \text{ min}^{-1}$ und den d-Strom $i_d = -80\text{A}$. Auf diese Art lässt sich eine einfache Regelungsstruktur erzielen, bei der der d-Strom ausschließlich von der Drehzahl und der q-Strom ausschließlich vom Moment abhängen.

Vergleicht man die mit der Steinmetzformel berechneten Verluste mit denen aus dem Verlustkennfeld für das mit der Steinmetzformel berechnete Strompaar und den einfachen Fall wie vorab diskutiert, ergeben sich folgende Werte für $n = 3600 \text{ min}^{-1}$ und $M = 160\text{Nm}$. Dies ist ein rein hypothetischer Betriebspunkt zu Vergleichszwecken.

	Steinmetz	Verlustkennfeld	Verlustminimierung einfach
$i_d [\text{A}]$	-37	-37	-40
$i_q [\text{A}]$	192	192	195
$P_{V, \text{Cu}} [\text{W}]$	1054	1035	1096
$P_{V, \text{Fe}} [\text{W}]$	1904	1826	1827
$P_{V, R} [\text{W}]$	-	256	260
$P_V [\text{W}]$	2958	3117	3183

Der kleine Unterschied bei den Stromwärmeverlusten in der ersten und der zweiten Spalte der obigen Tabelle mit demselben Stromwertepaar, lässt sich durch die lineare Interpolation zwischen den Kennfeldwerten erklären.

4.3.9 Montage und Kühlung

Das vorab beschriebene Statorblechpaket wurde auf -40°C heruntergekühlt und in einen auf 200°C erhitzten Aluminium-Kühlkörper eingeschrumpft. Im Anschluss wurde die Wicklung eingezogen.

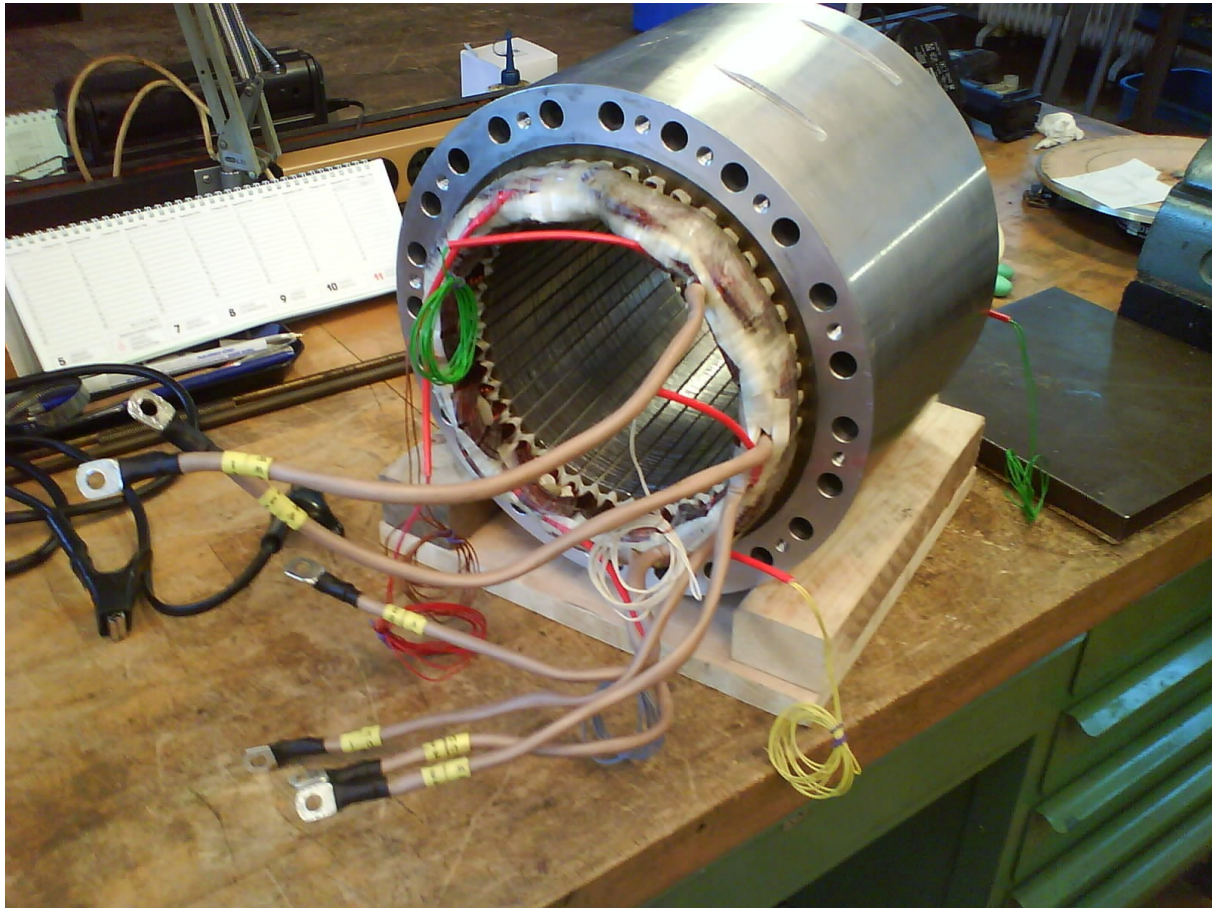


Bild 4.3.49: Statorpaket im Aluminium-Kühlkörper

Herausgeführt wurden beide Enden der Wicklungsstränge. Die Stränge wurden in einem Stück eingezogen und nicht durch Einzelspulen realisiert. Erst durch Verschalten auf dem Klemmbrett entsteht eine Sternschaltung. Das Wicklungsschema ist als Handskizze im Anhang dargestellt.

Die weiteren herausgeführten Kabel in Bild 4.3.49 dienen der Temperaturüberwachung mit PT100 Widerstandselementen. Jeweils drei in den beiden Wickelköpfen, drei in der Mitte des Blechpakets aufgeteilt auf die drei Stränge.

Auf Bild 4.3.49 sind die Kühlbohrungen zu erkennen. Auf die beiden Enden des Kühlkörpers wurden Endringe aufgebracht, die den Kühlmittelfluss mäanderartig durch den Kühlkörper lenken. Als Kühlmittel wird wie in Automobilen üblich ein Glykol-Wasser-Gemisch eingesetzt, welches im Prüfaufbau auch der Kühlung des eingesetzten Umrichters dient.

Die Rotorblechpakete mit den eingefügten Magneten wurden auf die Welle thermisch aufgeschrumpft. Im Anschluss wurde das Blechpaket mit Endringen mit dem Rotorblechpaket-Querschnitt versehen. Zusätzliche Messingringe wurden aufgebracht, die zusammen mit Messingstreifen in axialer Richtung durch die Blechaussparungen das Rotorpaket auf der Welle fixieren. Die Messingringe selbst wurden mit Madenschrauben auf die Welle geklemmt.



Bild 4.3.50: Rotorpaket mit Endstücken auf der Welle

Der Motor wurde auf zwei Lagerschilde mit Distanzhülsen aufgezogen. Die Lagerschilde werden von einer Bodenplatte fixiert.

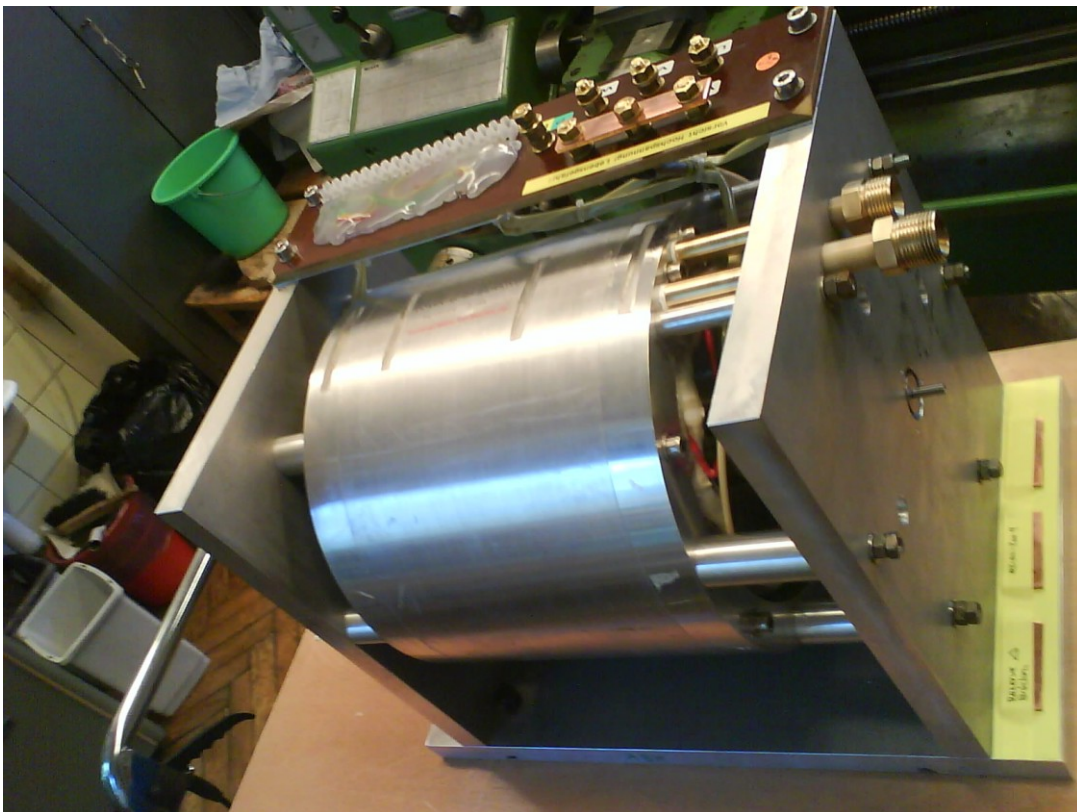


Bild 4.3.51: Rotor- und Statorpaket incl. Lagerschilden und Sockel

5. Regelung

Das Ziel dieses Regelungsentwurfs ist es, für jeden Betriebspunkt diejenigen Ströme einzustellen, bei denen die geringsten Verluste für eine gegebene Drehzahl und ein gewünschtes Moment auftreten. Dies erfordert vorab die Kenntnis des Strompaares i_d und i_q , für welches dies zutrifft. Dieses Strompaar ist folglich aus den Gesamtverlusten zu bestimmen, wie dies im voranstehenden Kapitel bereits skizziert wurde. Die Bestimmung dieses Sollwertpaares in der Regelung geschieht durch Interpolation in Kennfeldern, wie in einem späteren Unterkapitel beschrieben wird.

In der Vergangenheit wurden bereits einige Arbeiten zur Minimierung der Verluste durch die Regelung durch Online-Algorithmen vorgestellt. In diesen Arbeiten wird jedoch üblicherweise die Eisenverlustrechnung durch ein Modell, mit einem zusätzlichen Widerstand, modelliert. In [16] wird dieser Widerstand in den d-q-Teilmodellen eingeführt. Dabei wird die Bestimmung der Eisenverluste durch die Steinmetzformel bewerkstelligt. Im vorgestellten Modell werden die Eisenverluste und die Kupferverluste in Abhängigkeit vom Drehmoment, der Kreisdrehzahl und dem d-Strom ermittelt.

Die in dieser Arbeit entwickelte Regelung wird im Folgenden nur in der Simulation dargestellt. Die Realisierung und deren Auswertung ist Gegenstand einer Nachfolgearbeit.

Eine Online-Berechnung des Wertepaares ist entsprechend dem in Kapitel 4 vorgestellten Algorithmus möglich, vermutlich aber, da in Flächen über einer Ebene interpoliert werden muss, zu langsam. Die Berechnungsdauer mit dem in Hinblick auf Rechengeschwindigkeit keineswegs optimierten Algorithmus beträgt im Schnitt mehrere hundert Millisekunden. Letztlich ist jedoch eine Berechnungsdauer im Bereich einer Millisekunde wünschenswert, um bei hohen dynamischen Anforderungen die Vorsteuerwerte und das Sollwert-Strompaar ausreichend schnell zu berechnen.

Bei dem gewünschten Ansatz ist eine klassische Unterscheidung in Bereiche wie Grunddrehzahlbereich und Feldschwächbereich bzw. Bereich konstanten Drehmoments und konstanter Leistung nicht mehr sinnvoll und möglich. Das Kriterium, ab wann die Ströme so eingestellt werden müssen, dass auch für dynamische Lastfälle noch ausreichend Stellreserve zur Verfügung steht, bleibt selbstverständlich die aktuelle Zwischenkreisspannung. Jedoch wird in der Regelung dann nicht direkt Einfluss auf den d-Strom genommen, sondern nur das Drehmoment begrenzt. Damit kann die Regelung weiterhin den Bestpunkt im Sinne einer Verlustminimierung einstellen.

Die Regelung soll im Unterschied zu bekannten Regelungsstrukturen nicht mit konstanten Motorparametern, Streckenbeobachtern und Störgrößenaufschaltung ausgeführt werden, sondern in Abhängigkeit vom Betriebspunkt in jedem Rechenzyklus einen zu den Strömen passenden Parametersatz durch lineare Interpolation in Parameter-Kennfeldern einlesen.

Falls die Motorparameter richtig identifiziert wurden, sorgt dies dafür, dass die im Weiteren vorgestellte Regelung mit Vorsteuerung nicht weitere Rechenzyklen zum Einschwingen benötigt. Dies wäre insbesondere bei Lastsprüngen der Fall. Eine Schwierigkeit hierbei besteht darin, dass der Fluss, der von den Magneten in der Maschine erzeugt wird, nicht messtechnisch bestimmt werden kann. In dem im Folgenden beschriebenen Modell wurde der Magnetfluss rein rechnerisch ermittelt. Die Bestimmung der Magnetflussverkettung geschieht durch Auswertung der Drehmomente der einzelnen Betriebspunkte.

5.1 Regelstrecke

Die Gleichungen für die Regelstrecke wurden bereits in Kapitel 2 aufgestellt. Der später verwendete Umrichter und die Messtechnik die zur Regelung benötigt wird, werden hier nicht dargestellt.

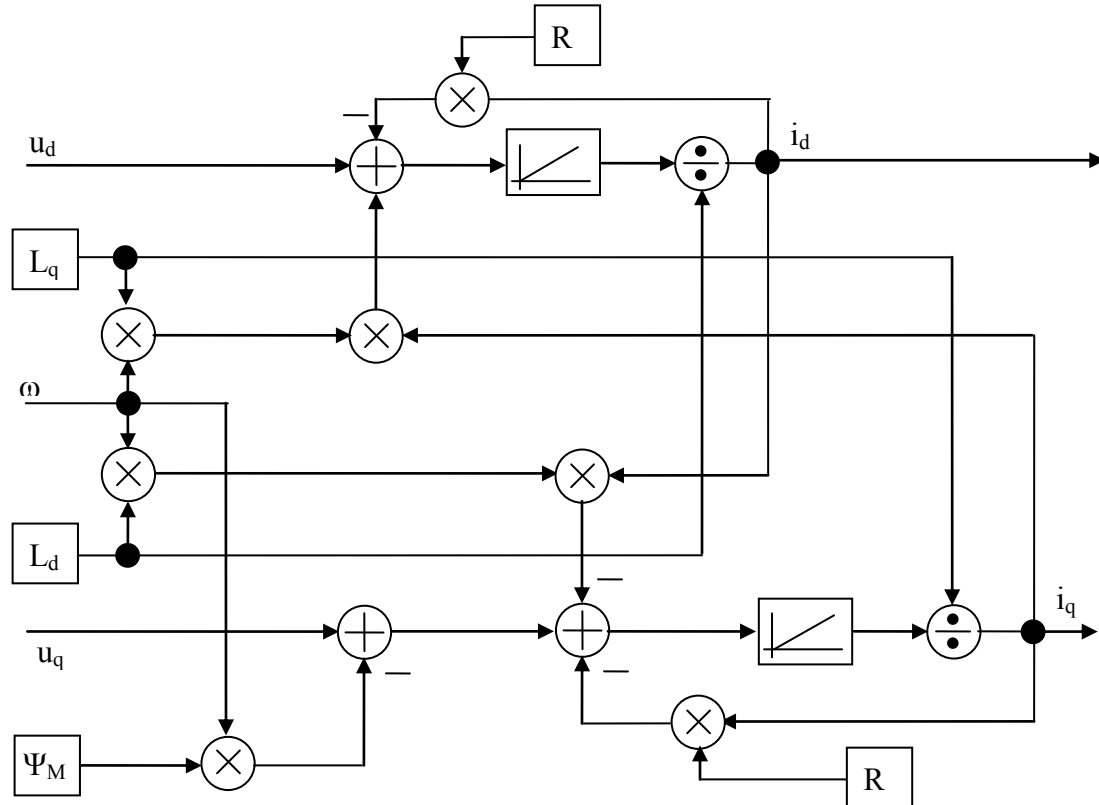


Bild 5.1.1: Regelungstechnisches Blockschaltbild für die Ströme

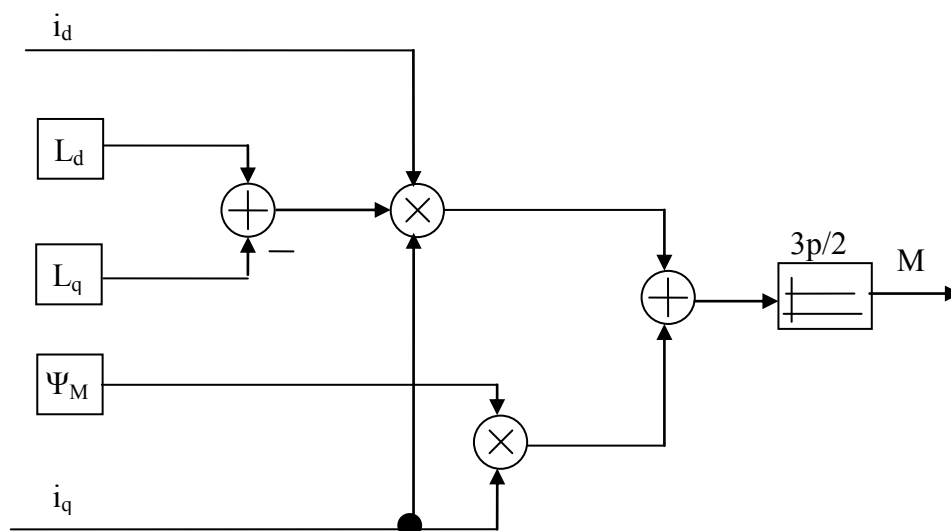


Bild 5.1.2: Regelungstechnisches Blockschaltbild für das Drehmoment

Die regelungstechnischen Blockschaltbilder werden durch Umformung aus den Gleichungen 2.3.5, 2.3.6 und 2.3.7 gewonnen.

$$i_d = \frac{1}{L_d} \cdot \int_0^t (u_d - R \cdot i_d + \omega \cdot L_q \cdot i_q) dt \quad (5.1.1)$$

$$i_q = \frac{1}{L_q} \cdot \int_0^t (u_q - R \cdot i_q - \omega \cdot (\Psi_M + L_d \cdot i_d)) dt \quad (5.1.2)$$

$$M = \frac{3 \cdot p}{2} \cdot (\Psi_M \cdot i_q + (L_d - L_q) \cdot i_d \cdot i_q) \quad (5.1.3)$$

Keiner der in den Blöcken dargestellten Maschinenparameter ist konstant. Die magnetischen Parameter sollen, wie bereits angesprochen durch Interpolation in Kennfeldern für jeden Betriebspunkt eingelesen werden.

Der Widerstand ist ausschließlich temperaturabhängig. In einem Regelungsmodell wird für die Bestimmung des aktuellen Werts im Allgemeinen ein thermisches Modell hinzugefügt. Dies wird hier nicht berücksichtigt.

5.2 Erweitertes Motormodell

Für die Simulation der Regelstrecke wurde in MATLAB/SIMULINK ein erweitertes Modell der PMSM erstellt, das die reellen Effekte aufgrund des magnetischen Verhaltens besser nachbilden soll als das im vorangehenden Kapitel dargestellte Modell der Regelstrecke.

Die folgenden Darstellungen stammen direkt aus der graphischen Programmieroberfläche SIMULINK.

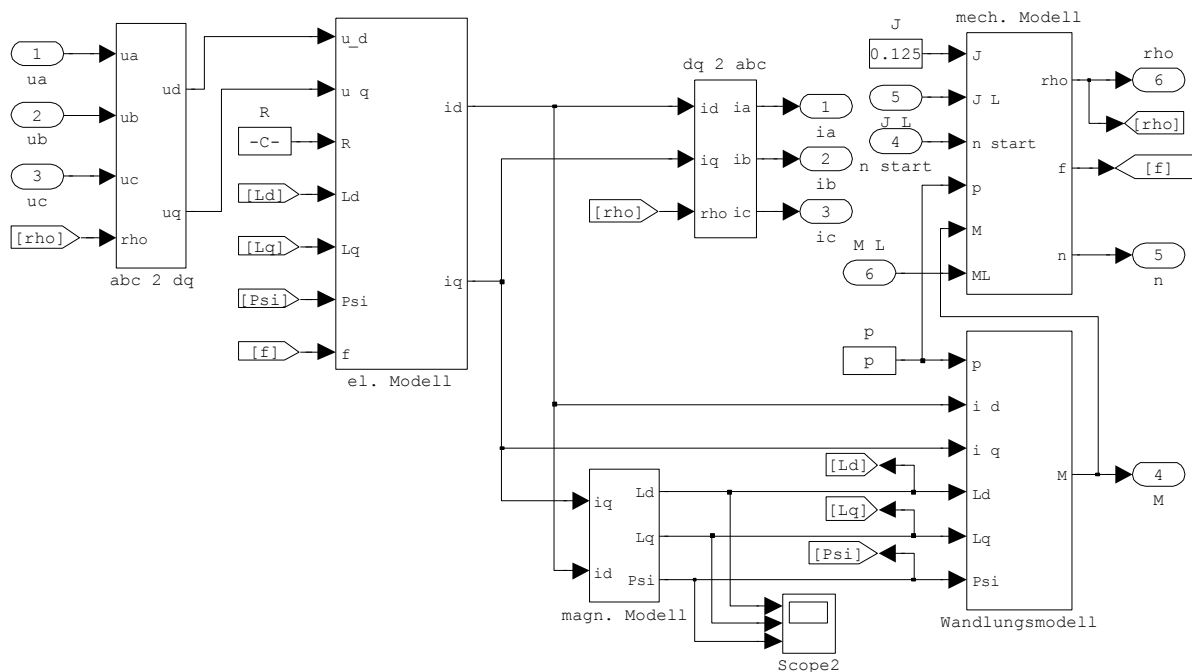


Bild 5.2.1: Erweitertes regelungstechnisches Blockschaltbild

Das einfache Modell in Kapitel 5.1 wird hier durch folgende Teile ergänzt.

- Koordinatentransformation vom Dreiphasensystem in das d-q-System
- Koordinatentransformation vom d-q-System in das Dreiphasensystem
- Modell zur betriebspunktabhängigen Bestimmung der magnetischen Parameter
- Ein mechanisches Modell zur Bestimmung der Änderungen am Betriebspunkt

Das elektrische Modell entspricht dem bekannten regelungstechnischen Blockschaltbild aus Bild 5.1.1. Das Wandlungsmodell entspricht dem Blockschaltbild 5.1.2.

Das magnetische Modell enthält die in den Diagrammen in Kapitel 4 dargestellten Kennfelder $L_{dd}(i_d, i_q)$, $L_q(i_d, i_q)$ und $\Psi_M(i_d, i_q)$.

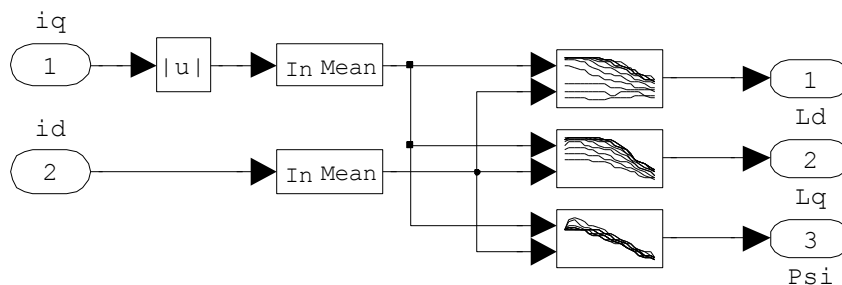


Bild 5.2.2: Magnetisches Modell

Die Koordinatentransformationen sind die bekannten Parkschen Transformationen.

Die Betragsbildung wird notwendig, weil im Kennfeld ausschließlich positive q-Ströme abgebildet werden können. Die Mittelwertbildung ist nicht zwingend erforderlich, allerdings bringt die Berücksichtigung der durch Schaltvorgänge im Umrichter bedingten Stromänderungen keine wesentliche Erkenntnis in Bezug auf das Betriebsverhalten der PMSM.

Im mechanischen Modell wird das Trägheitsmoment des Rotors berücksichtigt, und es wird möglich, äußere Einflüsse auf den Antriebstrang, wie weitere Trägheitsmomente und Last-Drehmomente, sowie eine Startdrehzahl zu berücksichtigen. Ausgegeben werden an dieser Stelle Drehzahl n , elektrische Frequenz f und absoluter Lagewinkel ρ .

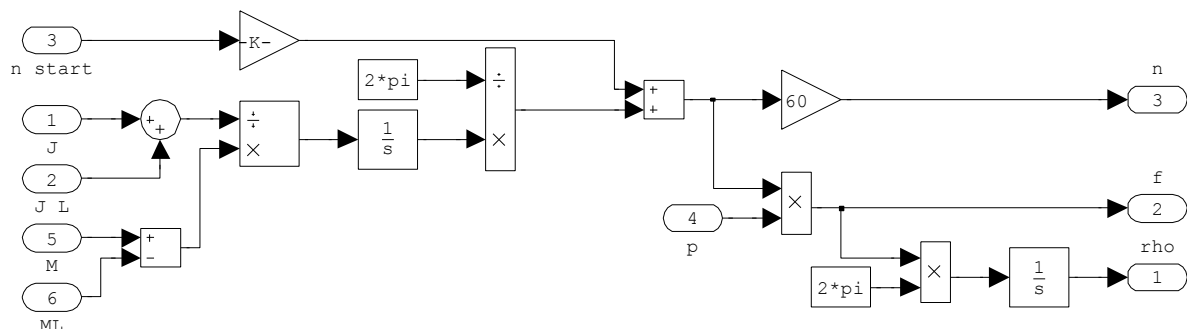


Bild 5.2.3: Mechanisches Modell

5.3 Kennfelder

Um Kennfelder zur Bestimmung von i_{dw} und i_{qw} in der Regelung zu entwickeln, wurde zunächst das Raster der Funktion $M(i_d, i_q)$ (Bild 4.3.33) durch zweidimensionale lineare Interpolation verfeinert. Dazu wurde in MATLAB eine Funktion „verbreitern.m“ geschrieben, in der man die Schrittweite für i_d und i_q vorgeben kann. Der Quelltext befindet sich im Anhang.

Anschließend wurden die Gesamtverluste, wie z.B. in den Bildern 4.3.45 bis 4.3.48 dargestellt und im Anhang in Tabellenform in einem Drehzahlraaster von 1200 min⁻¹ abgelegt, in ein dreidimensionales Datenfeld als Datei „PV_I_N.mat“ (.mat sind zur Anwendung in MATLAB formatierte Daten) zur Verwendung in den im Weiteren beschriebenen MATLAB-Funktionen gewandelt. Der Dateiname drückt die Abhängigkeit der Verluste von den Strömen und der Drehzahl aus.

Weitere in MATLAB realisierte Funktionen wandeln die Abhängigkeit der Verlustfunktion $P_V(i_d, i_q, n)$ in eine Abhängigkeit $P_V(M, n)$ vom Moment und der Drehzahl. Im Weiteren wird dann für alle Wertepaare i_d, i_q für die $M = \text{const.}$ gilt, dasjenige Wertepaar gesucht, welches die geringsten Gesamtverluste aufweist. Die Einzelwerte i_d bzw. i_q dieser Wertepaare werden dann in Kennfeldern $i_d(M, n)$ und $i_q(M, n)$ abgelegt und später in der Regelung verwendet. Die Funktionen sind im Anhang als Quelltext angehängt.

In der ersten Funktion „Kennfeld.m“ (die Endung .m kennzeichnet MATLAB-Funktionen) werden die Datenfelder angelegt und zwei weitere Funktionen aufgerufen.

In der in „Kennfeld.m“ aufgerufenen Funktion „Strompaare.m“ wird das verfeinerte Kennfeld der Momente $M(i_d, i_q)$ geladen und durch die Suchfunktion „find.m“ werden, jeweils für ein gegebenes Moment M und eine bestimmte Drehzahl n , die Strompaare bestimmt, für die die angegebene Bedingung $M+0.1 \geq M \geq M-0.1$ gilt.

In der zweiten, in „Kennfeld.m“ aufgerufenen, Funktion wird nun noch aus „PV_I_N.mat“ der Wert der Gesamtverluste ausgelesen, der für die Wertepaare i_d, i_q für den jeweiligen Betriebspunkt mit Drehmoment M , und Drehzahl n mit den geringsten Verlusten gilt.

Für alle drei Kennfelder wurde durch Interpolation mit Polynomen dritter Ordnung die Schrittweite der zugrunde liegenden Achsen M und n verfeinert. Mit der Funktion „polyfit.m“ in MATLAB wurden die Koeffizienten der passenden Polynome bestimmt.

Der Fluss, der von den Magneten in verschiedenen Betriebspunkten, aufgrund der Einflüsse durch die Ströme in der PMSM resultiert, wurde in einer weiteren MATLAB-Funktion ermittelt. Dabei handelt es sich selbstverständlich um eine reine Rechengröße, deren Existenz nur durch Bestimmung des richtigen Drehmoments in den Betriebspunkten gerechtfertigt ist. Das Moment ist auch die Berechnungsgrundlage in der MATLAB-Funktion „Psi_interp.m“.

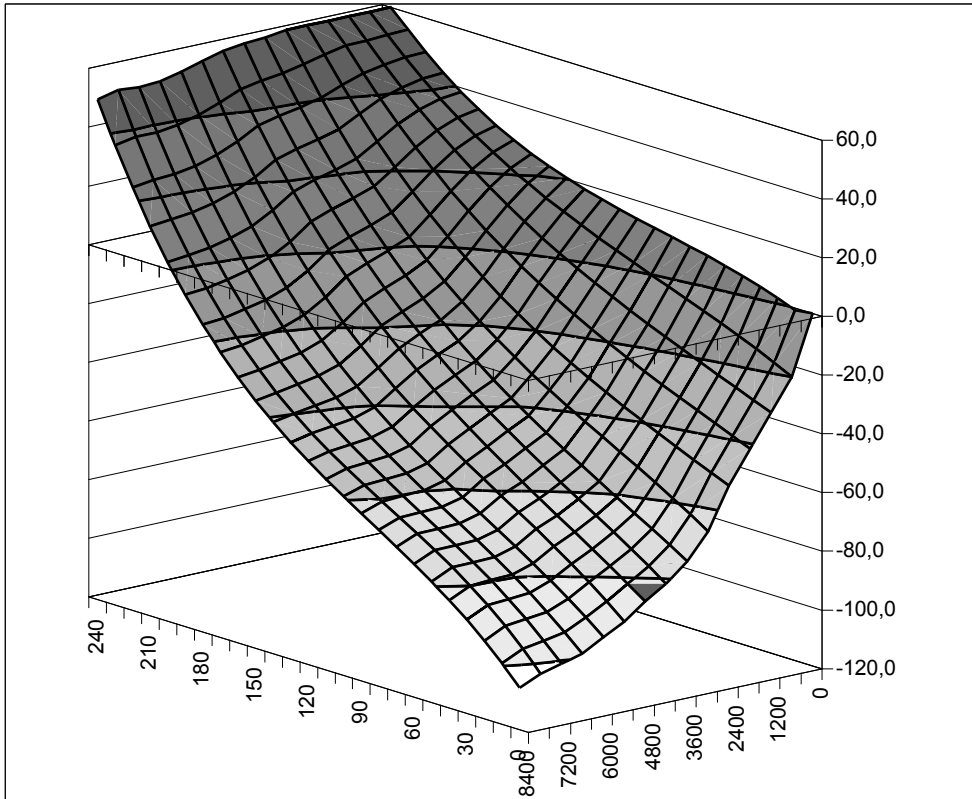


Bild 5.3.1: Längsstrom i_d in A für minimale Verluste über M und n

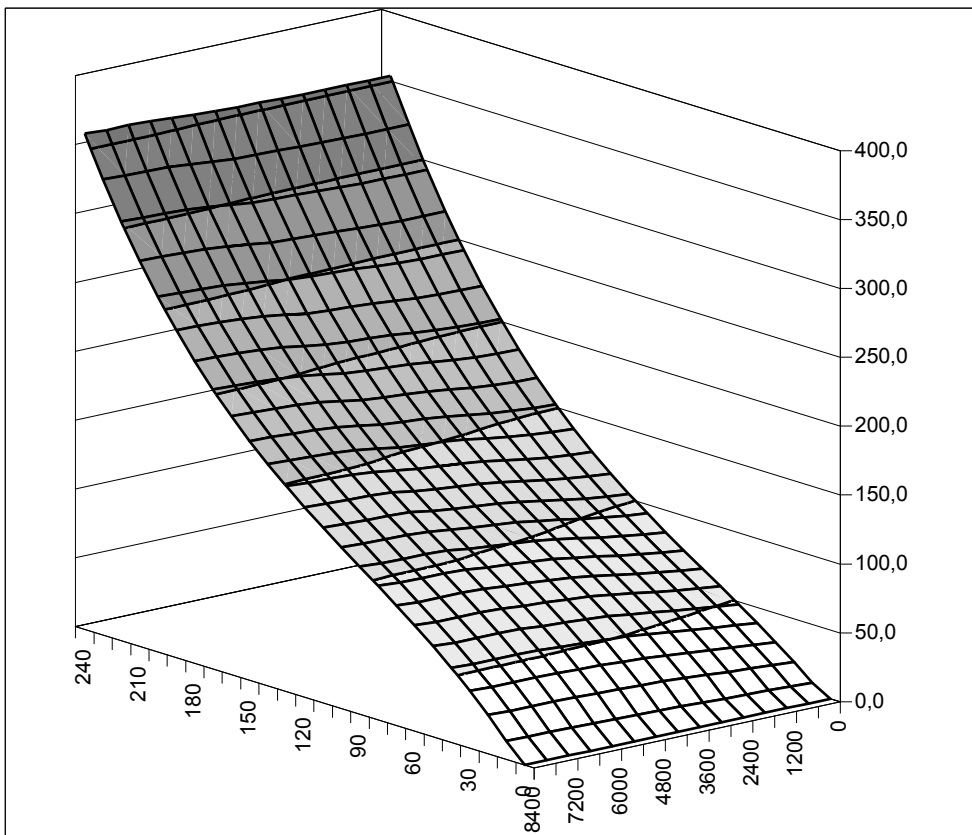


Bild 5.3.2: Querstrom i_q in A für minimale Verluste über M und n

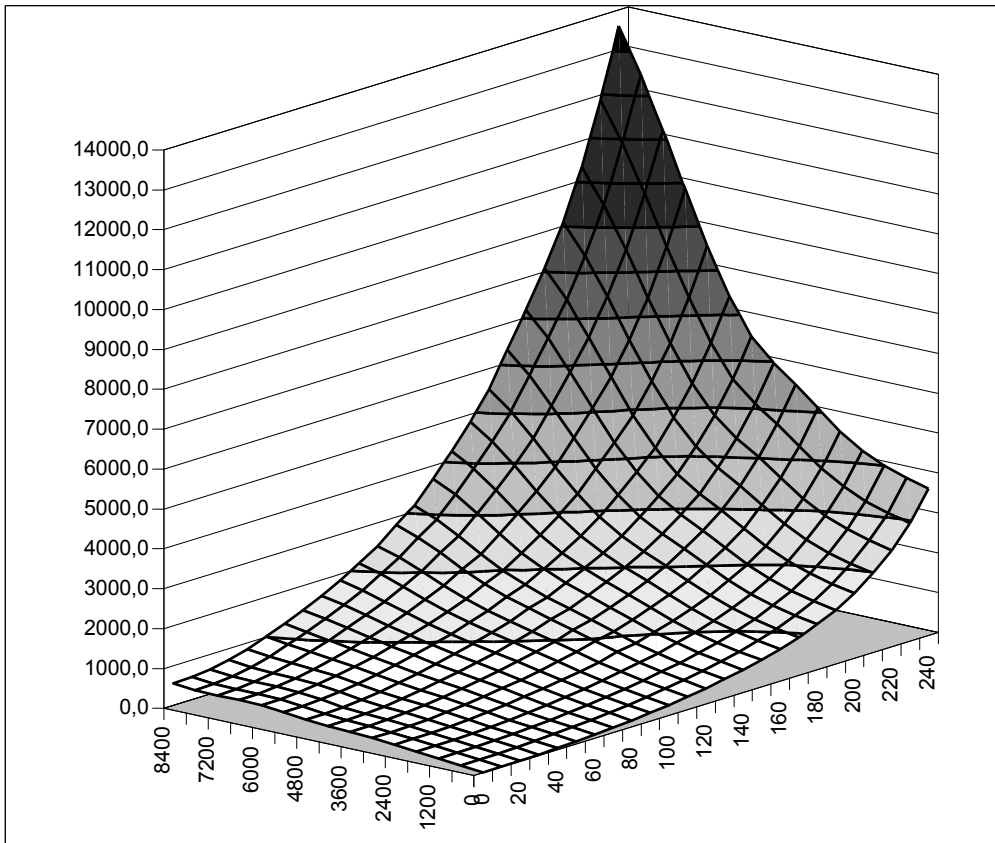


Bild 5.3.3: Minimierte Verluste P_V in W über M und n

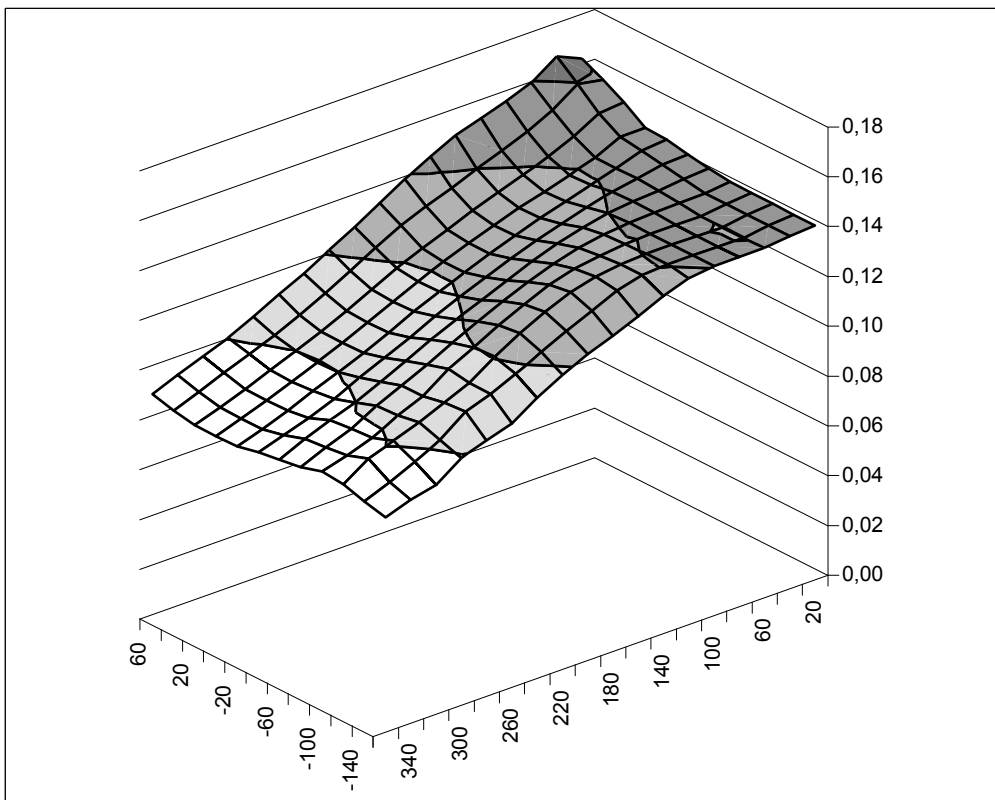


Bild 5.3.4: Virtueller Magnetfluss Ψ_M in Vs in den Betriebspunkten

5.4 Stromregelung mit Vorsteuerung

Mit der Kenntnis der Strompaare für eine verlustoptimierte Ansteuerung aller Betriebspunkte kann nun eine simple Stromregelung für den Querstrom und den Längsstrom aufgebaut werden.

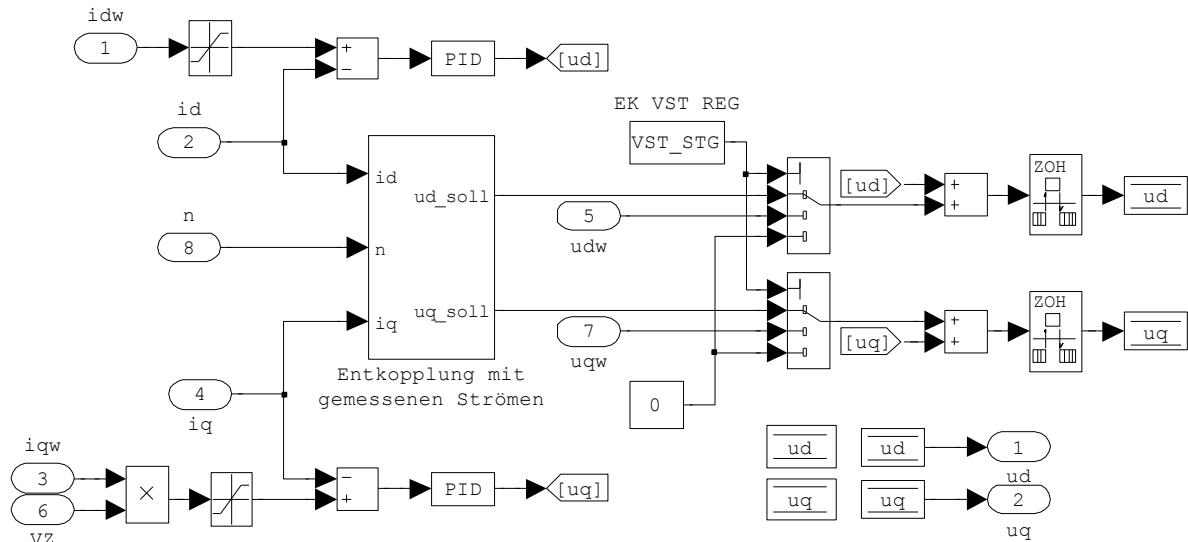


Bild 5.4.1: Stromregelung für den komplexen Strom

Die Sollwerte werden begrenzt: Der Längsstromsollwert auf Werte von $-160\text{A} \leq i_d \leq 60\text{A}$, der Querstromsollwert auf Werte von $-320\text{A} \leq i_q \leq 320\text{A}$.

Die Reglereinstellung erfolgte für die Simulation der Einfachheit halber empirisch. Die Reglerwerte für die reale Regelung werden in einer Folgearbeit ermittelt. Es wurden aus den Simulinkblöcken für die PID-Regler nur Werte für den Proportionalanteil und den Integrationsanteil eingetragen.

Aus dem vorangehenden Block werden die auf den Kennfeldern basierenden Spannungswerte u_d und u_q als Vorsteuerwerte addiert. Wahlweise können auch auf bekannte Art aus den gemessenen Strömen mit Hilfe eines Entkopplungsnetzwerks die Anteile eliminiert werden, die vom jeweils anderen Stromanteil abhängen. Da dies jedoch einer Vorsteuerung, was die Verbesserung der Dynamik angeht, relativ gleichwertig ist, wird hier darauf verzichtet, dies eingehender zu betrachten. Alternativ kann auch auf beides, die Vorsteuerung, sowie das Entkopplungsnetzwerk verzichtet werden, um die Regelgüte und Regelgeschwindigkeit in der Simulation zu beurteilen. Auch dies soll hier nicht weiter erörtert werden.

Die Halteglieder am Ende der Regelstruktur schreiben die Stellwerte mit einer der Schaltfrequenz des Umrichtermodells entsprechenden Frequenz auf Speicher, aus denen das Umrichtermodell mit entsprechender Koordinatentransformation und Raumzeigermodulation mit den Stellwerten bedient wird.

5.5 Momentführung

Wie vorab beschrieben erfolgt die Absenkung des Magnetflusses im Statoreisen nicht mit der Spannungs-Stellreserve als Kriterium. Der Fluss wird nur indirekt begrenzt. Die eigentliche Beschränkung findet im Drehmoment statt.

Der Anstieg des Wunschkrafts wird durch eine Anstiegsbegrenzung limitiert. Da in den folgenden Blöcken die Stromsollwerte aus den Kennfeldern gewonnen werden und für den Querstrom nur Kennfelder mit positiven Strömen vorliegen, wird hier der Momentwunsch in Betrag und Vorzeichen aufgespalten. Die untere Momentgrenze beträgt somit immer null.

Aus der aktuellen Zwischenkreisspannung wird mit dem aus der Regelung geforderten Betrag der Raumzeigerspannung, nach Glättung durch einen Mittelwertbildner, eine Größe mit Namen SR (Stellreserve) gebildet. Die eigentliche Reserve liegt allerdings in einem offset, der im Block Momentbegrenzung hinzugefügt wird.

Als Kriterium wann eine Momentbegrenzung stattfindet, dient sowohl die Größe SR mit einem offset, als auch der Querstrom. Über je ein Hystereseglied wird im Block Momentbegrenzung entweder durch die Stellreserve, oder durch die Stromgrenze der Ausgangswert des Momentbegrenzers umgeschaltet und eine Integration mit dem Wunschmoment als Startwert initialisiert. Diese Integration ist Teil eines PI-Reglers, der die Stellreserve mit dem offset als Eingangsgröße hat. Der Ausgang dieses PI-Reglers ergibt die momentane Momentgrenze.

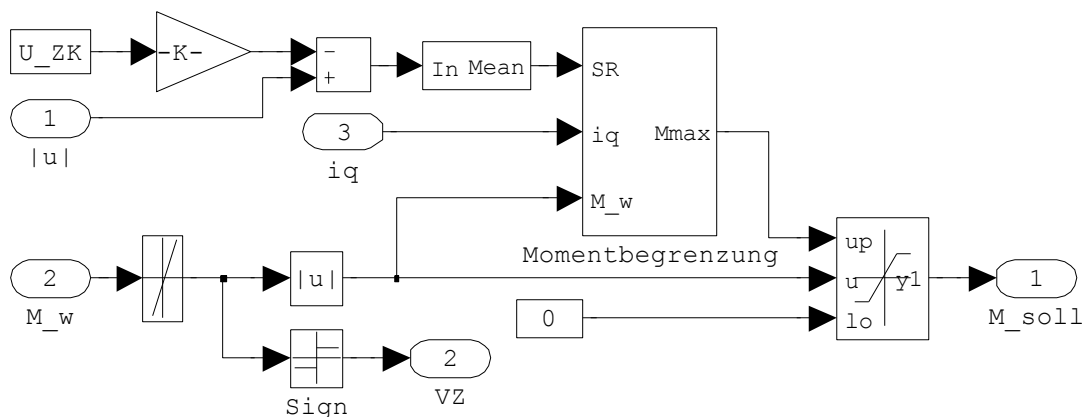


Bild 5.5.1: Momentführung

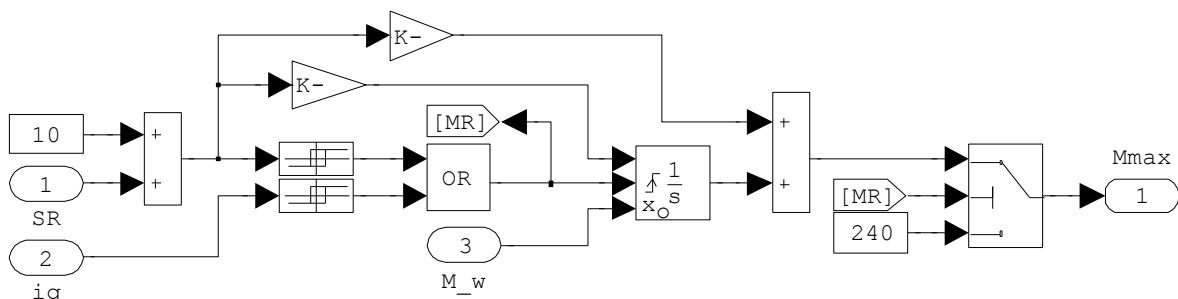


Bild 5.5.2: Momentbegrenzung

5.6 Regelungsstruktur

In der vollständigen Regelungsstruktur sind zusätzlich zu den vorab beschriebenen Blöcken noch die Koordinatentransformationen, die Raumzeigermodulationen, sowie ein sehr einfaches Umrichtermodell vorhanden. Da diese Modelle hinlänglich bekannt sind, soll hier darauf verzichtet werden diese Modelle zu beschreiben.

Weitere Blöcke dienen zur Eingabe von Lastmomenten, lastseitigen Trägheitsmomenten und der Vorgabe einer Startdrehzahl in den mechanischen Teil des Motormodells.

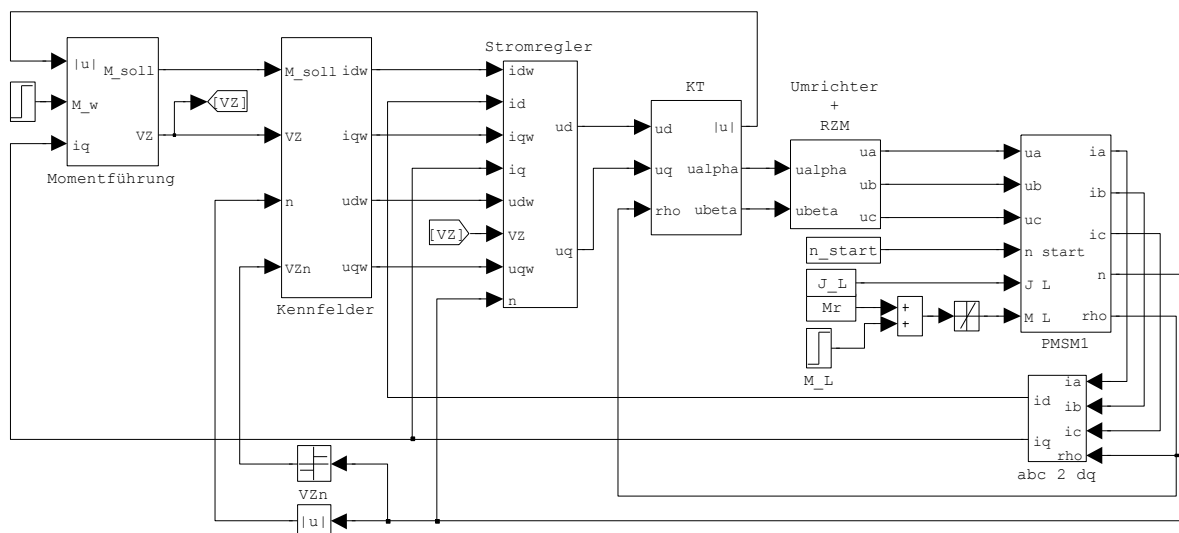


Bild 5.5.1: Regelungsstruktur

5.7 Simulationsergebnisse

An dieser Stelle werden einige Simulationsergebnisse vorgestellt, die die Wirkung der verlustoptimierten Regelung darstellen sollen. Hierbei wird klar ersichtlich, dass ein deutlicher Unterschied bei der Wahl des Strompaares bei der verlustoptimierten gegenüber der herkömmlichen Regelungsstrategie vorliegt. Der Unterschied in den Verlusten ist vor allem im Leerlauf und bei Teillast ersichtlich.

In den folgenden Diagrammen sind die dargestellten Werte jeweils bei 2400 min^{-1} und Lastmomentsprüngen von 40 Nm nach jeweils $0,1 \text{ s}$, beginnend bei 0 Nm und endend bei 200 Nm , simuliert worden. Bei den Verlustdiagrammen wurden die Bereiche der Lastsprünge auf zwei Diagramme aufgeteilt, da die Unterschiede sonst nicht deutlich werden. In den ersten beiden Diagrammen geht das Moment nur bis 120 Nm , in den beiden letzten Diagrammen werden die Verluste bei 160 Nm und 200 Nm dargestellt

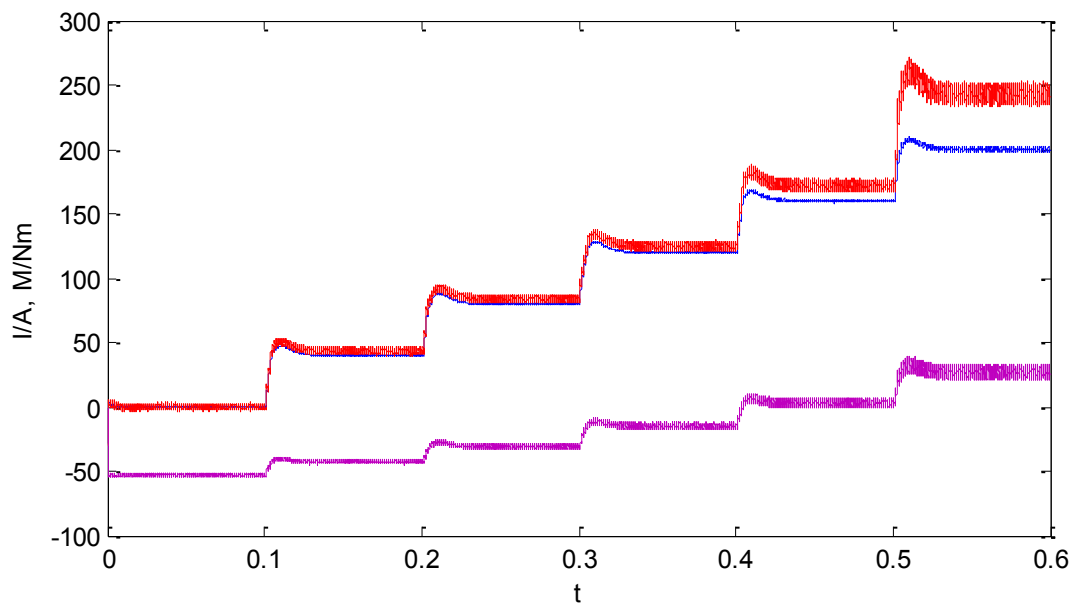


Bild 5.7.1: Querstrom i_q (rot), Längsstrom i_d (lila) und Drehmoment M (blau)

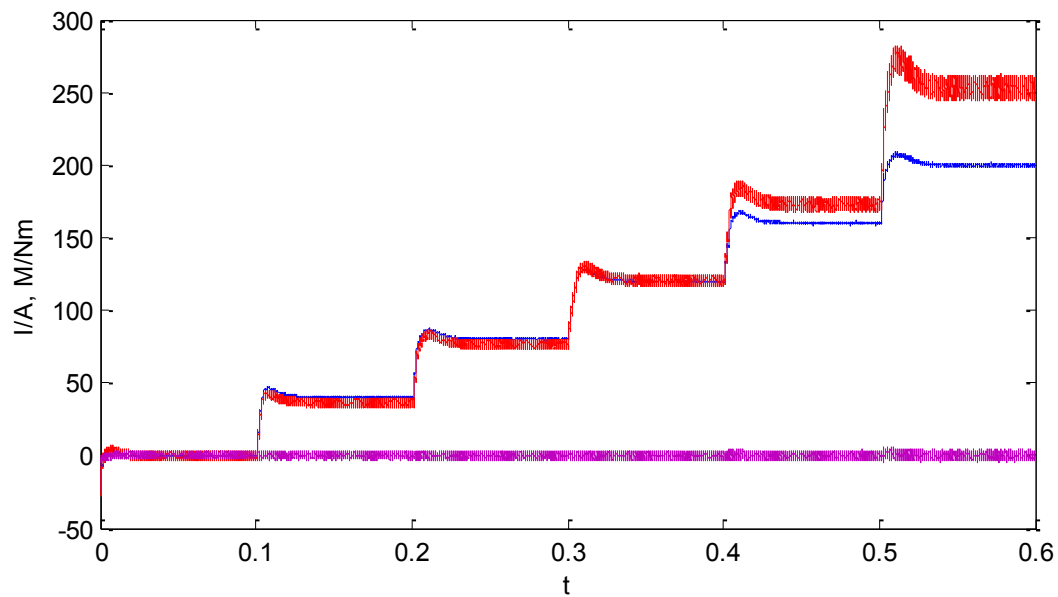


Bild 5.7.2: Querstrom i_q (rot), Längsstrom i_d (lila) und Drehmoment M (blau)

In Bild 5.7.1 sind die Ströme und das Moment mit der verlustoptimierten, in Bild 5.7.2 mit herkömmlicher Regelung dargestellt. Die Unterschiede scheinen nicht sehr groß zu sein. Lediglich der Längsstrom unterscheidet sich deutlich.

Der Querstrom bei hohen Momenten ist bei der verlustoptimierten Regelung aufgrund des positiven Längsstroms etwas kleiner als üblich, hingegen bei kleinen Momenten im Gegensatz dazu aufgrund des negativen Längsstroms etwas größer.

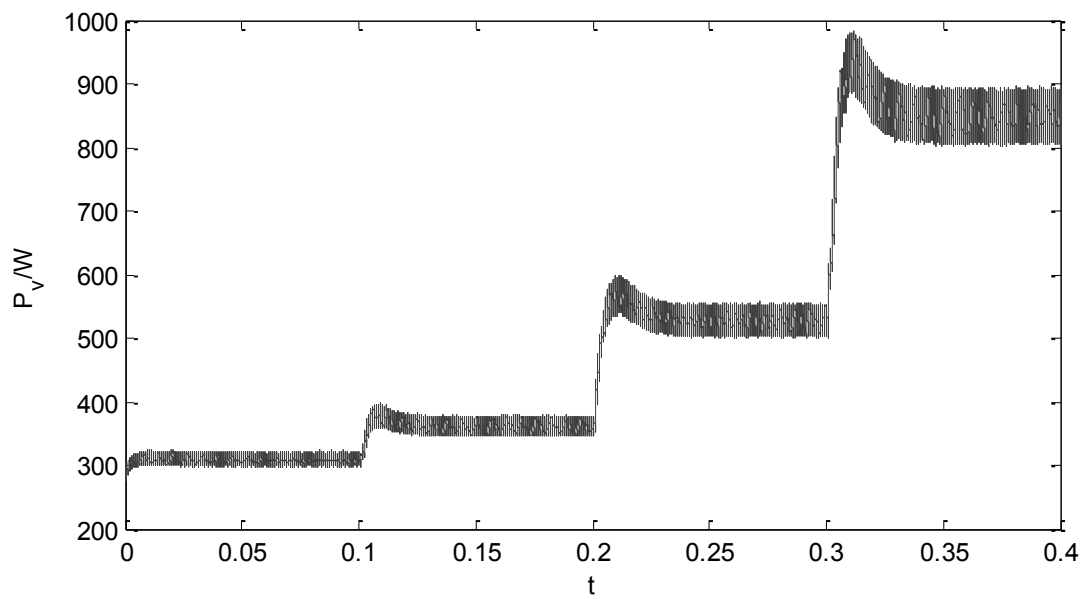


Bild 5.7.3: Verluste bei herkömmlicher Regelungsstrategie

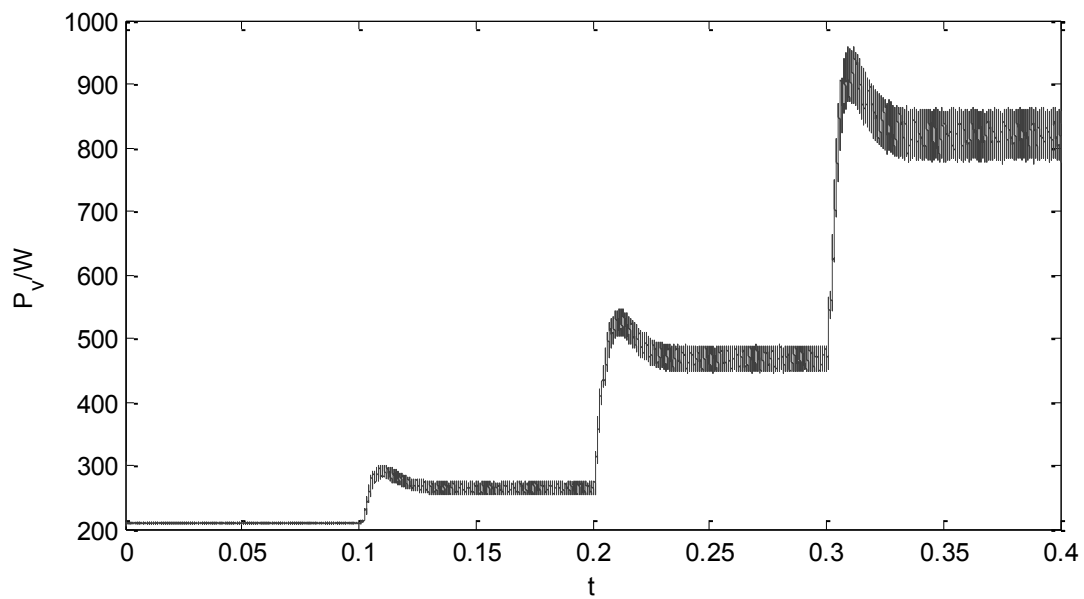


Bild 5.7.4: Verluste mit verlustoptimierter Regelungsstrategie

Aus den Bildern 5.7.3 und 5.7.4 wird klar ersichtlich, dass bei kleinen Drehmomenten der Unterschied in den Verlusten relativ gesehen sehr groß ist.

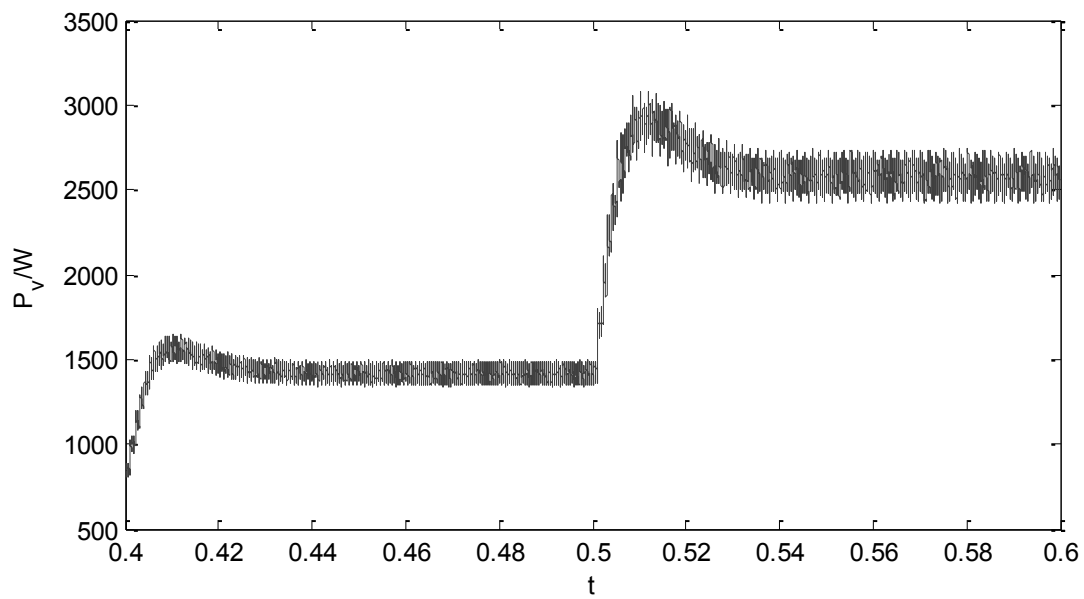


Bild 5.7.5: Verluste bei herkömmlicher Regelungsstrategie

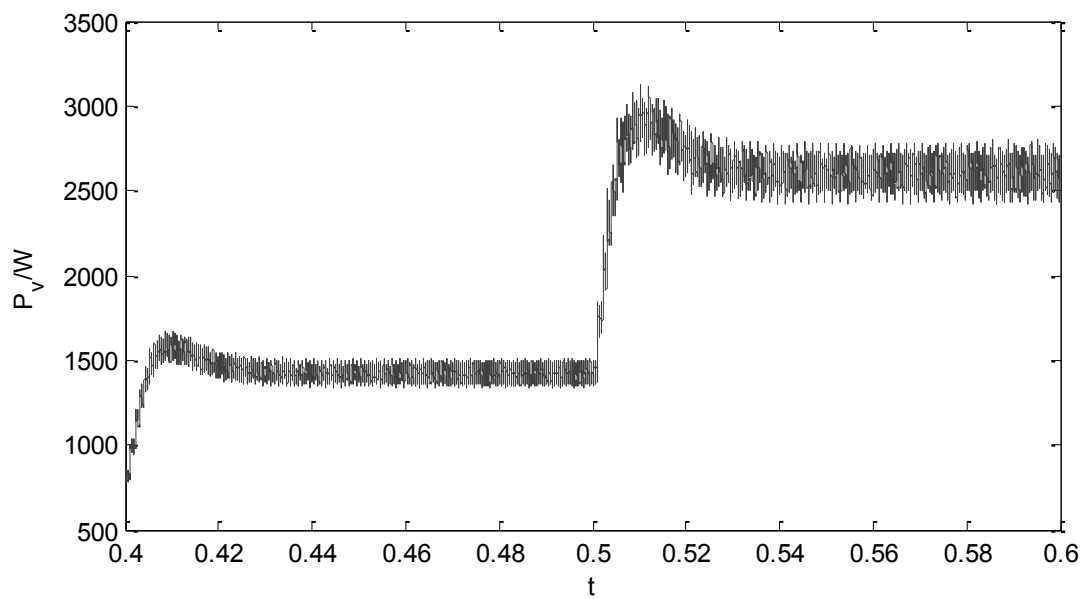


Bild 5.7.6: Verluste mit verlustoptimierter Regelungsstrategie

Bei den großen Momenten 160 Nm und 200 Nm ist praktisch kein Unterschied bei den Verlusten feststellbar.

6. Prüfstand

Der Maschinenprüfstand wurde größtenteils im Zuge dieser Arbeit aus vorhandenen Komponenten an der TU Berlin entwickelt. Teilweise wurden neue Komponenten, die zur Prüfung sowohl des Motors, als auch der Funktionsfähigkeit der verlustoptimierten Regelung notwendig waren, erstellt. Dies waren im Wesentlichen der Maschinenumrichter und die Regelungshardware, wie auch die Automatisierung des Prüfstands.

Da der Prüfstand nur Mittel zum Zweck für diese Arbeit ist, erfolgt hier grundsätzlich nur eine kurze Beschreibung der Komponenten. Allerdings haben die Komponenten auf die Ergebnisse im nächsten Kapitel dieser Arbeit wesentlichen Einfluss. Dies soll in diesem Kapitel erläutert werden.

6.1 Wechselrichter und Zwischenkreisspannung

Der Wechselrichter wurde im Zuge einer Diplomarbeit [5] an der TU Berlin erstellt. Das Besondere an diesem Wechselrichter in Bezug auf diese Arbeit, sind die folgenden Eigenschaften.

- Die Pulsmuster werden außerhalb des Wechselrichters in der Regelung erzeugt. Dies ermöglicht die freie Programmierung der Regelung. Die Schaltfrequenz kann somit bis zu einem Maximum von 16 kHz frei gewählt werden. Es muss jedoch bei maximaler Schaltfrequenz der Strom und somit die Leistung begrenzt werden. Für die Messungen innerhalb dieser Arbeit wurde eine Schaltfrequenz von 10 kHz gewählt.
- Der Leistungselektronik ist flüssigkeitsgekühlt. Die Kühlung wird in den Kühlkreislauf für den Motor mit eingebunden. Dies ergibt Verhältnisse, die denen in einem Hybridfahrzeug ähnlich sind. Es können daher Situationen in einem HEV, wie Anfahren am Berg etc. nachgestellt werden.
- Der Wechselrichter wird direkt aus einer Gleichspannungsquelle gespeist. Als Quelle wurde, wie bereits erwähnt, ein Maschinenumformer mit einer maximalen Spannung von 500V verwendet. Die Leistung dieses Maschinenumformers genügt für Vollastbetrieb des Motors.

6.2 Regelung

Die Regelung wurde in einer Studienarbeit [6] und einer weiteren Diplomarbeit [7] an der TU Berlin erstellt. Sie basiert auf dem im voranstehenden Kapitel beschriebenen Regelungsentwurf.

Die hier vorgestellte Regelung wurde in diesen Arbeiten zeitdiskretisiert, und es wurden weitere Blöcke hinzugefügt.

Bei der Realisierung wurden basierend auf einem digitalen Signalprozessorsystem von d-Space (DS1104) alle notwendigen Schnittstellen zum und vom Motor hinzugefügt. Die mechanische Winkellageerfassung geschieht über einen Resolver und die Auswertung über einen R/D-Wandler im Signalprozessorsystem. Die Phasenströme werden nach der Erfassung durch Stromwandler und Wandlung in Spannungssignale über AD-Wandler in der Regelung verarbeitet. Die Zwischenkreisspannung wird der Regelung ebenso über Wandler zugeführt.

Die Ausgangssignale zur Wechselrichteransteuerung gehen über eine Verstärkerelektronik an den Wechselrichter.

6.3 Belastungseinheit

Die Belastungseinheit besteht aus einer Gleichstrommaschine mit einer Bemessungsleistung von 60 kW. Die Eckdrehzahl beträgt bei Betrieb an 400V 2350 min^{-1} . Das Nennmoment beträgt 245 Nm. Es kann durch Feldschwächung eine Drehzahl von 6500 min^{-1} erreicht werden. Die Maschine wird drehzahl geregelt über einen Gleichrichter betrieben.

6.4 Temperiereinheit

Um sowohl den Prüfling, als auch den Wechselrichter zu kühlen bzw. zu temperieren, steht ein Temperiergerät der Firma Single zur Verfügung, das über einen Rückkühler die Wärmeleistung bei Betrieb der Motor-Wechselrichtereinheit entzieht.

Die Ansteuerung dieses Geräts, wie auch aller anderen Komponenten des Prüfstands, geschieht über einen Automatisierungsrechner, der alle Messvorgänge und die dazugehörigen Abläufe steuert.

6.5 Messtechnik

Die Messtechnik besteht hauptsächlich aus einem Leistungsmessgerät der Firma Zimmer (LMG310), das alle notwendigen Strangströme und Klemmenspannungen erfasst und intern in einem digitalen Signalprozessor auswertet. Die mechanischen Größen Drehzahl und Drehmoment werden durch eine Messwelle der Firma Staiger Mohilo (Typ 0260 DM) erfasst und dem Leistungsmessgerät zugeführt. Das Drehmoment wird analog vom LMG ausgewertet, die Drehzahl über einen digitalen Eingang. Dies ermöglicht die zeitgleiche Erfassung aller elektrischen und mechanischen Messgrößen. Eine Messung eines Betriebspunktes wird durch dieses Automatisierungssystem angestoßen. Es kann hierbei eingestellt werden wie eine Mittelung der Messwerte erfolgt. Üblicherweise wird im Messgerät (LMG) eine Mittelung nach dem sliding-window-Verfahren über 1,2,4,8 oder 16 aufeinander folgende Messwerte durchgeführt. Durch die Automatisierung werden mehrere solcher Messungen hintereinander angestoßen, die vom Automatisierungssystem aufgezeichnet werden und über die dann bei der Auswertung unter Ausschluss der fehlgeschlagenen Messungen gemittelt wird.

Dem Automatisierungssystem werden noch zusätzlich Informationen wie Wicklungstemperaturen sowie die Vorlauftemperatur des Temperiergeräts zugeführt, die zeitsynchron mit den Messungen aus dem Leistungsmessgerät abgelegt werden.

6.6 Beschränkungen durch die Prüfstandskomponenten

Leider ist der Gleichrichter, der den Motor antreibt, nur für den Betrieb bis ca. 220V ausgelegt. Daher beträgt die Eckdrehzahl nur ca. 1800 min^{-1} . Dies bedeutet, dass für Messungen über ca. 3000 min^{-1} nicht mehr genügend Stellreserve vorhanden ist, um alle Betriebspunkte anzufahren. Zudem wird das Feld des Antriebsmotors über ein Netzgerät gespeist. Dies führt dazu, dass der Motor ständig in der Feldschwächung betrieben wird.

Der Gleichrichter ist ein Gerät älterer Bauart mit analoger Regelung. Dies führt, da der Gleichrichter nur unzulänglich auf den Antriebsmotor abgestimmt ist, zu Schwankungen in der Drehzahl. Bei kleiner Belastung durch den Prüfling wirkt sich dies stärker aus als bei größeren Lasten. Die Tatsache, dass der Motor immer in der Feldschwächung arbeitet, verstärkt diesen Effekt. Folglich werden die beiden Regelungen, Antriebs- bzw. Belastungsmotorregelung und Prüflingsregelung, ständig gegeneinander arbeiten, was zu einer Schwingneigung des gesamten Prüfsystems führt.

Die Spannung aus dem Maschinenumformer schwankt bei höheren Leistungen relativ stark. Daher kann bei hohen Drehzahlen und Leistungen die Regelgenauigkeit der PMSM nicht genau eingehalten werden. Dies führt wiederum zu einer Beschränkung der Messpunkte und zu einer Minderung der Messgenauigkeit.

All diese Effekte führen zu Einschränkungen bei den Messungen, wie sie im nächsten Kapitel beschrieben sind. Aufgrund dieser Einschränkungen wurden folgende Festlegungen für die Messungen getroffen.

- Alle elektrischen Leistungsmessungen werden im Leistungsmessgerät über ein Fenster von 4 Messwerten gemittelt.
- Es werden pro Betriebspunkt 10 Messungen in Folge aufgezeichnet, über die dann bei der Auswertung gemittelt wird. In einigen Fällen wird im folgenden Kapitel auf die Abweichungen der einzelnen Messreihen, in Bezug auf die gemittelten Werte, eingegangen.
- Die Zwischenkreisspannung wird abhängig von der Drehzahl bei maximalem Strom festgelegt. Der Grund hierfür liegt in der Dauer der einzelnen Schaltpulse. Ist die Schaltpulsdauer größer, treten sowohl in der Spannung, als auch im Strom weniger schaltfrequente Harmonische auf. Dies erhöht die Messgenauigkeit bei kleiner Belastung wesentlich. Zudem verringert sich so der Effekt, der aufgrund des Unterschieds zwischen absoluter und differentieller Induktivität entsteht.

Es hat sich bei den Messaufzeichnungen gezeigt, dass die Resolver signale mit einem Quantisierungsfehler behaftet sind. Dies führt zu einem kleinen Winkelfehler, der wiederum bei höheren Drehzahlen stärker ins Gewicht fällt. Um diesen Fehler weitgehend auszugleichen, wurde für jede Drehzahl ein Korrekturwinkel eingeführt, der durch Anwendung von positivem Längsstrom ohne Querstrom und ohne anliegendes Drehmoment ermittelt wurde.

7. Vergleich der Berechnungs- und Messwerte des Motors

Zur Verifikation der berechneten Maschinendaten wurden auf dem vorab beschriebenen Prüfstand Messungen durchgeführt.

Die erste Messung dient der Bestimmung des Statorwiderstands bei ca. 20°C Raumtemperatur und akklimatisierter PMSM. Die einzelnen Strangwiderstände wurden durch Messung der Spannung über den Strängen bei einem Gleichstrom von 10 A durch den Strang bestimmt. In guter Übereinstimmung mit dem berechneten Wert ergab sich ein über alle drei Stränge gemittelter Wert $R_{\text{Str}} = 18,9 \text{ m}\Omega$. In den folgenden Messungen wurde mit einer gemessenen mittleren Wicklungstemperatur der aktuelle Widerstand berechnet und für die Berechnung der Betriebsparameter herangezogen.

Die maximale Wicklungstemperatur überstieg bei den Messungen der Betriebspunkte bei 600 min^{-1} und einem Stromraster $-120\text{A} \leq i_d \leq 40\text{A}$, einem Stromraster $-220\text{A} \leq i_q \leq 220\text{A}$ jeweils in Schritten von 20A nie den Wert von 70°C. D.h. der Temperatureinfluss bei den Messungen ist gering und könnte theoretisch vernachlässigt werden. Bei sehr kleinen Strangspannungen und kleinen Strömen i_q ist allerdings bereits ein kleiner Einfluss störend, da dieser Einfluss als prinzipieller Fehler in die Berechnung der Querinduktivität aus der Spannung u_d eingeht.

Die zweite Messung ist die Leerlaufmessung bei verschiedenen Drehzahlen im Drehzahlraster der Berechnungsgrundlage. Aus dieser Messung wird der Magnetfluss bestimmt und anhand der Harmonischen in der Spannung der Luftspaltfluss untersucht. Dies wird den ersten Hinweis auf den Erfolg des Maschinenentwurfs hinsichtlich des Verhältnisses L_d/L_q geben.

Auch bei diesen Messungen wurden die Strangwerte gemittelt, sowohl über die drei Stränge, als auch über mehrere Messungen. Die Messwerte der Messreihe für 600 min^{-1} hängen als Tabelle an. Die maximale Abweichung der Einzelmessungen dieser Messreihe vom Mittelwert beträgt 0,51%. Da dies auch auf die Messreihen bei höheren Drehzahlen zutrifft, wurden diese Messungen nur zum Vergleich der Ergebnisse herangezogen. Diese Messungen werden hier nicht dargestellt, da sich gezeigt hat, dass die Differenzen zur Messung bei 600 min^{-1} klein sind.

Die dritte Messung ist die Kurzschlussmessung. Sie wird den ersten Aufschluss über die Längsinduktivität geben und somit eine Aussage hinsichtlich des Fehlerverhaltens des Motorentwurfs ermöglichen. Diese Messungen fanden in demselben Drehzahlraster wie die Leerlaufmessungen statt. Die Auswertung wurde für die Drehzahl 3600 min^{-1} vorgenommen, da hier der Realanteil im Strom mit Sicherheit hinreichend klein ist. Die maximal auftretende Abweichung in den einzelnen Strangströmen der Messungen beträgt 0,83% vom Mittelwert über alle Messungen und über die drei Stränge.

Die Messungen zur Bestimmung der Betriebsparameter sind wie bereits diskutiert mit prinzipiellen Messfehlern für bestimmte Betriebspunkte behaftet. Um diese Fehler so klein wie möglich zu halten, wurden die Betriebsparameter bei ca. 600 min^{-1} bestimmt, da hierbei, aufgrund der relativ kleinen Polradspannung, die Zwischenkreisspannung klein gehalten werden kann. Die Zwischenkreisspannung wurde auf $U_{\text{ZK}} = 150 \text{ V}$ eingestellt. Dies ergibt die maximale Strangspannung von $U_{\text{Str}} = 61 \text{ V}$. Durch die kleinen zu messenden Spannungen wird natürlich der absolute Messfehler durch die Messinstrumente stärker in die Messungen eingehen.

Zur Bestimmung der Betriebsparameter wurden die oben beschriebenen Stromraster im Prüffeld automatisiert abgefahren. Innerhalb jeder Messung wurde durch das Leistungsmessgerät eine Mittelwertbildung nach dem „sliding window“ Verfahren mit einer Fensterbreite von vier Messwerten ausgeführt. Darüber hinaus wurden an jedem Messpunkt 10 Messwerte aufgenommen. Die ersten drei Messpunkte wurden, da sich nicht bei jedem Betriebspunkt der eingeschwungene Zustand gleich zu Beginn der Messwertaufnahme eingestellt hat, nicht berücksichtigt. Über die verbleibenden sieben Messpunkte wurde dann bei der Auswertung in „MATLAB“ gemittelt. Diese aufwändige Mittelung wurde aufgrund der in Kapitel 6 beschriebenen Effekte beim Prüfstandsantrieb in Kombination mit der Regelung des Prüflings durchgeführt.

7.1 Maschinenparameter

7.1.1 Magnetflussverkettung und Luftspaltfluss

Bei $602,4 \text{ min}^{-1}$ ergibt sich ein Strangspannungs-Effektivwert von $U_P = U_{Str} = 27,6 \text{ V}$ bei einer elektrischen Frequenz von $f = 50,2 \text{ Hz}$. Die Magnetflussverkettung ergibt sich somit zu:

$$\Psi_M = \frac{\sqrt{2} \cdot U_{Str}}{\omega} = 123 \text{ mVs} \quad (7.1.1)$$

Dieser Wert unterscheidet sich deutlich vom berechneten Wert, der 142 mVs beträgt. Die Erklärung hierfür kann in der Fertigung gesucht werden. Zum einen mussten die Magnet Taschen nach dem Backen, aufgrund von Verschiebungen der Bleche, untereinander nachgearbeitet werden, was zu einem höheren Luftspalt zwischen Blech und Magneten sorgt. Zum anderen entstehen an den Schnittkanten durch die Wärme des Lasers unisolierte Stellen im Blech, die Grate aufweisen. An diesen Stellen treten Wirbelströme auf, die dem Magnetfluss entgegenwirken. Eine weitere Unsicherheit besteht in der Remanenzinduktion der Magnete, die gegenüber den Herstellerangaben abweichen kann.

Der Unterschied zwischen gerechnetem und gemessenem Wert liegt bei ca. 13% reduziertem Magnetfluss.

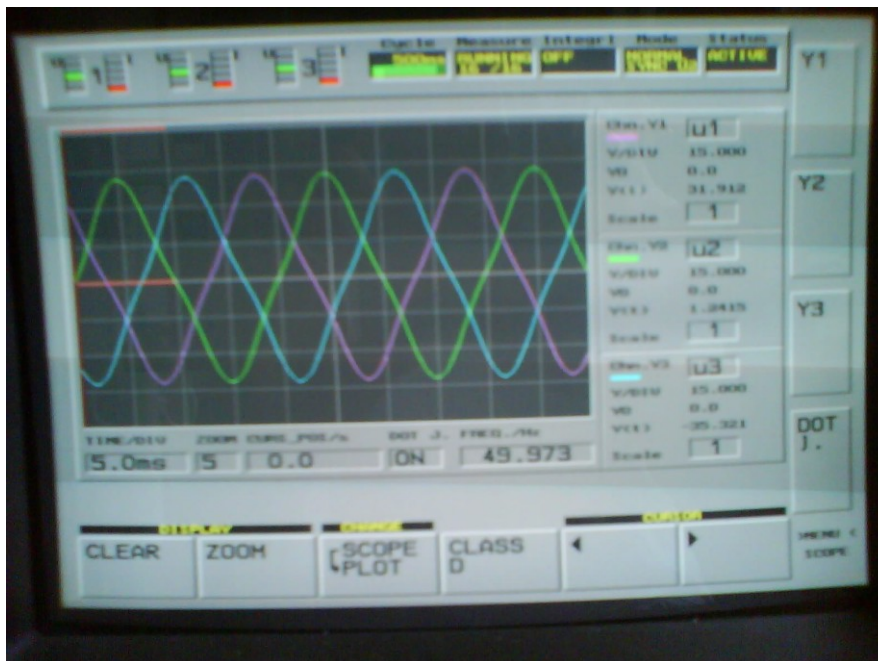


Bild 7.1.1: Polradspannung U_P

In Bild 7.1.1 kann man den Einfluss der Rotorgeometrie auf den Luftspaltfluss bereits erkennen. Die Flussdichteverteilung im Luftspalt wird durch die spektrale Aufteilung der gemessenen Spannung verdeutlicht. Der Einfluss der Wicklung verhindert eine genauere Betrachtung.

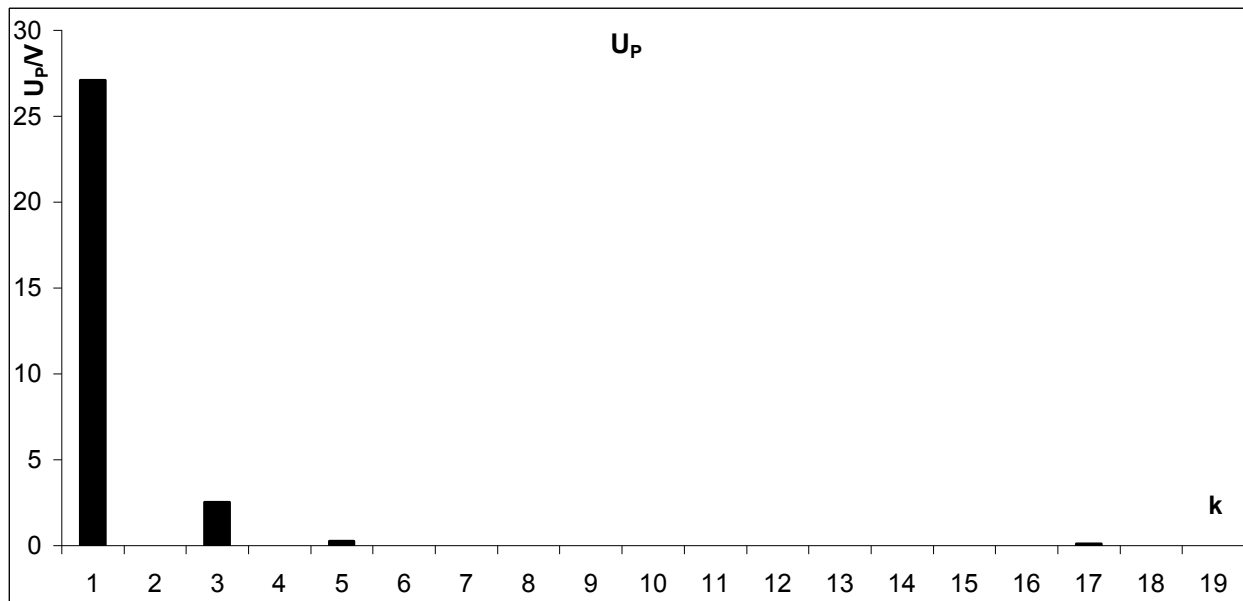


Bild 7.1.2: spektrale Verteilung der Polradspannung U_p

Klar zu erkennen ist, dass im Wesentlichen, wie vorhergesagt, die dritte Harmonische in der Spannung mit einem Wert von ca. 9% des Grundschwingungswertes auftritt. In der numerischen Berechnung der Luftspaltflussdichte betrug der Wert der 3. Harmonischen 23,4% des Grundwellenwertes.

7.1.2 Längsinduktivität

Aus (4.2.1) folgt:

$$L_d \approx \frac{\Psi_M}{\sqrt{2} \cdot I_k} = 0,94 \text{ mH}$$

mit dem Kurzschlussstrom $I_K = 92,4 \text{ A}$ bei 3600 min^{-1} . Bei dieser Drehzahl kann man davon ausgehen, dass der Realanteil im Strom deutlich kleiner ist, als der induktive Stromanteil bzw., dass die Reaktanz aufgrund der elektrischen Frequenz um zwei Größenordnungen größer ist, als der Wirkwiderstand. Das Diagramm Drehmoment über Drehzahl bei Kurzschluss im nächsten Teilkapitel rechtfertigt diese Annahme.

Der berechnete Wert beträgt $L_d = 1,04 \text{ mH}$. Der Unterschied lässt sich wiederum mit den oben genannten Fertigungseffekten erklären. Wobei hierzu angemerkt sei, dass es sich beim berechneten Wert aufgrund der Berechnungsmethode um die differentielle Längsinduktivität handelt im Gegensatz zur gemessenen Induktivität, bei der es sich um die absolute Grundwelleninduktivität handelt. Da jedoch bei nahezu entmagnetisiertem Statoreisen der Unterschied zwischen den beiden Induktivitäten vernachlässigbar ist, zeigt der Vergleich klar auf, dass die Magnetflussverkettung durch die Permanentmagnete, wie bereits festgestellt, kleiner ist als erwartet. Zudem liegt der Kurzschlussstrom I_K geringfügig über dem erwarteten Wert von ca. 88 A.

7.1.3 Betriebsinduktivitäten

Die Bestimmung der Betriebsinduktivitäten geschieht bei Umrichterbetrieb. Dies erschwert die Ermittlung der Werte, wie bereits diskutiert. Speziell die Querinduktivität bei kleinen Strömen wird deutlich von den berechneten Werten abweichen.

Die Gegenüberstellung der Längsinduktivität ist ebenfalls problematisch, da die bisher gezeigten berechneten Werte der Längsinduktivität die differentiellen Werte sind. Die Berechnung der absoluten Induktivität gestaltet sich schwierig, da bei kleinen Werten des Längsstroms und nahezu konstanter Flussverkettung die Werte deutlich zu groß werden.

Zum Vergleich wird hier die differentielle Längsinduktivität aus der Berechnung den gemessenen Werten der absoluten Längsinduktivität gegenüber gestellt. Zumindest bei kleinen Querströmen und Längsströmen im negativen Bereich bis zu maximal $i_d = 0A$ werden durch die nicht vorhandene Sättigung im Statoreisen die Werte vergleichbar sein.

Die Berechnung der Werte aus den gemessenen Spannungswerten geschieht wie folgt.

Zunächst wird aus dem vorgegebenen Vorsteuerwinkel und dem gemessenen Phasenwinkel der Polradwinkel bestimmt.

$$\gamma = \arctan\left(\frac{-i_d}{i_q}\right) \quad (7.1.2)$$

$$\vartheta = \gamma + \varphi \quad (7.1.3)$$

Der Polradwinkel ϑ wird zur Berechnung der Spannungen u_q und u_d herangezogen.

$$u_q = \sqrt{2} \cdot U_1 \cdot \cos(\vartheta) \quad (7.1.4)$$

mit dem Grundschnungsspannungswert U_1 aus der Messung der Harmonischen der Spannungen und Ströme.

$$u_d = -\sqrt{2} \cdot U_1 \cdot \sin(\vartheta)$$

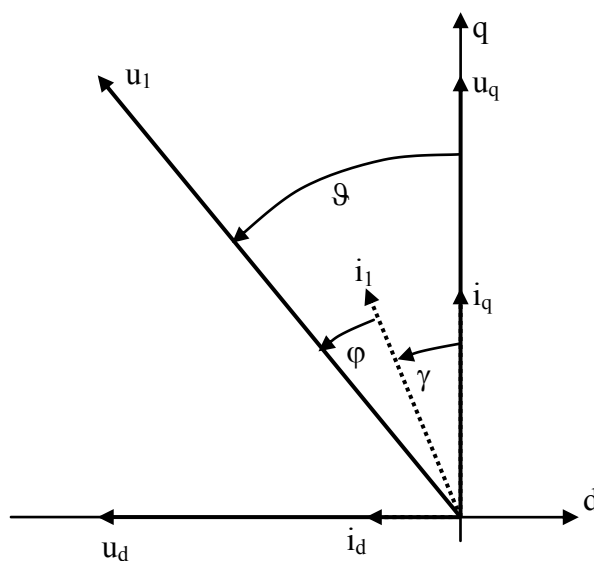


Bild 7.1.3: Elektrische Winkel im Zeigerdiagramm

Die Magnetflussverkettung bei Umrichterbetrieb wird in Abhängigkeit vom Querstrom bei $i_d = 0$ A bestimmt.

$$\Psi_M(i_q) = \frac{u_q - R \cdot i_q}{\omega} \quad (7.1.5)$$

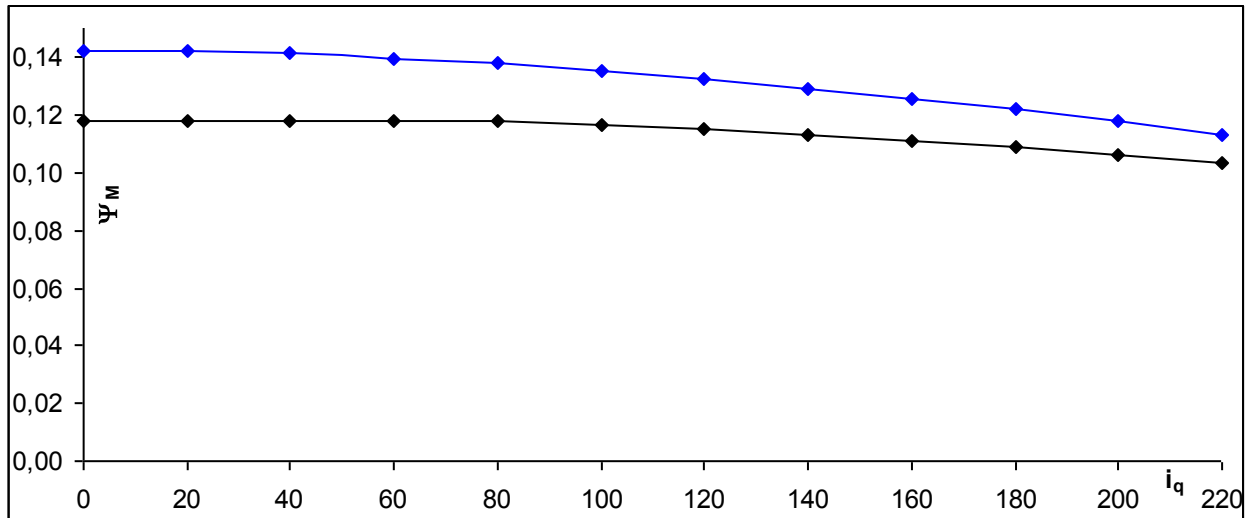


Bild 7.1.4: Berechnete und gemessene Magnetflussverkettung Ψ_M

Wie in allen folgenden Diagrammen der Maschinenparameter werden die gemessenen Werte in schwarzer Farbe dargestellt.

In diesem Fall liegt der maximale Wert der Magnetflussverkettung noch etwas unterhalb des durch die Leerlaufmessung ermittelten Werts.

Für L_d , bzw. L_q gelten unter Berücksichtigung der stromabhängigen Flussverkettung:

$$L_d = \frac{u_q - R \cdot i_q - \omega \cdot \Psi_M(i_q)}{\omega \cdot i_d} \quad (7.1.6)$$

$$L_q = \frac{R \cdot i_d - u_d}{\omega \cdot i_q} \quad (7.1.7)$$

Die folgenden Diagramme zeigen, dass wie erwartet die Reduktion der gemessenen Induktivität im Vergleich zur Rechnung bestätigt wird. Der Verlauf entspricht ebenso der Erwartung. Tabellenwerte befinden sich im Anhang.

Durch den vergrößerten Luftspalt verkleinern sich die Sättigungseffekte. Die Sättigung tritt in der realen Maschine offensichtlich später und abgeschwächt ein, wie dies aus der Scherung von Magnetkreisen durch Vergrößerung des Luftspalts zu beobachten ist.

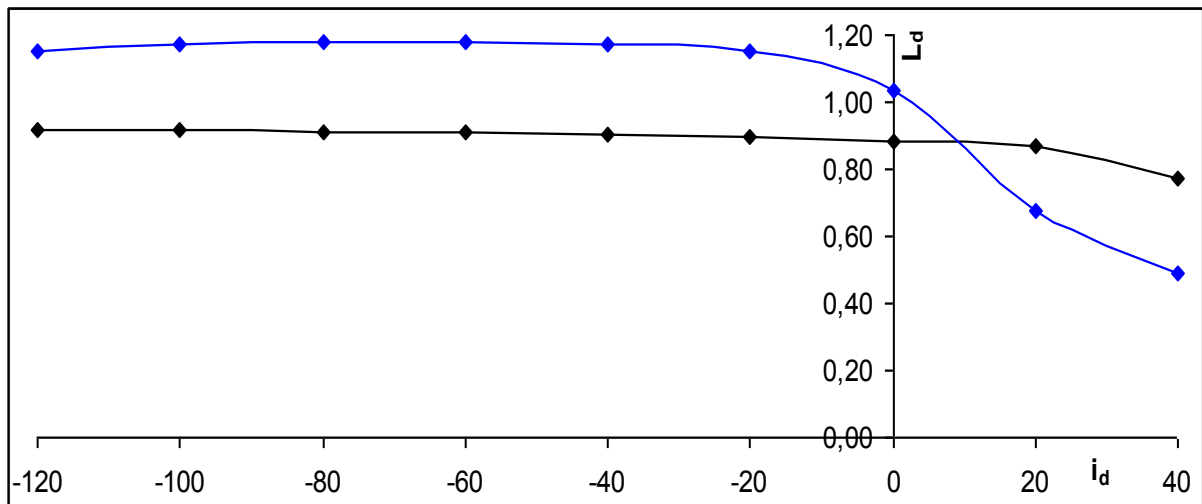


Bild 7.1.6: Vergleich der Längsinduktivität bei $i_q = 0A$

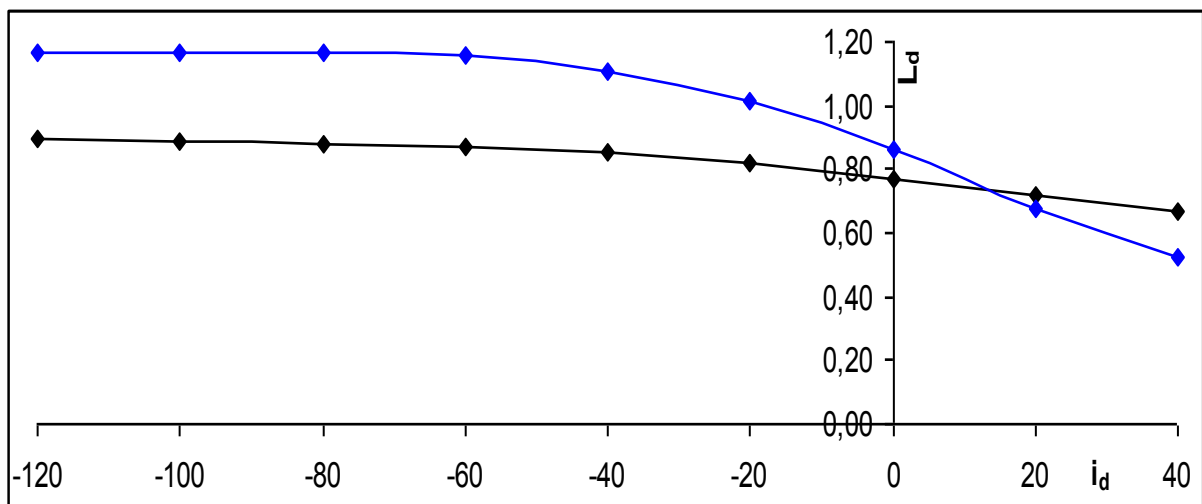


Bild 7.1.7: Vergleich der Längsinduktivität bei $i_q = 100A$

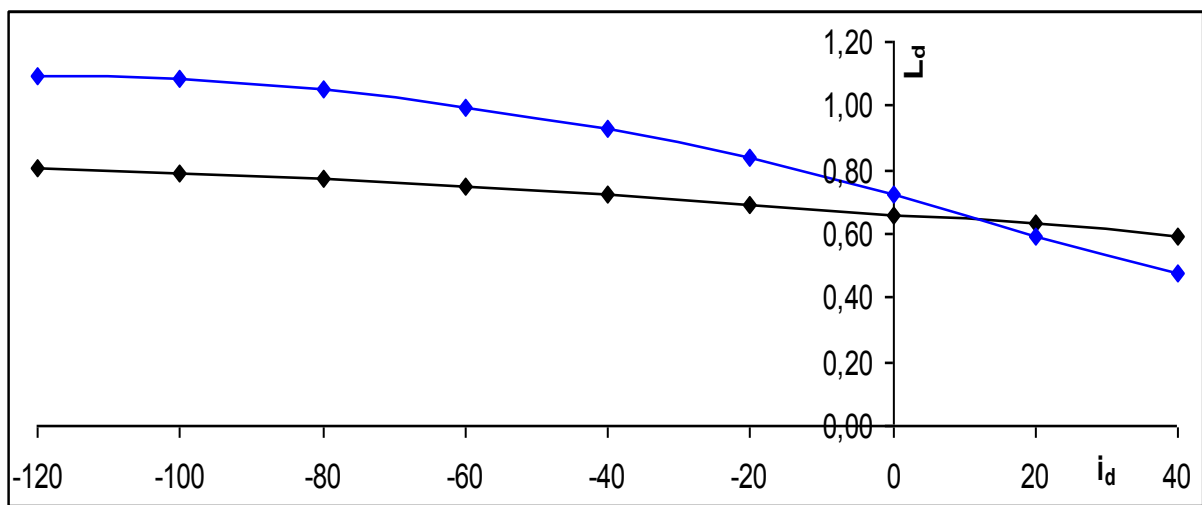


Bild 7.1.8: Vergleich der Längsinduktivität bei $i_q = 200A$

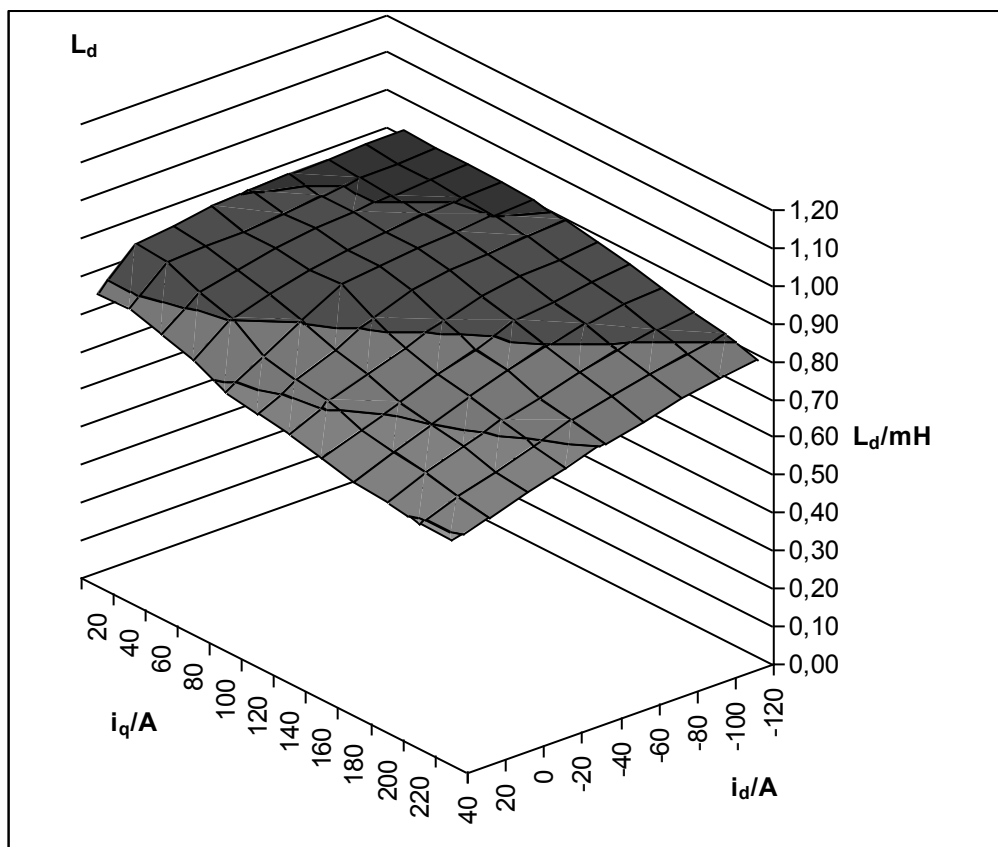


Bild 7.1.9: Messwerte der absoluten Längsinduktivität L_d

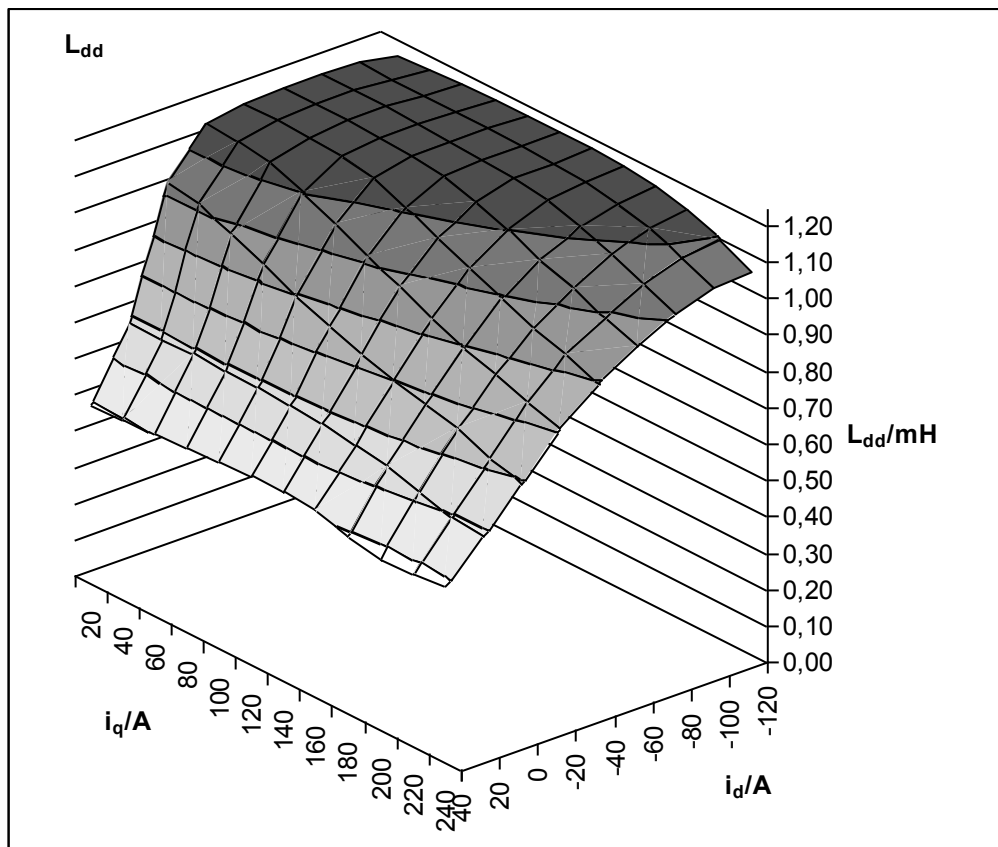


Bild 7.1.10: Rechenwerte der differentiellen Längsinduktivität L_{dd}

Für die Querinduktivität können mit den bereits angegebenen Einschränkungen dieselben Vergleiche angestellt werden.

Bei mittleren bis großen Werten von i_q ist klar zu erkennen, dass Berechnung und Messung sowohl im Verlauf als auch in den absoluten Werten gut übereinstimmen. In den Diagrammen 7.1.12 und 7.1.13 zeigen Fehlerindikatoren, dass zwischen Rechnung und Messung eine maximale Abweichung von ca. 5% liegt.

Die fertigungstechnischen Probleme spielen bei der Querinduktivität L_q aufgrund der unterschiedlichen Flusswege gegenüber dem Längsfluss keine so große Rolle, da der Luftspalt aufgrund der Maßnahmen, die zum verbesserten Verhältnis L_d/L_q führen, sollen bereits vergrößert ist.

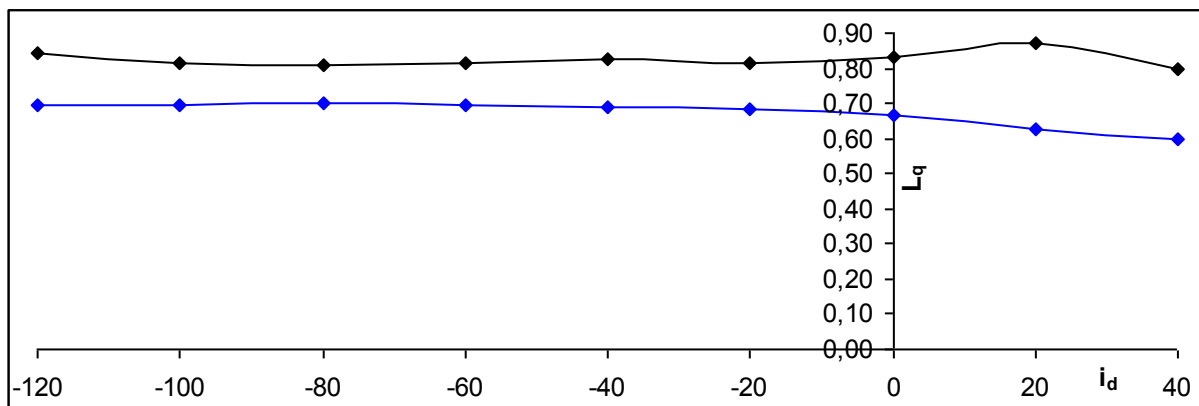


Bild 7.1.11: Vergleich der Querinduktivität bei $i_q = 20A$

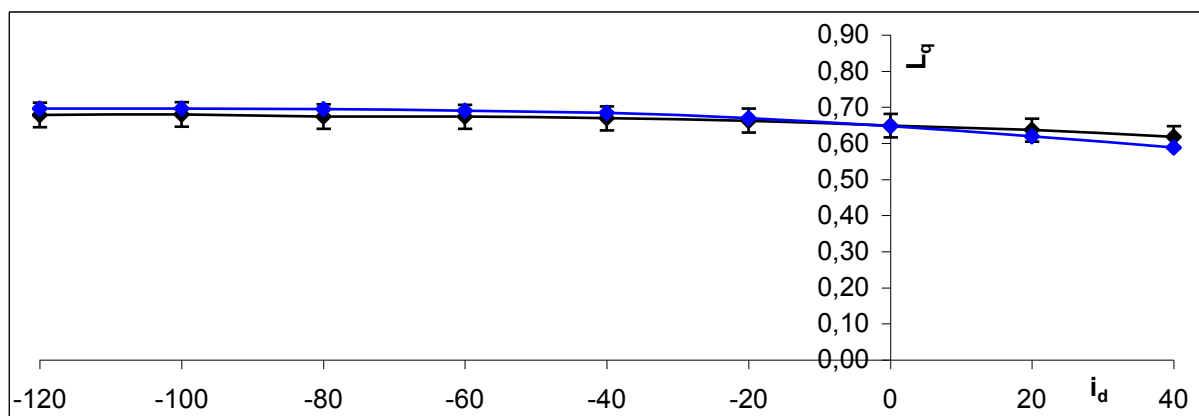


Bild 7.1.12: Vergleich der Querinduktivität bei $i_q = 100A$

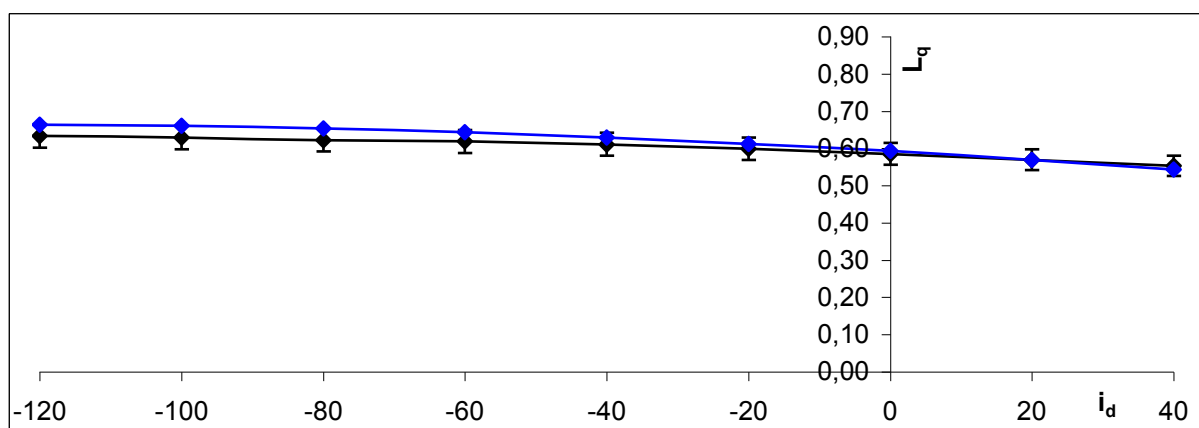


Bild 7.1.13: Vergleich der Querinduktivität bei $i_q = 200A$

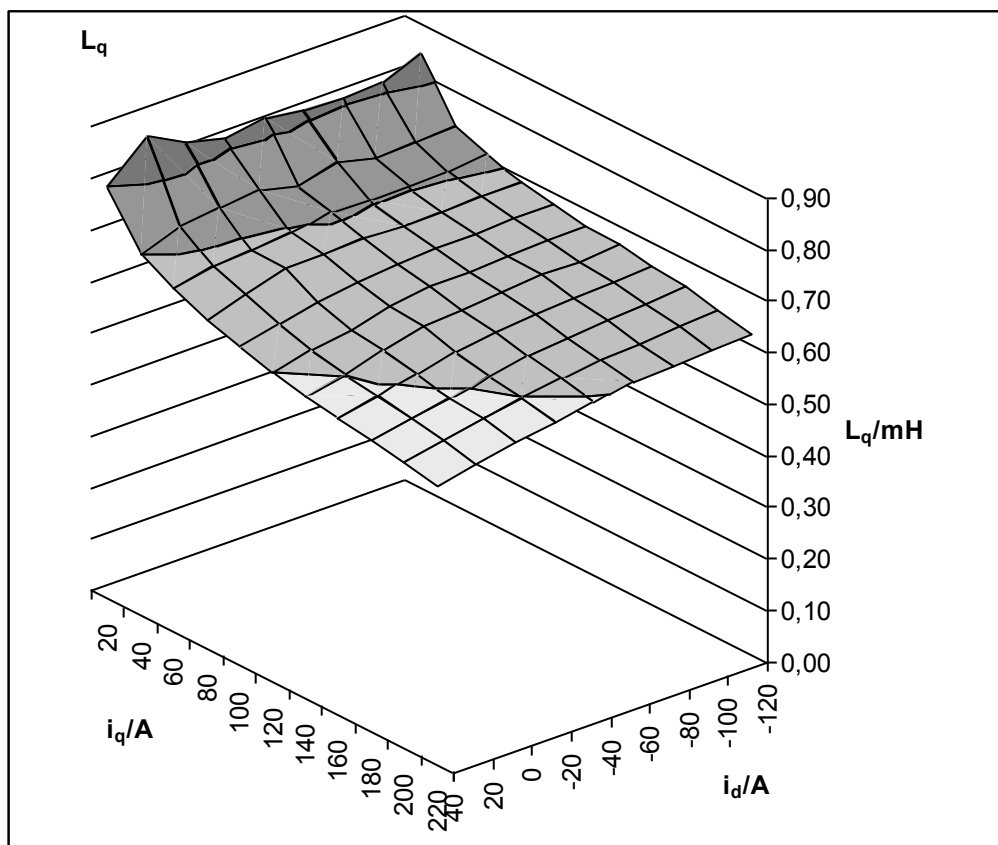


Bild 7.1.14: Messwerte der absoluten Querinduktivität L_q

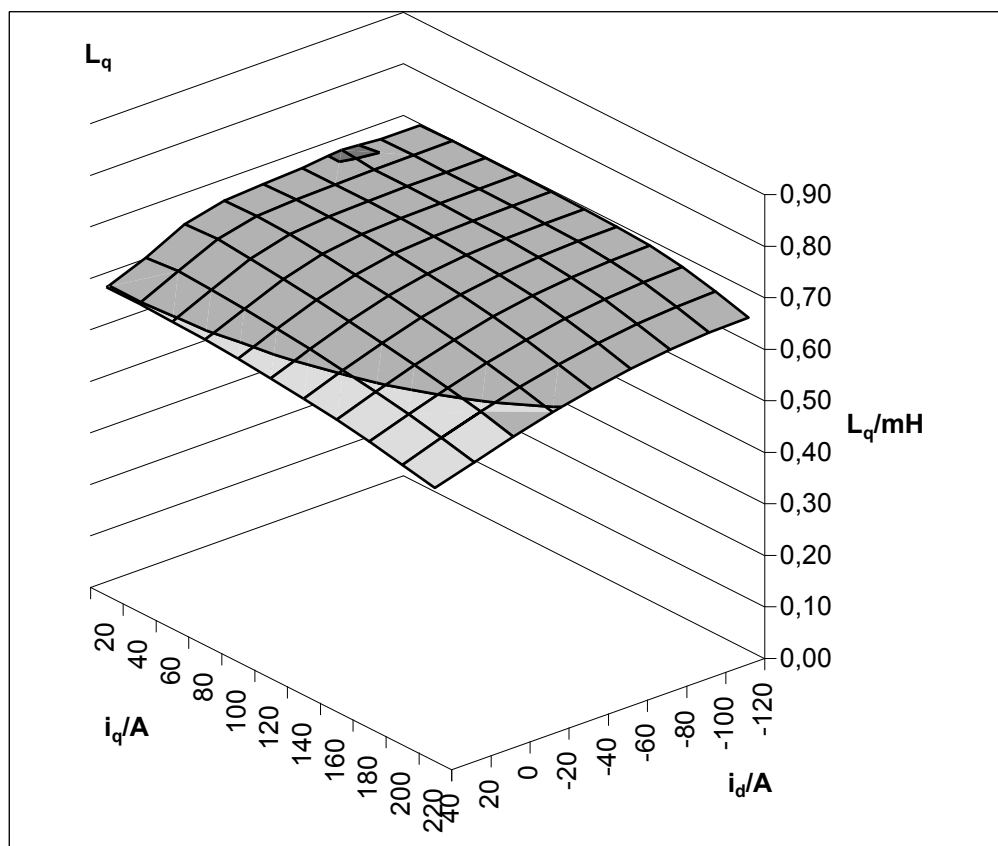


Bild 7.1.15: Rechenwerte der absoluten Querinduktivität L_q

Eigentlich müsste Ψ_M in Abhängigkeit von i_q und i_d bestimmt werden. Dies lässt sich nicht messtechnisch realisieren. Es lässt sich jedoch mit der Theorie zur Momentbildung eine virtuelle Größe Magnetflussverkettung erzeugen, die in der Regelung angewandt werden kann.

Zur Erzeugung dieser Größe wird das gemessene Moment, welches im Folgenden dargestellt wird, mit dem Moment verglichen, welches theoretisch bei den gegebenen Strompaaren und den gemessenen Induktivitäten auftreten müsste. Als Startwert wird der dem Querstrom entsprechende Wert der Magnetflussverkettung verwendet. Danach wird in Iteration der Wert der Magnetflussverkettung solange angepasst, bis theoretischer und gemessener Momentwert übereinstimmen. Dieser Wert wird in einem Kennfeld entsprechend den Strompaaren abgelegt. Die Tabellenwerte sind angehängt.

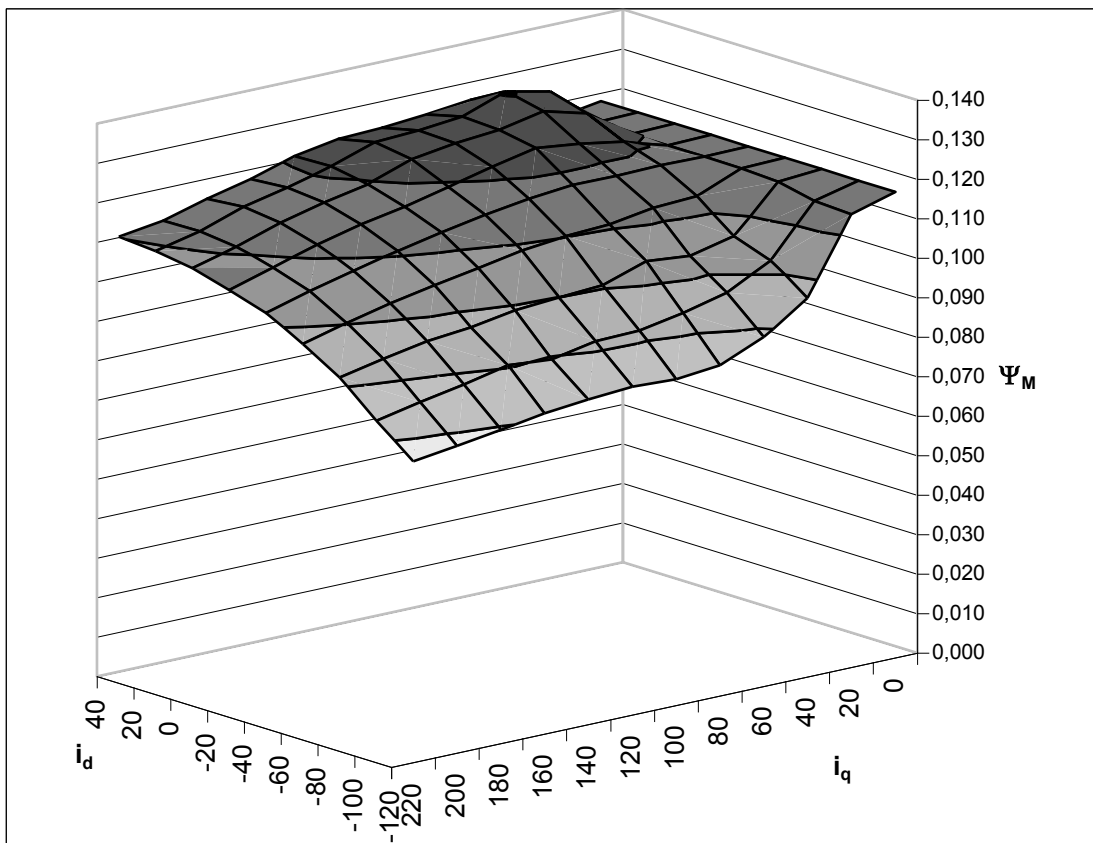


Bild 7.1.16: Virtuelle Magnetflussverkettung Ψ_M

Als letzte Größe wird nun noch das Drehmoment dargestellt und den Berechnungswerten gegenüber gestellt. Hier ist natürlich ein reduziertes gemessenes Drehmoment zu erwarten, da die Magnetflussverkettung als maßgebliche Größe für das Drehmoment kleiner als vorhergesagt ist.

Eine Schwierigkeit bei der Messung ist, wie bereits erwähnt, die Einstellung des Polradwinkels in der Regelung. Wie im nachfolgenden Kapitel dargelegt, ist darüber hinaus noch Reibung zu berücksichtigen. Daher wurden, wie schon bei den vorangestellten Darstellungen, die Werte bei einer Drehzahl von $n = 600 \text{ min}^{-1}$ benutzt. Hierbei kann von dem nachfolgend beschriebenen konstanten Reibwert von ca. $M_R = 1 \text{ Nm}$ ausgegangen werden.

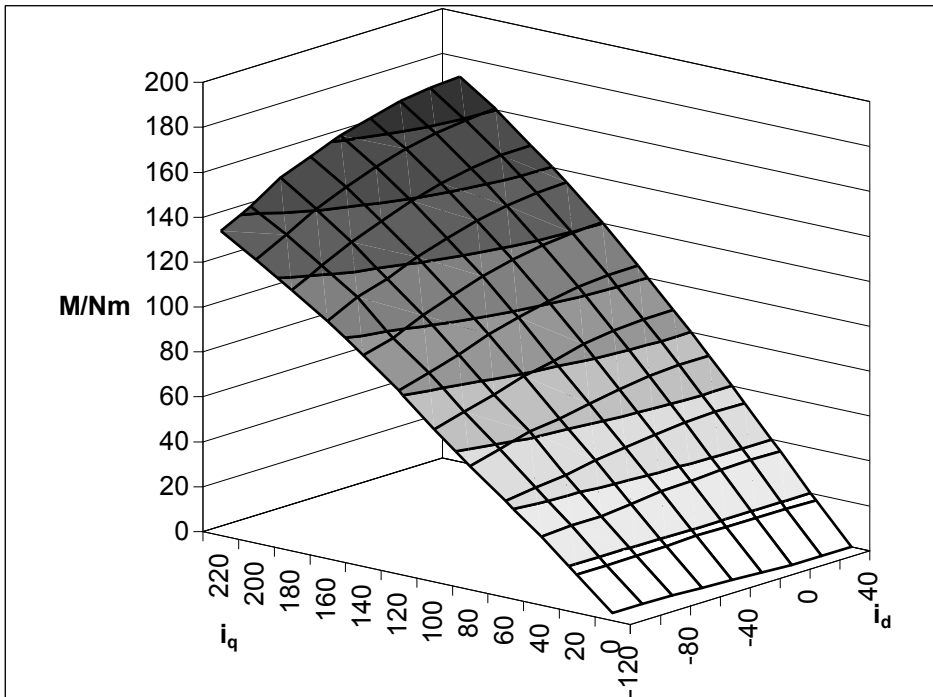


Bild 7.1.17: Gemessenes Drehmoment

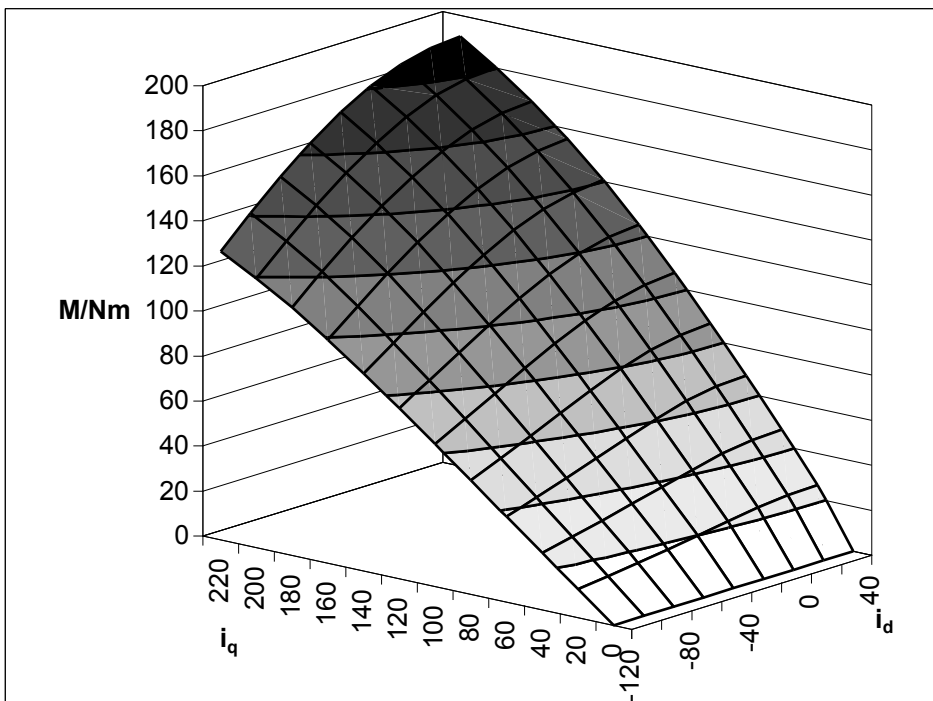


Bild 7.1.18: Berechnetes Drehmoment

Die gemessenen Momentwerte liegen ca. 12% unter den vorausgerechneten Werten. Für den Fall im Bemessungspunkt wird das Strompaar $i_d = 0\text{A}$ und $i_q = 160\text{ A}$ angewandt. Der gemessene Drehmomentwert beträgt hier $M = 132,5\text{ Nm}$ gegenüber $M = 150,8\text{ Nm}$ aus der Berechnung.

Der Verlauf des Moments in Abhängigkeit von der von den Strömen aufgespannten Fläche stimmt gut überein.

7.2 Verlustbestimmung und -vergleich

Zur Verlustbestimmung werden die aus Kapitel 3 bekannten Messungen und Berechnungen durchgeführt

7.2.1 Stromwärmeverluste und Reibung

Aus den Kurzschlussmessungen bei kleinen Drehzahlen, kalter Wicklung und einer mittleren Drehzahl bei bekannter Wicklungstemperatur, wird sowohl der Wicklungswiderstand verifiziert, als auch näherungsweise die Reibung bestimmt. Hierbei wird die Annahme getroffen, dass die Reibung bei kleinen bis mittleren Drehzahlen als konstant angesehen werden kann. Erst bei höheren Drehzahlen kommt die Luftreibung hinzu.

Für $n = 3600 \text{ min}^{-1}$ wurde die mechanische Leistung zu $P_V = 911,5 \text{ W}$ und das Drehmoment zu $M = 2,42 \text{ Nm}$ ermittelt. Die mittlere Wicklungstemperatur beträgt $\vartheta = 46^\circ \text{ C}$. Der Kurzschlussstrom beträgt $I_K = 92,4 \text{ A}$.

Somit errechnet sich die Verlustleistung in den Wicklungen zu:

$$P_{V,Cu} = 3 \cdot R(\vartheta) \cdot I_K^2 = 525 \text{ W}$$

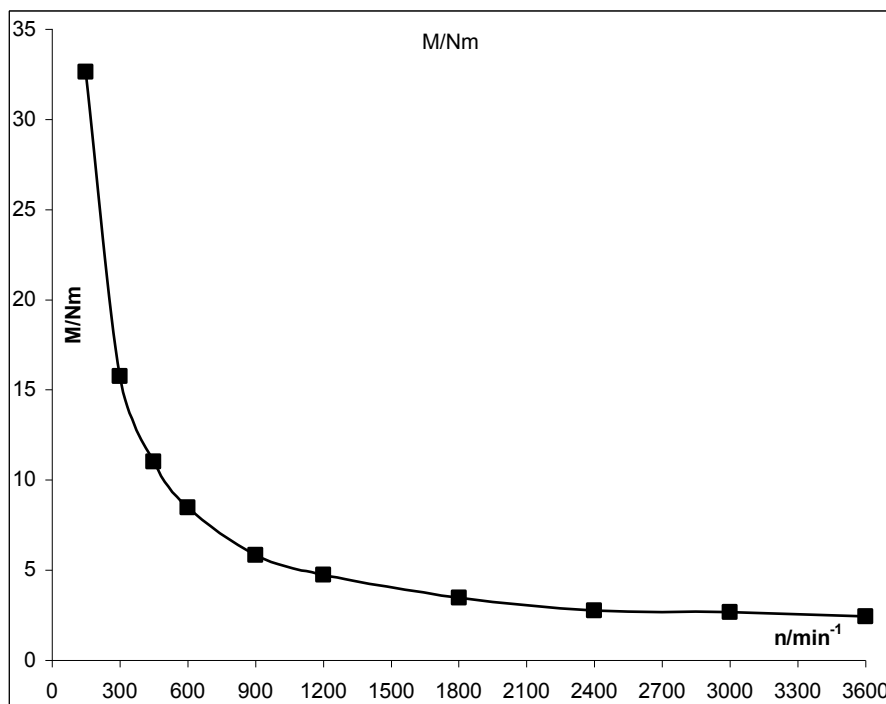
Die Reibungsleistung beträgt unter der Annahme eines konstanten Reibmoments von $M = 1 \text{ Nm}$:

$$P_{V,R} = 2 \cdot \pi \cdot n \cdot M = 377 \text{ W}$$

Die Summe $P_V = 902 \text{ W}$ entspricht der gemessenen Verlustleistung.

Somit kann sowohl die Widerstandsmessung, als auch das angenommene Reibmoment als korrekt angesehen werden.

Der Drehmomentverlauf der Kurzschlussmessung ist im Folgenden dargestellt.



n/min ⁻¹	M/Nm
150	32,6
300	15,8
450	11,0
600	8,5
900	5,8
1200	4,7
1800	3,5
2400	2,8
3000	2,7
3600	2,4

Bild 7.2.1: Drehmoment bei Klemmenkurzschluss

7.2.2 Ummagnetisierungsverluste

Das Drehmoment und die Leistung aus den Messungen stellen sich wie folgt dar:

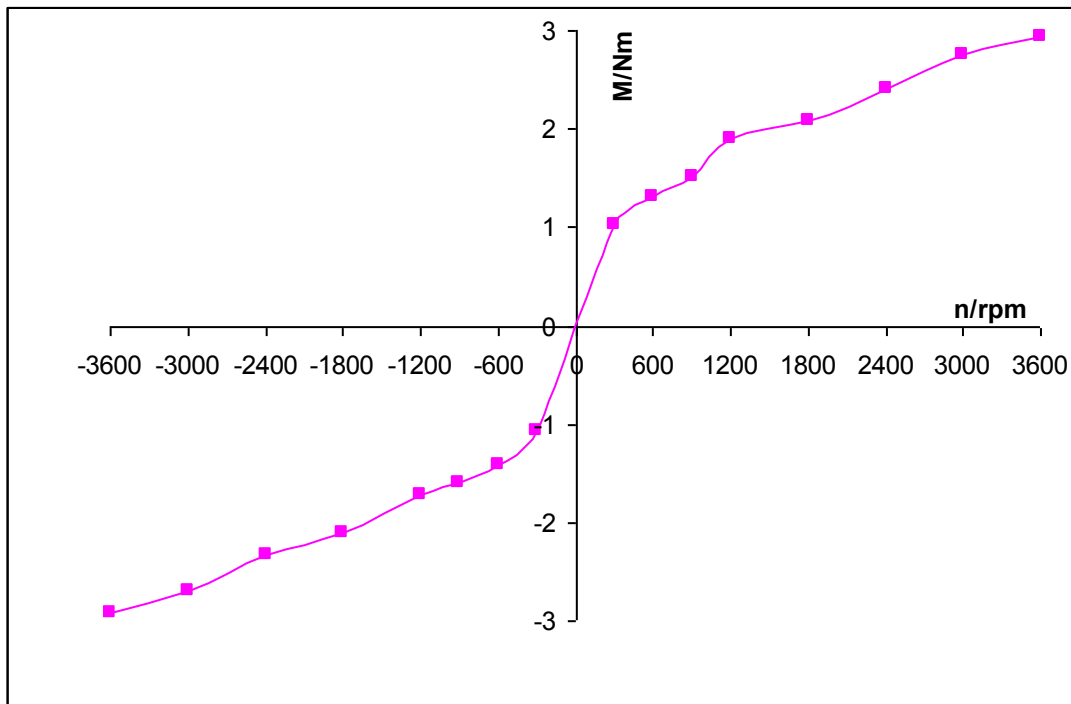


Bild 7.2.2: Drehmoment bei Klemmenleerlauf

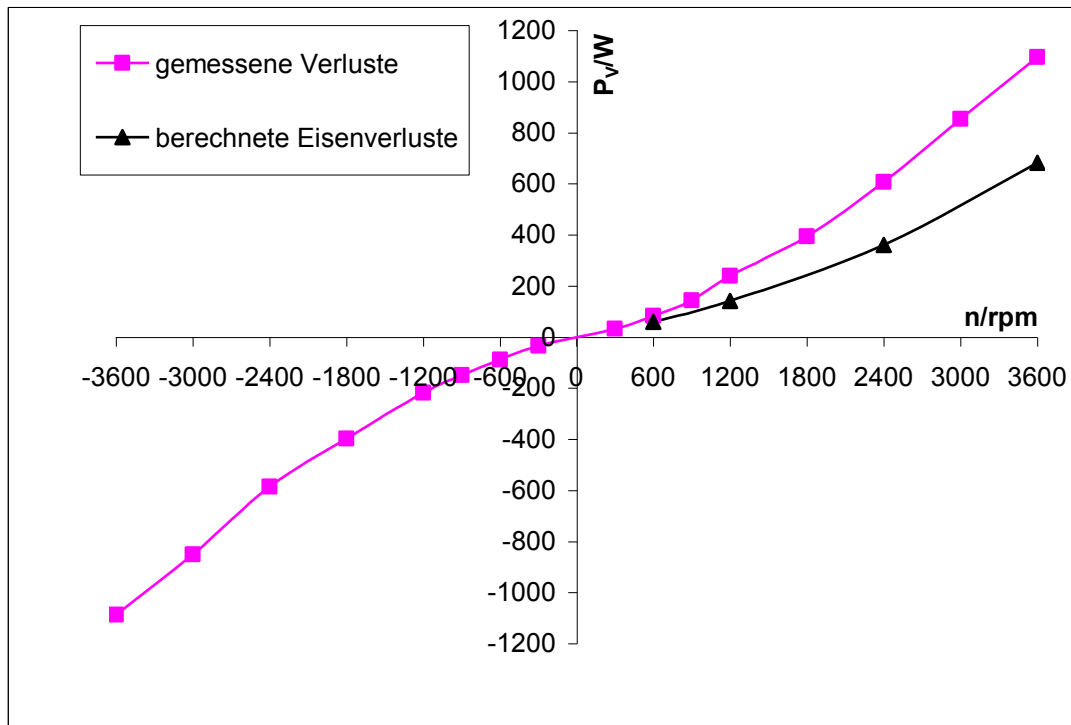


Bild 7.2.3: Mechanische Verluste bei Klemmenleerlauf

Die Verluste steigen mit der Drehzahl in einer quadratischen Funktion an, während das Drehmoment näherungsweise linear verläuft.

Nimmt man den positiven Zweig der Drehmomentmessung und führt eine lineare Regression durch, bestätigt sich die Annahme für das Reibmoment erneut.

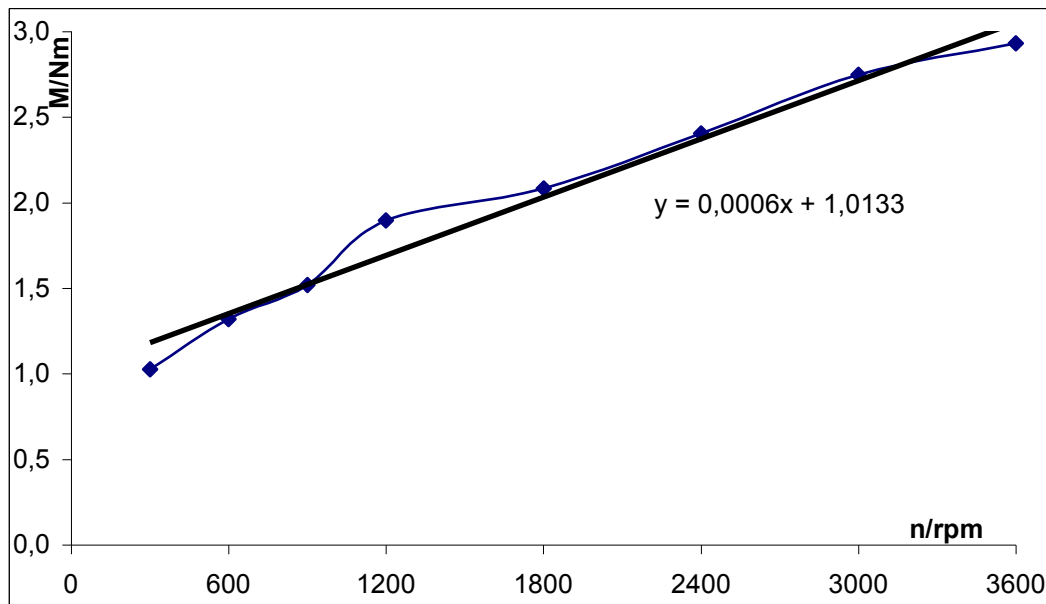


Bild 7.2.4: Drehmomentverlauf im Leerlauf

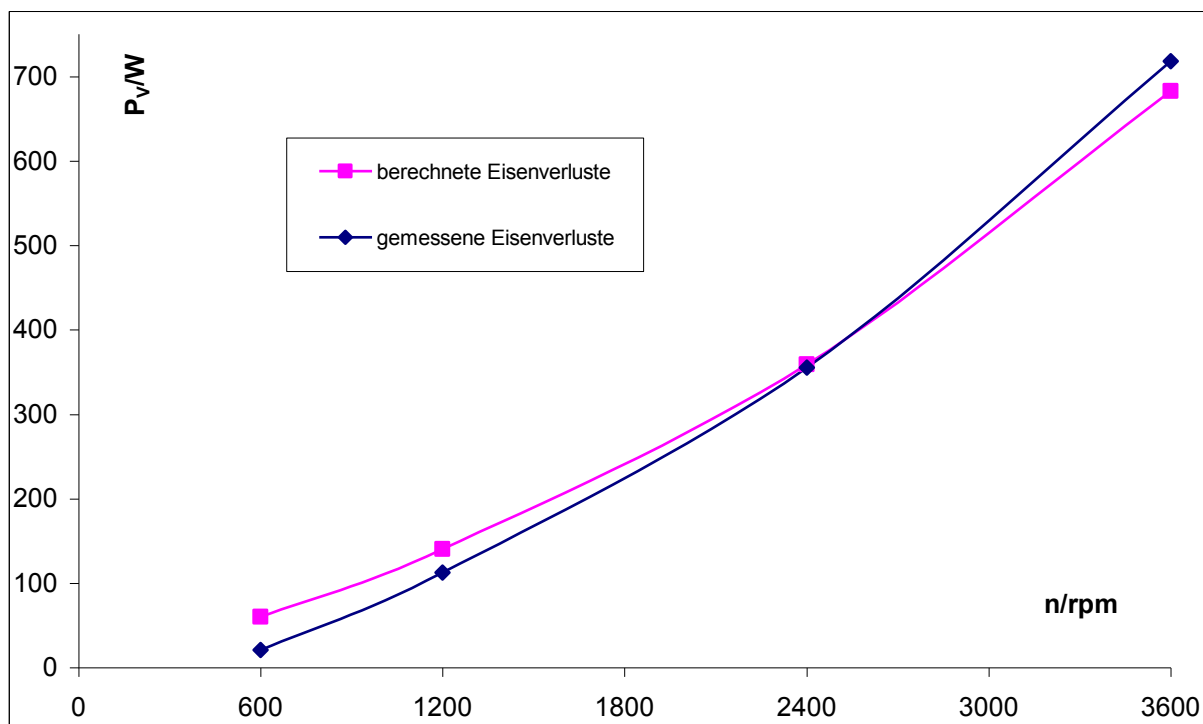


Bild 7.2.5: Ummagnetisierungsverluste im Leerlauf

Die gemessenen Ummagnetisierungsverluste in Diagramm 7.2.5 entsprechen den Gesamtverlusten im Leerlauf, wie sie in der folgenden Tabelle notiert sind. Die berechneten Verlustwerte stammen aus angehängten Tabellen, die den Diagrammen in Kapitel 4.3.8 zugrunde liegen.

Die Übereinstimmung des qualitativen Verlaufs von Rechenwerten und gemessenen Werten, rechtfertigt die Methode zur Verlustberechnung aus Kapitel 3.

$n_{\text{soll}}/\text{min}^{-1}$	$n_{\text{ist}}/\text{min}^{-1}$	M/Nm	P/W	$P_{V, \text{Fe}}/\text{W}$	$P_{V, \text{Fe}}/\text{W}$
-3600	3563	-2,91	-1086,6		
-3000	3010	-2,70	-850,5		
-2400	2408	-2,33	-586,5		
-1800	1809	-2,10	-397,7		
-1200	1211	-1,72	-217,9		
-900	899	-1,59	-150,1		
-600	604	-1,41	-89,0		
-300	308	-1,07	-34,5		
300	310	1,03	33,3		
600	603	1,32	83,4	20,6	60,3
900	900	1,52	143,0		
1200	1200	1,90	238,4	112,7	140,6
1800	1809	2,08	394,4		
2400	2409	2,40	606,5	355,2	359,5
3000	2967	2,75	853,7		
3600	3569	2,93	1095,2	718,2	682,9

Tabelle 7.2.1: Leerlaufverluste

In Spalte 5 befinden sich die Werte der Ummagnetisierungsverluste aus der Messung unter der Annahme konstanten Reibmoments. In Spalte 6 sind die berechneten Werte der Ummagnetisierungsverluste eingetragen.

7.2.3 Leistung und Verluste in den Betriebspunkten

Zunächst werden hier die mechanische und die elektrische Leistung für verschiedene Betriebspunkte dargestellt. Es schließen sich Betrachtungen zu den Gesamtverlusten und den Einzelverlusten in einigen Betriebspunkten an.

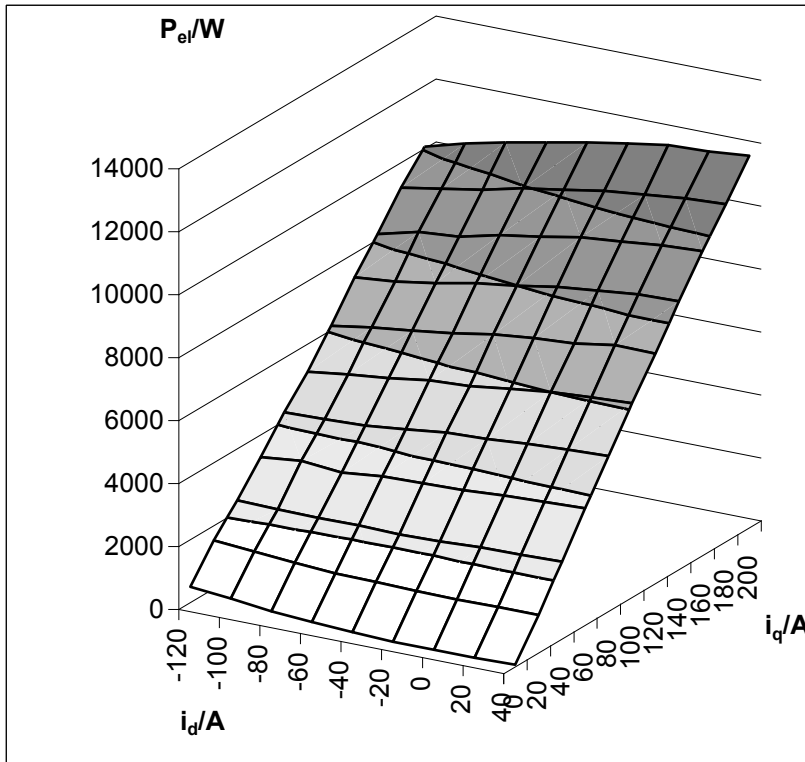


Bild 7.2.6: Elektrische Leistung bei $n = 600 \text{ min}^{-1}$

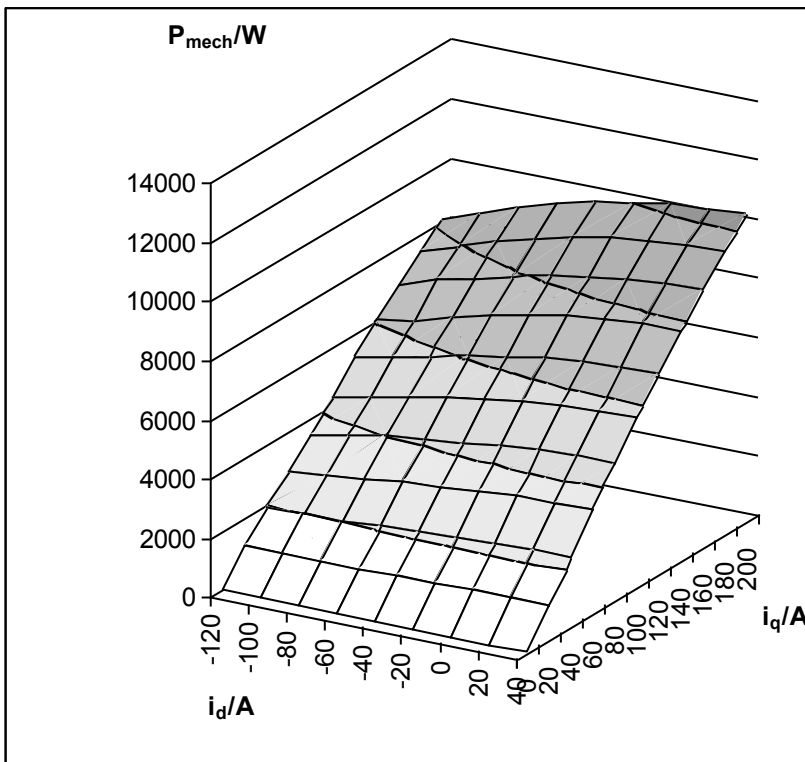


Bild 7.2.7: Mechanische Leistung bei $n = 600 \text{ min}^{-1}$

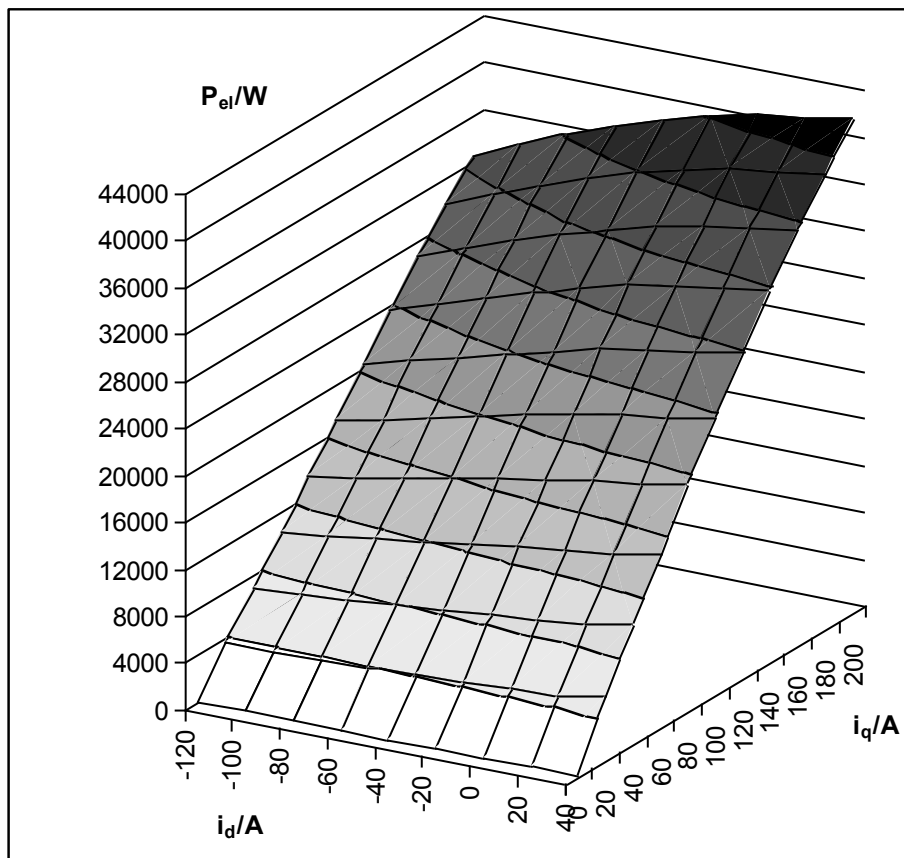


Bild 7.2.8: Elektrische Leistung bei $n = 2400 \text{ min}^{-1}$

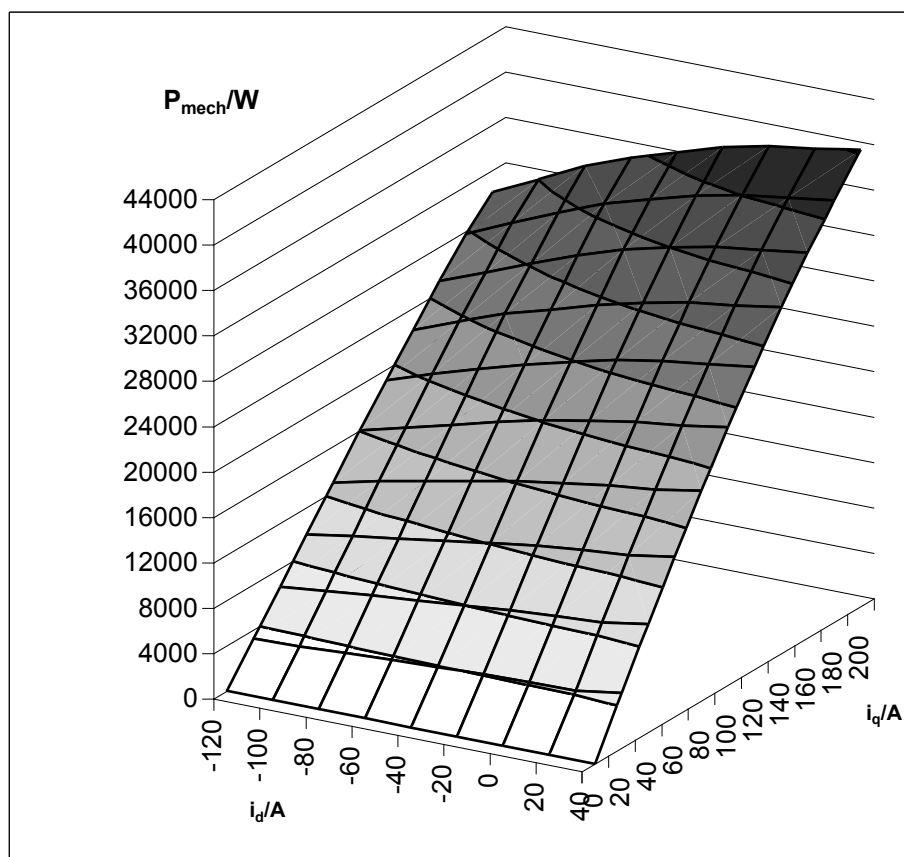


Bild 7.2.9: Mechanische Leistung bei $n = 2400 \text{ min}^{-1}$

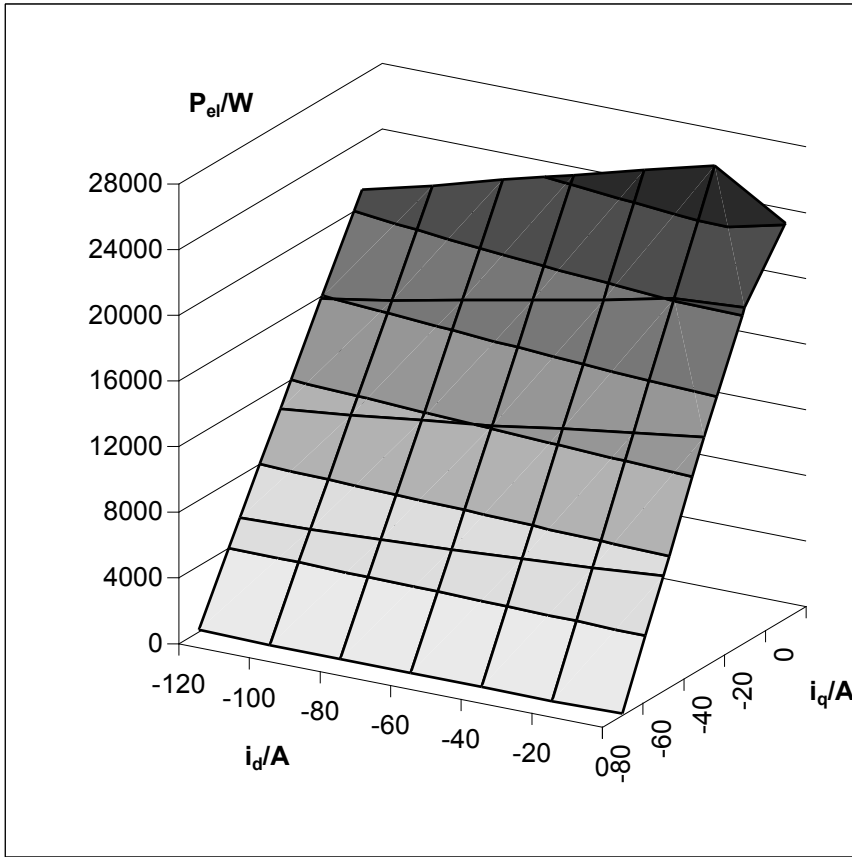


Bild 7.2.10: Elektrische Leistung bei $n = 3600 \text{ min}^{-1}$

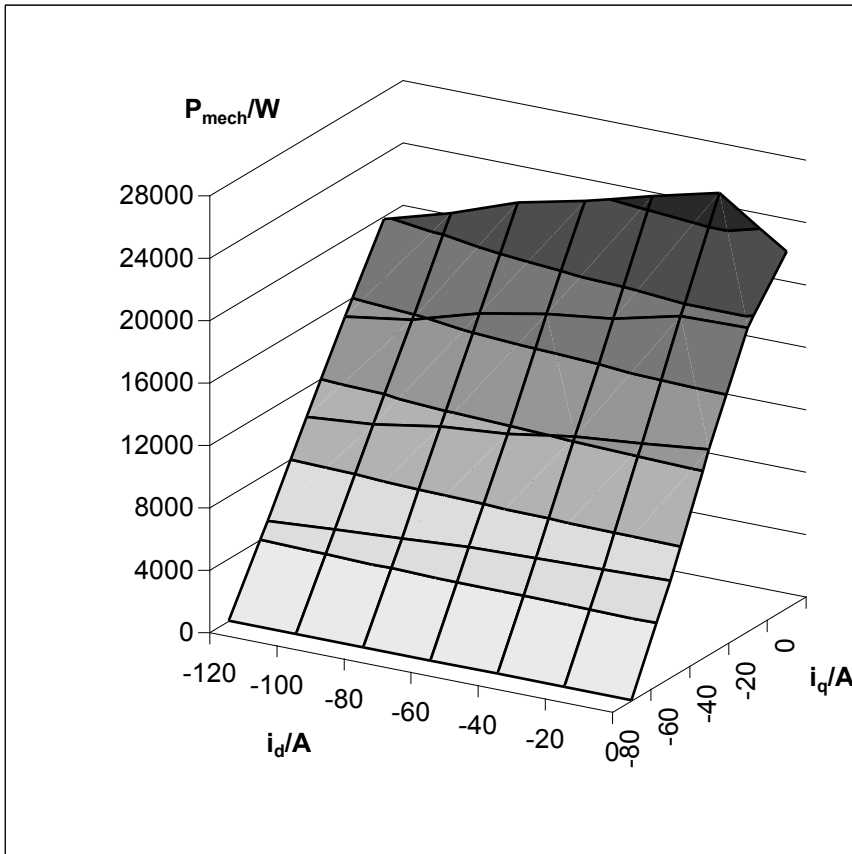


Bild 7.2.11: Mechanische Leistung bei $n = 3600 \text{ min}^{-1}$

Die unterschiedlichen Messbereiche sind der Zwischenkreisspannung, die in Abhängigkeit von der Spannung des Maschinensatzes relativ stark schwankt, und dem reduzierten Drehzahlbereich der Belastungsmaschine geschuldet.

Immerhin konnte die Maschine, trotz der Beschränkungen mit einer Leistung von ca. 40 kW, bei 2400 min^{-1} betrieben werden.

Mit der Wicklungstemperatur wurden die ohmschen Verluste berechnet, um gemeinsam mit den Gesamtverlusten Aussagen über die Eisen-, Eisenzusatz- und Rotorverluste zu treffen. Zunächst werden die Gesamtverluste bei den oben dargestellten Drehzahlen aufgezeigt.

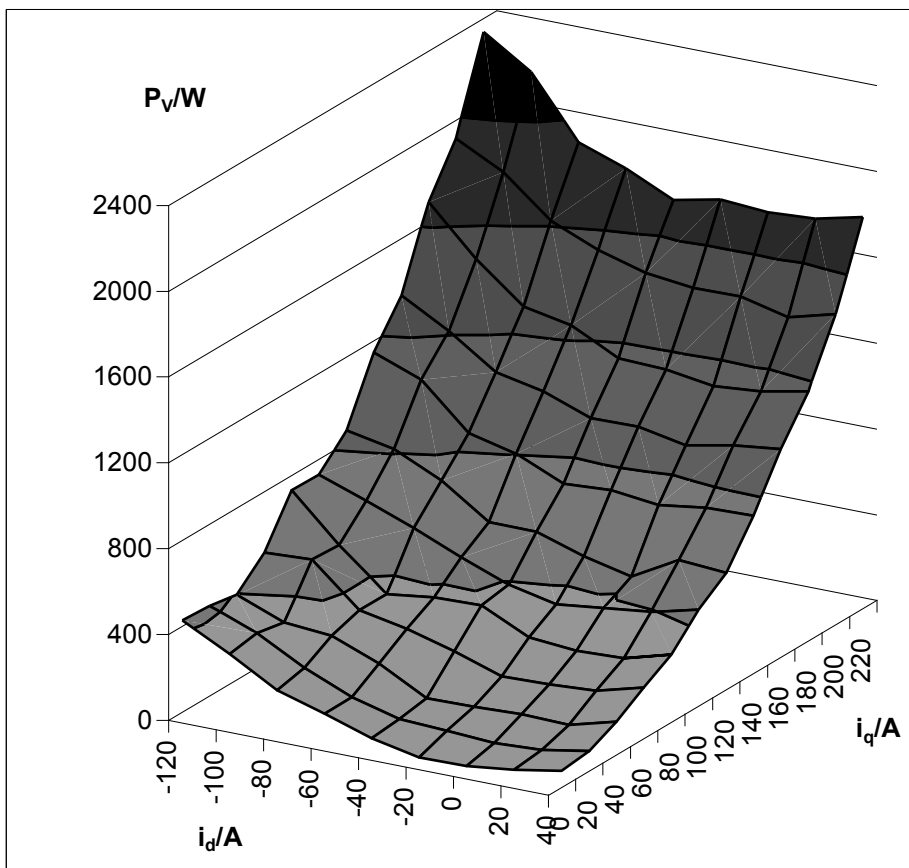


Bild 7.2.12: Gesamte Verlustleistung bei $n = 600 \text{ min}^{-1}$

Bei $n=600 \text{ min}^{-1}$ wird im Vergleich mit dem Leistungsdiagramm klar, dass auch hier die Ummagnetisierungsverluste in einigen Betriebspunkten nicht zu vernachlässigen sind.

Die Messungen bei dieser Drehzahl sind allerdings zu sehr mit Fehlern behaftet, als dass es Sinn machen würde, weitere Untersuchungen anzustellen.

Bei 2400 min^{-1} lässt sich aus den Messungen trotz der Messfehler eine eindeutige Aussage zu den Eisen- und Zusatzverlusten gewinnen. Die Rotorverluste jedoch können auch hier nicht eindeutig beurteilt werden, weshalb auf eine gesonderte Untersuchung der Rotorverluste verzichtet wird. Der Vergleich mit den berechneten Werten zeigt eine gute Übereinstimmung.

Für 3600 min^{-1} gilt sinngemäß das gleiche. Der begrenzte Messbereich erschwert hier belastbare Aussagen zusätzlich.

Da die Einschränkungen bezüglich der Messungen genauere Untersuchungen der Rotorverluste nicht ermöglichen, wird im Weiteren auf die Darstellung der Messergebnisse im generatorischen Bereich verzichtet.

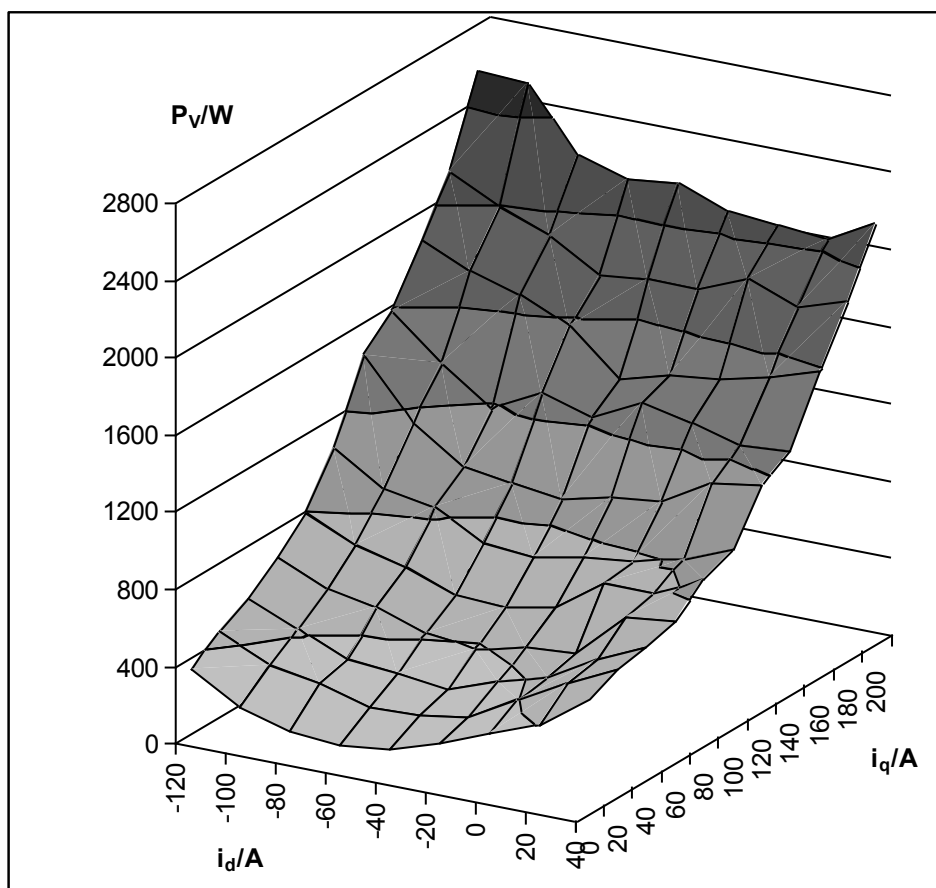


Bild 7.2.13: Gemessene gesamte Verlustleistung bei $n = 2400 \text{ min}^{-1}$

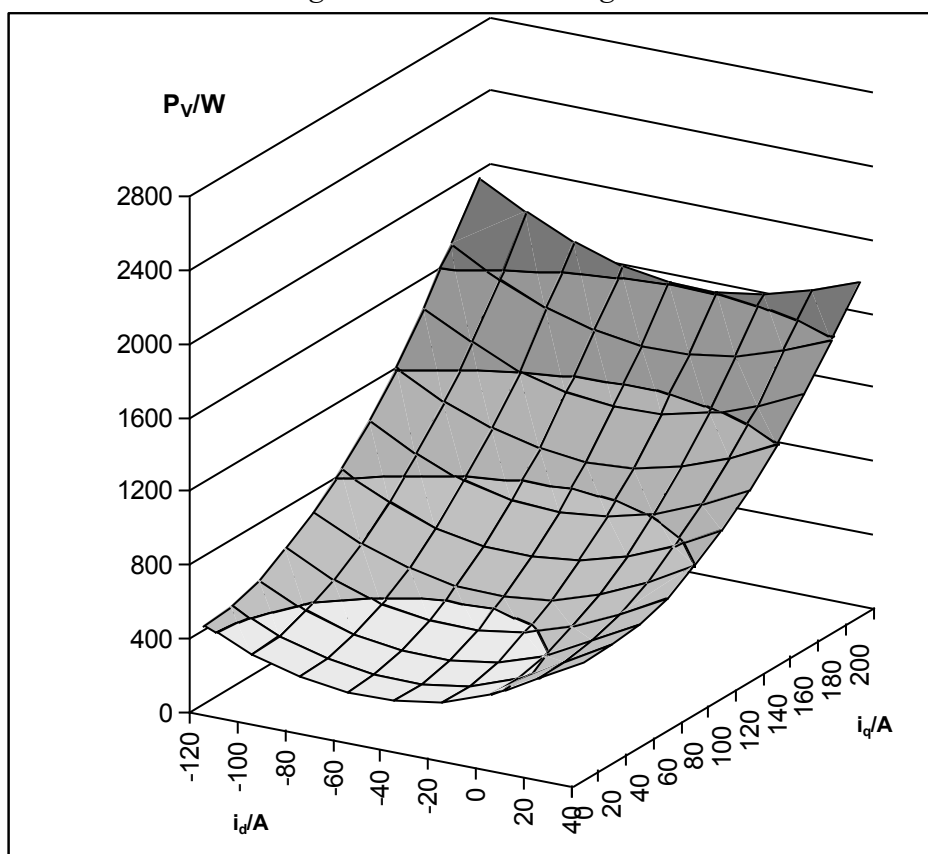


Bild 7.2.14: Berechnete Verlustleistung ohne Reibung bei $n = 2400 \text{ min}^{-1}$

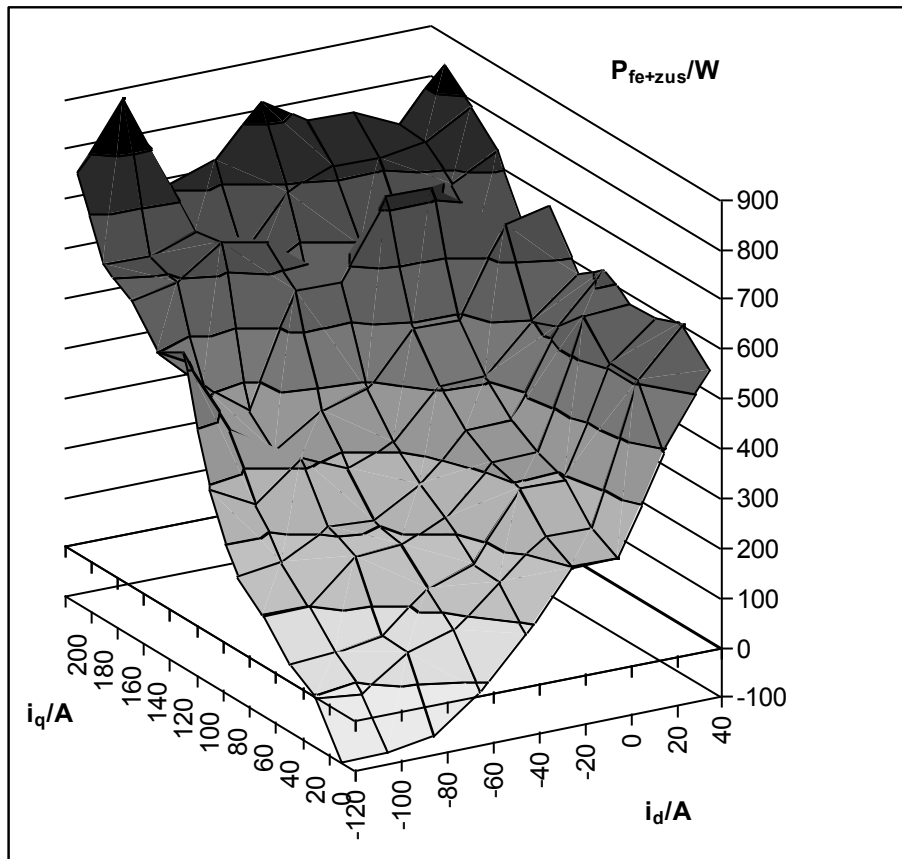


Bild 7.2.15: Gesamtverluste abzüglich der Stromwärmeverluste bei $n = 2400 \text{ min}^{-1}$

Klar erkenntlich, trotz aller Messwertungenauigkeiten, ist der Zusammenhang der Ummagnetisierungs- und der Zusatzverluste mit den Strömen. Bei kleinen Querströmen steigen die Ummagnetisierungsverluste mit dem Längsstrom deutlich an. Diese Tendenz wird bei größeren Querströmen abgeschwächt. Bei kleinen Längsströmen steigen die Ummagnetisierungs- und die Zusatzverluste stark mit dem Querstrom an. Auch hier ist eine Abschwächung dieses Verlaufs bei großen Längsströmen erkennbar. Klar ist, dass der Verlauf des Anstiegs jeweils mit der Eisensättigung zusammenhängt, wie dies in Kapitel 3 bereits vorhergesagt wurde.

Die Möglichkeit, durch Einprägen eines negativen d-Stroms, eine Reduktion des Magnetflusses im Stator und somit eine Minimierung der Ummagnetisierungs- und Zusatzverluste im Sinne einer die Gesamtverluste minimierenden Regelung zu realisieren, ist folglich gegeben. Das Ziel, mit Hilfe konstruktiver Maßnahmen die Möglichkeit zu realisieren, die Verluste aktiv in einer Regelung zu begrenzen, wurde erreicht.

Betrachtet man nun die Messreihe mit ansteigendem Querstrom bei $i_d = 0 \text{ A}$ und zieht davon die Ummagnetisierungsverluste aus den Leerlaufmessungen ab, ergibt sich ein quadratischer Zusammenhang zwischen Querstrom und Zusatzverlusten.

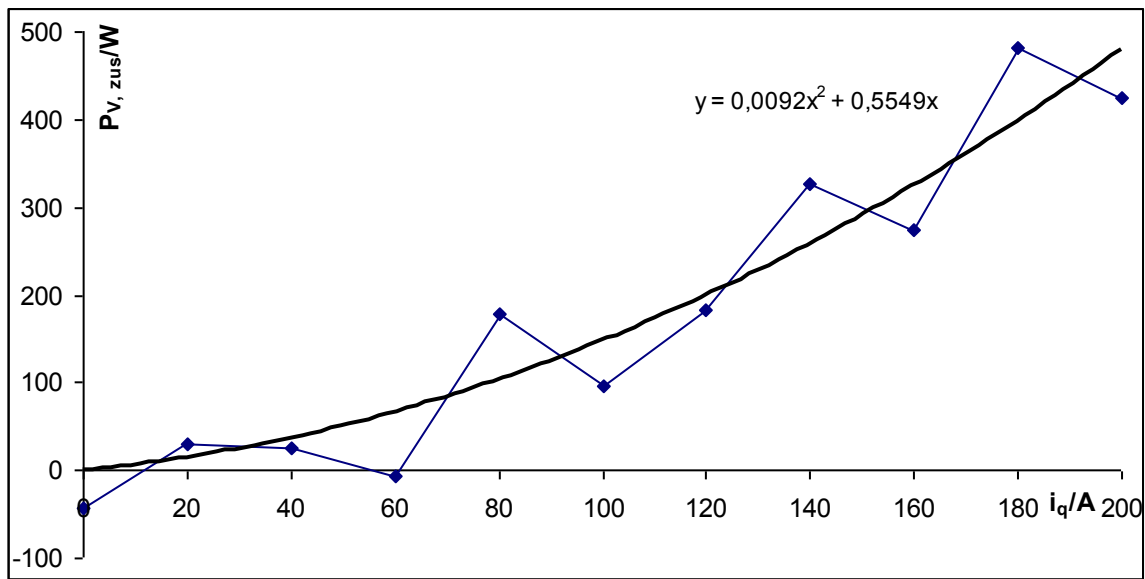


Bild 7.2.16: Verluste abzüglich Kupfer- und Leerlaufverlusten bei $i_d=0A$ und $n = 2400 \text{ min}^{-1}$

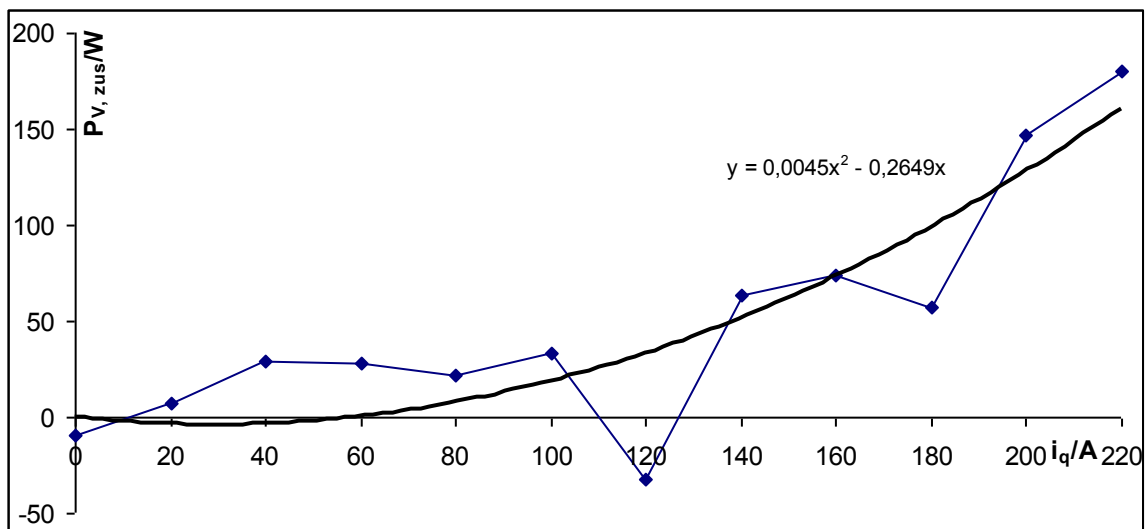


Bild 7.2.17: Verluste abzüglich Kupfer- und Leerlaufverlusten bei $i_d=0A$ und $n = 600 \text{ min}^{-1}$

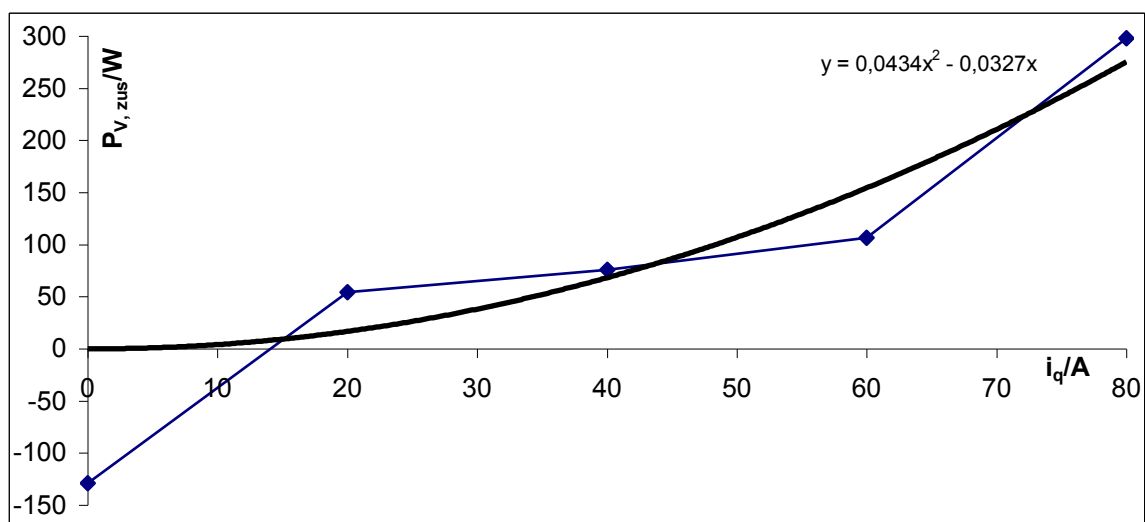


Bild 7.2.18: Verluste abzüglich Kupfer- und Leerlaufverlusten bei $i_d=0A$ und $n = 3600 \text{ min}^{-1}$

Die Werte der Messungen bei 600 min⁻¹ sind allerdings zu klein und damit zu ungenau. Bei der Messreihe mit 3600 min⁻¹ sind zu wenige Daten vorhanden, um dieses Ergebnis sicher zu bestätigen.

Bei allen Drehzahlen wurden sehr gute Wirkungsgradwerte erzielt, was daran liegt, dass die konstruktiven passiven Maßnahmen zur Reduktion der Verluste aus Kapitel 4 offensichtlich wirksam sind.

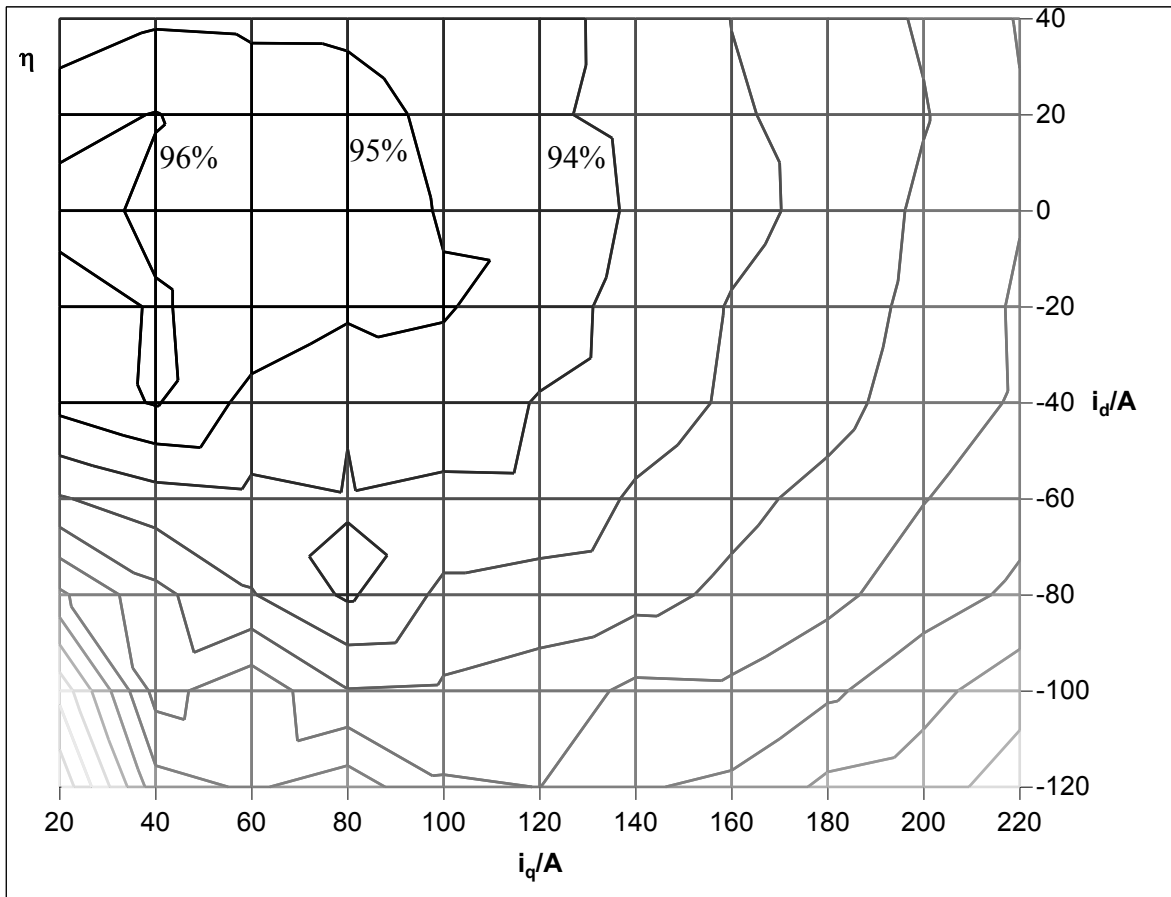


Bild 7.2.19: Wirkungsgrad η bei $n = 600 \text{ min}^{-1}$

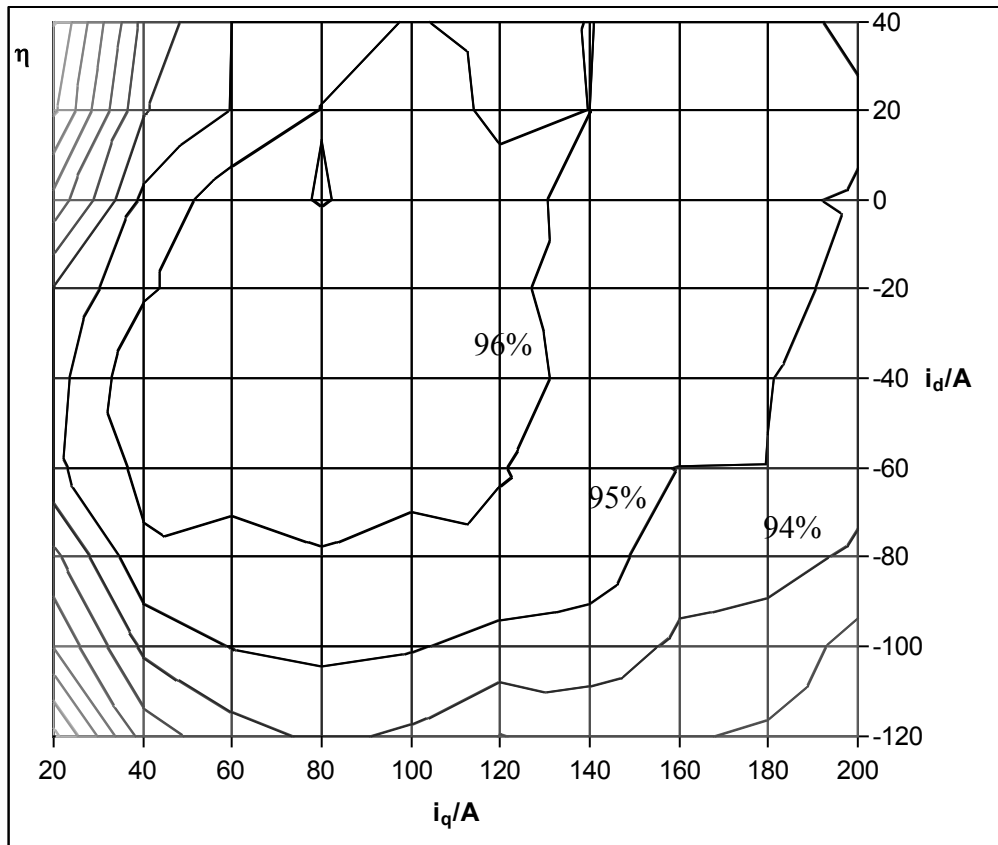


Bild 7.2.20: Wirkungsgrad η bei $n = 2400 \text{ min}^{-1}$

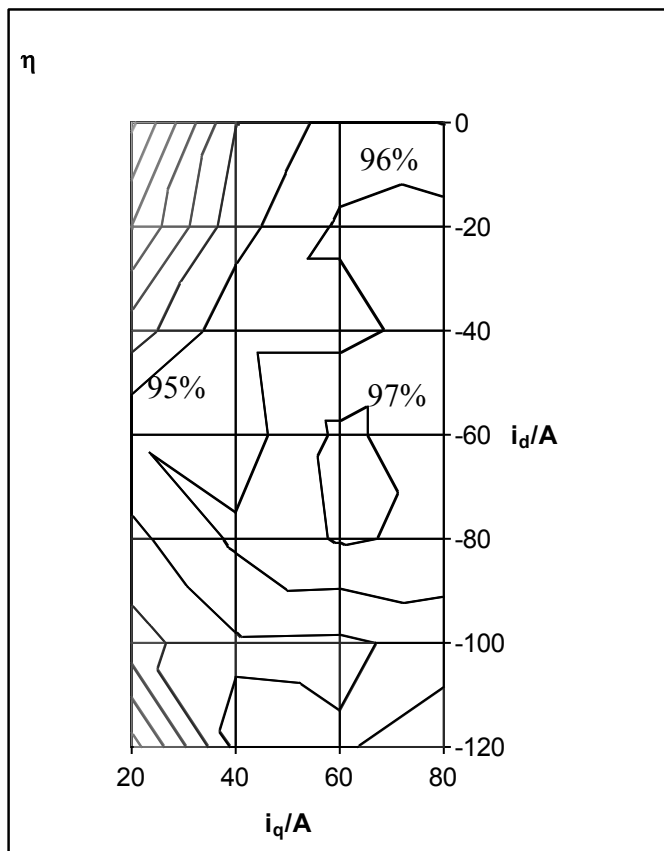


Bild 7.2.21: Wirkungsgrad η bei $n = 3600 \text{ min}^{-1}$

8. Zusammenfassung

In der Automobilindustrie werden derzeit unterschiedliche Ansätze für elektrische Antriebe untersucht. In dieser Arbeit wurde ein spezieller Entwurf für den elektrischen Teil des Antriebsstrangs für ein Hybridfahrzeug gefunden, ausgelegt und untersucht. Der Ansatz für diesen Entwurf war in erster Linie geprägt von der Notwendigkeit, effizient mit der elektrischen Energie, die von den derzeit gebräuchlichen Energiespeichern zur Verfügung gestellt wird, umzugehen. Hierzu wurde eine Maschinenauslegung ausgeführt, die die Verluste im Motor an sich reduziert und eine aktive Reduktion der Verluste durch eine neue Regelungsstrategie ermöglicht.

Als Motorenkonzept wurde eine permanenterregte Synchronmaschine mit vergrabenen Magneten ausgewählt, da dieses Konzept an sich die Realisierung von verlustarmen Maschinen und durch die Einbettung der Magnete im Rotoreisen eine Beeinflussung der Induktivitäten ermöglicht. Speziell die im Vergleich zu anderen Maschinenkonzepten geringeren Verluste im Leerlauf und Teillastbereich waren ausschlaggebend für die Wahl des Konzepts. Durch die speziell ausgelegten Motorparameter kann der Leistungsfaktor gut beeinflusst werden. Dies ist in Hinblick auf eine optimale Nutzung eines gesamten Antriebs inklusive Energiespeicher von Bedeutung.

Die in dieser Arbeit vorgestellte Maschinenauslegung wurde realisiert und auf einem für diesen Zweck erstellten Prüfstand gemessen. Es konnte nachgewiesen werden, dass die berechneten Maschinenparameter weitgehend realisiert wurden bzw. realisierbar sind. Weiterhin zeigte sich, dass die Verluste in weiten Teilen sehr klein gehalten werden können.

Die Verluste wurden vorab durch eine Methode berechnet, die in dieser Arbeit auf die speziellen Bedürfnisse für diese Art Antriebe angepasst und erweitert wurde. In den Messungen hat sich gezeigt, dass die Verluste mit den vorab berechneten Werten, soweit die Messmittel dies zuließen, gut übereinstimmen.

Als aktive Maßnahme zur Verlustreduktion wurde eine spezielle Regelungsstrategie entwickelt, die die Ströme nach dem Verlustminimum in den Betriebspunkten bestimmt und auf diese Werte einregelt. Im dynamischen Bereich kann dieser Ansatz in zukünftigen Arbeiten sicher noch verbessert werden. Erste Tests mit dieser Regelung auf dem Prüfstand haben gezeigt, dass diese Art der Regelung ihren Zweck erfüllt.

Weitere Arbeiten können vor allem in Hinblick auf die Regelung noch Verbesserungen bei diesem Konzept bewirken. Speziell bei höheren Drehzahlen muss sich die Wirksamkeit des Regelungsentwurfs noch zeigen. Die Verlustminimierung sollte in weiteren Arbeiten auch online durch Bestimmung des verlustminimierenden Strompaares ermöglicht werden, und der Vergleich der Messungen mit den berechneten Werten, vor allem bei höheren Drehzahlen, ist hier noch durchzuführen.

9. Anhang

9.1 Literaturverzeichnis

- [1] Prof. Dr.-Ing. U. Schäfer; Skript zur Vorlesung Elektrische Fahrzeugantriebe; TU Berlin, 2008.
- [2] Dr.-Ing. Dirk Bochnia; Optimierung hochpoliger Dauermagnetmotoren unter Verwendung der Finiten Elemente Methode und der Evolutionsstrategie; TU Chemnitz, 2001.
- [3] Dr. Thomas B. Kochmann; Vergleich der magnetischen Kennwerte unter Drehfeld- und Wechselfelderregung; RWTH Aachen, 1996.
- [4] Dr.-Ing. Reinhard Nuscheler; Numerische Verlustberechnung im magnetischen Feld unter Berücksichtigung der Nichtlinearität und Anisotropie; TU München 1988.
- [5] Jan-Phillip von Klitzing; Elektrische und thermische Auslegung sowie Aufbau und Funktionsprüfung eines flüssigkeitsgekühlten 180 kVA Wechselrichters zur Verwendung auf einem Maschinenprüfstand; TU Berlin 2008.
- [6] Andreas Amberger; Zeitdiskreter Aufbau eines Regelungsmodells für eine permanenterregte Synchronmaschine mit verlustoptimierten Betriebspunkten; TU Berlin 2009.
- [7] Andreas Amberger; Realisierung und Überprüfung einer kennfeldorientierten Regelung für eine permanenterregte Synchronmaschine; TU Berlin 2010.
- [8] Hideo Nakai, Hiraki Ohtani, Eiji Satoh, Yukio Inaguma; Development and Testing of the Torque Control for the Permanent-Magnet Synchronous Motor, IEEE Transactions on Industrial Electronics Vol. 52, No. 3, June 2005.
- [9] Sheldon S. Williamson, Srdjan Lukic, Ali Emadi; Comprehensive Drive Train Efficiency Analysis of Hybrid Electric and Fuel Cell Vehicles Based on Motor-Controller Efficiency Modelling; IEEE Transactions on Power Electronics Vol. 21, No. 3, May 2006.
- [10] Ki-Chan Kim, Seung-Bin Lim, Dae-Hyun Koo, Ju Lee; The Shape Design of Permanent Magnet for Permanent Magnet Synchronous Motor Considering Partial Demagnetization; IEEE Transactions on Magnetics Vol. 42, No. 10, October 2006.
- [11] Janne Nerg, Markku Niemelä, Juha Pyrhönen, Jarmo Partanen; FEM Calculation of Rotor Losses in a Medium Speed Direct Torque Controlled PM Synchronous Motor at Different Load Conditions; IEEE Transactions on Magnetics Vol. 38, No. 5, September 2002.
- [12] D.C. Kaluvagunta, B. Fahimi; Three-Dimensional Magnetic Effects in Permanent-Magnet Synchronous Machines; IEEE Transactions on Magnetics Vol. 41, No. 8, August 2005.
- [13] Katsumi Yamazaki; Torque and Efficiency Calculation of an Interior Permanent Magnet Motor Considering Harmonic Iron Losses of both the Stator and Rotor; IEEE Transactions on Magnetics Vol. 39, No. 3, August 2003.
- [14] E. Hall M, J.C. Balda; Permanent Magnet Synchronous Motor Drive for HEV Propulsion: Optimum Speed Ratio and Parameter Determination; IEEE 2002.

- [15] Ying Dai, Liwei Song, Shumei Cui; Development of PMSM Drives for Hybrid Electrical Car Applications; IEEE Transactions on Magnetics Vol. 43, No. 1, January 2007.
- [16] Calogero Cavallaro, Antonio Oscar Di Tommaso, Rosario Miceli, Angelo Raciti, Giuseppe Ricco Galluzzo, Marco Trapanese; Efficiency Enhancement of Permanent-Magnet Synchronous Motor Drives by Online Loss Minimization Approaches; IEEE Transactions on Industrial Electronics Vol. 52, No. 4, August 2005.
- [17] Li Chen, Roy Davis, Stephen Stella, Tod Tesch, Andreas Fischer–Antze; Improved Control Techniques for IPM Motor Drives On Vehicle Application; IEEE2002.
- [18] Z.Q. Zhu, David Howe; Electrical Machines and Drives for Electric, Hybrid and Fuel Cell Vehicles; Proceedings of the IEEE, Vol. 95 No. 4, April 2007.
- [19] Nicola Bianchi, Silverio Bolognani, Brian J. Chalmers; Salient-Rotor PM Synchronous Motors for an Extended Flux-Weakening Operation Range; IEEE Transactions on Industry Applications Vol. 36, No. 4, July/August 2000.
- [20] L. Ma, M. Sanada, Y. Takeda; Iron Loss Prediction Considering the Rotational Field and Flux Density Harmonics in IPMSM and SYNRM; IEE Proc. Electr. Power Appl. Vol. 150, No 6, November 2003.
- [21] Mounir Zeraoulia, Mohamed El Hachemi Benbouzid, Demba Diallo; Electric Motor Drive Selection Issues for HEV Propulsion Systems: A Comparative Study; IEEE Transactions on Vehicular Technology, Vol. 55, No. 6, November 2006.
- [22] Yung-Kang Chin, Juliette Soulard; Modelling of Iron Losses in Permanent Magnet Synchronous Motors with Field-Weakening Capability for Electric Vehicles; EVS 19, 2002.
- [23] D.M. Ionel, J.F. Eastham, T.J.E. Miller, E. Demeter; Design Considerations for Permanent Magnet Synchronous Motors for Flux Weakening Applications; IEE Pro. Electr. Power Appl. Vol. 145, No. 5, September 1998.
- [24] Longya Xu, Lurong Ye, Li Zhen, Ahmed El-Antably; A New Design concept of Permanent Magnet Machine for Flux Weakening Operation; IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 31, No. 2, March/April 1995.
- [25] Seong Yeop Lim, Ju Lee; A Design for Improved Performance of Interior Permanent Magnet Synchronous Motor for Hybrid Electric Vehicle; Journal of Applied Physics 99.
- [26] Chunting Mi, Gordon R. Slemon, Richard Bonert; Modelling of Iron Losses of Surface-Mounted Permanent Magnet Synchronous Motors; IEEE 2001.
- [27] Hans-Peter Nee, Louis Lefevre, Peter Thelin, Juliette Soulard; Determination of d and q Reactances of Permanent-Magnet Synchronous Motors Without Measurement of the Rotor Position; IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 36, No. 5, September/October 2000.
- [28] M. Azizur Rahman, Ping Zhou; Analysis of Permanent Magnet Synchronous Motors; IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 43, No. 2, April 1996.
- [29] Fabio Crescimbeni, Augusto Di Napoli, Luca Solero, Federico Caricchi; Compact Permanent-Magnet Generator for Hybrid Vehicle Applications; IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 41, No. 5, September/October 2005.

- [30] Andreas Binder, Tobias Schneider, Markus Klohr; Fixation of Buried and Surface-Mounted Magnets in High-Speed Permanent-Magnet Synchronous Machines; IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 42, No. 4, July/August 2006
- [31] Bertram Frei; Regelung eines elektromechanischen Getriebes für Hybridfahrzeuge; Dissertation, TU Chemnitz 2005.
- [32] Dierk Schröder; Elektrische Antriebe Grundlagen; Springer 2007.
- [33] Rolf Fischer; Elektrische Maschinen; Hanser, 1995.
- [34] Günther Lehner; Elektromagnetische Feldtheorie; Springer, 1996.
- [35] Karoly Simonyi; Theoretische Elektrotechnik; Deutscher Verlag der Wissenschaften, 1956.
- [36] Arnulf Kost; Numerische Methoden in der Berechnung elektromagnetischer Felder; Springer 1994.
- [37] Germar Müller, Bernd Ponick; Grundlagen elektrischer Maschinen; WILEY-VCH 2006.
- [38] Germar Müller, Bernd Ponick; Theorie elektrischer Maschinen; WILEY-VCH, 2009.
- [39] Germar Müller, Karl Vogt, Bernd Ponick; Berechnung elektrischer Maschinen; WILEY-VCH, 2008.
- [40] Hendershot, J.R., T.J.E. Miller; Design of Brushless Permanent-Magnet Motors; Oxford university Press
- [41] D.M. Ionel, J.F. Eastham, E. Demeter, M.J. Balchin, D.Stoia, C. Apetrei; Different Rotor Configurations for BLDC Motors operating in flux weakening mode; Proceedings of ICEM, 1996 Vol. 2, pp. 331-336.
- [42] D.M. Ionel, J.F. Eastham, E. Demeter, M.J. Balchin; Finite Element design of a BLDC Motor for flux weakening operation; IEEE Transactions on Magnetics, 1996, Vol. 32, pp. 5040-5042.
- [43] D.M. Ionel, J.F. Eastham, T. Betzer; Finite Element Analysis of a novel brushless DC motor with flux barriers; IEEE Transactions on Magnetics, 1995, Vol. 31, pp. 3749-3751.
- [44] W.L. Soong, D.A. Staton, T.J.E. Miller; Design of a new axially laminated interior permanent magnet motor; IEEE Transactions on Industrial Applications, 1995, Vol. 31, pp. 358-367.
- [45] K.J. Binns, D.W. Shimmin; Design considerations for a vector controlled permanent magnet motor with a wide speed range; Proc. of ICEM, 1994, Vol. 2, pp. 220-224.
- [46] B.J Chalmers, L. Musaba, D.F. Godsen; Variable frequency synchronous motor drives for electric vehicles; IEEE Transactions on Industrial Applications; 1996, Vol. 32, pp. 896-903.
- [47] D.M. Ionel, J.F. Eastham, E. Demeter, R. Hill-Cottingham; Permanent magnet behaviour in synchronous motors operating in flux weakening mode; Proceedings of Speedam, 1996, pp. B8.23-B8.27.
- [48] N. Bianchi, S. Bolognani; Performance analysis of an IPM motor with segmented rotor for flux weakening applications; IEE Electrical Machines and Drives Conference, Canterbury, 1999.

9.2 Technische Daten

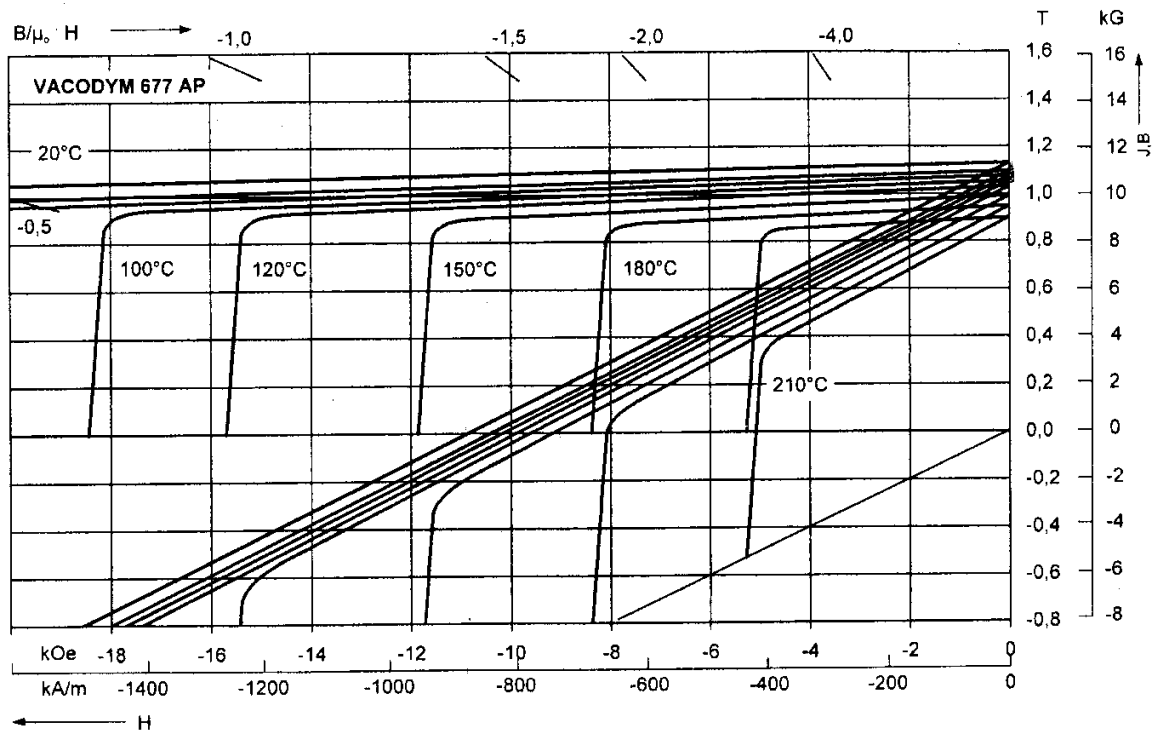


Bild 9.2.1: Kennlinie der Magnete

Grade: **M 270 - 35 A**
Typical curves **J (H)**

Ref. E 77532 N

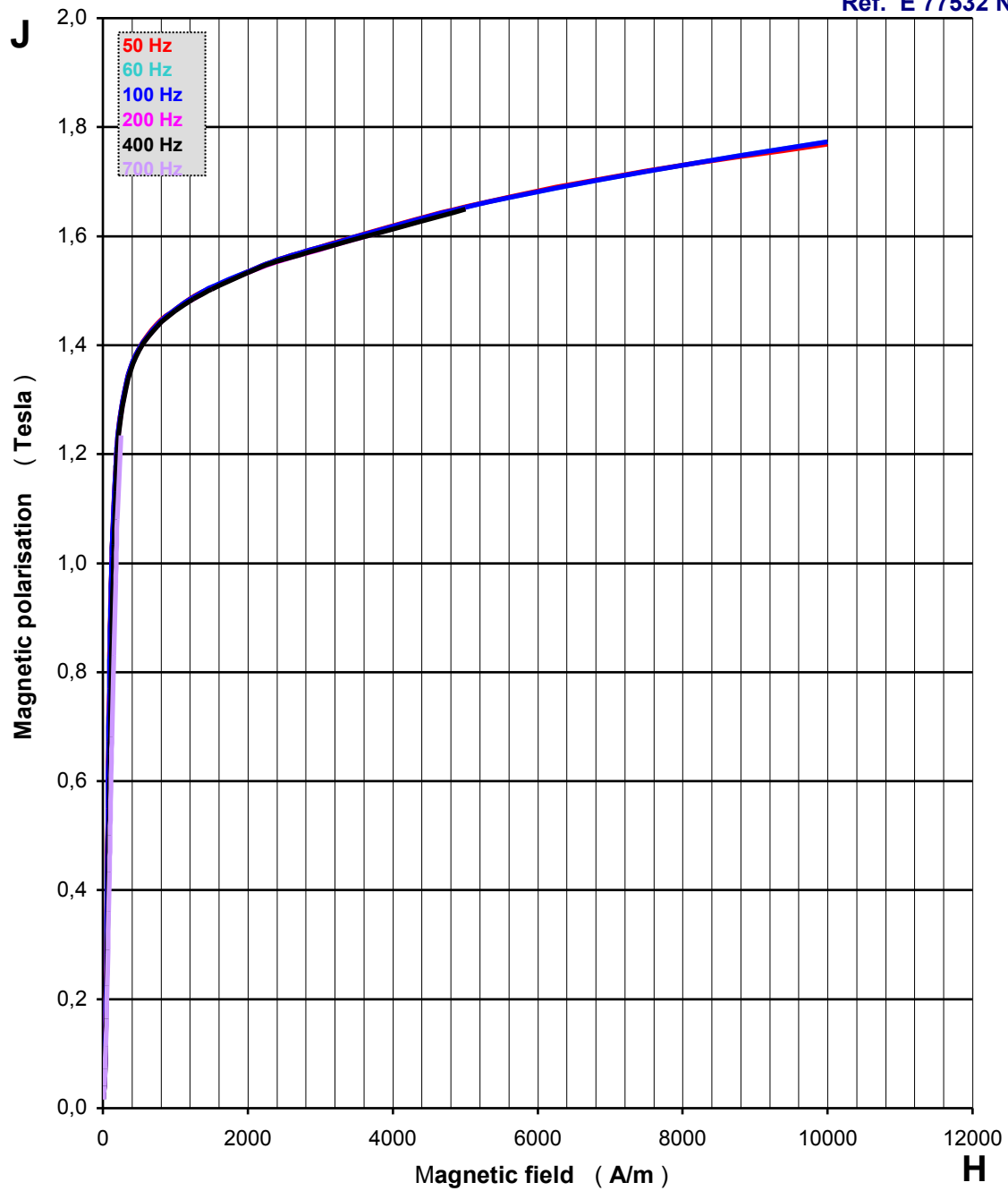


Bild 9.2.2: Magnetisierungskurve M 270-35 A

J (T)	W 50Hz	W 60Hz	W 100Hz	W 200 Hz	W 400Hz	W 700Hz
	50	60	100	200	400	700
0,10	0,018	0,023	0,041	0,098	0,256	0,59
0,20	0,075	0,093	0,167	0,398	1,01	2,27
0,30	0,157	0,194	0,350	0,84	2,13	4,74
0,40	0,256	0,317	0,58	1,39	3,56	7,96
0,50	0,370	0,458	0,84	2,04	5,26	11,7
0,60	0,50	0,616	1,13	2,78	7,17	16,2
0,70	0,64	0,789	1,46	3,62	9,41	21,5
0,80	0,79	0,981	1,82	4,52	11,9	27,6
0,90	0,96	1,19	2,22	5,53	14,8	34,6
1,00	1,14	1,42	2,65	6,66	18,0	42,8
1,10	1,35	1,67	3,13	7,89	21,7	52,1
1,20	1,58	1,96	3,68	9,30	25,8	62,9
1,30	1,86	2,30	4,3	10,9	30,5	79,5
1,40	2,19	2,72	5,1	12,9	36,4	103
1,50	2,57	3,21	6,0	15,5	43,6	134
1,60	2,94	3,67	7,0	18,5	53,0	171
1,70	3,29	4,08	8,0	22,2	65,6	220
1,80	3,71	4,68	9,3	26,7	79,3	281
1,90	4,21	5,32	10,8	32,0	96,6	357
2,00	4,72	6,00	12,5	38,5	118	449
2,10	5,2		14,4	46,2	144	562
2,20	5,69		16,6	55,4	176	697

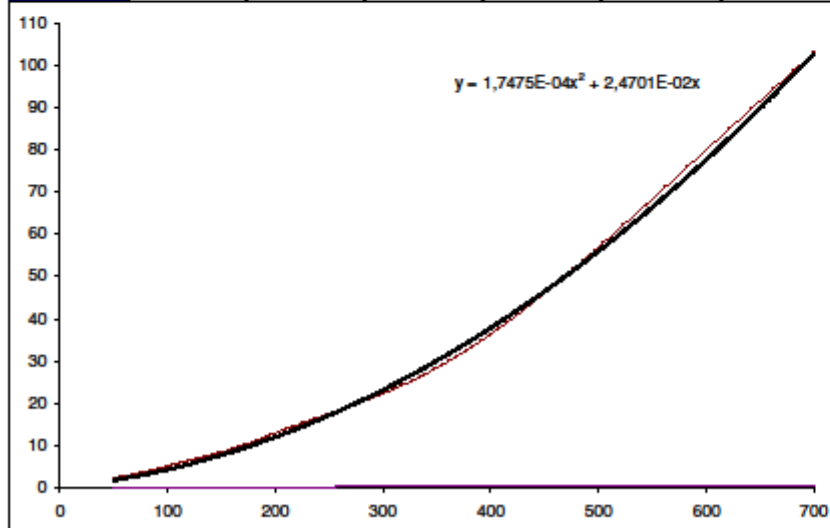


Bild 9.2.3: Spezifische Verlustkurve des Blechs 270-35 bei $B = 1,4$ T in Abhängigkeit von der Frequenz

9.3 Quelltexte

Berechnung der Stator-Ummagnetisierungsverluste

```
%Berechnung der Stator-Ummagnetisierungsverluste mit der Methode Bochnia
Kochmann, Nuscheler

%Konstanten
stf = 0.97; %Packingfaktor des Statorblechs
lfe = 0.2; %Statorblechpaketlänge
rho = 7650; %spezifisches Gewicht des Blechs
theta = 0:2:70; %Winkelraster
maxwinkel = size(theta);
I_d = [60 40 20 10 0.01 -20:-20:-160]; %I_d-Raster
maxdstrom = size(I_d);
I_q = [0.001 20:20:360]; %I_q-Raster
maxqstrom = size(I_q);
f1 = [50 100 200 300 400 500 600 700]; %Drehfrequenzraster
maxfrequenz = size(f1);

%-----
%Einlesen der Verlustkurven
load 'ps';
f_grid = [0 50 100 200 400 700 1000]; %Frequenzen der Verlustkurven
B_grid = 0:0.1:2.2; %Induktionen der Verlustkurven
%-----

%Berechnung der Ummagnetisierungsverluste für die Lastpunkte
for n = 1:maxfrequenz(2) %Wahl der Frequenz
    f = f1(n);
    freq = num2str(f);
    for l = 1:maxdstrom(2) %d-Strom aus Lastpunktraster
        for m = 1:maxqstrom(2) %q-Strom aus Lastpunktraster
            clear winkel Id Iq pfad0 pfad1 pfad2
            clear Bx By maxelem c d Bxx Byy Bxmax Bymax
            clear Bxf Bxfabs Bxfarg Byf Byfabs Byfarg alpha X Bh Ba a
            clear AS P_d0 Fx Fy K p1 p2 gamma p_d P_d P
        %-----
        %-----
        %Einlesen der Werte von B_x, B_y und der Elementflächen für einen Lastfall
        %für alle Winkel alpha des Winkelrasters
        for k = 1:maxwinkel(2)
            winkel = num2str(theta(k)); %Datentypwandlung für die Pfadsuche
            Id = num2str(I_d(l)); %Datentypwandlung für die Pfadsuche
            Iq = num2str(I_q(m)); %Datentypwandlung für die Pfadsuche
            %Pfade verfolgen nach den Lastpunkten
            vollmer = strcat('C:\Dokumente und Einstellungen\vollmer\Eigene
Dateien\');
            ansyspfad = strcat(vollmer, '\DIS\ANSYS\10p45\');
            pfad0 = strcat(ansyspfad, 'KD1\Id = ', Id);
            pfad1 = strcat(pfad0, '\Iq = ', Iq);
            pfad2 = strcat(pfad1, '\', winkel, 'grad\');
            pfad3 = strcat(ansyspfad, 'KD1\');
            %Lesen der Elementinduktionen und -flächen für alle Winkel
            Bx(:,k) = dlmread([pfad2, 'Bxs.txt']);
            By(:,k) = dlmread([pfad2, 'Bys.txt']);
        end
        maxelem = size(Bx);
    %-----
end
```

```

%Koordinatentrafo aufgrund der Statordrehung
for k = 1:maxelem(2)
    c = [ cos(pi*theta(k)/180) sin(pi*theta(k)/180)];
    d = [-sin(pi*theta(k)/180) cos(pi*theta(k)/180)];
    for j = 1:maxelem
        Bxx(j,k) = c*[Bx(j,k); By(j,k)];
        Byy(j,k) = d*[Bx(j,k); By(j,k)];
        Bxmax(1,j) = max(abs(Bxx(j,:)));
        Bymax(1,j) = max(abs(Byy(j,:)));
    end
end
%-----
%FFT
for k = 1:maxelem
    Bxf(k,:) = fft(Bxx(k,:));           %komplexe Bx-Fourierreihe für alle
Winkel
    Bxfabs = abs(Bxf)/18;               %Wandlung in Betrag und Phase
    Bxfarg = angle(Bxf);
    Byf(k,:) = fft(Byy(k,:));           %komplexe By-Fourierreihe für alle
Winkel
    Byfabs = abs(Byf)/18;               %Wandlung in Betrag und Phase
    Byfarg = angle(Byf);
end
%-----
%Transformation der Grundwelle in das Hauptachsensystem
for k = 1:maxelem
    alpha(k) = Bxfarg(k,2)-Byfarg(k,2);
    X(k) = ((1/Bxfabs(k,2)^2)-(1/Byfabs(k,2)^2))^2+ ...
            (2*(cos(alpha(k)))/(Bxfabs(k,2)*Byfabs(k,2)))^2;
    Bh(k) = sqrt((2*(sin(alpha(k)))^2)/(1/Bxfabs(k,2)^2+ ...
            1/Byfabs(k,2)^2-sqrt(X(k))));
    Ba(k) = sqrt((2*(sin(alpha(k)))^2)/(1/Bxfabs(k,2)^2+ ...
            1/Byfabs(k,2)^2+sqrt(X(k))));
    a(k) = Ba(k)/Bh(k);
end
%-----
%Verlustberechnung
AS = dlmread([pfad3,'Areas.txt'],''); %Flächen der finiten Elemente
P_d0 = 0;
%Oberwellenkorrekturfaktor
for k = 1:maxelem
    Fx(k) = 1+((3*Bxfabs(k,4))^2+(5*Bxfabs(k,6))^2+(7*Bxfabs(k,8))^2 ...
            +(9*Bxfabs(k,10))^2+(11*Bxfabs(k,12))^2+(13*Bxfabs(k,14))^2 ...
            +(15*Bxfabs(k,16))^2+(17*Bxfabs(k,18))^2)/Bxfabs(k,2)^2;
    Fy(k) = 1+((3*Byfabs(k,4))^2+(5*Byfabs(k,6))^2+(7*Byfabs(k,8))^2 ...
            +(9*Byfabs(k,10))^2+(11*Byfabs(k,12))^2+(13*Byfabs(k,14))^2 ...
            +(15*Byfabs(k,16))^2+(17*Byfabs(k,18))^2)/Byfabs(k,2)^2;
    K(k)=(Fx(k)*Bxfabs(k,2)^2+Fy(k)*Byfabs(k,2)^2)/(Bxmax(k)^2+Bymax(k)^2);
end
%Interpolation in den Herstellerverlustkurven
for k = 1:maxelem
    p1(k) = interp2(f_grid,B_grid,p,f,abs(Bh(k)));
    p2(k) = interp2(f_grid,B_grid,p,f,abs(Ba(k)));
end
%Berechnung der Korrekturfunktion für Drehfelder
for k = 1:maxelem
    gamma(k) = (1.168-0.342*a(k)*Bh(k)+0.082*(a(k)*Bh(k))^2)*(0.143*a(k)+0.86);
end

```

```

%Gesamtverlust im Stator
for k = 1:maxelem
    p_d(k) = K(k)*gamma(k)*(p1(k)+p2(k)); %spezifischer Verlust
    P_d = stf*lfe*rho*AS(k)*p_d(k);
    P_d0 = P_d0+P_d;
end
P = P_d0;
%-----
----
%Speichern in Dateistruktur
fid = fopen([pfad1 '\Pv_Eisen_ ' freq 'Hz.txt'], 'w');
fprintf(fid, 'Pv = %g ',P);
fclose(fid);
%-----
----
%-----
----
    end
end
end

```

Berechnung der Rotor-Ummagnetisierungsverluste

```
%Berechnung der Ummagnetisierungsverluste mit der Methode Bochnia

%Konstanten
stf = 0.97; %Packingfaktor des Statorblechs
lfe = 0.2; %Statorblechpaketlänge in
rho = 7650; %spezifisches Gewicht des Blechs
theta = 0:2:70; %Winkelraster
ppz = 5; %Polpaarzahl
lz = 3/2; %Lochzahl
sz = 3; %Strangzahl
maxwinkel = size(theta);
I_d = [60 40 20 10 0.01 -20:-20:-160]; %I_d-Raster
maxdstrom = size(I_d);
I_q = [0.001 20:20:360]; %I_q-Raster
maxqstrom = size(I_q);
f = [10 20:20:140]; %Drehzahlraster
maxf = size(f);

%-----
%Einlesen der Herstellerverlustkurven
load pr.dat
f_grid = [0 50 100 200 400 700 1000:500:5000]; %Frequenzen der
Verlustkurven
B_grid = 0:0.1:2.2; %Induktionen der
Verlustkurven
%-----

%Berechnung der Ummagnetisierungsverluste für die Lastpunkte
for n = 1:maxf(2) %Wahl der Frequenz
    f1 = lz*2*ppz*f(n);
    f2 = sz*lz*2*ppz*f(n);
    freq = num2str(ppz*f(n));
    for l = 1:maxdstrom(2) %d-Strom aus Lastpunktraster
        for m = 1:maxqstrom(2) %q-Strom aus Lastpunktraster
            clear k winkel Id Iq pfad0 pfad1 pfad2
            clear Bx By maxelem c d Bxmax Bymax
            clear Bxf Bxfabs Bxfarg Byf Byfabs Byfarg alpha X Bh Ba a
            clear AR P_d0 Fx Fy K p1 p2 gamma p_d P_d P
            t = clock; %Start der Stoppuhr
%-----
%Einlesen der Werte von B_x, B_y und der Elementflächen für einen Lastfall
%für alle Winkel alpha des Winkelrasters
for k = 1:maxwinkel(2)
    winkel = num2str(theta(k)); %Datentypwandlung für die Pfadsuche
    Id = num2str(I_d(l)); %Datentypwandlung für die Pfadsuche
    Iq = num2str(I_q(m)); %Datentypwandlung für die Pfadsuche
    %Pfade verfolgen nach den Lastpunkten
    vollmer = strcat('X:');
    ansyspfad = strcat(vollmer, '\DIS\ANSYS\10p45\');
    pfad0 = strcat(ansyspfad, 'KD1\Id = ', Id);
    pfad1 = strcat(pfad0, '\Iq = ', Iq);
    pfad2 = strcat(pfad1, '\', winkel, 'grad\');
    pfad3 = strcat(ansyspfad, 'KD1\');
    %Lesen der Elementinduktionen für alle Winkel
    Bx(:,k) = single(dlmread([pfad2, 'Bxr.txt']));
    By(:,k) = single(dlmread([pfad2, 'Byr.txt']));
end
maxelem = size(Bx);
%-----
```

```

%FFT
for k = 1:maxelem
    Bxf(k,:) = fft(Bx(k,:));           %komplexe Bx-Fourierreihe für alle
Winkel
    Bxfabs = abs(Bxf)/18;              %Wandlung in Betrag und Phase
    Bxfarg = angle(Bxf);
    Byf(k,:) = fft(By(k,:));          %komplexe By-Fourierreihe für alle
Winkel
    Byfabs = abs(Byf)/18;              %Wandlung in Betrag und Phase
    Byfarg = angle(Byf);
end
%-----
%Spitzenwert der Wechselinduktion
for k = 1:maxelem
    Bxmax1(1,k) =
sqrt(Bxfabs(k,4)^2+Bxfabs(k,7)^2+Bxfabs(k,13)^2+Bxfabs(k,16)^2);
    Bymax1(1,k) =
sqrt(Byfabs(k,4)^2+Byfabs(k,7)^2+Byfabs(k,13)^2+Byfabs(k,16)^2);
    Bxmax2(1,k) = sqrt(Bxfabs(k,10)^2+Bxfabs(k,19)^2);
    Bymax2(1,k) = sqrt(Byfabs(k,10)^2+Byfabs(k,19)^2);
end
%-----
% Tranformation in das Hauptachsensystem
for k = 1:maxelem
    x1 = Bxfabs(k,4);
    y1 = Byfabs(k,4);
    alpha1(k) = Bxfarg(k,4)-Byfarg(k,4);
    X1(k) = ((1/x1^2)-(1/y1^2))^2+(2*(cos(alpha1(k)))/(x1*y1))^2;
    Bh1(k) = sqrt((2*(sin(alpha1(k)))^2)/(1/x1^2+1/y1^2-sqrt(X1(k))));
    Ba1(k) = sqrt((2*(sin(alpha1(k)))^2)/(1/x1^2+1/y1^2+sqrt(X1(k))));
    a1(k) = Ba1(k)/Bh1(k);
    x2 = Bxfabs(k,10);
    y2 = Byfabs(k,10);
    alpha2(k) = Bxfarg(k,10)-Byfarg(k,10);
    X2(k) = ((1/x2^2)-(1/y2^2))^2+(2*(cos(alpha2(k)))/(x2*y2))^2;
    Bh2(k) = sqrt((2*(sin(alpha2(k)))^2)/(1/x2^2+1/y2^2-sqrt(X2(k))));
    Ba2(k) = sqrt((2*(sin(alpha2(k)))^2)/(1/x2^2+1/y2^2+sqrt(X2(k))));
    a2(k) = Ba2(k)/Bh2(k);
end
%-----
% Verlustberechnung
AR = dlmread([pfad3,'Arear.txt']);
P_d = 0;

%Oberwellenkorrekturfaktor
for k = 1:maxelem
    Fx1(k) = 1+(((2*Bxfabs(k,7))^2+(4*Bxfabs(k,13))^2+ ...
        (5*Bxfabs(k,16))^2)/Bxfabs(k,4)^2);
    Fy1(k) = 1+(((2*Byfabs(k,7))^2+(4*Byfabs(k,13))^2+ ...
        (5*Byfabs(k,16))^2)/Byfabs(k,4)^2);
    K1(k) = (Fx1(k)*Bxfabs(k,4)^2+Fy1(k)*Byfabs(k,4)^2) ...
        / (Bxmax1(k)^2+Bymax1(k)^2);
    Fx2(k) = 1+((2*Bxfabs(k,19))^2/Bxfabs(k,10)^2);
    Fy2(k) = 1+((2*Byfabs(k,19))^2/Byfabs(k,10)^2);
    K2(k) = (Fx2(k)*Bxfabs(k,10)^2+Fy2(k)*Byfabs(k,10)^2) ...
        / (Bxmax2(k)^2+Bymax2(k)^2);
end

```



```

%Interpolation in den Hersteller-Verlustkurven
for k = 1:maxelem
    if (abs(Bh1(k))==inf||isnan(abs(Bh1(k))))==1)
        p11(k) = 0;
    else
        p11(k) = interp2(f_grid,B_grid,pr,f1,abs(Bh1(k)));
    end
    if (abs(Ba1(k))==inf||isnan(abs(Ba1(k))))==1)
        p12(k) = 0;
    else
        p12(k) = interp2(f_grid,B_grid,pr,f1,abs(Ba1(k)));
    end
    if (abs(Bh2(k))==inf||isnan(abs(Bh2(k))))==1)
        p21(k) = 0;
    else
        p21(k) = interp2(f_grid,B_grid,pr,f2,abs(Bh2(k)));
    end
    if (abs(Ba2(k))==inf||isnan(abs(Ba2(k))))==1)
        p22(k) = 0;
    else
        p22(k) = interp2(f_grid,B_grid,pr,f2,abs(Ba2(k)));
    end
end
%Berechnung der Korrekturfunktion für Drehfelder
for k = 1:maxelem
    if
        (abs(Bh1(k))==inf||abs(a1(k))==inf||isnan(Bh1(k))==1||isnan(a1(k))==1)
            gamma1(k) = 1;
        else
            gamma1(k) = (1.168-0.342*abs(a1(k))*abs(Bh1(k)) ...
                +0.082*(abs(a1(k))*abs(Bh1(k)))^2)*(0.14*abs(a1(k))+0.86);
        end
    if
        (abs(Bh2(k))==inf||abs(a2(k))==inf||isnan(Bh2(k))==1||isnan(a2(k))==1)
            gamma2(k) = 1;
        else
            gamma2(k) = (1.168-0.342*abs(a2(k))*abs(Bh2(k)) ...
                +0.082*(abs(a2(k))*abs(Bh2(k)))^2)*(0.14*abs(a2(k))+0.86);
        end
    end
end
%spezifischer Verlust
for k = 1:maxelem
    if (abs(K1(k))==inf||isnan(K1(k))==1)
        p_d1(k) = 0;
    else
        p_d1(k) = K1(k)*gamma1(k)*(p11(k)+p12(k));
    end
    if (abs(K2(k))==inf||isnan(K2(k))==1)
        p_d2(k) = 0;
    else
        p_d2(k) = K2(k)*gamma2(k)*(p21(k)+p22(k));
    end
    %Gesamtverlust im Stator
    P_d1 = stf*lfe*rho*AR(k)*p_d1(k);
    P_d2 = stf*lfe*rho*AR(k)*p_d2(k);
    P_d = P_d+P_d1+P_d2;
end
P = P_d;
%-----

```

```

%Speichern in Dateistruktur
fid = fopen([pfad1 '\Pv_EisenR_' freq 'Hz.txt'], 'w');
fprintf(fid, 'Pv = %g ',P);
fclose(fid);
%-----
%-----
        Dauer = etime(clock,t)/60           %Stopp Uhr
    end
end
end

```

Betriebspunktbestimmung zur Minimierung der Verluste

```

%clear;
%clc;
t = clock;

%Deklaration der Variablen
syms i_d i_q
%Deklaration der Parameter
id = [60 40 20 0.01 -20 -40 -60 -80 -100 -120 -140 -160];
iq = [0.001 20:20:360];
load 'Ld_d'
load 'L_q'
load 'MSP'
load 'Psi'

%Lastpunkt aus Moment und Drehzahl
Mw = 160;
M = Mw;
n = 6600;

%Deklaration der Konstanten
p = 5;
f = p*n/60;
Ld = 0.001035;
Lq = 0.000675;
R = 0.0184;
Psi_M = 0.142;
B_0 = 1.4;
C_h = 0.0105;
C_e = 0.0000932;
m = 22.52;
Md = 1;

while abs(Md)>0.1 %abs(Ldd)>0.00001
%Deklaration einiger Abkürzungen
a = (2*M)/(3*p*(Ld-Lq));
b = Psi_M/(Ld-Lq);
c = f*((B_0^2)/(Psi_M^2))*(C_h+f*C_e);
%Deklaration der Verlustdichtefunktion und deren Ableitung
p_V_Cu = 3*R*((a^2)/(i_q^2))-((2*a*b)/i_q)+(b^2)/2+3*R*(i_q^2)/2;
p_V_Fe = c*((Psi_M^2)+(2/1)*Ld*Psi_M*((a/i_q)-b)+ ...
        ((Ld)^2)*((a^2)/(i_q^2))-((2*a*b)/i_q)+(b^2))+((Lq^2)*(i_q^2));
P_V = p_V_Cu + m*p_V_Fe;
p_v = diff(P_V,i_q);
%Deklaration von i_d und i_q
Iq = double(solve(p_v,i_q));
I_d = Iq(3)
I_d = a/Iq(3)-b
%Deklaration von L_d und L_q
Ld = interp2(id,iq,Ld_d,I_d,I_q)/1000;
Lq = interp2(id,iq,L_q,I_d,I_q)/1000;
Psi_M = interp2(id,iq,Psi,I_d,I_q);
Mneu = interp2(id,iq,MSP,I_d,I_q);
Md = Mw-Mneu;
M = M+Md;
end

```

```

%Berechnung der Eingabegrößen in Speed
ISP = sqrt(I_d^2+I_q^2);
gamma = 180*asin(I_d/ISP)/pi;
%Berechnung der Vorgaben für die Raumzeigermodulation für den stationären
Fall
ud = R*I_d-2*pi*f*Lq*I_q;
uq = R*I_q+2*pi*f*Psi_M+2*pi*f*Ld*I_d;
%Berechnung der Kupfer- und Ummagnetisierungsverluste
P_V_Cu = 3*R*ISP^2/2;
p_v_Fe = f*(C_h+f*C_e)*B_0^2*((Psi_M+(1/l)*Ld*I_d)^2+(Lq*I_q)^2)/Psi_M^2;
p_fe = f*(C_h+f*C_e)*B_0^2;
P_V_Fe = m*p_v_Fe;
P_V = P_V_Cu+P_V_Fe;
Dauer = etime(clock,t);
%Speichern in xls-Datei
%Zeile = strcat('B',num2str(i+1));
%Erg =[i_d i_q ISP gamma p_V_Cu P_V_Fe P_V];
%pfad = 'C:\Dokumente und Einstellungen\vollmer\Eigene
Dateien\DIS\ANSYS\10p45\Ergebnisse\';
%xlswrite(strcat(pfad,'Betriebspunkte_Vergleich.xls'),Erg,'V 0',Zeile);

```

Verfeinerung des Strompaarrasters

```
function [vMSP] = verbreitern(S_Id, S_Iq)
% Daten msp.mat wird durch Interpolation verfeinert.
% S_Id: Schrittlänge der Zeile (id)
% S_Iq: Schrittlänge der Spalte (iq)

id = [60 40 20 0.01 -20 -40 -60 -80 -100 -120 -140 -160];
iq = [0.001 20 40 60 80 100 120 140 160 180 200 220 240 260 280 300 320 340
360];

load 'MSP'

Iq = 0:S_Iq:360;
Iq (1,1) = 0.001;
Id = 60:-S_Id:-160;

leIq = length(Iq);
leId = length(Id);

tmp = zeros(leIq,leId);

for i = 1:leId
    tmp(:,i) = interp2(id,iq,MSP,Id(1,i),Iq);
end

vMSP = tmp;

end
```

Kennfelderzeugung

```
function [IdK, IqK, PvK] = Kennfeld()

SM = input('Momentschrittweite: ');
Sn = input('Drehzahlschrittweite: ');

nw = 0:Sn:8400;
Mw = 0:SM:240;
ln = length(nw);
lM = length(Mw);
I_dK = zeros(lM,ln);
I_qK = zeros(lM,ln);
PvK = zeros(lM,ln);

for i=1:lM
    for j=1:ln
        M = Mw(1,i);
        n = nw(1,j);
        [I] = Strompaare(M);
        [Imin, Pvmin] = Verlustminimum(I,n);
        I_dK(i,j) = Imin(1);
        I_qK(i,j) = Imin(2);
        PvK(i,j) = Pvmin;
    end
end
x = (1:1:lM)';
for j=1:ln
    idKp = polyfit(x,I_dK(:,j),3);
    iqKp = polyfit(x,I_qK(:,j),3);
    for i=1:lM
        IdK(i,j) = idKp(1)*x(i)^3+idKp(2)*x(i)^2+idKp(3)*x(i)+idKp(4);
        IqK(i,j) = iqKp(1)*x(i)^3+iqKp(2)*x(i)^2+iqKp(3)*x(i)+iqKp(4);
    end
end

end
```

Ermittlung der Strompaare mit den geringsten Verlusten für den jeweiligen Betriebspunkt

```
function [I] = Strompaare(M)

load vMSP
clear Idp
clear Iqp

[r,v] = find(M-0.1<vMSP & vMSP<M+0.1);

h = length(r);
i_q = r-ones(h,1);
i_d = ones(h,1)*61-v;

[rm] = find(i_q==0);
[vm] = find(i_d==0);

if isempty(rm)== 0
    for n = 1:length(rm)
        i_q(rm(n,1),1) = 0.001;
    end
end

if isempty(vm)~=0
    for n = 1:length(vm)
        i_d(vm(n,1),1) = 0.01;
    end
end

x = (1:1:h)';
idp = polyfit(x,i_d,3);
iqp = polyfit(x,i_q,3);

for k = 1:h
    Idp(k) = idp(1)*x(k)^3+idp(2)*x(k)^2+idp(3)*x(k)+idp(4);
    Iqp(k) = iqp(1)*x(k)^3+iqp(2)*x(k)^2+iqp(3)*x(k)+iqp(4);
end

I(:,1) = Idp;
I(:,2) = Iqp;

end
```

Ermittlung des virtuellen Magnetflusses anhand des berechneten Drehmoments

```
clear;
clc;

load 'L_d'
load 'L_q'
load 'Ld_d'
load 'Lq_d'
load 'MSP'
load 'Psi_M'

%Deklaration der Konstanten
p = 5;

%Deklaration der Parameter
I_d = [60 40 20 0.01 -20 -40 -60 -80 -100 -120 -140 -160];
maxid = length(I_d);
I_q = [0.01 20:20:360];
maxiq = length(I_q);
dPsi = 0.00001;
Psi = zeros(maxiq,maxid);

for k = 1:maxid
    id = I_d(k);
    for l = 1:maxiq
        iq = I_q(l);
        Ld = interp2(I_d,I_q,Ld_d,id,iq)/1000;
        Lq = interp2(I_d,I_q,Lq_d,id,iq)/1000;
        %PsiM = 0.1424;
        PsiM = interp1(I_q,Psi_M,iq);
        %Moment und Leistung
        Mi = interp2(I_d,I_q,MSP,id,iq);
        Mr = (3/2)*p*(PsiM*iq+(Ld-Lq)*iq*id);
        while abs(Mi-Mr)>0.5
            if Mi-Mr>0
                PsiM = PsiM+dPsi;
                Mr = (3/2)*p*(PsiM*iq+(Ld-Lq)*iq*id);
            else
                PsiM = PsiM-dPsi;
                Mr = (3/2)*p*(PsiM*iq+(Ld-Lq)*iq*id);
            end
        end
        Psi(l,k) = PsiM;
    end
end
end
```


9.4 Experimentelle Ummagnetisierungsverluste

	I_{ms} [A]	I_m [A]	I_{μ} [A]	U [V]	U_L [mV]	P [W]	S [VA]	Q [Var]	PF	R [Ω]	Φ_{ms} [μ Vs]	GS	2.OS	3.OS	4.OS	5.OS	6.OS	7.OS	8.OS	9.OS	B [T]	H_L [A/m]	H_T [A/m]	P_{ms}	P_{μ}	I_{μ}/I_m	P_{μ}/m
0	0,200	0,000	0,2	0,11	0	0,02	0,02	0,00	1,00	0,540	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	251	251	0,02	0,00		0,0
1	0,201	0,201	0,0	0,71	76	0,04	0,14	0,13	0,31	0,610	43,20	25,13	0,00	4,95	0,00	2,10	0,00	1,17	0,00	0,00	0,85	362	-362	0,02	0,02	0,00	1,2
2	0,400	0,400	0,0	0,99	105	0,12	0,40	0,38	0,30	0,543	54,50	32,40	0,00	6,75	0,00	3,03	0,00	1,77	0,00	0,00	1,07	720	-720	0,09	0,03	0,00	2,1
3	0,600	0,600	0,0	1,20	126	0,24	0,72	0,33	0,68	0,540	61,60	36,40	0,00	7,82	0,00	3,58	0,00	2,13	0,00	0,00	1,21	1080	-1080	0,19	0,05	0,00	2,9
4	0,800	0,800	0,0	1,37	142	0,38	1,09	1,02	0,35	0,510	67,00	39,70	0,00	8,82	0,00	4,11	0,00	2,46	0,00	1,63	1,31	1441	-1441	0,33	0,05	0,00	3,5
5	1,000	1,000	0,0	1,51	156	0,56	1,51	1,41	0,37	0,490	70,40	41,80	0,00	9,53	0,00	4,50	0,00	2,71	0,00	1,83	1,38	1801	-1801	0,49	0,07	0,00	4,5
6	1,200	1,200	0,0	1,65	168	0,77	1,98	1,82	0,39	0,480	72,40	43,00	0,00	9,90	0,00	4,67	0,00	2,80	0,00	1,87	1,42	2161	-2161	0,69	0,08	0,00	5,1
0	0,200	0,000	0,2	0,11	0	0,02	0,02	0,00	1,00	0,540	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	251	251	0,02	0,00		0,0
1	0,283	0,200	0,2	0,56	58	0,06	0,16	0,15	0,37	0,540	36,80	17,12	6,99	2,52	0,00	0,89	1,04	0,71	0,00	0,00	0,72	611	-109	0,04	0,02	0,99	1,0
2	0,447	0,400	0,2	0,97	102	0,14	0,43	0,41	0,32	0,530	54,10	30,30	7,35	3,36	4,15	0,65	1,84	1,37	0,00	0,00	1,06	971	-469	0,11	0,03	0,49	2,1
3	0,632	0,600	0,2	1,19	124	0,26	0,75	0,71	0,34	0,535	61,20	35,33	5,96	6,04	4,00	1,39	2,64	0,00	1,63	0,68	1,20	1331	-830	0,21	0,05	0,33	2,9
4	0,824	0,799	0,2	1,36	141	0,40	1,12	1,05	0,36	0,505	66,70	39,00	5,14	7,67	3,63	2,64	2,67	0,85	1,94	0,00	1,31	1690	-1188	0,34	0,06	0,25	3,7
5	1,020	1,000	0,2	1,51	155	0,58	1,54	1,43	0,37	0,495	71,13	41,49	4,35	8,73	3,21	3,45	2,48	1,52	1,93	0,58	1,39	2051	-1550	0,51	0,06	0,20	3,9
6	1,217	1,200	0,2	1,65	168	0,79	2,01	1,84	0,39	0,480	72,60	42,80	3,85	9,35	2,87	3,90	2,24	1,92	1,79	0,93	1,42	2412	-1910	0,71	0,08	0,16	5,1
0	0,400	0,000	0,4	0,22	0	0,09	0,09	0,00	1,00	0,543	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	509	509	0,09	0,00		0,0
1	0,447	0,201	0,4	0,27	12	0,11	0,12	0,05	0,91	0,538	10,56	5,33	0,77	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,21	871	147	0,11	0,00	1,99	0,3
2	0,564	0,400	0,4	0,87	88	0,20	0,49	0,45	0,40	0,533	49,50	23,20	10,36	3,57	0,00	1,82	1,88	1,08	0,00	0,00	0,97	1230	-211	0,17	0,03	1,00	1,8
3	0,719	0,600	0,4	1,16	119	0,32	0,83	0,77	0,38	0,528	69,80	32,18	10,60	1,20	4,54	2,56	0,60	1,94	1,08	0,46	1,37	1590	-571	0,27	0,04	0,67	2,8
4	0,894	0,800	0,4	1,36	138	0,49	1,22	1,11	0,40	0,543	65,80	37,20	9,62	4,30	5,56	0,86	2,54	1,92	0,52	1,59	1,29	1950	-931	0,43	0,06	0,50	3,6
5	1,078	1,001	0,4	1,51	154	0,64	1,62	1,49	0,39	0,493	69,45	40,03	8,49	6,32	5,54	0,70	3,33	1,00	1,66	1,46	1,36	2312	-1293	0,57	0,07	0,40	4,2
6	1,266	1,201	0,4	1,65	166	0,85	2,08	1,90	0,41	0,485	72,20	42,10	7,54	7,63	5,20	1,80	3,49	0,00	2,16	0,92	1,42	2672	-1653	0,78	0,07	0,33	4,5
0	0,600	0,000	0,6	0,33	0	0,20	0,20	0,00	1,00	0,545	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	764	764	0,20	0,00		0,0
1	0,632	0,201	0,6	0,36	8	0,22	0,23	0,04	0,98	0,547	6,48	3,30	0,34	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,13	1126	402	0,22	0,00	2,99	0,2
2	0,720	0,400	0,6	0,45	24	0,29	0,33	0,16	0,88	0,537	19,72	9,10	2,40	0,62	0,20	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,39	1484	44	0,28	0,01	1,50	0,6
3	0,847	0,600	0,6	1,08	107	0,41	0,92	0,82	0,45	0,520	56,00	26,25	12,25	4,23	0,30	2,29	2,32	1,24	0,00	0,84	1,10	1844	-316	0,37	0,04	1,00	2,5
4	0,998	0,800	0,6	1,36	132	0,63	1,35	1,19	0,47	0,590	64,00	33,81	12,81	0,30	4,45	3,58	0,49	1,70	1,77	0,40	1,25	2204	-677	0,59	0,05	0,75	2,9
5	1,166	1,000	0,6	1,49	150	0,73	1,74	1,58	0,42	0,492	68,70	37,90	11,95	2,76	6,00	2,36	1,69	2,55	0,60	1,26	1,35	2565	-1037	0,67	0,06	0,60	4,0
6	1,341	1,200	0,6	1,64	164	0,94	2,19	1,98	0,43	0,487	72,50	40,67	11,00	4,88	6,45	1,00	2,98	2,27	0,58	1,89	1,42	2925	-1397	0,88	0,07	0,50	4,3
0	0,800	0,000	0,8	0,44	0	0,35	0,35	0,00	1,00	0,548	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1020	1020	0,35	0,00		0,0
1	0,825	0,201	0,8	0,46	5	0,38	0,38	0,00	0,99	0,550	4,75	2,40	0,20	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,09	1381	657	0,37	0,00	3,98	0,0
2	0,894	0,400	0,8	0,50	14	0,44	0,45	0,11	0,97	0,536	12,00	6,00	1,13	0,15	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,24	1739	298	0,43	0,01	2,00	0,4
3	0,997	0,600	0,8	0,75	59	0,54	0,75	0,53	0,71	0,515	37,70	14,00	5,85	2,96	1,74	1,06	0,69	0,45	0,27	0,15	0,74	2099	-62	0,51	0,02	1,33	1,5
4	1,131	0,800	0,8	1,30	122	0,77	1,15	1,25	0,53	0,560	61,50	28,46	13,80	4,90	0,34	2,65	2,71	1,44	0,00	1,00	1,21	2459	-422	0,72	0,05	1,00	3,4
5	1,281	1,000	0,8	1,47	144	0,86	1,88	1,66	0,46	0,490	66,80	34,50	14,27	1,43	4,14	4,11	1,26	1,28	2,00	0,96	1,31	2819	-782	0,80	0,06	0,80	3,6
6	1,442	1,200	0,8	1,63	160	1,08	2,34	2,08	0,46	0,488	71,00	38,50	13,70	1,38	6,01	3,46	0,78	2,67	1,10	0,60	1,39	3179	-1142	1,01	0,07	0,67	4,1
0	1,000	0,000	1,0	0,55	0	0,55	0,55	0,00	1,00	0,549	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1273	1273	0,55	0,00		-0,1
1	1,019	0,200	1,0	0,56	4	0,57	0,57	0,00	1,00	0,547	3,55	1,89	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,07	1633	913	0,57	0,00	5,00	0,0
2	1,079	0,400	1,0	0,59	10	0,62	0,63	0,10	0,99	0,534	8,94	4,53	0,65	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,18	1993	553	0,62	0,00	2,50	0,1
3	1,166	0,599	1,0	0,65	21	0,72	0,75	0,22	0,96	0,522	17,00	8,10	2,10	0,55	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,33	2352	195	0,71	0,01	1,67	0,7
4	1,280	0,800	1,0	1,17	98	0,97	1,50	1,14	0,65	0,570	53,80	20,60	10,88	6,28	3,54	1,69	0,43	0,46	0,86	0,96	1,05	2714	-167	0,93	0,03	1,25	2,0
5	1,413	1,000	1,0	1,42	135	1,03	2,01	1,72	0,51	0,487	64,20	30,00	14,95	5,30	0,45	2,97	2,97	1,53	0,00	1,14	1,26	3074	-527	0,97	0,06	1,00	3,6
6	1,560	1,200	1,0	1,61	154	1,25	2,51	2,17	0,50	0,486	69,50	35,36	15,44	2,29	3,95	4,51	1,86	0,92	2,08	1,39	1,36	3434	-888	1,18	0,07	0,83	4,3

Ummagnetisierungsverluste bei 50 Hz

	I_{pm} [A]	I_m [A]	I_{eff} [A]	U [V]	U_L [mV]	P [W]	S [VA]	Q [VAR]	PF	R [Ω]	Φ_{90} [μVs]	GS	2.OS	3.OS	4.OS	5.OS	6.OS	7.OS	8.OS	9.OS	B [T]	H _z [A/m]	H _{-z} [A/m]	P _{cu}	P _{fe}	I_g/I_m	P _d /m
0	0,200	0,000	0,2	0,10	0	0,02	0,02	0,00	1,00	0,515	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	251	251	0,02	0,00		0,0
1	0,200	0,200	0,0	1,31	142	0,07	0,26	0,25	0,27	0,515	42,98	25,20	0,31	5,15	0,28	2,14	0,25	1,15	0,23	0,65	0,84	360	-360	0,02	0,05	0,00	3,1
2	0,400	0,400	0,0	1,88	204	0,17	0,75	0,73	0,22	0,515	54,82	32,33	0,48	7,01	0,49	2,75	0,35	1,21	0,26	0,51	1,07	720	-720	0,08	0,08	0,00	5,4
3	0,600	0,600	0,0	2,34	254	0,30	1,40	1,37	0,21	0,510	62,10	36,74	0,32	8,49	0,29	3,67	0,28	1,90	0,28	1,03	1,22	1080	-1080	0,18	0,12	0,00	7,4
4	0,800	0,800	0,0	2,60	281	0,47	2,08	2,02	0,23	0,515	66,20	39,81	0,63	9,25	0,54	3,92	0,45	1,86	0,34	0,83	1,30	1441	-1441	0,33	0,14	0,00	8,8
5	1,000	1,000	0,0	2,81	302	0,70	2,80	2,71	0,25	0,515	71,10	42,32	0,57	10,04	0,52	4,44	0,43	2,26	0,38	1,18	1,39	1801	-1801	0,52	0,19	0,00	11,8
6	1,200	1,200	0,0	3,07	330	0,93	3,69	3,57	0,25	0,515	73,67	44,03	0,82	10,52	0,64	4,58	0,53	2,19	0,36	1,02	1,44	2161	-2161	0,74	0,19	0,00	11,9
0	0,200	0,000	0,2	0,10	0	0,02	0,02	0,00	1,00	0,515	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	251	251	0,02	0,00		0,0
1	0,283	0,200	0,2	0,99	106	0,07	0,28	0,27	0,27	0,515	36,18	16,58	6,68	2,39	0,63	0,64	0,70	0,48	0,26	0,29	0,71	611	-109	0,04	0,03	0,99	2,1
2	0,447	0,400	0,2	1,82	197	0,18	0,81	0,79	0,23	0,515	53,84	30,24	7,06	3,85	3,98	0,50	1,52	0,98	0,19	0,52	1,06	971	-469	0,10	0,08	0,49	5,1
3	0,632	0,600	0,2	2,24	242	0,32	1,41	1,38	0,22	0,515	62,09	36,06	5,38	6,98	3,65	1,98	2,32	0,55	1,28	0,40	1,22	1331	-830	0,21	0,11	0,33	6,9
4	0,824	0,800	0,2	2,55	275	0,48	2,10	2,04	0,23	0,515	66,48	39,17	4,82	8,16	3,39	2,72	2,29	0,84	1,39	0,32	1,30	1691	-1190	0,35	0,13	0,25	8,3
5	1,020	1,000	0,2	2,81	302	0,68	2,86	2,78	0,24	0,515	70,23	41,72	4,72	8,97	3,42	3,10	2,30	1,00	1,36	0,22	1,38	2051	-1550	0,54	0,14	0,20	9,1
6	1,217	1,200	0,2	3,04	328	0,94	3,07	3,58	0,25	0,515	73,30	43,62	4,19	9,73	3,11	3,61	2,17	1,28	1,32	0,31	1,44	2412	-1910	0,76	0,18	0,16	11,2
0	0,400	0,000	0,4	0,21	0	0,08	0,08	0,00	1,00	0,515	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	509	509	0,08	0,00		0,0
1	0,447	0,200	0,4	0,33	24	0,11	0,15	0,10	0,75	0,518	10,41	5,20	0,70	0,04	0,04	0,04	0,00	0,00	0,00	0,00	0,20	869	149	0,10	0,01	2,00	0,4
2	0,565	0,400	0,4	1,51	161	0,23	0,85	0,82	0,27	0,518	48,23	22,90	9,75	2,84	0,78	1,46	1,30	0,75	0,27	0,23	0,95	1230	-211	0,17	0,06	1,00	3,9
3	0,721	0,600	0,4	2,11	227	0,37	1,52	1,47	0,24	0,518	59,30	32,74	10,03	2,59	4,57	2,11	1,05	1,61	0,78	0,50	1,16	1590	-571	0,27	0,10	0,67	6,3
4	0,895	0,800	0,4	2,49	268	0,54	2,22	2,16	0,24	0,518	65,61	37,14	9,33	4,84	5,25	1,01	2,06	1,47	0,32	0,09	1,29	1950	-931	0,41	0,12	0,50	7,8
5	1,078	1,000	0,4	2,80	300	0,75	3,02	2,92	0,25	0,518	69,86	40,44	8,58	6,62	5,37	0,90	2,68	1,05	0,86	0,86	1,37	2310	-1291	0,60	0,15	0,40	9,4
6	1,264	1,200	0,4	3,05	328	1,01	3,87	3,73	0,26	0,520	73,55	42,78	7,76	8,02	5,19	1,77	3,03	0,60	1,35	0,75	1,44	2670	-1651	0,83	0,18	0,33	11,4
0	0,600	0,000	0,6	0,31	0	0,19	0,19	0,00	1,00	0,518	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	764	764	0,19	0,00		0,0
1	0,632	0,200	0,6	0,36	15	0,21	0,23	0,08	0,93	0,517	6,53	3,29	0,36	0,06	0,04	0,03	0,02	0,01	0,00	0,00	0,13	1124	404	0,21	0,00	3,00	0,2
2	0,719	0,400	0,6	0,56	45	0,28	0,40	0,29	0,70	0,518	18,19	8,99	2,13	0,19	0,13	0,04	0,02	0,05	0,05	0,02	0,36	1484	44	0,27	0,02	1,50	1,0
3	0,846	0,600	0,6	1,85	196	0,45	1,56	1,49	0,29	0,517	54,31	26,22	11,61	3,33	1,10	2,27	1,89	0,76	0,38	0,52	1,06	1844	-316	0,37	0,08	1,00	5,2
4	1,000	0,800	0,6	2,40	257	0,64	2,40	2,32	0,26	0,518	63,37	33,83	12,28	1,13	4,35	3,09	0,51	1,34	1,12	0,17	1,24	2204	-677	0,52	0,12	0,75	7,5
5	1,164	1,000	0,6	2,75	294	0,84	3,21	3,10	0,26	0,518	68,34	38,25	11,65	3,45	5,73	2,12	1,49	1,98	0,51	0,65	1,34	2565	-1037	0,70	0,14	0,60	9,0
6	1,341	1,200	0,6	3,03	325	1,09	4,06	3,90	0,27	0,520	72,00	41,22	10,91	5,45	6,23	1,19	2,52	1,90	0,38	1,06	1,41	2925	-1397	0,94	0,16	0,50	9,9
0	0,800	0,000	0,8	0,42	0	0,33	0,33	0,00	1,00	0,519	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1020	1020	0,33	0,00		0,1
1	0,825	0,200	0,8	0,44	11	0,36	0,36	0,08	0,98	0,519	4,67	2,40	0,20	0,05	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,09	1379	658	0,35	0,00	4,00	0,2
2	0,893	0,400	0,8	0,54	28	0,42	0,48	0,23	0,88	0,520	11,23	5,97	0,98	0,23	0,12	0,03	0,00	0,03	0,03	0,00	0,22	1739	298	0,41	0,01	2,00	0,6
3	0,997	0,600	0,8	0,81	67	0,54	0,81	0,60	0,67	0,519	26,40	11,91	3,89	1,07	0,42	0,08	0,00	0,10	0,08	0,05	0,52	2099	-62	0,52	0,02	1,33	1,5
4	1,130	0,800	0,8	2,09	220	0,76	2,36	2,24	0,32	0,519	59,93	28,60	13,38	4,13	1,03	2,59	2,20	0,89	0,33	0,64	1,18	2459	-422	0,66	0,10	1,00	6,3
5	1,280	1,000	0,8	2,66	282	0,98	3,40	3,26	0,29	0,519	66,00	35,03	13,74	1,09	4,32	3,62	0,88	1,25	1,33	0,41	1,29	2819	-782	0,85	0,13	0,80	8,4
6	1,439	1,200	0,8	2,98	318	1,22	4,28	4,10	0,28	0,520	70,84	38,79	13,27	2,43	5,93	2,94	0,98	2,13	0,98	0,44	1,39	3179	-1142	1,08	0,14	0,67	9,1
0	1,000	0,000	1,0	0,52	0	0,52	0,52	0,00	1,00	0,519	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1273	1273	0,52	0,00		0,0
1	1,017	0,200	1,0	0,54	8	0,54	0,54	0,07	0,99	0,519	3,69	1,91	0,14	0,07	0,02	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,07	1633	913	0,54	0,00	5,00	0,1
2	1,077	0,400	1,0	0,60	21	0,61	0,64	0,20	0,95	0,520	8,71	4,38	0,63	0,17	0,09	0,02	0,16	0,03	0,02	0,00	0,17	1993	553	0,60	0,01	2,50	0,4
3	1,166	0,600	1,0	0,71	39	0,72	0,83	0,41	0,87	0,520	15,85	7,96	1,62	0,29	0,10	0,13	0,05	0,04	0,04	0,00	0,31	2354	193	0,71	0,01	1,67	0,8
4	1,282	0,800	1,0	1,50	146	0,91	1,96	1,73	0,47	0,519	47,21	18,11	8,69	4,50	2,59	1,26	0,73	0,44	0,26	0,28	0,93	2714	-167	0,85	0,06	1,25	3,8
5	1,412	1,000	1,0	2,32	241	1,15	3,28	3,07	0,35	0,519	63,56	30,17	14,46	4,45	1,06	2,76	2,23	0,77	0,21	0,51	1,25	3074	-527	1,03	0,12	1,00	7,3
6	1,557	1,200	1,0	2,85	301	1,40	4,47	4,23	0,32	0,519	70,00	35,83	14,93	1,64	4,21	3,94	1,23	1,06	1,40	0,56	1,37	3434	-888	1,26	0,14	0,83	9,0

Ummagnetisierungsverluste bei 100 Hz

	$I_{\text{eff}} [A]$	$I_{\text{eff}} [A]$	$I_{\text{eff}} [A]$	$U [V]$	$U_L [mV]$	$P [W]$	$S [VA]$	$Q [VA]$	PF	$R [\Omega]$	$\Phi_{\text{eff}} [\mu Vs]$	GS	2.OS	3.OS	4.OS	5.OS	6.OS	7.OS	8.OS	9.OS	$B [T]$	$H_1 [A/m]$	$H_2 [A/m]$	P_{eff}	P_{eff}	$I_{\text{eff}}/I_{\text{eff}}$	P_{eff}/m
0	0,200	0,000	0,2	0,10	0	0,02	0,02	0,00	1,00	0,515	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	251	251	0,02	0,00		0,0
1	0,200	0,200	0,0	2,41	264	0,15	0,48	0,46	0,31	0,515	43,50	25,00	0,12	4,52	0,12	1,59	0,08	0,65	0,05	0,27	0,85	360	-360	0,02	0,13	0,00	8,2
2	0,400	0,400	0,0	0,35	381	0,31	1,39	1,36	0,22	0,510	53,90	32,10	0,10	7,00	0,20	2,82	0,20	1,44	0,16	0,78	1,06	720	-720	0,08	0,23	0,00	14,5
3	0,600	0,600	0,0	4,34	474	0,50	2,60	2,55	0,19	0,515	60,80	36,50	0,32	8,47	0,25	3,70	0,20	1,91	0,15	1,04	1,19	1080	-1080	0,19	0,31	0,00	19,9
4	0,800	0,800	0,0	4,90	535	0,71	3,92	3,86	0,18	0,510	66,78	40,00	0,42	9,52	0,32	4,35	0,27	2,34	0,21	1,31	1,31	1441	-1441	0,33	0,38	0,00	24,3
5	1,000	1,000	0,0	5,32	580	0,94	5,32	5,23	0,18	0,510	70,24	42,15	0,44	10,12	0,35	4,70	0,24	2,62	0,18	1,52	1,38	1801	-1801	0,51	0,43	0,00	27,3
6	1,200	1,200	0,0	5,68	618	1,25	6,81	6,69	0,18	0,515	72,93	43,95	0,46	10,73	0,39	5,05	0,29	2,85	0,22	1,69	1,43	2161	-2161	0,74	0,51	0,00	32,2
0	0,200	0,000	0,2	0,10	0	0,02	0,02	0,00	1,00	0,515	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	251	251	0,02	0,00		0,0
1	0,283	0,200	0,2	1,72	186	0,12	0,48	0,48	0,24	0,515	34,21	15,96	6,00	2,01	0,66	0,57	0,49	0,31	0,17	0,12	0,67	611	-109	0,04	0,07	0,99	4,7
2	0,447	0,400	0,2	3,35	367	0,31	1,50	1,46	0,21	0,510	53,23	30,36	6,87	4,05	3,98	0,47	1,72	1,00	0,40	0,72	1,04	971	-469	0,10	0,21	0,49	13,2
3	0,633	0,600	0,2	4,19	458	0,50	2,65	2,60	0,19	0,510	60,40	35,60	4,75	7,25	3,29	2,32	2,15	0,68	1,32	0,18	1,18	1331	-830	0,20	0,30	0,33	18,7
4	0,823	0,800	0,2	4,80	524	0,71	3,95	3,88	0,18	0,510	66,30	39,35	3,97	8,76	2,85	3,47	2,11	1,52	1,51	0,63	1,30	1691	-1190	0,35	0,36	0,25	23,1
5	1,020	1,000	0,2	5,27	575	0,96	5,38	5,29	0,18	0,515	70,20	41,92	3,31	9,61	2,40	4,07	1,81	1,94	1,35	0,90	1,38	2051	-1550	0,54	0,42	0,20	26,9
6	1,218	1,200	0,2	5,66	616	1,27	6,89	6,78	0,18	0,515	73,10	43,87	2,92	10,34	2,14	4,56	1,65	2,32	1,27	1,18	1,43	2412	-1910	0,76	0,51	0,16	32,1
0	0,400	0,000	0,4	0,21	0	0,08	0,08	0,00	1,00	0,518	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	509	509	0,08	0,00		0,0
1	0,447	0,200	0,4	0,51	48	0,12	0,23	0,19	0,51	0,518	10,42	5,10	0,80	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00	0,20	869	149	0,10	0,01	2,00	0,7
2	0,563	0,400	0,4	2,70	295	0,32	1,52	1,49	0,21	0,515	47,46	22,90	9,33	2,51	1,12	1,50	1,11	0,65	0,37	0,36	0,93	1230	-211	0,16	0,15	1,00	9,7
3	0,720	0,600	0,4	3,89	424	0,53	2,79	2,74	0,19	0,518	58,88	32,81	9,20	3,22	4,47	1,53	1,29	1,47	0,49	0,63	1,15	1590	-571	0,27	0,26	0,67	16,6
4	0,894	0,800	0,4	4,61	503	0,76	4,12	4,06	0,18	0,513	65,43	37,70	8,27	6,00	5,14	1,02	2,74	1,31	1,11	1,30	1,28	1950	-931	0,41	0,35	0,50	22,2
5	1,081	1,000	0,4	5,18	564	1,04	5,59	5,49	0,19	0,518	69,10	40,71	7,02	7,82	4,70	2,10	3,01	0,60	1,70	0,82	1,35	2310	-1291	0,60	0,44	0,40	27,6
6	1,266	1,200	0,4	5,63	611	1,33	7,12	6,66	0,19	0,520	72,26	43,00	6,30	8,97	4,41	3,00	3,06	0,89	1,97	0,51	1,42	2670	-1651	0,83	0,50	0,33	31,5
0	0,600	0,000	0,6	0,31	0	0,19	0,19	0,00	1,00	0,520	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	764	764	0,19	0,00		0,0
1	0,633	0,200	0,6	0,43	30	0,21	0,27	0,17	0,78	0,520	6,30	3,34	0,39	0,09	0,05	0,04	0,02	0,02	0,02	0,01	0,12	1124	404	0,21	0,01	3,00	0,4
2	0,720	0,400	0,6	0,89	87	0,30	0,64	0,57	0,46	0,515	17,74	8,80	2,10	0,21	0,23	0,12	0,03	0,06	0,03	0,00	0,35	1484	44	0,27	0,03	1,50	1,9
3	0,848	0,600	0,6	3,30	358	0,58	2,79	2,73	0,21	0,517	54,00	26,31	11,21	3,03	1,05	2,03	1,64	0,61	0,33	0,53	1,06	1844	-316	0,37	0,21	1,00	13,2
4	1,000	0,800	0,6	4,31	469	0,83	4,31	4,23	0,19	0,515	63,28	34,42	11,45	1,85	4,64	2,58	0,59	1,73	1,02	0,35	1,24	2204	-677	0,52	0,32	0,75	20,0
5	1,165	1,000	0,6	4,97	540	1,11	5,00	5,69	0,19	0,517	68,37	38,63	10,50	4,63	5,71	1,23	2,27	1,95	0,37	1,32	1,34	2565	-1037	0,70	0,41	0,60	25,9
6	1,342	1,200	0,6	5,49	596	1,41	7,35	7,21	0,19	0,520	72,23	41,64	9,58	6,60	5,92	0,81	3,17	1,40	1,25	1,47	1,42	2925	-1397	0,94	0,47	0,50	30,0
0	0,800	0,000	0,8	0,42	0	0,33	0,33	0,00	1,00	0,520	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1020	1020	0,33	0,00		0,0
1	0,825	0,200	0,8	0,48	22	0,36	0,39	0,16	0,91	0,520	4,58	2,32	0,19	0,08	0,00	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,09	1379	658	0,35	0,00	4,00	0,3
2	0,894	0,400	0,8	0,70	56	0,43	0,62	0,45	0,69	0,518	11,50	5,88	1,03	0,22	0,16	0,07	0,01	0,43	0,03	0,01	0,23	1739	298	0,41	0,02	2,00	1,2
3	1,000	0,600	0,8	1,32	129	0,57	1,32	1,18	0,44	0,518	25,76	12,13	3,76	0,76	0,22	0,22	0,06	0,07	0,06	0,02	0,51	2099	-62	0,52	0,05	1,33	3,4
4	1,132	0,800	0,8	3,72	403	0,93	4,20	4,10	0,22	0,516	59,46	27,00	12,88	3,58	1,10	2,46	1,91	0,59	0,35	0,58	1,17	2459	-422	0,66	0,27	1,00	17,0
5	1,281	1,000	0,8	4,57	496	1,21	5,85	5,72	0,21	0,519	66,23	35,27	13,20	0,86	4,58	3,32	0,42	1,65	1,38	0,14	1,30	2819	-782	0,85	0,36	0,80	22,7
6	1,442	1,200	0,8	5,18	561	1,52	7,46	7,30	0,20	0,520	71,30	39,45	12,48	3,29	6,09	2,30	1,70	2,38	0,56	1,13	1,40	3179	-1142	1,08	0,44	0,67	27,8
0	1,000	0,000	1,0	0,52	0	0,52	0,52	0,00	1,00	0,520	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1273	1273	0,52	0,00		0,0
1	1,021	0,200	1,0	0,56	17	0,55	0,57	0,15	0,96	0,520	3,76	1,82	0,10	0,05	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,07	1633	913	0,54	0,00	5,00	0,2
2	1,077	0,400	1,0	0,68	41	0,62	0,73	0,40	0,84	0,520	8,37	4,31	0,60	0,22	0,11	0,04	0,01	0,03	0,01	0,00	0,16	1993	553	0,60	0,01	2,50	0,8
3	1,169	0,599	1,0	0,96	78	0,74	1,12	0,83	0,66	0,518	15,27	7,84	1,77	0,25	0,14	0,19	0,08	0,05	0,05	0,03	0,30	2352	195	0,71	0,03	1,67	2,2
4	1,281	0,800	1,0	2,43	257	0,98	3,10	2,94	0,32	0,518	42,60	17,32	7,70	3,49	1,84	0,83	0,48	0,43	0,25	0,23	0,84	2714	-167	0,85	0,13	1,25	8,4
5	1,414	1,000	1,0	4,12	445	1,35	5,82	5,66	0,23	0,519	63,51	30,32	14,21	4,13	1,16	2,81	2,23	0,67	0,40	0,69	1,25	3074	-527	1,04	0,31	1,00	19,8
6	1,562	1,200	1,0	4,82	521	1,66	7,52	7,33	0,22	0,521	69,05	36,22	14,62	1,10	4,47	3,87	0,91	1,42	1,61	0,44	1,35	3434	-888	1,27	0,39	0,83	24,7

Ummagnetisierungsverluste bei 200 Hz

	$I_{\text{eff}} [A]$	$I_{\text{eff}} [A]$	$I_{\text{eff}} [A]$	$U [V]$	$U_L [mV]$	$P [W]$	$S [VA]$	$Q [VAR]$	PF	$R [\Omega]$	$\Phi_{\text{eff}} [\mu Vs]$	GS	$2.OS$	$3.OS$	$4.OS$	$5.OS$	$6.OS$	$7.OS$	$8.OS$	$9.OS$	$B [T]$	$H_L [A/m]$	$H [A/m]$	P_{ex}	P_{in}	$I_{\text{eff}}/I_{\text{eff}}$	P_{eff}/m
0	0,200	0,000	0,2	0,10	0	0,02	0,02	0,00	1,00	0,505	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	251	251	0,02	0,00		0,0
1	0,200	0,200	0,0	4,37	479	0,37	0,87	0,79	0,43	0,505	43,28	24,36	0,04	3,65	0,06	0,97	0,04	0,25	0,03	0,05	0,85	360	-360	0,02	0,35	0,00	22,2
2	0,400	0,400	0,0	6,15	674	0,68	2,46	2,36	0,27	0,505	54,65	32,06	0,14	6,31	0,09	2,13	0,04	0,89	0,02	0,33	1,07	720	-720	0,08	0,60	0,00	38,0
3	0,600	0,600	0,0	7,36	806	0,97	0,44	4,30	0,22	0,505	61,55	36,57	0,13	8,08	0,05	3,15	0,05	1,37	0,05	0,62	1,21	1080	-1080	0,18	0,79	0,00	50,0
4	0,800	0,800	0,0	8,32	911	1,28	6,66	6,53	0,19	0,510	66,14	39,53	0,07	9,20	0,04	4,00	0,04	2,00	0,05	1,00	1,30	1441	-1441	0,33	0,95	0,00	60,5
5	1,000	1,000	0,0	9,14	998	1,69	9,12	8,97	0,19	0,510	71,00	41,92	0,19	9,06	0,11	3,82	0,08	1,97	0,07	1,06	1,39	1801	-1801	0,51	1,18	0,00	74,8
6	1,200	1,200	0,0	9,83	1073	2,07	11,78	11,61	0,18	0,510	73,68	43,72	0,23	9,73	0,16	4,22	0,11	2,23	0,08	1,25	1,44	2161	-2161	0,73	1,34	0,00	84,7
0	0,200	0,000	0,2	0,10	0	0,02	0,02	0,00	1,00	0,510	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	251	251	0,02	0,00		0,0
1	0,284	0,200	0,2	2,70	296	0,18	0,77	0,74	0,24	0,505	28,60	13,45	4,28	1,34	0,52	0,32	0,20	0,12	0,07	0,04	0,56	611	-109	0,04	0,14	0,99	8,9
2	0,448	0,400	0,2	5,94	651	0,66	2,66	2,58	0,25	0,505	53,40	30,00	6,67	3,45	3,19	0,46	1,03	0,49	0,17	0,18	1,05	971	-469	0,10	0,56	0,49	35,4
3	0,632	0,600	0,2	7,26	795	0,97	4,59	4,48	0,21	0,505	61,00	35,54	4,84	6,73	3,12	1,83	1,77	0,44	0,86	0,21	1,20	1331	-830	0,20	0,77	0,33	48,7
4	0,825	0,800	0,2	8,25	903	1,29	6,81	6,68	0,19	0,510	66,00	39,12	4,13	8,40	2,89	3,09	1,97	1,20	1,24	0,48	1,29	1691	-1190	0,35	0,94	0,25	59,8
5	1,020	1,000	0,2	9,08	993	1,63	9,08	9,11	0,18	0,515	70,61	41,44	4,57	8,18	3,11	2,81	2,08	1,00	1,33	0,24	1,38	2051	-1550	0,54	1,09	0,20	69,4
6	1,216	1,200	0,2	9,80	1070	2,08	11,95	11,78	0,17	0,515	73,34	43,30	4,12	9,05	2,91	3,42	2,04	1,44	1,40	0,54	1,44	2412	-1910	0,76	1,32	0,16	83,6
0	0,400	0,000	0,4	0,21	0	0,08	0,03	0,00	1,00	0,520	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	509	509	0,08	0,00		0,0
1	0,448	0,200	0,4	0,90	95	0,13	0,40	0,38	0,33	0,523	10,32	5,08	0,71	0,05	0,04	0,04	0,01	0,00	0,00	0,00	0,20	869	149	0,10	0,03	2,00	1,7
2	0,564	0,400	0,4	4,77	522	0,54	2,69	2,64	0,20	0,518	44,42	21,24	8,20	2,67	1,25	0,97	0,70	0,47	0,26	0,16	0,87	1230	-211	0,16	0,38	1,00	23,8
3	0,720	0,600	0,4	7,14	783	1,01	5,15	5,05	0,20	0,515	58,88	32,38	9,24	2,78	4,00	1,62	0,99	1,15	0,58	0,39	1,15	1590	-571	0,27	0,74	0,67	47,1
4	0,895	0,800	0,4	8,08	884	1,33	0,23	7,11	0,18	0,520	66,00	36,81	9,48	3,81	4,81	0,86	1,74	1,28	0,22	0,74	1,29	1950	-931	0,42	0,91	0,50	57,9
5	1,080	1,000	0,4	8,97	981	1,74	9,69	9,53	0,18	0,515	70,11	40,04	8,58	5,84	5,10	0,42	2,58	0,88	0,99	0,90	1,37	2310	-1291	0,60	1,14	0,40	72,2
6	1,266	1,200	0,4	9,71	1060	2,13	12,32	12,12	0,17	0,520	73,18	42,42	7,70	7,32	4,97	1,52	2,95	0,25	1,53	0,69	1,43	2670	-1651	0,83	1,30	0,33	82,2
0	0,600	0,000	0,6	0,31	0	0,19	0,19	0,00	1,00	0,520	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	764	764	0,19	0,00		0,0
1	0,632	0,200	0,6	0,65	60	0,22	0,41	0,34	0,54	0,522	6,84	3,42	0,39	0,07	0,04	0,04	0,01	0,00	0,01	0,00	0,13	1124	404	0,21	0,01	3,00	0,9
2	0,721	0,400	0,6	1,64	174	0,34	1,20	1,14	0,29	0,517	17,87	8,96	2,09	0,24	0,20	0,08	0,02	0,05	0,02	0,00	0,35	1484	44	0,27	0,07	1,50	4,6
3	0,847	0,600	0,6	5,96	653	0,92	5,04	4,97	0,18	0,517	53,17	25,30	10,40	3,07	1,23	1,48	1,16	0,52	0,40	0,33	1,04	1844	-316	0,37	0,55	1,00	34,8
4	1,001	0,800	0,6	7,73	845	1,36	7,73	7,60	0,18	0,515	64,12	33,24	12,50	0,84	3,52	2,86	0,65	0,88	0,94	0,33	1,26	2204	-677	0,52	0,84	0,75	53,5
5	1,167	1,000	0,6	8,75	956	1,80	10,22	10,06	0,18	0,518	69,00	37,76	11,84	2,40	5,31	2,17	1,18	1,80	0,54	0,63	1,35	2565	-1037	0,71	1,09	0,60	69,4
6	1,345	1,200	0,6	9,56	1044	2,21	12,87	12,67	0,17	0,523	72,57	40,74	11,05	4,50	6,00	1,06	2,35	1,78	0,32	1,16	1,42	2925	-1397	0,95	1,26	0,50	80,1
0	0,800	0,000	0,8	0,42	0	0,34	0,34	0,00	1,00	0,525	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1020	1020	0,34	0,00		0,0
1	0,824	0,200	0,8	0,59	43	0,36	0,49	0,32	0,75	0,521	4,64	2,33	0,17	0,05	0,01	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,09	1379	658	0,35	0,01	4,00	0,6
2	0,893	0,400	0,8	1,13	111	0,46	1,01	0,90	0,45	0,520	11,52	5,98	1,06	0,21	0,14	0,06	0,02	0,04	0,03	0,00	0,23	1739	298	0,41	0,04	2,00	2,6
3	1,000	0,600	0,8	2,30	249	0,64	2,32	2,24	0,28	0,519	24,51	11,73	3,51	0,62	0,23	0,10	0,08	0,02	0,02	0,00	0,48	2099	-62	0,52	0,12	1,33	7,8
4	1,134	0,800	0,8	7,07	773	1,44	8,01	7,88	0,18	0,516	60,88	27,73	13,12	4,76	0,70	1,70	1,68	0,97	0,36	0,33	1,19	2459	-422	0,66	0,78	1,00	49,2
5	1,284	1,000	0,8	8,42	918	1,88	10,82	10,64	0,17	0,518	67,45	34,33	14,84	1,80	3,42	3,42	1,23	0,70	1,16	0,64	1,32	2819	-782	0,85	1,03	0,80	65,1
6	1,446	1,200	0,8	9,34	1019	2,30	13,51	13,31	0,17	0,524	71,49	38,40	13,63	1,11	5,40	3,13	0,48	1,90	1,11	0,27	1,40	3179	-1142	1,10	1,20	0,67	76,4
0	1,000	0,000	1,0	0,52	0	0,52	0,52	0,00	1,00	0,522	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1273	1273	0,52	0,00		0,0
1	1,020	0,200	1,0	0,62	33	0,55	0,63	0,31	0,87	0,523	3,61	1,86	0,13	0,05	0,02	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,07	1633	913	0,54	0,01	5,00	0,4
2	1,076	0,400	1,0	0,95	82	0,63	1,02	0,80	0,62	0,520	8,50	4,45	0,64	0,16	0,06	0,00	0,00	0,02	0,00	0,00	0,17	1993	553	0,60	0,03	2,50	2,0
3	1,166	0,600	1,0	1,53	152	0,78	1,80	1,62	0,43	0,518	15,62	7,81	1,70	0,21	0,15	0,13	0,06	0,03	0,03	0,01	0,31	2354	193	0,70	0,08	1,67	4,8
4	1,284	0,800	1,0	4,87	539	1,24	6,37	6,27	0,20	0,518	44,06	17,64	8,28	4,23	2,22	1,15	0,60	0,39	0,32	0,28	0,86	2714	-167	0,85	0,39	1,25	24,5
5	1,417	1,000	1,0	7,85	858	1,96	11,13	10,97	0,18	0,519	64,50	29,46	14,41	5,23	0,57	2,06	2,06	1,15	0,34	0,43	1,26	3074	-527	1,04	0,92	1,00	58,2
6	1,566	1,200	1,0	9,00	981	2,42	14,11	13,91	0,17	0,522	69,90	35,14	15,25	2,57	3,28	3,78	1,68	0,49	1,27	0,88	1,37	3434	-888	1,28	1,14	0,83	72,3

Ummagnetisierungsverluste bei 400 Hz

	I _{ges} [A]	I _u [A]	I _g [A]	U [V]	U _i [mV]	P [W]	S [VA]	Q [VAR]	PF	R [Ω]	Φ _{ges} [μVs]	GS	2.OS	3.OS	4.OS	5.OS	6.OS	7.OS	8.OS	9.OS	B [T]	H _u [A/m]	H _g [A/m]	P _{cu}	P _{Fe}	I _g /I _u	P _g /m
0	0,200	0,000	0,2	0,10	0	0,02	0,02	0,00	1,00	0,510	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	251	251	0,02	0,00		0,0
1	0,200	0,200	0,0	6,84	749	0,76	1,36	1,13	0,56	0,510	42,80	23,04	0,04	2,41	0,05	0,24	0,03	0,02	0,02	0,04	0,84	360	-360	0,02	0,74	0,00	46,9
2	0,400	0,400	0,0	9,86	1080	1,42	3,94	3,68	0,36	0,505	55,26	31,31	0,06	4,85	0,05	1,23	0,35	0,28	0,02	0,06	1,08	720	-720	0,08	1,34	0,00	84,9
3	0,600	0,600	0,0	11,87	1299	1,99	7,14	6,84	0,28	0,510	62,21	35,78	0,11	6,27	0,07	1,91	0,03	0,61	0,00	0,15	1,22	1080	-1080	0,18	1,81	0,00	114,5
4	0,800	0,800	0,0	13,43	1468	2,53	10,75	10,45	0,24	0,510	66,91	38,95	0,15	7,40	0,12	2,52	0,08	0,94	0,05	0,31	1,31	1441	-1441	0,33	2,20	0,00	139,7
5	1,000	1,000	0,0	14,75	1611	3,06	14,74	14,41	0,21	0,515	70,90	41,45	0,10	8,33	0,10	3,08	0,08	1,30	0,07	0,52	1,39	1801	-1801	0,52	2,55	0,00	161,4
6	1,200	1,200	0,0	15,91	1737	3,86	19,07	18,66	0,20	0,515	73,18	43,20	0,07	9,01	0,06	3,46	0,05	1,51	0,03	0,62	1,43	2161	-2161	0,74	3,12	0,00	197,7
0	0,200	0,000	0,2	0,10	0	0,02	0,02	0,00	1,00	0,510	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	251	251	0,02	0,00		0,0
1	0,282	0,200	0,2	3,85	414	0,27	1,08	1,04	0,25	0,510	24,26	11,60	3,15	0,81	0,27	0,16	0,10	0,05	0,03	0,02	0,48	611	-109	0,04	0,23	0,99	14,5
2	0,447	0,400	0,2	9,47	1037	1,35	4,24	4,01	0,32	0,505	53,83	28,77	6,64	2,03	2,23	0,54	0,44	0,25	0,12	0,02	1,06	971	-469	0,10	1,25	0,49	79,2
3	0,633	0,600	0,2	11,71	1281	1,97	7,40	7,13	0,27	0,510	61,78	34,66	5,53	4,68	2,70	0,65	1,01	0,10	0,25	0,07	1,21	1331	-830	0,20	1,77	0,33	111,9
4	0,824	0,800	0,2	13,33	1456	2,52	10,98	10,68	0,23	0,510	66,73	38,25	4,80	6,31	2,70	1,53	1,32	0,29	0,53	0,05	1,31	1691	-1190	0,35	2,17	0,25	137,8
5	1,020	1,000	0,2	14,68	1604	3,06	15,00	14,65	0,20	0,510	70,23	40,93	4,27	7,55	2,63	2,28	1,50	0,67	0,76	0,15	1,38	2051	-1550	0,53	2,53	0,20	160,4
6	1,218	1,200	0,2	15,86	1731	3,88	19,34	18,88	0,20	0,515	73,36	42,94	3,93	8,43	2,56	2,81	1,58	0,95	0,89	0,24	1,44	2412	-1910	0,76	3,12	0,16	197,6
0	0,400	0,000	0,4	0,21	0	0,08	0,08	0,00	1,00	0,513	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	509	509	0,08	0,00		0,0
1	0,447	0,200	0,4	1,51	163	0,16	0,68	0,66	0,23	0,513	10,30	5,10	0,72	0,04	0,01	0,02	0,01	0,00	0,00	0,00	0,20	869	149	0,10	0,06	2,00	3,5
2	0,567	0,400	0,4	7,17	783	0,86	4,05	3,97	0,21	0,510	41,20	19,24	7,21	2,38	0,84	0,65	0,44	0,22	0,12	0,07	0,81	1230	-211	0,16	0,70	1,00	44,1
3	0,722	0,600	0,4	11,14	1218	1,89	8,04	7,82	0,24	0,513	60,00	31,12	9,71	0,87	2,71	1,37	0,29	0,41	0,18	0,08	1,18	1590	-571	0,27	1,62	0,67	102,9
4	0,895	0,800	0,4	13,03	1424	2,50	11,66	11,38	0,21	0,515	65,70	36,20	9,06	3,32	4,00	0,70	1,14	0,73	0,17	0,27	1,29	1950	-931	0,41	2,09	0,50	132,4
5	1,080	1,000	0,4	14,50	1584	3,27	15,68	15,32	0,21	0,515	69,97	39,52	8,28	5,26	4,34	0,34	1,85	0,58	0,53	0,43	1,37	2310	-1291	0,60	2,67	0,40	169,2
6	1,268	1,200	0,4	15,71	1714	3,88	19,91	19,55	0,19	0,518	73,02	41,85	7,55	6,63	4,44	1,05	2,23	0,25	0,86	0,39	1,43	2670	-1651	0,83	3,05	0,33	193,3
0	0,600	0,000	0,6	0,31	0	0,19	0,19	0,00	1,00	0,513	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	764	764	0,18	0,00		0,0
1	0,632	0,200	0,6	1,01	103	0,23	0,64	0,59	0,37	0,513	6,66	3,35	0,30	0,06	0,01	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,13	1124	404	0,21	0,03	3,00	1,8
2	0,722	0,400	0,6	2,82	305	0,42	2,03	1,99	0,21	0,512	18,40	8,81	2,20	0,51	0,12	0,04	0,03	0,03	0,02	0,01	0,36	1484	44	0,27	0,15	1,50	9,7
3	0,850	0,600	0,6	9,50	1036	1,55	8,06	7,90	0,19	0,513	51,60	23,61	9,93	3,39	0,11	0,93	0,67	0,32	0,17	0,10	1,01	1844	-316	0,37	1,18	1,00	74,8
4	1,000	0,800	0,6	12,43	1358	2,45	12,47	12,20	0,20	0,513	63,77	32,68	11,90	1,03	2,89	2,13	0,55	0,55	0,45	0,22	1,25	2204	-677	0,51	1,94	0,75	122,8
5	1,170	1,000	0,6	14,13	1543	3,26	16,52	16,23	0,20	0,515	69,00	37,08	11,43	1,95	4,44	1,76	0,73	1,08	0,34	0,23	1,35	2565	-1037	0,70	2,56	0,60	162,0
6	1,347	1,200	0,6	15,47	1689	3,91	20,85	20,46	0,19	0,518	71,93	40,12	10,78	3,93	5,21	0,99	1,64	1,24	0,14	0,54	1,41	2925	-1397	0,94	2,97	0,50	188,3
0	0,800	0,000	0,8	0,41	0	0,33	0,33	0,00	1,00	0,516	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1020	1020	0,33	0,00		0,0
1	0,825	0,200	0,8	0,82	75	0,37	0,67	0,56	0,55	0,514	5,00	2,44	0,20	0,03	0,02	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,10	1379	658	0,35	0,02	4,00	1,2
2	0,894	0,400	0,8	1,84	193	0,50	1,65	1,57	0,30	0,513	12,26	5,94	1,12	0,17	0,04	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,24	1739	298	0,41	0,09	2,00	5,5
3	1,001	0,600	0,8	4,33	469	0,81	4,32	4,24	0,19	0,513	26,50	11,93	4,01	1,38	0,51	0,16	0,05	0,01	0,00	0,00	0,52	2099	-62	0,51	0,30	1,33	18,8
4	1,133	0,800	0,8	11,18	1221	2,36	12,65	12,42	0,19	0,514	58,66	26,70	12,02	4,18	1,04	1,27	1,02	0,53	0,30	0,21	1,15	2459	-422	0,66	1,70	1,00	107,8
5	1,284	1,000	0,8	13,52	1480	3,23	17,40	17,05	0,19	0,515	67,06	33,60	13,50	1,91	2,73	2,61	0,96	0,46	0,58	0,32	1,31	2819	-782	0,85	2,38	0,80	151,0
6	1,447	1,200	0,8	15,08	1645	3,93	21,83	21,47	0,18	0,518	70,90	37,75	13,25	0,88	4,61	2,65	0,37	1,24	0,75	0,21	1,39	3179	-1142	1,08	2,85	0,67	180,5
0	1,000	0,000	1,0	0,51	0	0,51	0,51	0,00	1,00	0,512	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1273	1273	0,51	0,00		0,0
1	1,017	0,200	1,0	0,76	58	0,55	0,77	0,54	0,71	0,513	3,61	1,80	0,13	0,02	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,07	1633	913	0,53	0,01	5,00	0,9
2	1,080	0,400	1,0	1,43	142	0,67	1,54	1,40	0,43	0,515	9,00	4,45	0,67	0,04	0,01	0,02	0,01	0,01	0,00	0,00	0,18	1993	553	0,60	0,07	2,50	4,2
3	1,170	0,600	1,0	2,63	277	0,88	3,09	2,97	0,28	0,512	16,85	7,95	2,02	0,47	0,09	0,02	0,02	0,02	0,01	0,00	0,33	2354	193	0,70	0,18	1,67	11,4
4	1,281	0,800	1,0	6,98	758	1,52	8,91	8,77	0,17	0,511	38,00	16,11	6,91	3,12	1,45	0,65	0,32	0,19	0,12	0,08	0,75	2714	-167	0,84	0,68	1,25	43,2
5	1,418	1,000	1,0	12,53	1367	3,12	17,82	17,51	0,17	0,515	63,00	28,62	13,51	4,80	0,94	1,52	1,34	0,72	0,37	0,28	1,24	3074	-527	1,04	2,08	1,00	132,2
6	1,568	1,200	1,0	14,51	1583	3,92	22,74	22,41	0,17	0,520	69,39	34,40	14,74	2,73	2,62	3,02	1,41	0,39	0,69	0,49	1,36	3434	-888	1,28	2,64	0,83	167,5

Ummagnetisierungsverluste bei 700 Hz

	I_{pm} [A]	I_m [A]	I_{p0} [A]	U [V]	U_L [mV]	P [W]	S [VA]	Q [VAR]	PF	R[Ω]	Φ_{pm} [μVs]	GS	2.OS	3.OS	4.OS	5.OS	6.OS	7.OS	8.OS	9.OS	B[T]	H _z [A/m]	H _{-z} [A/m]	P _{sw}	P _h	I_p/I_m	P _d /m	
0	0,200	0,000	0,2	0,10	0	0,02	0,02	0,00	1,00	0,505	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	251	251	0,02	0,00		0,0	
1	0,200	0,200	0,0	8,93	977	1,19	1,79	1,34	0,66	0,510	41,15	21,59	0,05	1,53	0,00	0,03	0,00	0,05	0,00	0,00	0,00	0,81	360	-360	0,02	1,17	0,00	74,2
2	0,400	0,400	0,0	13,28	1451	2,34	5,30	4,76	0,44	0,510	54,92	30,44	0,04	3,91	0,01	0,64	0,00	0,07	0,00	0,09	1,08	720	-720	0,08	2,26	0,00	143,2	
3	0,600	0,600	0,0	16,12	1759	3,27	9,66	9,08	0,34	0,510	62,31	35,33	0,16	5,61	0,06	1,39	0,02	0,28	0,00	0,11	1,22	1080	-1080	0,18	3,09	0,00	195,7	
4	0,800	0,800	0,0	18,28	1994	4,10	14,62	14,02	0,28	0,510	67,08	38,60	0,10	6,85	0,04	2,04	0,02	0,59	0,00	0,14	1,32	1441	-1441	0,33	3,77	0,00	239,3	
5	1,000	1,000	0,0	20,12	2194	5,30	20,08	19,40	0,26	0,515	70,54	41,11	0,18	7,85	0,09	2,60	0,05	0,91	0,02	0,26	1,38	1801	-1801	0,52	4,79	0,00	303,4	
6	1,200	1,200	0,0	21,70	2364	6,19	26,00	25,28	0,24	0,515	73,54	43,06	0,24	8,64	0,14	3,07	0,08	1,19	0,04	0,40	1,44	2161	-2161	0,74	5,45	0,00	345,4	
0	0,200	0,000	0,2	0,10	0	0,02	0,02	0,00	1,00	0,505	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	251	251	0,02	0,00		0,0	
1	0,283	0,200	0,2	4,76	519	0,36	1,34	1,29	0,26	0,505	21,30	10,59	2,45	0,48	0,13	0,07	0,34	0,01	0,00	0,00	0,42	611	-109	0,04	0,32	0,99	20,3	
2	0,448	0,400	0,2	12,67	1383	2,17	5,67	5,24	0,38	0,510	52,21	27,69	6,08	1,67	1,50	0,35	0,19	0,08	0,06	0,07	1,02	971	-469	0,10	2,07	0,49	131,1	
3	0,634	0,600	0,2	15,87	1734	3,21	10,07	9,53	0,32	0,510	61,71	34,11	5,55	4,02	2,29	0,43	0,62	0,13	0,07	0,10	1,21	1331	-830	0,20	3,01	0,33	190,5	
4	0,825	0,800	0,2	18,15	1980	4,08	15,02	14,41	0,27	0,510	66,76	37,90	4,86	5,77	2,47	1,17	1,00	0,17	0,27	0,06	1,31	1691	-1190	0,35	3,73	0,25	236,7	
5	1,022	1,000	0,2	20,04	2183	4,90	20,44	19,88	0,24	0,515	70,62	40,63	4,41	7,03	2,49	1,85	1,21	0,42	0,45	0,04	1,38	2051	-1550	0,54	4,36	0,20	276,6	
6	1,218	1,200	0,2	21,64	2357	6,18	26,34	25,59	0,23	0,515	73,42	42,78	3,99	8,02	2,41	2,45	1,30	0,73	0,58	0,15	1,44	2412	-1910	0,76	5,42	0,16	343,4	
0	0,400	0,000	0,4	0,20	0	0,08	0,08	0,00	1,00	0,513	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	509	509	0,08	0,00		0,0	
1	0,448	0,200	0,4	2,10	228	0,19	0,94	0,92	0,20	0,515	9,88	4,98	0,65	0,00	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,19	869	-149	0,10	0,09	2,00	5,6	
2	0,567	0,400	0,4	8,83	962	1,11	5,03	4,95	0,22	0,510	36,00	17,30	5,93	1,81	6,34	0,43	0,26	0,11	0,05	0,02	0,71	1230	-211	0,16	0,95	1,00	60,0	
3	0,722	0,600	0,4	14,98	1634	2,98	10,82	10,40	0,28	0,515	58,92	30,20	9,25	0,99	2,10	1,00	0,34	0,20	0,12	0,08	1,16	1590	-571	0,27	2,71	0,67	171,9	
4	0,896	0,800	0,4	17,70	1930	4,00	15,86	15,37	0,25	0,515	65,71	35,73	8,93	2,93	3,44	0,70	0,77	0,47	0,15	0,09	1,29	1950	-931	0,41	3,59	0,50	227,4	
5	1,080	1,000	0,4	19,75	2153	5,25	21,32	20,68	0,25	0,520	69,95	39,21	8,24	4,84	3,97	0,26	1,41	0,45	0,29	0,21	1,37	2310	-1291	0,61	4,64	0,40	294,4	
6	1,268	1,200	0,4	21,42	2335	6,17	27,20	26,47	0,23	0,518	73,00	41,70	7,48	6,36	4,12	0,98	1,86	0,22	0,62	0,25	1,43	2670	-1651	0,83	5,34	0,33	338,4	
0	0,600	0,000	0,6	0,31	0	0,19	0,19	0,00	1,00	0,515	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	764	764	0,19	0,00		0,0	
1	0,633	0,200	0,6	1,40	148	0,25	0,88	0,85	0,29	0,513	6,60	3,29	0,31	0,04	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,13	1124	-404	0,21	0,05	3,00	3,0	
2	0,723	0,400	0,6	3,89	424	0,52	2,84	2,78	0,18	0,513	17,90	8,58	2,00	0,39	0,08	0,02	0,02	0,02	0,00	0,00	0,35	1484	-44	0,27	0,25	1,50	16,0	
3	0,850	0,600	0,6	12,12	1319	2,60	10,28	10,09	0,20	0,513	47,19	21,79	8,66	2,87	1,00	0,80	0,51	0,24	0,13	0,08	0,93	1844	-316	0,37	2,23	1,00	141,3	
4	1,002	0,800	0,6	16,80	1831	3,78	16,85	16,38	0,22	0,515	63,42	31,87	11,42	1,32	2,27	1,60	0,51	0,33	0,17	0,15	1,24	2204	-677	0,52	3,26	0,75	206,9	
5	1,166	1,000	0,6	19,17	2091	5,11	22,34	21,75	0,23	0,518	68,86	36,74	11,22	1,80	3,94	1,56	0,60	0,75	0,28	0,14	1,35	2565	-1037	0,70	4,41	0,60	279,3	
6	1,346	1,200	0,6	21,07	2296	6,11	28,35	27,69	0,22	0,520	72,27	40,00	10,62	3,79	4,80	0,92	1,39	0,95	0,18	0,34	1,42	2925	-1397	0,94	5,17	0,50	327,7	
0	0,800	0,000	0,8	0,41	0	0,33	0,33	0,00	1,00	0,516	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1020	1020	0,33	0,00		0,0	
1	0,825	0,200	0,8	1,08	107	0,38	0,89	0,81	0,43	0,515	4,90	2,34	0,18	0,03	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,10	1379	-658	0,35	0,03	4,00	1,9	
2	0,895	0,400	0,8	2,58	275	0,55	2,30	2,22	0,24	0,513	11,93	5,88	1,04	0,11	0,00	0,02	0,01	0,00	0,00	0,00	0,23	1739	-298	0,41	0,14	2,00	8,9	
3	1,000	0,600	0,8	5,81	629	0,97	5,80	5,71	0,17	0,513	25,38	11,57	3,69	1,18	0,40	0,12	0,04	0,03	0,02	0,01	0,50	2099	-62	0,51	0,46	1,33	29,0	
4	1,136	0,800	0,8	14,63	1590	3,34	16,75	16,41	0,20	0,516	55,04	25,05	10,84	3,72	1,16	1,06	0,72	0,33	0,21	0,13	1,08	2459	-422	0,67	2,67	1,00	169,5	
5	1,284	1,000	0,8	18,30	1993	4,93	23,64	23,05	0,21	0,519	66,46	33,01	13,02	2,05	2,29	2,07	0,79	0,38	0,29	0,18	1,30	2819	-782	0,86	4,07	0,80	258,4	
6	1,447	1,200	0,8	20,51	2235	6,07	29,71	29,04	0,20	0,538	71,10	37,46	13,00	0,84	4,13	2,28	0,36	0,89	0,48	0,18	1,39	3179	-1142	1,13	4,94	0,67	313,5	
0	1,000	0,000	1,0	0,52	0	0,52	0,52	0,00	1,00	0,516	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1273	1273	0,52	0,00		0,0	
1	1,020	0,200	1,0	0,94	83	0,56	0,96	0,78	0,58	0,516	3,60	1,82	0,09	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,07	1633	-913	0,54	0,02	5,00	1,3	
2	1,080	0,400	1,0	1,96	203	0,71	2,11	1,99	0,33	0,513	8,95	4,42	0,64	0,04	0,01	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,18	1993	-553	0,60	0,11	2,50	6,8	
3	1,171	0,600	1,0	3,66	392	0,99	4,30	4,23	0,23	0,513	16,60	7,88	1,93	0,43	0,09	0,00	0,01	0,01	0,00	0,00	0,33	2354	-193	0,70	0,29	1,67	18,2	
4	1,286	0,800	1,0	8,66	953	1,84	11,37	11,20	0,16	0,514	34,67	14,83	5,93	2,46	1,07	0,47	0,23	0,14	0,10	0,66	0,68	2714	-167	0,85	0,99	1,25	62,8	
5	1,417	1,000	1,0	16,67	1814	4,42	23,61	23,22	0,19	0,518	61,00	27,67	12,61	4,40	1,16	1,29	0,94	0,46	0,29	0,19	1,20	3074	-527	1,04	3,38	1,00	214,3	
6	1,565	1,200	1,0	19,65	2142	5,88	30,77	30,20	0,19	0,533	69,30	34,00	14,23	2,64	2,31	2,46	1,08	0,39	0,40	0,23	1,36	3434	-888	1,31	4,57	0,83	290,0	

Ummagnetisierungsverluste bei 1000 Hz

	I_{pm} [A]	I_m [A]	I_{ϕ} [A]	U [V]	U_i [mV]	P [W]	S[VA]	Q[VAR]	PF	R[Ω]	Φ_{μ} [μVs]	GS	2.OS	3.OS	4.OS	5.OS	6.OS	7.OS	8.OS	9.OS	B[T]	H _z [A/m]	H _{-z} [A/m]	P _{sw}	P _μ	I_{ϕ}/I_m	P _μ /m
0	0,200	0,000	0,2	0,10	0	0,02	0,02	0,00	1,00	0,515	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	251	251	0,02	0,00		0,0
1	0,200	0,200	0,0	11,55	1259	1,78	2,31	1,48	0,77	0,515	36,31	18,79	0,07	0,72	0,02	0,08	0,01	0,02	0,00	0,01	0,71	360	-360	0,02	1,76	0,00	111,6
2	0,400	0,400	0,0	18,28	1991	4,07	7,29	6,05	0,56	0,515	54,12	28,94	0,05	2,63	0,00	0,09	0,01	0,14	0,00	0,04	1,06	720	-720	0,08	3,99	0,00	252,8
3	0,600	0,600	0,0	22,20	2423	5,67	13,32	12,06	0,43	0,505	61,76	34,17	0,64	4,27	0,25	0,48	0,05	0,16	0,08	0,00	1,21	1080	-1080	0,18	5,49	0,00	348,0
4	0,800	0,800	0,0	25,37	2765	7,10	20,29	19,00	0,35	0,515	66,67	34,99	0,70	5,64	0,37	1,03	0,07	0,20	0,09	0,13	1,31	1441	-1441	0,33	6,77	0,00	429,3
5	1,000	1,000	0,0	28,00	3052	9,25	28,01	26,44	0,33	0,515	70,25	40,33	0,74	6,76	0,46	1,56	0,14	0,29	0,06	0,17	1,38	1801	-1801	0,52	8,74	0,00	553,8
6	1,200	1,200	0,0	30,10	3315	11,00	36,10	34,40	0,30	0,510	73,38	42,44	0,84	7,65	0,55	2,01	0,20	0,43	0,00	0,20	1,44	2161	-2161	0,73	10,27	0,00	650,9
0	0,200	0,000	0,2	0,10	0	0,02	0,02	0,00	1,00	0,515	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	251	251	0,02	0,00		0,0
1	0,283	0,200	0,2	6,15	668	0,51	1,74	1,66	0,29	0,510	19,00	9,42	1,80	0,24	0,05	0,03	0,11	0,00	0,00	0,00	0,37	611	-109	0,04	0,47	0,99	29,7
2	0,448	0,400	0,2	17,13	1865	3,52	7,66	6,80	0,46	0,515	49,30	25,65	5,03	1,44	0,80	0,19	0,05	0,11	0,06	0,07	0,97	971	-469	0,10	3,42	0,49	216,6
3	0,633	0,600	0,2	21,82	2382	5,51	13,82	12,67	0,40	0,510	60,75	32,69	5,53	2,75	1,43	0,15	0,13	0,18	0,00	0,08	1,19	1331	-830	0,20	5,31	0,33	336,4
4	0,825	0,800	0,2	25,16	2743	7,03	20,76	19,53	0,34	0,515	66,30	36,83	5,15	4,45	1,95	0,45	0,31	0,09	0,17	0,12	1,30	1691	-1190	0,35	6,68	0,25	423,5
5	1,021	1,000	0,2	27,87	3037	9,19	28,47	26,93	0,32	0,520	70,14	39,74	4,75	5,82	2,21	0,94	0,58	0,14	0,19	0,09	1,38	2051	-1550	0,54	8,65	0,20	548,3
6	1,217	1,200	0,2	30,00	3303	10,90	36,50	34,80	0,30	0,515	73,22	42,00	4,48	6,87	2,33	1,41	0,78	0,25	0,19	0,08	1,44	2412	-1910	0,76	10,14	0,16	642,7
0	0,400	0,000	0,4	0,20	0	0,08	0,08	0,00	1,00	0,500	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	509	509	0,08	0,00		0,0
1	0,448	0,200	0,4	2,98	324	0,24	1,34	1,31	0,18	0,500	9,63	4,78	0,52	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,19	869	149	0,10	0,14	2,00	8,9
2	0,566	0,400	0,4	10,91	1187	1,42	6,19	6,02	0,23	0,503	22,20	9,47	1,91	0,67	0,60	0,41	0,30	0,23	0,19	0,18	0,44	1230	-211	0,16	1,26	1,00	79,8
3	0,722	0,600	0,4	20,29	2209	4,82	14,64	13,83	0,33	0,515	55,80	28,09	8,35	1,30	1,22	0,39	0,20	0,09	0,12	0,05	1,09	1590	-571	0,27	4,55	0,67	288,6
4	0,895	0,800	0,4	24,47	2666	6,76	21,91	20,83	0,31	0,518	64,90	34,37	8,74	1,94	2,30	0,52	0,23	0,18	0,17	0,05	1,27	1950	-931	0,41	6,35	0,50	402,3
5	1,079	1,000	0,4	27,43	3008	9,02	29,59	28,18	0,30	0,520	69,40	38,13	8,32	3,68	3,10	0,28	0,55	0,19	0,09	0,18	1,36	2310	-1291	0,61	8,41	0,40	533,5
6	1,267	1,200	0,4	29,70	3271	10,80	37,60	36,00	0,29	0,520	72,80	40,86	7,83	5,11	3,52	0,30	0,93	0,10	0,19	0,19	1,43	2670	-1651	0,83	9,97	0,33	631,8
0	0,600	0,000	0,6	0,30	0	0,18	0,18	0,00	1,00	0,502	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	764	764	0,18	0,00		0,0
1	0,633	0,200	0,6	1,97	211	0,28	1,25	1,22	0,22	0,502	6,39	3,20	0,25	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,13	1124	404	0,20	0,07	3,00	4,7
2	0,722	0,400	0,6	5,48	591	0,67	3,96	3,90	0,17	0,503	15,67	7,53	1,60	0,24	0,00	0,08	0,00	0,00	0,00	0,00	0,31	1484	44	0,26	0,41	1,50	25,8
3	0,849	0,600	0,6	15,30	1660	2,71	12,99	12,69	0,21	0,515	41,30	18,93	7,05	2,32	0,81	0,48	0,26	0,08	0,00	0,00	0,81	1844	-316	0,37	2,34	1,00	148,3
4	1,001	0,800	0,6	22,94	2499	6,11	22,95	22,13	0,27	0,518	60,90	29,86	10,47	1,80	1,44	0,79	0,25	0,18	1,00	0,13	1,19	2204	-677	0,52	5,59	0,75	354,5
5	1,168	1,000	0,6	26,63	2919	8,69	31,11	29,88	0,28	0,523	68,00	35,42	10,98	1,17	2,73	1,10	0,26	0,18	0,21	0,11	1,33	2565	-1037	0,71	7,98	0,60	505,7
6	1,344	1,200	0,6	29,20	3212	10,60	39,10	37,70	0,27	0,522	72,00	38,99	10,70	2,67	3,73	0,94	0,55	0,33	0,13	0,12	1,41	2925	-1397	0,94	9,66	0,50	612,3
0	0,800	0,000	0,8	0,40	0	0,32	0,32	0,00	1,00	0,504	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1020	1020	0,32	0,00		0,0
1	0,826	0,200	0,8	1,49	155	0,39	1,24	1,17	0,31	0,504	4,69	2,35	0,19	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,09	1379	658	0,34	0,04	4,00	2,7
2	0,895	0,400	0,8	3,70	396	0,63	3,30	3,24	0,19	0,511	11,66	5,74	0,88	0,09	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,23	1739	298	0,41	0,22	2,00	14,0
3	1,001	0,600	0,8	7,98	863	1,26	7,99	7,89	0,16	0,514	23,98	11,24	3,11	0,83	0,31	0,00	0,69	0,00	0,00	0,00	0,47	2099	-62	0,51	0,75	1,33	47,2
4	1,133	0,800	0,8	18,85	2050	4,54	21,35	20,87	0,21	0,519	49,00	22,10	9,09	3,15	1,08	0,72	0,40	0,14	0,09	0,08	0,96	2459	-422	0,67	3,87	1,00	245,6
5	1,284	1,000	0,8	25,21	2742	8,04	32,37	31,35	0,25	0,524	64,66	31,30	12,16	2,47	1,52	1,16	0,37	0,23	0,08	0,16	1,27	2819	-782	0,86	7,18	0,80	455,0
6	1,445	1,200	0,8	28,30	3119	10,20	40,90	39,60	0,25	0,524	70,63	36,19	12,72	0,99	2,87	1,60	0,29	0,26	0,20	0,19	1,38	3179	-1142	1,09	9,11	0,67	577,4
0	1,000	0,000	1,0	0,50	0	0,50	0,50	0,00	1,00	0,504	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1273	1273	0,50	0,00		-0,1
1	1,021	0,200	1,0	1,24	121	0,56	1,27	1,14	0,44	0,504	3,68	1,84	0,08	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,07	1633	913	0,53	0,03	5,00	1,9
2	1,081	0,400	1,0	2,78	2957	0,78	3,03	2,90	0,26	0,511	8,76	4,37	0,55	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,17	1993	553	0,60	0,18	2,50	11,6
3	1,170	0,600	1,0	5,24	563	1,20	6,12	6,00	0,20	0,514	16,30	7,74	1,67	0,38	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,32	2354	193	0,70	0,50	1,67	31,5
4	1,282	0,800	1,0	11,15	1206	2,33	14,28	14,08	0,16	0,515	31,25	13,44	5,00	1,93	0,79	0,32	0,14	0,06	0,00	0,00	0,61	2714	-167	0,85	1,48	1,25	94,1
5	1,418	1,000	1,0	21,99	2391	6,33	31,20	30,55	0,20	0,519	55,60	24,76	10,88	3,89	1,26	0,90	0,53	0,17	0,12	0,11	1,09	3074	-527	1,04	5,29	1,00	335,2
6	1,565	1,200	1,0	27,13	2971	9,45	42,44	41,37	0,22	0,518	68,00	32,38	13,49	3,15	1,45	1,42	0,55	0,27	0,14	0,14	1,33	3434	-888	1,27	8,18	0,83	518,7

Ummagnetisierungsverluste bei 1500 Hz

	I_{pm} [A]	I_m [A]	I_{p0} [A]	U [V]	U_i [mV]	P [W]	S [VA]	Q [VAR]	PF	R [Ω]	Φ_{pm} [μVs]	GS	2.OS	3.OS	4.OS	5.OS	6.OS	7.OS	8.OS	9.OS	B [T]	H _z [A/m]	H _{-z} [A/m]	P _{cu}	P _{fe}	I_p/I_m	P _d [m]
0	0,200	0,000	0,2	0,10	0	0,02	0,02	0,00	1,00	0,500	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	251	251	0,02	0,00		0,0
1	0,200	0,200	0,0	13,32	1450	2,16	2,66	1,55	0,81	0,500	32,07	16,45	0,18	4,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,63	360	-360	0,02	2,14	0,00	135,7
2	0,400	0,400	0,0	22,34	2433	5,75	8,94	6,84	0,64	0,505	52,01	27,17	0,33	1,47	0,00	0,14	0,00	0,06	0,00	0,00	1,02	720	-720	0,08	5,67	0,00	359,4
3	0,600	0,600	0,0	28,01	3049	8,47	16,81	14,52	0,50	0,510	61,20	33,11	0,46	3,22	0,11	0,16	0,07	0,15	0,00	0,09	1,20	1080	-1080	0,18	8,29	0,00	525,4
4	0,800	0,800	0,0	32,00	3527	10,80	25,60	23,20	0,42	0,515	66,44	36,85	0,53	4,69	0,21	0,52	0,05	0,20	0,07	0,12	1,30	1441	-1441	0,33	10,47	0,00	663,9
5	1,000	1,000	0,0	35,40	3901	12,80	35,40	33,00	0,36	0,515	70,12	39,65	0,59	5,89	0,29	1,02	0,05	0,19	0,07	0,16	1,37	1801	-1801	0,52	12,29	0,00	778,9
6	1,200	1,200	0,0	38,40	4233	16,70	46,10	43,00	0,36	0,520	73,00	41,80	0,57	6,89	0,34	1,50	0,08	0,24	0,07	0,17	1,43	2161	-2161	0,75	15,95	0,00	1011,4
0	0,200	0,000	0,2	0,10	0	0,02	0,02	0,00	1,00	0,500	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	251	251	0,02	0,00		0,0
1	0,284	0,200	0,2	7,32	793	0,64	2,07	1,97	0,31	0,500	17,25	8,49	1,44	0,16	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,34	611	-109	0,04	0,60	0,99	38,0
2	0,447	0,400	0,2	20,39	2219	4,52	9,12	7,91	0,50	0,505	45,25	24,16	4,38	1,11	0,43	0,13	0,06	0,07	0,00	0,05	0,89	971	-469	0,10	4,42	0,49	280,2
3	0,633	0,600	0,2	27,39	2981	8,12	17,33	15,31	0,47	0,515	59,57	31,47	4,85	2,17	0,76	0,19	0,15	0,13	0,06	0,05	1,17	1331	-830	0,21	7,91	0,33	501,8
4	0,825	0,800	0,2	31,70	3492	10,60	26,10	23,90	0,41	0,520	65,85	35,95	4,69	3,70	1,32	0,27	0,17	0,10	0,15	0,06	1,29	1691	-1190	0,35	10,25	0,25	649,6
5	1,020	1,000	0,2	35,20	3881	12,70	35,90	33,60	0,35	0,520	69,92	38,98	4,37	5,10	1,66	0,65	0,26	0,06	0,21	0,05	1,37	2051	-1550	0,54	12,16	0,20	770,9
6	1,217	1,200	0,2	38,30	4214	16,50	46,60	43,50	0,36	0,520	72,90	41,30	4,06	6,23	1,85	1,11	0,45	0,15	0,18	0,00	1,43	2412	-1910	0,77	15,73	0,16	997,3
0	0,400	0,000	0,4	0,20	0	0,08	0,08	0,00	1,00	0,505	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	509	509	0,08	0,00		0,0
1	0,449	0,200	0,4	3,84	415	0,31	1,72	1,69	0,18	0,508	9,13	4,59	0,47	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,18	869	149	0,10	0,21	2,00	13,2
2	0,566	0,400	0,4	12,96	1408	1,79	7,34	7,11	0,24	0,508	28,50	13,58	3,77	0,93	0,27	0,13	0,06	0,00	0,00	0,00	0,56	1230	-211	0,16	1,63	1,00	103,2
3	0,722	0,600	0,4	24,83	2700	6,49	17,92	16,70	0,36	0,515	52,27	26,22	7,17	1,30	0,98	0,21	0,18	0,08	0,10	0,05	1,02	1590	-571	0,27	6,22	0,67	394,5
4	0,895	0,800	0,4	30,70	3381	10,10	27,50	25,50	0,37	0,518	63,60	33,33	7,94	1,76	1,56	0,30	0,12	0,20	0,12	0,06	1,25	1950	-931	0,41	9,69	0,50	614,1
5	1,075	1,000	0,4	34,60	3815	13,80	37,20	34,60	0,37	0,525	68,80	37,36	7,74	3,22	2,35	0,24	0,25	0,22	0,00	0,17	1,35	2310	-1291	0,61	13,19	0,40	836,5
6	1,266	1,200	0,4	37,80	4168	16,30	47,90	45,10	0,34	0,525	72,50	40,20	7,30	4,67	2,86	0,33	0,56	0,14	0,09	0,20	1,42	2670	-1651	0,84	15,46	0,33	980,1
0	0,600	0,000	0,6	0,30	0	0,18	0,18	0,00	1,00	0,507	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	764	764	0,18	0,00		0,0
1	0,633	0,200	0,6	2,56	276	0,31	1,62	1,59	0,19	0,507	6,06	3,08	0,24	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,12	1124	404	0,20	0,11	3,00	6,7
2	0,721	0,400	0,6	6,99	756	0,85	5,04	4,97	0,17	0,507	16,35	8,87	1,64	0,28	0,06	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,32	1484	44	0,26	0,59	1,50	37,2
3	0,849	0,600	0,6	17,88	1943	3,25	15,18	14,84	0,21	0,515	37,30	17,33	5,95	1,78	0,60	0,36	0,18	0,06	0,00	0,00	0,73	1844	-316	0,37	2,88	1,00	182,5
4	1,000	0,800	0,6	28,20	3107	8,50	28,20	26,90	0,30	0,523	57,60	28,28	9,25	1,68	1,27	0,49	0,21	0,14	0,11	0,09	1,13	2204	-677	0,52	7,98	0,75	505,7
5	1,166	1,000	0,6	33,50	3686	13,10	39,00	36,70	0,34	0,527	67,10	34,50	10,17	1,29	2,08	0,65	0,28	0,08	0,22	0,06	1,32	2565	-1037	0,72	12,38	0,60	785,2
6	1,344	1,200	0,6	37,10	4086	15,90	49,90	47,30	0,32	0,530	71,40	38,30	10,04	2,50	3,03	0,65	0,37	0,19	0,18	0,07	1,40	2925	-1397	0,96	14,94	0,50	947,4
0	0,800	0,000	0,8	0,41	0	0,33	0,33	0,00	1,00	0,508	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1020	1020	0,32	0,00		0,0
1	0,826	0,200	0,8	1,93	204	0,41	1,60	1,54	0,26	0,505	4,34	2,39	0,08	0,06	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,09	1379	658	0,34	0,06	4,00	4,1
2	0,895	0,400	0,8	4,81	516	0,73	4,30	4,23	0,17	0,509	11,42	5,56	0,96	0,12	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,22	1739	298	0,41	0,32	2,00	20,4
3	1,001	0,600	0,8	10,04	1086	1,57	10,05	9,92	0,16	0,514	22,50	10,44	2,95	0,79	0,22	0,05	0,00	0,00	0,00	0,00	0,44	2099	-62	0,51	1,06	1,33	66,9
4	1,132	0,800	0,8	22,36	2423	5,67	25,28	24,63	0,22	0,516	44,40	20,35	7,85	2,54	0,88	0,58	0,31	0,10	0,06	0,05	0,87	2459	-422	0,66	5,01	1,00	317,6
5	1,283	1,000	0,8	31,30	3447	11,60	40,20	38,40	0,29	0,526	62,10	30,07	10,98	2,18	1,45	0,80	0,24	0,22	0,08	0,13	1,22	2819	-782	0,87	10,73	0,80	680,6
6	1,445	1,200	0,8	35,90	3957	15,10	51,90	49,60	0,29	0,524	69,80	35,50	11,90	1,14	2,36	1,06	0,35	0,13	0,21	0,16	1,37	3179	-1142	1,09	14,01	0,67	888,1
0	1,000	0,000	1,0	0,51	0	0,51	0,51	0,00	1,00	0,505	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1273	1273	0,51	0,00		0,0
1	1,021	0,200	1,0	1,58	161	0,57	1,61	1,50	0,35	0,507	3,86	1,97	0,12	0,08	0,05	0,04	0,00	0,00	0,00	0,00	0,08	1633	913	0,53	0,04	5,00	2,7
2	1,080	0,400	1,0	3,64	387	0,87	3,94	3,84	0,22	0,510	8,64	4,31	0,52	0,00	0,00	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00	0,17	1993	553	0,59	0,28	2,50	17,4
3	1,166	0,600	1,0	6,79	732	1,44	7,93	7,80	0,18	0,511	15,69	7,47	1,74	0,37	0,08	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,31	2354	193	0,69	0,75	1,67	47,3
4	1,280	0,800	1,0	13,63	1477	2,94	17,41	17,14	0,17	0,512	29,10	12,86	4,47	1,57	0,56	0,20	0,07	0,00	0,00	0,00	0,57	2714	-167	0,84	2,10	1,25	133,2
5	1,415	1,000	1,0	26,54	2900	8,12	37,51	36,61	0,22	0,521	51,25	23,23	9,62	3,21	1,10	0,82	0,44	0,14	0,11	0,08	1,00	3074	-527	1,04	7,08	1,00	448,7
6	1,565	1,200	1,0	33,90	3732	13,80	53,10	51,20	0,26	0,519	65,50	31,30	12,39	2,74	1,50	1,07	0,31	0,28	0,10	0,12	1,28	3434	-888	1,27	12,53	0,83	794,4

Ummagnetisierungsverluste bei 2000 Hz

	I_p [A]	I_s [A]	I_g [A]	U [V]	U_L [mV]	P [W]	S [VA]	Q [VAR]	PF	R[Ω]	Φ_{res} [Vs]	GS	2.OS	3.OS	4.OS	5.OS	6.OS	7.OS	8.OS	9.OS	B [T]	H ₁ [A/m]	H ₂ [A/m]	P _{cu}	P _{fe}	I_p/I_s	P _W /m
0	0,200	0,000	0,2	0,10	0	0,02	0,02	0,00	1,00	0,495	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	251	251	0,02	0,00		0,0
1	0,200	0,200	0,0	14,86	1616	2,47	2,97	1,65	0,83	0,500	28,70	14,59	0,15	0,30	0,00	0,04	0,00	0,00	0,00	0,00	0,56	360	-360	0,02	2,45	0,00	155,3
2	0,400	0,400	0,0	25,97	2844	7,38	10,39	7,32	0,71	0,495	49,33	25,41	0,23	0,87	0,06	0,16	0,03	0,00	0,00	0,03	0,97	720	-720	0,08	7,30	0,00	462,9
3	0,600	0,600	0,0	33,00	3641	11,50	19,80	16,10	0,58	0,510	59,97	31,89	0,33	2,35	0,07	0,19	0,06	0,13	0,00	0,04	1,18	1080	-1080	0,18	11,32	0,00	717,5
4	0,800	0,800	0,0	38,30	4221	14,70	30,70	26,90	0,48	0,515	65,80	34,99	0,34	3,93	0,10	0,20	0,04	0,24	0,00	0,13	1,29	1441	-1441	0,33	14,37	0,00	911,1
5	1,000	1,000	0,0	42,60	4685	17,50	42,60	38,80	0,41	0,515	69,80	38,80	0,38	5,10	0,18	0,60	0,00	0,21	0,04	0,17	1,37	1801	-1801	0,52	16,99	0,00	1076,9
6	1,200	1,200	0,0	46,30	5100	22,90	55,50	50,60	0,41	0,535	72,70	41,02	0,44	6,15	0,21	1,09	0,00	0,15	0,05	0,18	1,43	2161	-2161	0,77	22,13	0,00	1403,1
0	0,200	0,000	0,2	0,10	0	0,02	0,02	0,00	1,00	0,495	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	251	251	0,02	0,00		0,0
1	0,283	0,200	0,2	8,42	913	0,78	2,38	2,25	0,33	0,495	16,25	7,96	1,17	0,07	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,32	611	-109	0,04	0,74	0,99	46,9
2	0,448	0,400	0,2	23,32	2533	5,40	10,44	8,94	0,52	0,505	41,88	21,36	3,74	0,98	0,31	0,10	0,04	0,06	0,00	0,04	0,82	971	-469	0,10	5,30	0,49	336,0
3	0,633	0,600	0,2	32,10	3543	10,80	20,30	17,20	0,53	0,510	57,65	30,12	4,21	1,77	0,31	0,15	0,18	0,08	0,08	0,04	1,13	1331	-830	0,20	10,60	0,33	671,8
4	0,825	0,800	0,2	37,90	4175	14,40	31,30	27,70	0,46	0,515	65,00	34,99	4,23	3,12	0,86	0,17	0,22	0,55	0,17	0,05	1,27	1691	-1190	0,35	14,05	0,25	890,8
5	1,020	1,000	0,2	42,30	4658	17,40	43,20	39,50	0,40	0,520	69,30	38,20	4,01	4,43	1,24	0,41	0,15	0,00	0,23	0,00	1,36	2051	-1550	0,54	16,86	0,20	1068,9
6	1,217	1,200	0,2	46,20	5081	22,80	56,20	51,30	0,41	0,540	72,40	40,58	3,80	5,58	1,47	0,81	0,23	0,04	0,21	0,00	1,42	2412	-1910	0,80	22,00	0,16	1394,9
0	0,400	0,000	0,4	0,20	0	0,08	0,08	0,00	1,00	0,500	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	509	509	0,08	0,00		0,0
1	0,448	0,200	0,4	4,64	499	0,37	2,08	2,05	0,18	0,500	8,79	4,39	0,46	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,17	869	149	0,10	0,27	2,00	17,1
2	0,566	0,400	0,4	14,81	1605	2,13	8,38	8,10	0,25	0,505	26,50	12,72	3,24	0,71	0,19	0,08	0,04	0,00	0,00	0,00	0,52	1230	-211	0,16	1,97	1,00	124,8
3	0,721	0,600	0,4	28,40	3131	7,90	20,50	18,90	0,39	0,513	48,60	24,49	6,28	1,23	0,82	0,12	0,14	0,06	0,09	0,05	0,95	1590	-571	0,27	7,63	0,67	484,0
4	0,894	0,800	0,4	36,40	4012	13,40	32,60	29,70	0,41	0,520	61,90	32,15	7,12	1,75	1,11	0,25	0,06	0,21	0,10	0,10	1,21	1950	-931	0,42	12,98	0,50	823,3
5	1,078	1,000	0,4	41,60	4573	19,00	44,80	40,50	0,42	0,523	68,22	36,50	7,16	2,89	1,78	0,16	0,06	0,24	0,00	0,16	1,34	2310	-1291	0,61	18,39	0,40	1166,2
6	1,267	1,200	0,4	45,60	5023	22,40	57,70	53,20	0,39	0,548	71,70	39,39	6,88	4,19	2,31	0,33	0,29	0,17	0,09	0,19	1,41	2670	-1651	0,88	21,52	0,33	1364,5
0	0,600	0,000	0,6	0,30	0	0,18	0,18	0,00	1,00	0,502	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	764	764	0,18	0,00		0,0
1	0,633	0,200	0,6	3,15	338	0,34	2,01	1,98	0,17	0,500	6,19	3,05	0,21	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,12	1124	404	0,20	0,14	3,00	8,9
2	0,721	0,400	0,6	8,46	913	1,04	6,09	6,00	0,17	0,505	15,81	7,72	1,51	0,20	0,05	0,05	0,03	0,00	0,00	0,00	0,31	1484	44	0,26	0,78	1,50	49,3
3	0,848	0,600	0,6	20,46	2220	3,85	17,38	16,93	0,22	0,512	34,70	16,26	5,22	1,44	0,47	0,28	0,14	0,05	0,00	0,00	0,68	1844	-316	0,37	3,48	1,00	220,8
4	0,999	0,800	0,6	32,80	3606	10,40	32,70	31,00	0,32	0,518	53,60	26,68	8,23	1,58	1,20	0,41	0,17	0,09	0,12	0,10	1,05	2204	-677	0,52	9,88	0,75	626,6
5	1,168	1,000	0,6	39,90	4398	17,70	46,60	43,10	0,38	0,525	65,40	33,48	9,33	1,44	1,65	0,40	0,26	0,09	0,19	0,08	1,28	2565	-1037	0,72	16,98	0,60	1076,8
6	1,343	1,200	0,6	44,60	4924	21,60	59,90	55,90	0,36	0,548	70,60	37,42	9,41	2,30	2,45	0,50	0,26	0,18	0,16	0,10	1,38	2925	-1397	0,99	20,61	0,50	1306,8
0	0,800	0,000	0,8	0,40	0	0,32	0,32	0,00	1,00	0,503	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1020	1020	0,32	0,00		0,0
1	0,826	0,200	0,8	2,36	250	0,43	1,94	1,89	0,22	0,503	4,49	2,18	0,14	0,04	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,09	1379	658	0,34	0,08	4,00	5,3
2	0,895	0,400	0,8	5,87	632	0,84	5,26	5,19	0,16	0,505	11,10	5,50	0,87	0,07	0,03	0,04	0,00	0,00	0,00	0,00	0,22	1739	298	0,40	0,44	2,00	27,6
3	1,000	0,600	0,8	12,00	1296	1,89	12,00	11,85	0,16	0,510	10,27	0,45	2,67	0,57	0,10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,20	2099	-62	0,51	1,38	1,33	87,5
4	1,132	0,800	0,8	25,56	2765	6,82	28,90	28,07	0,24	0,515	41,10	19,10	6,96	2,13	0,78	0,53	0,29	0,09	0,00	0,00	0,81	2459	-422	0,66	6,16	1,00	390,6
5	1,281	1,000	0,8	36,70	4040	14,60	46,90	44,60	0,31	0,540	58,40	28,43	9,90	1,98	1,39	0,65	0,18	0,17	0,08	0,13	1,15	2819	-782	0,89	13,71	0,80	869,5
6	1,443	1,200	0,8	43,00	4743	20,40	62,10	58,60	0,33	0,540	68,20	34,43	11,05	1,32	1,98	0,71	0,36	0,07	0,19	0,12	1,34	3179	-1142	1,12	19,28	0,67	1222,1
0	1,000	0,000	1,0	0,50	0	0,50	0,50	0,00	1,00	0,502	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1273	1273	0,50	0,00		0,0
1	1,020	0,200	1,0	1,89	197	0,58	1,94	1,85	0,30	0,502	3,49	1,77	0,10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,07	1633	913	0,52	0,05	5,00	3,5
2	1,080	0,400	1,0	4,49	479	0,97	4,84	4,74	0,20	0,503	8,52	4,18	0,56	0,04	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,17	1993	553	0,59	0,38	2,50	24,3
3	1,166	0,600	1,0	8,31	892	1,73	9,68	9,52	0,18	0,507	15,34	7,45	1,55	0,23	0,06	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,30	2354	193	0,69	1,04	1,67	66,0
4	1,281	0,800	1,0	15,98	1726	3,61	20,47	20,16	0,18	0,511	27,20	12,39	4,10	1,33	0,45	0,17	0,07	0,04	0,00	0,00	0,53	2714	-167	0,84	2,77	1,25	175,7
5	1,415	1,000	1,0	30,20	3321	9,80	42,70	41,50	0,23	0,525	47,20	21,66	8,58	2,75	0,98	0,73	0,39	0,13	0,08	0,06	0,93	3074	-527	1,05	8,75	1,00	554,7
6	1,564	1,200	1,0	40,00	4412	17,60	62,50	59,90	0,28	0,541	62,30	29,95	11,30	2,45	1,50	0,91	0,22	0,24	0,08	0,12	1,22	3434	-888	1,32	16,28	0,83	1032,0

Ummagnetisierungsverluste bei 2500 Hz

	$I_{\text{eff}} [\text{A}]$	$I_{\text{eff}} [\text{A}]$	$I_{\text{eff}} [\text{A}]$	$U [\text{V}]$	$U_{\text{eff}} [\text{mV}]$	$P [\text{W}]$	$S [\text{VA}]$	$Q [\text{VAR}]$	PF	$R [\Omega]$	$\Phi_{\text{eff}} [\mu\text{Vs}]$	GS	2.OS	3.OS	4.OS	5.OS	6.OS	7.OS	8.OS	9.OS	$B [\text{T}]$	$H_{\text{eff}} [\text{A/m}]$	$H_{\text{eff}} [\text{A/m}]$	P_{eff}	P_{eff}	$I_{\text{eff}}/I_{\text{eff}}$	P_{eff}/m
0	0,200	0,000	0,2	0,10	0	0,02	0,02	0,00	1,00	0,515	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	251	251	0,02	0,00		0,0
1	0,200	0,200	0,0	16,01	1743	2,69	3,20	1,75	0,84	0,515	26,30	12,90	0,29	0,13	0,07	0,04	0,05	0,03	0,03	0,03	0,52	360	-360	0,02	2,67	0,00	169,2
2	0,400	0,400	0,0	28,40	3130	8,60	11,40	7,40	0,76	0,535	46,50	23,00	0,49	0,29	0,10	0,07	0,06	0,05	0,04	0,03	0,91	720	-720	0,09	8,51	0,00	539,8
3	0,600	0,600	0,0	37,30	4099	14,10	22,30	17,30	0,63	0,540	58,60	29,70	0,65	1,13	0,07	0,04	0,03	0,03	0,03	0,02	1,15	1080	-1080	0,19	13,91	0,00	881,7
4	0,800	0,800	0,0	43,70	4796	18,40	35,00	29,70	0,53	0,550	65,00	33,96	0,83	2,19	0,04	0,06	0,05	0,04	0,03	0,05	1,27	1441	-1441	0,35	18,05	0,00	1144,3
5	1,000	1,000	0,0	48,70	5333	22,10	48,60	43,30	0,45	0,555	69,00	37,05	1,03	3,07	0,09	0,20	0,08	0,05	0,06	0,04	1,36	1801	-1801	0,56	21,55	0,00	1366,0
6	1,200	1,200	0,0	52,90	5791	29,30	63,50	56,30	0,46	0,550	72,80	39,22	1,16	3,84	0,16	0,32	0,09	0,07	0,07	0,00	1,43	2161	-2161	0,79	28,51	0,00	1807,5
0	0,200	0,000	0,2	0,10	0	0,02	0,02	0,00	1,00	0,515	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	251	251	0,02	0,00		0,0
1	0,283	0,200	0,2	9,29	1010	0,89	2,65	2,49	0,34	0,510	15,35	7,15	0,95	0,07	0,04	0,03	0,02	0,00	0,00	0,00	0,30	611	-109	0,04	0,85	0,99	53,8
2	0,447	0,400	0,2	25,47	2752	6,03	11,39	9,67	0,53	0,535	38,80	19,05	3,10	0,58	0,10	0,06	0,03	0,03	0,02	0,00	0,76	971	-469	0,11	5,92	0,49	375,5
3	0,633	0,600	0,2	36,10	3967	13,00	22,80	18,70	0,57	0,540	55,10	27,67	3,57	1,00	0,00	0,09	0,00	0,02	0,00	0,00	1,08	1331	-830	0,22	12,78	0,33	810,5
4	0,825	0,800	0,2	43,10	4728	18,00	35,60	30,70	0,51	0,555	64,10	32,88	3,94	1,65	0,22	0,11	0,00	0,04	0,00	0,03	1,26	1691	-1190	0,38	17,62	0,25	1117,3
5	1,020	1,000	0,2	48,40	5300	21,80	49,30	44,20	0,44	0,560	69,00	36,24	4,04	2,51	0,42	0,17	0,06	0,05	0,03	0,00	1,35	2051	-1550	0,58	21,22	0,20	1345,3
6	1,217	1,200	0,2	52,70	5768	29,10	64,10	57,10	0,45	0,555	72,00	38,66	3,99	3,31	0,62	0,26	0,10	0,06	0,07	0,04	1,41	2412	-1910	0,82	28,28	0,16	1792,9
0	0,400	0,000	0,4	0,21	0	0,08	0,08	0,00	1,00	0,515	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	509	509	0,08	0,00		0,0
1	0,447	0,200	0,4	5,29	577	0,42	2,38	2,34	0,18	0,515	8,21	4,20	0,35	0,07	0,03	0,03	0,00	0,02	0,00	0,02	0,16	869	149	0,10	0,32	2,00	20,1
2	0,565	0,400	0,4	16,30	1761	2,45	9,20	8,87	0,27	0,533	24,70	11,51	2,64	0,54	0,14	0,05	0,04	0,04	0,03	0,02	0,48	1230	-211	0,17	2,28	1,00	144,6
3	0,721	0,600	0,4	31,30	3446	9,00	22,60	20,70	0,40	0,543	45,50	22,03	5,24	0,86	0,34	0,00	0,06	0,04	0,04	0,02	0,89	1590	-571	0,28	8,72	0,67	552,8
4	0,895	0,800	0,4	41,10	4508	16,20	36,80	33,00	0,44	0,560	60,40	29,75	6,11	0,99	0,37	0,14	0,06	0,04	0,02	0,00	1,18	1950	-931	0,45	15,75	0,50	998,7
5	1,080	1,000	0,4	47,30	5187	23,90	51,20	45,20	0,47	0,565	67,70	34,35	6,50	1,49	0,62	0,18	0,06	0,05	0,04	0,00	1,33	2310	-1291	0,66	23,24	0,40	1473,6
6	1,266	1,200	0,4	52,00	5696	28,50	65,80	59,30	0,43	0,560	71,60	37,33	6,47	2,30	0,84	0,16	0,08	0,06	0,03	0,00	1,40	2670	-1651	0,90	27,60	0,33	1750,1
0	0,600	0,000	0,6	0,31	0	0,19	0,19	0,00	1,00	0,518	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	764	764	0,19	0,00		0,0
1	0,633	0,200	0,6	3,63	391	0,37	2,31	2,28	0,16	0,518	5,90	2,92	0,17	0,05	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,12	1124	404	0,21	0,16	3,00	10,3
2	0,721	0,400	0,6	9,67	1042	1,24	6,97	6,87	0,18	0,533	15,22	7,55	1,02	0,16	0,09	0,07	0,05	0,05	0,04	0,03	0,30	1484	44	0,28	0,96	1,50	61,0
3	0,848	0,600	0,6	22,67	2444	4,44	19,23	18,71	0,23	0,547	32,60	14,77	4,31	1,09	0,28	0,07	0,03	0,04	0,04	0,03	0,64	1844	-316	0,39	4,05	1,00	256,6
4	1,000	0,800	0,6	36,30	3984	12,00	36,30	34,30	0,33	0,557	51,30	24,20	6,90	1,16	0,50	0,07	0,07	0,03	0,04	0,04	1,01	2204	-677	0,56	11,44	0,75	725,5
5	1,168	1,000	0,6	45,20	4949	21,80	52,80	48,00	0,41	0,567	63,80	31,00	8,01	0,95	0,65	0,12	0,10	0,04	0,05	0,00	1,25	2565	-1037	0,77	21,03	0,60	1333,2
6	1,343	1,200	0,6	50,80	5556	27,40	68,20	62,40	0,40	0,562	70,10	35,15	8,41	1,12	0,97	0,16	0,11	0,05	0,07	0,00	1,37	2925	-1397	1,01	26,39	0,50	1673,0
0	0,800	0,000	0,8	0,42	0	0,33	0,33	0,00	1,00	0,519	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1020	1020	0,33	0,00		-0,1
1	0,825	0,200	0,8	2,73	293	0,46	2,25	2,21	0,20	0,519	4,34	2,02	0,13	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,09	1379	658	0,35	0,10	4,00	6,5
2	0,894	0,400	0,8	6,80	729	0,96	6,07	5,99	0,16	0,534	10,63	5,18	0,84	0,15	0,07	0,05	0,04	0,03	0,03	0,02	0,21	1739	298	0,43	0,53	2,00	33,8
3	0,999	0,600	0,8	13,69	1472	2,24	13,66	13,47	0,16	0,545	20,64	9,75	2,52	0,55	0,14	0,13	0,10	0,08	0,07	0,05	0,40	2099	-62	0,54	1,70	1,33	107,5
4	1,133	0,800	0,8	28,17	3066	7,96	31,70	30,70	0,26	0,553	39,00	17,31	5,76	1,56	0,38	0,09	0,00	0,04	0,03	0,00	0,76	2459	-422	0,71	7,25	1,00	459,7
5	1,284	1,000	0,8	40,70	4463	17,40	52,30	49,40	0,33	0,565	55,68	25,87	8,29	1,55	0,60	0,14	0,06	0,04	0,04	0,05	1,09	2819	-782	0,93	16,47	0,80	1044,2
6	1,444	1,200	0,8	48,70	5327	25,30	70,30	65,60	0,36	0,563	66,60	31,92	9,50	1,09	0,82	0,15	0,11	0,05	0,05	0,04	1,31	3179	-1142	1,17	24,13	0,67	1529,7
0	1,000	0,000	1,0	0,52	0	0,52	0,52	0,00	1,00	0,519	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1273	1273	0,52	0,00		0,0
1	1,021	0,200	1,0	2,11	231	0,61	2,25	2,17	0,27	0,519	3,56	1,72	0,06	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,07	1633	913	0,54	0,07	5,00	4,2
2	1,080	0,400	1,0	5,20	554	1,11	5,63	5,52	0,20	0,534	8,08	4,14	0,30	0,09	0,06	0,04	0,04	0,03	0,02	0,00	0,16	1993	553	0,62	0,49	2,50	30,9
3	1,166	0,600	1,0	9,63	1031	2,07	11,24	11,04	0,18	0,543	15,19	6,98	1,36	0,15	0,03	0,03	0,02	0,02	0,00	0,00	0,30	2354	193	0,74	1,33	1,67	84,4
4	1,280	0,800	1,0	18,17	1951	4,38	23,27	22,86	0,19	0,550	27,00	11,60	3,53	1,03	0,30	0,09	0,05	0,05	0,04	0,03	0,53	2714	-167	0,90	3,48	1,25	220,6
5	1,416	1,000	1,0	33,00	3609	11,30	46,70	45,30	0,24	0,540	44,38	19,42	7,07	2,07	0,52	0,14	0,00	0,05	0,30	0,02	0,87	3074	-527	1,08	10,22	1,00	647,8
6	1,563	1,200	1,0	44,60	4879	21,00	69,70	66,50	0,30	0,553	59,60	27,22	9,48	1,96	0,65	0,21	0,06	0,04	0,03	0,06	1,17	3434	-888	1,35	19,65	0,83	1245,8

Ummagnetisierungsverluste bei 3000 Hz

	I_{pm} [A]	I_a [A]	I_g [A]	U [V]	U_L [mV]	P [W]	S [VA]	Q [var]	PF	R [Ω]	Φ_{pm} [μVs]	GS	2.OS	3.OS	4.OS	5.OS	6.OS	7.OS	8.OS	9.OS	B [T]	H _z [A/m]	H _{-z} [A/m]	P _{cu}	P _{fe}	I_g/I_a	P _d [m]
0	0,200	0,000	0,2	0,11	0	0,02	0,02	0,00	1,00	0,525	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	251	251	0,02	0,00		0,0
1	0,200	0,200	0,0	17,06	1840	2,88	3,40	1,81	0,85	0,530	24,20	10,97	0,27	0,06	0,04	0,02	0,02	0,01	0,00	0,00	0,47	360	-360	0,02	2,86	0,00	181,3
2	0,400	0,400	0,0	30,70	3365	9,70	12,30	7,60	0,54	0,540	43,30	20,01	0,48	0,03	0,08	0,06	0,03	0,02	0,02	0,01	0,85	720	-720	0,09	9,61	0,00	609,5
3	0,600	0,600	0,0	41,10	4516	16,70	24,60	18,10	0,68	0,555	56,85	26,53	0,66	0,19	0,07	0,08	0,04	0,02	0,02	0,00	1,11	1080	-1080	0,20	16,50	0,00	1046,2
4	0,800	0,800	0,0	48,70	5345	22,30	38,90	31,90	0,57	0,535	64,30	30,94	0,87	0,62	0,09	0,11	0,07	0,03	0,03	0,03	1,26	1441	-1441	0,34	21,96	0,00	1392,2
5	1,000	1,000	0,0	54,50	5986	26,90	54,50	47,40	0,49	0,550	68,72	34,00	1,10	0,99	0,13	0,08	0,09	0,03	0,04	0,02	1,35	1801	-1801	0,55	26,35	0,00	1670,7
6	1,200	1,200	0,0	59,30	6524	36,00	71,20	61,50	0,51	0,550	71,70	36,13	1,18	1,37	0,12	0,00	0,08	0,01	0,04	0,01	1,41	2161	-2161	0,79	35,21	0,00	2232,3
0	0,200	0,000	0,2	0,11	0	0,02	0,02	0,00	1,00	0,525	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	251	251	0,02	0,00		0,0
1	0,283	0,200	0,2	10,12	1097	1,01	2,89	2,70	0,35	0,525	14,40	6,35	0,70	0,10	0,06	0,05	0,03	0,02	0,02	0,01	0,28	611	-109	0,04	0,97	0,99	61,4
2	0,447	0,400	0,2	27,47	2948	6,62	12,29	10,35	0,54	0,540	36,70	16,65	2,23	0,14	0,09	0,05	0,04	0,02	0,02	0,01	0,72	971	-469	0,11	6,51	0,49	412,9
3	0,632	0,600	0,2	39,50	4343	14,90	24,90	20,00	0,60	0,550	53,00	24,54	2,61	0,23	0,11	0,06	0,09	0,03	0,03	0,02	1,04	1331	-830	0,22	14,68	0,33	930,8
4	0,825	0,800	0,2	48,00	5266	21,60	39,50	33,10	0,55	0,535	63,00	29,77	2,96	0,46	0,10	0,05	0,11	0,03	0,03	0,01	1,24	1691	-1190	0,36	21,24	0,25	1346,4
5	1,020	1,000	0,2	54,20	5947	26,60	55,20	48,40	0,48	0,545	68,00	33,15	3,19	0,75	0,10	0,06	0,13	0,05	0,03	0,03	1,33	2051	-1550	0,57	26,03	0,20	1650,6
6	1,217	1,200	0,2	59,10	6490	35,60	71,90	62,40	0,50	0,550	71,60	35,47	3,18	1,15	0,90	0,03	0,10	0,05	0,03	0,03	1,40	2412	-1910	0,81	34,79	0,16	2205,5
0	0,400	0,000	0,4	0,21	0	0,09	0,09	0,00	1,00	0,530	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	509	509	0,08	0,00		0,0
1	0,447	0,200	0,4	5,96	639	0,49	2,67	2,62	0,19	0,533	8,37	3,82	0,17	0,05	0,04	0,02	0,02	0,02	0,01	0,00	0,16	869	149	0,11	0,38	2,00	24,3
2	0,565	0,400	0,4	17,75	1906	2,77	10,03	9,64	0,28	0,538	23,90	10,21	1,87	0,28	0,09	0,07	0,05	0,03	0,02	0,02	0,47	1230	-211	0,17	2,60	1,00	164,7
3	0,721	0,600	0,4	34,10	3742	10,10	24,40	22,30	0,41	0,550	43,30	19,50	3,81	0,40	0,14	0,12	0,05	0,06	0,04	0,04	0,85	1590	-571	0,29	9,81	0,67	622,2
4	0,894	0,800	0,4	45,40	4979	18,90	40,50	35,90	0,47	0,540	57,80	26,63	4,51	0,33	0,14	0,06	0,08	0,08	0,03	0,03	1,13	1950	-931	0,43	18,47	0,50	1171,0
5	1,079	1,000	0,4	52,70	5801	28,90	56,90	49,00	0,51	0,550	66,53	31,18	4,89	0,37	0,14	0,07	0,10	0,11	0,06	0,06	1,30	2310	-1291	0,64	28,26	0,40	1791,8
6	1,266	1,200	0,4	58,30	6402	34,90	73,80	65,10	0,47	0,553	71,20	34,10	4,95	0,74	0,09	0,03	0,07	0,08	0,05	0,02	1,40	2670	-1651	0,89	34,01	0,33	2156,6
0	0,600	0,000	0,6	0,32	0	0,19	0,19	0,00	1,00	0,533	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	764	764	0,19	0,00		0,0
1	0,633	0,200	0,6	4,12	439	0,42	2,63	2,59	0,16	0,533	5,83	2,64	0,12	0,05	0,04	0,02	0,01	0,01	0,01	0,00	0,11	1124	404	0,21	0,21	3,00	13,1
2	0,720	0,400	0,6	10,80	1156	1,41	7,79	7,66	0,18	0,538	15,20	6,52	1,00	0,16	0,07	0,05	0,04	0,03	0,02	0,01	0,30	1484	44	0,28	1,13	1,50	71,7
3	0,846	0,600	0,6	24,41	2633	4,87	20,64	20,05	0,24	0,550	30,80	13,08	3,12	0,59	0,16	0,14	0,11	0,06	0,05	0,04	0,60	1844	-316	0,39	4,48	1,00	283,8
4	0,999	0,800	0,6	39,70	4348	13,50	39,60	37,20	0,34	0,540	48,60	21,46	5,07	0,65	0,18	0,19	0,07	0,08	0,06	0,06	0,95	2204	-677	0,54	12,96	0,75	821,8
5	1,169	1,000	0,6	49,90	5485	25,60	58,30	52,30	0,44	0,550	61,50	27,87	5,93	0,45	0,14	0,12	0,05	0,07	0,04	0,04	1,21	2565	-1037	0,75	24,85	0,60	1575,5
6	1,342	1,200	0,6	56,80	6238	33,30	76,20	68,60	0,44	0,555	68,80	32,02	6,34	0,30	0,11	0,10	0,02	0,07	0,04	0,04	1,35	2925	-1397	1,00	32,30	0,50	2048,0
0	0,800	0,000	0,8	0,43	0	0,34	0,34	0,00	1,00	0,534	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1020	1020	0,34	0,00		0,0
1	0,825	0,200	0,8	3,14	331	0,49	2,59	2,54	0,19	0,534	4,27	2,05	0,15	0,05	0,04	0,03	0,02	0,01	0,00	0,00	0,08	1379	658	0,36	0,13	4,00	8,0
2	0,894	0,400	0,8	7,68	821	1,07	6,87	6,78	0,16	0,538	10,78	4,73	0,06	0,10	0,06	0,04	0,03	0,02	0,02	0,01	0,21	1739	298	0,43	0,64	2,00	40,6
3	0,997	0,600	0,8	15,25	1641	2,52	15,24	15,00	0,17	0,524	20,44	8,96	1,28	0,21	0,54	0,04	0,03	0,03	0,02	0,02	0,40	2099	-62	0,52	2,00	1,33	126,8
4	1,132	0,800	0,8	30,40	3349	9,20	34,60	33,30	0,27	0,535	36,90	15,46	4,24	0,88	0,21	0,22	0,16	0,08	0,07	0,05	0,72	2459	-422	0,69	8,51	1,00	539,8
5	1,282	1,000	0,8	44,40	4877	19,60	56,90	53,40	0,34	0,541	53,10	23,10	6,20	0,85	0,23	0,26	0,10	0,13	0,09	0,08	1,04	2819	-782	0,89	18,71	0,80	1186,3
6	1,444	1,200	0,8	54,00	5931	29,90	77,90	71,90	0,38	0,544	64,70	28,84	7,07	0,63	0,16	0,20	0,02	0,06	0,05	0,06	1,27	3179	-1142	1,13	28,77	0,67	1823,9
0	1,000	0,000	1,0	0,54	0	0,54	0,54	0,00	1,00	0,536	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1273	1273	0,54	0,00		0,0
1	1,020	0,200	1,0	2,49	261	0,64	2,55	2,47	0,25	0,535	3,29	1,57	0,05	0,02	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,06	1633	913	0,56	0,08	5,00	5,0
2	1,080	0,400	1,0	5,91	625	1,23	6,40	6,28	0,19	0,540	8,21	3,64	0,44	0,07	0,04	0,03	0,01	0,00	0,00	0,00	0,16	1993	553	0,63	0,60	2,50	38,1
3	1,167	0,600	1,0	10,79	1150	2,33	12,60	12,38	0,19	0,524	14,34	6,33	1,11	0,20	0,09	0,05	0,04	0,03	0,02	0,02	0,28	2354	193	0,71	1,62	1,67	102,5
4	1,281	0,800	1,0	20,50	2156	5,02	25,78	25,29	0,20	0,529	25,50	10,62	2,72	0,63	0,21	0,15	0,10	0,08	0,06	0,05	0,50	2714	-167	0,87	4,15	1,25	263,2
5	1,414	1,000	1,0	35,80	3932	12,70	50,70	49,00	0,25	0,535	41,90	17,43	5,30	1,11	0,28	0,29	0,15	0,08	0,09	0,07	0,82	3074	-527	1,07	11,63	1,00	737,4
6	1,563	1,200	1,0	48,90	5358	24,00	76,30	72,40	0,31	0,546	56,50	24,33	7,04	1,11	0,23	0,32	0,13	0,08	0,08	0,07	1,11	3434	-888	1,33	22,67	0,83	1437,1

Ummagnetisierungsverluste bei 3500 Hz

	$I_{\text{eff}} [\text{A}]$	$I_{\text{eff}} [\text{A}]$	$I_{\text{eff}} [\text{A}]$	$U [\text{V}]$	$U_{\text{eff}} [\text{mV}]$	$P [\text{W}]$	$S [\text{VA}]$	$Q [\text{VAR}]$	PF	$R [\Omega]$	$\Phi_{\text{eff}} [\mu\text{Vs}]$	G_S	2.OS	3.OS	4.OS	5.OS	6.OS	7.OS	8.OS	9.OS	$B [\text{T}]$	$H_{\text{eff}} [\text{A/m}]$	$H_{\text{eff}} [\text{A/m}]$	P_{eff}	P_{eff}	$I_{\text{eff}}/I_{\text{eff}}$	P_{eff}/m
0	0,200	0,000	0,2	0,10	0	0,02	0,02	0,00	1,00	0,505	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	251	251	0,02	0,00		0,0
1	0,200	0,200	0,0	18,30	1983	3,09	3,67	1,97	0,84	0,505	22,00	11,21	0,10	0,22	0,03	0,05	0,01	0,01	0,00	0,00	0,43	360	-360	0,02	3,07	0,00	194,6
2	0,400	0,400	0,0	33,30	3671	10,70	13,30	7,90	0,81	0,520	40,20	20,62	0,14	0,52	0,04	0,11	0,01	0,04	0,01	0,02	0,79	720	-720	0,08	10,62	0,00	673,1
3	0,600	0,600	0,0	45,40	5013	19,70	27,20	18,80	0,72	0,515	53,80	28,10	0,20	0,93	0,09	0,32	0,04	0,01	0,03	0,03	1,05	1080	-1080	0,19	19,51	0,00	1237,3
4	0,800	0,800	0,0	54,60	6006	27,20	43,70	34,10	0,62	0,520	63,30	33,20	0,19	2,08	0,07	0,37	0,05	0,18	0,01	0,02	1,24	1441	-1441	0,33	26,87	0,00	1703,5
5	1,000	1,000	0,0	61,70	6805	33,10	61,80	52,10	0,54	0,535	68,00	34,99	0,22	3,48	0,09	0,03	0,05	0,39	0,00	0,12	1,33	1801	-1801	0,54	32,57	0,00	2064,7
6	1,200	1,200	0,0	67,50	7438	45,20	80,90	67,10	0,56	0,535	71,50	39,25	0,22	4,67	0,12	0,27	0,05	0,40	0,05	0,20	1,40	2161	-2161	0,77	44,43	0,00	2617,0
0	0,200	0,000	0,2	0,10	0	0,02	0,02	0,00	1,00	0,505	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	251	251	0,02	0,00		0,0
1	0,283	0,200	0,2	11,07	1199	1,13	3,15	2,93	0,36	0,510	13,30	6,64	0,73	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,26	611	-109	0,04	1,09	0,99	69,1
2	0,446	0,400	0,2	29,40	3245	7,30	13,10	10,90	0,56	0,515	33,80	17,30	2,61	0,71	0,24	0,02	0,03	0,04	0,03	0,01	0,66	971	-469	0,10	7,20	0,49	456,4
3	0,632	0,600	0,2	43,40	4783	17,00	27,50	21,60	0,62	0,500	50,10	26,06	2,99	1,30	0,13	0,01	0,22	0,09	0,08	0,04	0,98	1331	-830	0,20	16,80	0,33	1065,2
4	0,824	0,800	0,2	53,70	5905	26,10	44,30	35,70	0,59	0,520	61,30	32,00	3,19	1,96	0,00	0,05	0,33	0,13	0,10	0,07	1,20	1691	-1190	0,35	25,75	0,25	1632,4
5	1,020	1,000	0,2	61,10	6727	32,50	62,20	53,10	0,52	0,535	67,50	34,99	3,35	3,05	0,45	0,03	0,38	0,05	0,19	0,10	1,32	2051	-1550	0,56	31,94	0,20	2025,3
6	1,217	1,200	0,2	67,20	7398	44,90	81,70	68,30	0,55	0,535	71,20	38,80	3,25	4,24	0,85	0,31	0,17	0,10	0,34	0,04	1,40	2412	-1910	0,79	44,11	0,16	2796,6
0	0,400	0,000	0,4	0,20	0	0,08	0,08	0,00	1,00	0,510	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	509	509	0,08	0,00		0,0
1	0,447	0,200	0,4	6,68	721	0,56	2,99	2,93	0,19	0,510	7,98	4,02	0,34	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,16	869	149	0,10	0,46	2,00	29,0
2	0,564	0,400	0,4	19,40	2100	3,11	10,91	10,45	0,28	0,515	22,50	10,92	2,30	0,37	0,08	0,05	0,04	0,03	0,02	0,02	0,44	1230	-211	0,16	2,95	1,00	186,8
3	0,719	0,600	0,4	37,00	4075	11,10	26,60	24,20	0,42	0,513	40,80	20,55	4,73	0,99	0,65	0,10	0,07	0,04	0,03	0,02	0,80	1590	-571	0,26	10,84	0,67	687,0
4	0,894	0,800	0,4	50,20	5525	21,80	44,80	39,20	0,48	0,525	55,20	28,50	5,51	1,67	0,65	0,26	0,08	0,19	0,13	0,12	1,08	1950	-931	0,42	21,38	0,50	1355,6
5	1,078	1,000	0,4	59,40	6524	35,40	64,00	53,30	0,55	0,538	64,60	33,88	5,88	2,27	0,78	0,36	0,11	0,23	0,15	0,13	1,27	2310	-1291	0,62	34,78	0,40	2204,9
6	1,265	1,200	0,4	66,10	7278	43,40	83,60	71,40	0,52	0,543	69,50	37,45	5,97	3,22	1,31	0,30	0,24	0,31	0,11	0,16	1,36	2670	-1651	0,87	42,53	0,33	2696,7
0	0,600	0,000	0,6	0,31	0	0,18	0,18	0,00	1,00	0,510	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	764	764	0,18	0,00		0,0
1	0,632	0,200	0,6	4,69	504	0,45	2,96	2,93	0,15	0,512	5,61	2,84	0,18	0,02	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,11	1124	404	0,20	0,25	3,00	15,6
2	0,719	0,400	0,6	12,15	1312	1,62	8,75	8,59	0,19	0,513	14,35	7,03	1,19	0,11	0,01	0,03	0,02	0,00	0,00	0,00	0,28	1484	44	0,27	1,35	1,50	85,9
3	0,845	0,600	0,6	26,81	2925	5,48	22,62	21,96	0,24	0,513	29,26	14,09	3,95	0,95	0,31	0,20	0,11	0,04	0,02	0,03	0,57	1844	-316	0,37	5,11	1,00	324,2
4	0,997	0,800	0,6	43,50	4773	15,00	43,30	40,60	0,35	0,520	45,50	22,90	6,44	1,28	1,02	0,38	0,13	0,11	0,08	0,06	0,89	2204	-677	0,52	14,48	0,75	918,3
5	1,167	1,000	0,6	55,50	6101	30,30	64,80	57,30	0,47	0,535	58,53	29,96	7,49	1,62	1,19	0,12	0,25	0,14	0,17	0,14	1,15	2565	-1037	0,73	29,57	0,60	1874,9
6	1,342	1,200	0,6	64,00	7057	40,90	85,90	75,60	0,48	0,545	67,26	35,09	7,99	2,14	1,50	0,35	0,22	0,22	0,19	0,15	1,32	2925	-1397	0,98	39,92	0,50	2531,0
0	0,800	0,000	0,8	0,41	0	0,33	0,33	0,00	1,00	0,514	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1020	1020	0,33	0,00		0,0
1	0,825	0,200	0,8	3,57	381	0,50	2,95	2,90	0,17	0,514	4,41	2,15	0,12	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,09	1379	658	0,35	0,15	4,00	9,5
2	0,892	0,400	0,8	8,69	934	1,18	7,80	7,70	0,15	0,513	10,30	5,11	0,72	0,02	0,00	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,20	1739	298	0,41	0,77	2,00	49,0
3	0,996	0,600	0,8	17,08	1840	2,88	17,02	16,77	0,17	0,505	19,69	9,38	2,23	0,42	0,05	0,32	0,03	0,00	0,00	0,00	0,39	2099	-62	0,50	2,38	1,33	150,8
4	1,131	0,800	0,8	33,40	3663	10,70	37,80	36,20	0,28	0,515	34,80	16,56	5,44	1,54	0,54	0,40	0,25	0,12	0,06	0,04	0,68	2459	-422	0,66	10,04	1,00	636,6
5	1,280	1,000	0,8	48,80	5377	22,50	6,25	58,30	0,36	0,530	49,50	24,55	7,88	1,61	1,23	0,62	0,16	0,18	0,11	0,10	0,97	2819	-782	0,87	21,63	0,80	1371,5
6	1,443	1,200	0,8	60,30	6633	35,70	86,90	79,20	0,41	0,549	61,60	31,35	9,14	1,71	1,69	0,40	0,27	0,06	0,21	0,20	1,21	3179	-1142	1,14	34,56	0,67	2191,1
0	1,000	0,000	1,0	0,51	0	0,51	0,51	0,00	1,00	0,514	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1273	1273	0,51	0,00		-0,1
1	1,020	0,200	1,0	2,90	305	0,64	2,96	2,88	0,21	0,515	3,39	1,62	0,11	0,04	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,07	1633	913	0,54	0,10	5,00	6,6
2	1,079	0,400	1,0	6,72	719	1,33	7,25	7,12	0,18	0,508	7,67	3,87	0,43	0,04	0,00	0,02	0,01	0,01	0,00	0,00	0,15	1993	553	0,59	0,74	2,50	46,8
3	1,166	0,600	1,0	12,30	1321	2,71	14,28	14,02	0,19	0,504	14,32	6,99	1,36	0,21	0,02	0,03	0,01	0,02	0,00	0,00	0,28	2354	193	0,69	2,02	1,67	128,4
4	1,282	0,800	1,0	22,46	2413	5,88	28,72	28,08	0,20	0,511	24,57	11,54	3,39	0,95	0,27	0,08	0,04	0,02	0,01	0,00	0,48	2714	-167	0,84	5,04	1,25	319,6
5	1,413	1,000	1,0	39,40	4342	14,70	55,50	53,50	0,26	0,524	39,80	18,68	6,78	2,04	0,74	0,59	0,38	0,18	0,11	0,09	0,78	3074	-527	1,05	13,65	1,00	865,7
6	1,563	1,200	1,0	54,00	5947	27,80	84,20	79,40	0,33	0,520	53,60	26,31	9,23	2,05	1,48	0,92	0,27	0,18	0,09	0,14	1,05	3434	-888	1,27	26,53	0,83	1682,1

Ummagnetisierungsverluste bei 4000 Hz

	$I_{\text{eff}} [A]$	$I_L [A]$	$I_{\text{eff}} [A]$	$U [V]$	$U_L [mV]$	$P [W]$	$S [VA]$	$Q [VAR]$	PF	$R [\Omega]$	$\Phi_{\text{eff}} [\mu Vs]$	GS	$2.OS$	$3.OS$	$4.OS$	$5.OS$	$6.OS$	$7.OS$	$8.OS$	$9.OS$	$B [T]$	$H_z [A/m]$	$H_z [A/m]$	P_{cu}	P_L	I_L/I_{eff}	P_L/m
0	0,200	0,000	0,2	0,10	0	0,02	0,02	0,00	1,00	0,490	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	251	251	0,02	0,00		0,0
1	0,200	0,200	0,0	19,29	2084	3,25	3,87	2,08	0,84	0,500	20,30	10,30	0,09	0,26	0,03	0,05	0,01	0,01	0,00	0,00	0,40	360	-360	0,02	3,23	0,00	204,8
2	0,400	0,400	0,0	35,40	3888	11,50	14,10	8,20	0,82	0,500	37,40	19,10	0,13	0,53	0,03	0,13	0,01	0,03	0,00	0,00	0,73	720	-720	0,08	11,42	0,00	724,1
3	0,600	0,600	0,0	48,80	5363	22,00	29,30	19,30	0,75	0,510	51,15	26,21	0,26	0,80	0,08	0,27	0,04	0,06	0,03	0,02	1,00	1080	-1080	0,18	21,82	0,00	1383,2
4	0,800	0,800	0,0	59,60	6568	31,30	47,60	35,90	0,66	0,525	61,41	31,74	0,21	1,58	0,05	0,36	0,04	0,08	0,02	0,02	1,20	1441	-1441	0,34	30,96	0,00	1963,2
5	1,000	1,000	0,0	67,60	7458	38,80	67,60	55,30	0,57	0,530	67,30	35,49	0,28	2,61	0,12	0,16	0,05	0,18	0,05	0,05	1,32	1801	-1801	0,53	38,27	0,00	2426,5
6	1,200	1,200	0,0	74,60	8226	54,50	89,60	71,10	0,61	0,540	71,10	38,18	0,23	3,90	0,11	0,38	0,07	0,12	0,00	0,02	1,39	2161	-2161	0,78	53,72	0,00	3406,2
0	0,200	0,000	0,2	0,10	0	0,02	0,02	0,00	1,00	0,490	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	251	251	0,02	0,00		0,0
1	0,283	0,200	0,2	11,98	1293	1,25	3,38	3,14	0,37	0,495	12,60	6,30	0,57	0,04	0,02	0,02	0,01	0,00	0,00	0,00	0,25	611	-109	0,04	1,21	0,99	76,7
2	0,446	0,400	0,2	31,30	3441	7,80	14,00	11,60	0,56	0,495	31,70	16,21	2,18	0,68	0,27	0,04	0,04	0,02	0,00	0,00	0,62	971	-469	0,10	7,70	0,49	488,3
3	0,631	0,600	0,2	46,70	5127	18,60	29,40	22,80	0,63	0,510	47,21	24,31	2,24	1,23	0,01	0,04	0,14	0,08	0,02	0,00	0,93	1331	-830	0,20	18,40	0,33	1166,4
4	0,825	0,800	0,2	58,20	6421	29,40	48,00	37,90	0,61	0,525	58,92	30,57	2,44	1,67	0,04	0,07	0,23	0,13	0,03	0,01	1,16	1691	-1190	0,36	29,04	0,25	1841,4
5	1,019	1,000	0,2	67,20	7417	38,10	68,50	56,90	0,56	0,535	66,73	34,90	2,54	2,65	0,23	0,19	0,25	0,12	0,11	0,00	1,31	2051	-1550	0,56	37,54	0,20	2380,5
6	1,216	1,200	0,2	74,10	8170	53,60	90,10	72,40	0,60	0,540	70,44	37,77	2,56	3,62	0,40	0,27	0,25	0,06	0,09	0,02	1,38	2412	-1910	0,80	52,80	0,16	3347,8
0	0,400	0,000	0,4	0,20	0	0,08	0,08	0,00	1,00	0,498	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	509	509	0,08	0,00		0,0
1	0,447	0,200	0,4	7,36	7917	0,62	3,30	3,24	0,19	0,498	7,78	3,91	0,31	0,04	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,15	869	149	0,10	0,52	2,00	33,0
2	0,563	0,400	0,4	10,91	2258	3,42	11,76	11,25	0,29	0,498	21,17	10,48	1,98	0,24	0,07	0,06	0,04	0,02	0,00	0,00	0,42	1230	-211	0,16	3,26	1,00	206,8
3	0,717	0,600	0,4	39,70	4355	12,00	28,40	25,80	0,42	0,505	37,89	19,30	3,97	0,87	0,63	0,17	0,08	0,00	0,03	16,25	0,74	1590	-571	0,26	11,74	0,67	744,4
4	0,892	0,800	0,4	54,00	5953	23,70	48,20	41,90	0,49	0,525	52,00	26,90	4,61	1,44	0,44	0,22	0,08	0,05	0,00	0,04	1,02	1950	-931	0,42	23,28	0,50	1476,2
5	1,078	1,000	0,4	64,60	7123	40,70	69,60	56,50	0,58	0,538	62,53	32,53	4,80	2,05	0,42	0,29	0,04	0,07	0,09	0,03	1,23	2310	-1291	0,62	40,08	0,40	2540,9
6	1,170	1,100	0,4	68,90	7594	46,40	80,60	65,70	0,58	0,548	65,62	34,63	4,90	2,47	0,65	0,37	0,00	0,06	0,07	0,01	1,29	2490	-1471	0,75	45,65	0,36	2894,4
0	0,600	0,000	0,6	0,30	0	0,18	0,18	0,00	1,00	0,498	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	764	764	0,18	0,00		0,0
1	0,632	0,200	0,6	5,25	562	0,48	3,32	3,28	0,15	0,498	5,46	2,75	0,20	0,03	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,11	1124	404	0,20	0,28	3,00	17,8
2	0,717	0,400	0,6	13,32	1431	1,78	9,57	9,40	0,19	0,498	13,68	6,78	1,10	0,09	0,01	0,01	0,02	0,00	0,00	0,00	0,27	1484	44	0,26	1,52	1,50	96,6
3	0,842	0,600	0,6	28,50	3126	6,20	24,00	23,20	0,26	0,500	27,60	13,35	3,36	0,62	0,18	0,16	0,96	0,05	0,02	0,01	0,54	1844	-316	0,35	5,85	1,00	370,6
4	0,995	0,800	0,6	46,60	5126	16,10	46,30	43,50	0,35	0,522	43,10	21,64	5,56	0,93	0,78	0,24	0,12	0,10	0,04	0,02	0,85	2204	-677	0,52	15,58	0,75	988,1
5	1,166	1,000	0,6	60,00	6617	33,90	70,00	61,20	0,49	0,537	55,82	28,61	6,47	1,47	0,98	0,22	0,25	0,10	0,04	0,06	1,09	2565	-1037	0,73	33,17	0,60	2103,1
6	1,253	1,100	0,6	65,40	7211	41,10	82,00	70,90	0,50	0,543	61,46	31,56	6,72	1,76	1,01	0,27	0,17	0,02	0,02	0,03	1,21	2745	-1217	0,85	40,25	0,55	2551,8
0	0,800	0,000	0,8	0,40	0	0,32	0,32	0,00	1,00	0,494	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1020	1020	0,32	0,00		0,0
1	0,825	0,200	0,8	3,96	421	0,50	3,28	3,24	0,15	0,494	4,21	2,08	0,12	0,02	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,08	1379	658	0,34	0,16	4,00	10,4
2	0,891	0,400	0,8	9,69	1034	1,28	8,62	8,51	0,15	0,499	10,22	5,02	0,65	0,04	0,00	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,20	1739	298	0,40	0,88	2,00	56,1
3	0,993	0,600	0,8	18,55	1996	3,15	18,46	18,17	0,17	0,505	18,42	9,02	1,92	0,28	0,03	0,05	0,03	0,02	0,00	0,00	0,36	2099	-62	0,50	2,65	1,33	168,1
4	1,128	0,800	0,8	35,40	3918	11,70	40,20	38,30	0,29	0,515	33,18	15,76	4,75	1,11	0,36	0,29	0,18	0,09	0,05	0,00	0,65	2459	-422	0,66	11,04	1,00	700,3
5	1,280	1,000	0,8	52,80	5820	25,30	67,50	62,60	0,37	0,531	47,43	28,38	6,94	1,14	0,90	0,37	0,04	0,08	0,08	0,07	0,93	2819	-782	0,87	24,43	0,80	1548,9
6	1,360	1,100	0,8	59,50	6557	33,00	81,00	74,00	0,41	0,540	53,73	26,86	7,59	1,24	1,25	0,39	0,29	0,20	0,11	0,03	1,05	2999	-962	1,00	32,00	0,73	2029,0
0	1,000	0,000	1,0	0,50	0	0,50	0,50	0,00	1,00	0,495	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1273	1273	0,50	0,00		0,0
1	1,019	0,200	1,0	3,21	336	0,63	3,27	3,20	0,19	0,495	3,34	1,68	0,07	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,07	1633	913	0,51	0,12	5,00	7,4
2	1,077	0,400	1,0	7,47	796	1,45	8,04	7,91	0,18	0,498	7,84	3,85	0,37	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,15	1993	553	0,58	0,87	2,50	55,3
3	1,164	0,600	1,0	13,51	1443	3,04	15,76	15,45	0,19	0,503	13,65	6,72	1,23	0,14	0,03	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00	0,27	2354	193	0,68	2,36	1,67	149,5
4	1,276	0,800	1,0	24,09	2604	6,53	30,82	30,09	0,21	0,508	23,67	11,04	3,02	0,73	0,16	0,03	0,03	0,03	0,02	0,00	0,46	2714	-167	0,83	5,70	1,25	361,6
5	1,410	1,000	1,0	42,40	4642	16,30	59,60	57,20	0,27	0,524	37,80	17,82	6,01	1,57	0,53	0,46	0,29	0,16	0,08	0,02	0,74	3074	-527	1,04	15,26	1,00	967,4
6	1,487	1,100	1,0	51,00	5605	23,60	76,00	72,20	0,31	0,533	44,51	21,41	7,17	1,68	1,01	0,70	0,24	0,19	0,13	0,00	0,87	3254	-707	1,18	22,42	0,91	1421,6

Ummagnetisierungsverluste bei 4500 Hz

	$I_{\text{ges}} [A]$	$I_L [A]$	$I_U [A]$	$U [V]$	$U_L [mV]$	$P [W]$	$S [VA]$	$Q [VAR]$	PF	$R [\Omega]$	$\Phi_{\text{res}} [\mu V s]$	GS	2.OS	3.OS	4.OS	5.OS	6.OS	7.OS	8.OS	9.OS	$B [T]$	$H_L [A/m]$	$H_U [A/m]$	P_{cu}	P_{fe}	I_U/I_L	P_{u}/m
0	0,200	0,000	0,2	0,10	0	0,02	0,02	0,00	1,00	0,485	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	251	251	0,02	0,00		0,0
1	0,200	0,200	0,0	20,04	2163	3,36	4,01	2,18	0,84	0,490	19,11	9,79	0,06	0,25	0,01	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00	0,37	360	-360	0,02	3,34	0,00	211,8
2	0,400	0,400	0,0	36,90	4058	12,10	14,80	8,50	0,82	0,500	35,51	18,19	0,11	0,53	0,02	0,11	0,01	0,01	0,00	0,00	0,70	720	-720	0,08	12,02	0,00	762,1
3	0,600	0,600	0,0	51,30	5638	23,60	30,80	19,80	0,77	0,515	49,10	25,22	0,11	0,77	0,03	0,18	0,00	0,03	0,00	0,00	0,96	1080	-1080	0,19	23,41	0,00	1484,6
4	0,800	0,800	0,0	63,30	6951	34,80	50,60	36,70	0,69	0,530	60,20	30,86	0,15	1,41	0,06	0,43	0,00	0,00	0,00	0,00	1,18	1441	-1441	0,34	34,46	0,00	2184,9
5	1,000	1,000	0,0	72,60	8010	43,60	72,60	58,00	0,60	0,540	66,69	34,98	0,15	2,46	0,06	0,50	0,00	0,15	0,00	0,02	1,31	1801	-1801	0,54	43,06	0,00	2730,2
6	1,150	1,150	0,0	78,00	8603	58,90	89,80	67,80	0,66	0,545	69,15	37,07	0,24	3,33	0,05	0,19	0,07	0,10	0,02	0,05	1,36	2071	-2071	0,72	58,18	0,00	3688,8
0	0,200	0,000	0,2	0,10	0	0,02	0,02	0,00	1,00	0,485	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	251	251	0,02	0,00		0,0
1	0,281	0,200	0,2	12,60	1357	1,34	3,55	3,28	0,38	0,490	12,10	5,92	0,54	0,01	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,24	611	-109	0,04	1,30	0,99	82,5
2	0,445	0,400	0,2	32,80	3600	8,30	14,60	12,00	0,57	0,500	30,13	15,40	2,18	0,61	0,27	0,05	0,03	0,01	0,00	0,00	0,59	971	-469	0,10	8,20	0,49	520,0
3	0,631	0,600	0,2	49,00	5395	19,70	30,90	23,80	0,64	0,510	45,07	23,37	2,46	1,14	0,08	0,12	0,13	0,04	0,02	0,00	0,88	1331	-830	0,20	19,50	0,33	1236,2
4	0,823	0,800	0,2	61,70	6773	32,20	50,70	39,20	0,64	0,525	57,32	29,61	2,60	1,49	0,13	0,13	0,23	0,09	0,02	0,00	1,12	1691	-1190	0,36	31,84	0,25	2019,0
5	1,019	1,000	0,2	71,60	7905	42,50	73,10	59,30	0,58	0,535	65,13	34,06	2,82	2,30	0,16	0,12	0,33	0,11	0,06	0,02	1,28	2051	-1550	0,56	41,94	0,20	2659,4
6	1,224	1,150	0,2	81,70	9000	64,60	99,60	76,00	0,65	0,545	68,30	36,36	3,18	3,58	0,51	0,81	0,91	0,62	0,27	0,14	1,34	2322	-1820	0,82	63,78	0,17	4044,1
0	0,400	0,000	0,4	0,20	0	0,08	0,08	0,00	1,00	0,490	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	509	509	0,08	0,00		0,0
1	0,445	0,200	0,4	7,83	843	0,66	3,50	3,43	0,19	0,493	7,70	3,83	0,32	0,01	0,02	0,02	0,01	0,00	0,00	0,00	0,15	869	149	0,10	0,56	2,00	35,7
2	0,560	0,400	0,4	21,87	2367	3,62	12,23	11,68	0,30	0,500	20,27	9,93	1,92	0,28	0,06	0,04	0,02	0,00	0,00	0,00	0,40	1230	-211	0,16	3,46	1,00	219,6
3	0,716	0,600	0,4	41,70	4569	12,70	29,80	26,90	0,43	0,513	36,52	18,50	4,02	0,86	0,61	0,18	0,06	0,02	0,00	0,00	0,72	1590	-571	0,26	12,44	0,67	788,6
4	0,891	0,800	0,4	57,20	6279	25,60	50,90	44,00	0,50	0,528	49,67	25,93	4,73	1,51	0,58	0,15	0,09	0,12	0,06	0,02	0,97	1950	-931	0,42	25,18	0,50	1596,6
5	1,077	1,000	0,4	68,70	7577	44,80	74,00	58,80	0,61	0,545	60,47	31,56	5,04	2,04	0,46	0,30	0,15	0,19	0,12	0,07	1,19	2310	-1291	0,63	44,17	0,40	2800,4
6	1,283	1,150	0,4	79,50	8742	60,80	102,00	82,10	0,60	0,550	68,63	34,74	5,26	2,86	0,73	0,99	0,84	0,73	0,43	0,18	1,35	2580	-1561	0,91	59,89	0,35	3797,5
0	0,600	0,000	0,6	0,30	0	0,18	0,18	0,00	1,00	0,493	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	764	764	0,18	0,00		0,0
1	0,631	0,200	0,6	5,62	600	0,50	3,54	3,50	0,14	0,493	5,43	2,67	0,18	0,02	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,11	1124	404	0,20	0,30	3,00	19,2
2	0,715	0,400	0,6	14,15	1523	1,82	10,17	9,97	0,19	0,502	12,94	6,57	1,02	0,09	0,02	0,02	0,01	0,00	0,00	0,00	0,25	1484	44	0,26	1,66	1,50	105,5
3	0,840	0,600	0,6	30,10	3293	6,60	25,30	24,40	0,26	0,508	26,35	12,82	3,36	0,77	0,25	0,16	0,08	0,02	0,00	0,00	0,52	1844	-316	0,36	6,24	1,00	395,7
4	0,994	0,800	0,6	49,40	5408	17,30	49,00	45,80	0,35	0,522	41,36	20,81	5,89	1,10	0,90	0,38	0,16	0,10	0,05	0,02	0,81	2204	-677	0,52	16,78	0,75	1064,2
5	1,166	1,000	0,6	63,80	7023	37,20	74,30	64,30	0,50	0,538	53,51	27,55	6,59	1,54	1,19	0,19	0,28	0,19	0,15	0,08	1,05	2565	-1037	0,73	36,47	0,60	2312,2
6	1,357	1,150	0,6	75,70	8350	54,50	103,00	88,00	0,53	0,543	63,00	31,51	7,43	3,06	1,36	1,37	0,60	0,07	0,29	0,37	1,24	2835	-1307	1,00	53,50	0,52	3392,1
0	0,800	0,000	0,8	0,40	0	0,32	0,32	0,00	1,00	0,494	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1020	1020	0,32	0,00		0,0
1	0,823	0,200	0,8	4,28	456	0,52	3,53	3,49	0,15	0,495	4,10	2,06	0,10	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,08	1379	658	0,34	0,18	4,00	11,7
2	0,891	0,400	0,8	10,42	1117	1,38	9,30	9,20	0,15	0,503	9,43	5,02	0,73	0,08	0,06	0,04	0,01	0,01	0,01	0,01	0,18	1739	298	0,40	0,98	2,00	62,2
3	0,992	0,600	0,8	20,05	2144	3,43	19,78	19,50	0,17	0,505	18,20	8,83	1,98	0,38	0,09	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,36	2099	-62	0,50	2,93	1,33	186,0
4	1,128	0,800	0,8	37,60	4129	12,90	42,50	40,50	0,30	0,519	32,04	15,12	4,69	1,26	0,44	0,32	0,19	0,07	0,03	0,00	0,63	2459	-422	0,66	12,24	1,00	776,1
5	1,282	1,000	0,8	56,00	6180	27,80	71,80	66,20	0,39	0,530	45,72	22,53	6,92	1,40	1,07	0,63	0,23	0,19	0,12	0,07	0,90	2819	-782	0,87	26,93	0,80	1707,4
6	1,513	1,150	0,8	71,40	7822	46,70	108,70	97,50	0,44	0,543	26,88	26,88	8,32	2,79	1,92	0,88	0,78	0,13	0,40	0,49	0,53	3089	-1052	1,24	45,46	0,70	2882,2
0	1,000	0,000	1,0	0,50	0	0,50	0,50	0,00	1,00	0,495	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1273	1273	0,50	0,00		0,0
1	1,019	0,200	1,0	3,47	364	0,64	3,54	3,48	0,18	0,496	3,12	1,62	0,07	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,06	1633	913	0,52	0,12	5,00	7,9
2	1,076	0,400	1,0	8,11	861	1,58	8,72	8,56	0,18	0,501	7,66	3,80	0,43	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,15	1993	553	0,58	1,00	2,50	63,4
3	1,162	0,600	1,0	14,48	1550	3,36	16,88	16,52	0,20	0,504	13,68	6,68	1,17	0,18	0,00	0,00	0,02	0,00	0,00	0,00	0,27	2354	193	0,68	2,68	1,67	169,9
4	1,275	0,800	1,0	25,86	2812	7,26	32,90	32,08	0,22	0,513	23,14	10,84	3,00	0,75	0,22	0,09	0,01	0,03	0,00	0,00	0,45	2714	-167	0,83	6,43	1,25	407,4
5	1,408	1,000	1,0	44,60	4900	17,80	62,70	60,10	0,28	0,516	36,68	17,12	5,91	1,77	0,62	0,47	0,31	0,15	0,09	0,04	0,72	3074	-527	1,02	16,78	1,00	1063,7
6	1,554	1,150	1,0	60,60	6630	32,40	94,30	88,30	0,35	0,536	45,94	22,26	7,64	1,95	1,36	1,13	0,65	0,63	0,55	0,39	0,90	3344	-797	1,29	31,11	0,87	1972,2

Ummagnetisierungsverluste bei 5000 Hz

9.5 Berechnete Betriebsparameter

Ψ_d/Vs	60	40	20	0	-20	-40	-60	-80	-100	-120	-140	-160
0	0,180	0,171	0,160	0,142	0,120	0,097	0,073	0,050	0,026	0,003	-0,020	-0,044
20	0,179	0,171	0,159	0,142	0,120	0,097	0,073	0,050	0,026	0,003	-0,021	-0,044
40	0,179	0,170	0,158	0,141	0,120	0,097	0,073	0,050	0,026	0,003	-0,021	-0,044
60	0,177	0,168	0,156	0,140	0,119	0,097	0,073	0,050	0,026	0,003	-0,021	-0,044
80	0,175	0,166	0,154	0,138	0,118	0,096	0,073	0,050	0,026	0,003	-0,021	-0,044
100	0,172	0,163	0,151	0,136	0,117	0,095	0,073	0,049	0,026	0,003	-0,021	-0,044
120	0,168	0,160	0,148	0,133	0,115	0,094	0,072	0,049	0,026	0,002	-0,021	-0,044
140	0,164	0,156	0,144	0,129	0,112	0,092	0,071	0,049	0,026	0,002	-0,021	-0,044
160	0,160	0,152	0,140	0,126	0,109	0,090	0,069	0,048	0,025	0,002	-0,021	-0,043
180	0,155	0,147	0,136	0,122	0,106	0,087	0,068	0,046	0,024	0,002	-0,021	-0,042
200	0,151	0,142	0,131	0,118	0,102	0,084	0,065	0,045	0,023	0,002	-0,020	-0,041
220	0,146	0,137	0,126	0,113	0,098	0,081	0,063	0,043	0,022	0,001	-0,019	-0,040
240	0,141	0,132	0,121	0,108	0,094	0,078	0,060	0,041	0,021	0,001	-0,018	-0,038
260	0,136	0,127	0,116	0,104	0,090	0,074	0,057	0,039	0,020	0,002	-0,017	-0,036
280	0,132	0,122	0,111	0,100	0,086	0,071	0,055	0,037	0,020	0,002	-0,016	-0,034
300	0,127	0,118	0,107	0,096	0,082	0,068	0,052	0,036	0,019	0,002	-0,016	-0,032
320	0,122	0,113	0,103	0,092	0,079	0,065	0,050	0,034	0,018	0,002	-0,015	-0,031
340	0,118	0,109	0,099	0,088	0,076	0,062	0,048	0,033	0,017	0,001	-0,014	-0,029
360	0,114	0,105	0,095	0,084	0,073	0,060	0,046	0,031	0,016	0,001	-0,014	-0,028

Längsflussverkettung in Abhängigkeit von d-Strom (Spalten) und q-Strom (Reihen)

Ψ_q/Vs	60	40	20	0	-20	-40	-60	-80	-100	-120	-140	-160
0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
20	0,011	0,012	0,013	0,013	0,014	0,014	0,014	0,014	0,014	0,014	0,014	0,014
40	0,023	0,024	0,025	0,027	0,027	0,028	0,028	0,028	0,028	0,028	0,028	0,028
60	0,034	0,036	0,038	0,040	0,041	0,041	0,042	0,042	0,042	0,042	0,042	0,042
80	0,045	0,047	0,050	0,052	0,054	0,055	0,055	0,056	0,056	0,056	0,056	0,056
100	0,056	0,059	0,062	0,065	0,067	0,068	0,069	0,069	0,070	0,070	0,070	0,070
120	0,066	0,070	0,073	0,077	0,079	0,081	0,082	0,083	0,083	0,083	0,084	0,084
140	0,076	0,080	0,084	0,088	0,091	0,094	0,095	0,096	0,097	0,097	0,097	0,097
160	0,086	0,091	0,095	0,099	0,102	0,105	0,107	0,109	0,110	0,110	0,110	0,110
180	0,095	0,100	0,105	0,109	0,113	0,116	0,119	0,120	0,122	0,122	0,122	0,121
200	0,104	0,109	0,114	0,119	0,123	0,126	0,129	0,131	0,132	0,133	0,132	0,131
220	0,112	0,117	0,122	0,127	0,131	0,135	0,138	0,140	0,141	0,142	0,142	0,140
240	0,119	0,124	0,129	0,134	0,138	0,142	0,145	0,148	0,149	0,149	0,149	0,147
260	0,126	0,130	0,135	0,140	0,144	0,148	0,151	0,153	0,155	0,155	0,154	0,153
280	0,132	0,137	0,141	0,146	0,149	0,153	0,156	0,158	0,159	0,160	0,159	0,158
300	0,138	0,142	0,147	0,151	0,155	0,158	0,160	0,163	0,164	0,164	0,164	0,162
320	0,143	0,147	0,152	0,155	0,159	0,162	0,165	0,167	0,168	0,168	0,168	0,167
340	0,148	0,152	0,156	0,160	0,163	0,166	0,169	0,170	0,171	0,172	0,172	0,171
360	0,153	0,156	0,160	0,164	0,167	0,170	0,172	0,174	0,175	0,175	0,175	0,174

Querflussverkettung in Abhängigkeit von d-Strom (Spalten) und q-Strom (Reihen)

Ψ/Vs	60	40	20	0	-20	-40	-60	-80	-100	-120	-140	-160
0	0,180	0,171	0,160	0,142	0,120	0,097	0,073	0,050	0,026	0,003	0,020	0,044
20	0,180	0,171	0,160	0,143	0,121	0,098	0,075	0,052	0,030	0,014	0,025	0,046
40	0,180	0,171	0,160	0,144	0,123	0,101	0,078	0,057	0,038	0,028	0,035	0,052
60	0,180	0,172	0,161	0,145	0,126	0,105	0,084	0,065	0,049	0,042	0,047	0,061
80	0,180	0,172	0,162	0,148	0,130	0,111	0,092	0,074	0,062	0,056	0,060	0,071
100	0,181	0,173	0,163	0,150	0,135	0,117	0,100	0,085	0,074	0,070	0,073	0,083
120	0,181	0,174	0,165	0,153	0,139	0,124	0,109	0,096	0,087	0,083	0,086	0,095
140	0,181	0,175	0,167	0,157	0,145	0,132	0,119	0,108	0,100	0,097	0,099	0,107
160	0,182	0,177	0,169	0,160	0,150	0,139	0,128	0,119	0,112	0,110	0,112	0,118
180	0,182	0,178	0,172	0,164	0,155	0,145	0,137	0,129	0,124	0,122	0,124	0,128
200	0,183	0,179	0,173	0,167	0,160	0,152	0,144	0,138	0,134	0,133	0,134	0,138
220	0,183	0,180	0,175	0,170	0,164	0,157	0,151	0,146	0,143	0,142	0,143	0,146
240	0,184	0,181	0,177	0,172	0,167	0,162	0,157	0,153	0,151	0,149	0,150	0,152
260	0,185	0,182	0,178	0,174	0,170	0,165	0,161	0,158	0,156	0,155	0,155	0,157
280	0,186	0,183	0,180	0,176	0,172	0,169	0,165	0,162	0,161	0,160	0,160	0,161
300	0,187	0,185	0,182	0,178	0,175	0,172	0,169	0,166	0,165	0,164	0,165	0,166
320	0,189	0,186	0,183	0,180	0,178	0,175	0,172	0,170	0,169	0,168	0,169	0,170
340	0,190	0,187	0,185	0,182	0,180	0,177	0,175	0,174	0,172	0,172	0,172	0,173
360	0,191	0,189	0,187	0,184	0,182	0,180	0,178	0,177	0,176	0,175	0,176	0,177

Flussverkettung in Abhängigkeit von d-Strom (Spalten) und q-Strom (Reihen)

Ψ_M/Vs	60	40	20	0	-20	-40	-60	-80	-100	-120	-140	-160
0	0,142	0,142	0,142	0,142	0,142	0,142	0,142	0,142	0,142	0,142	0,142	0,142
20	0,162	0,158	0,153	0,147	0,146	0,145	0,144	0,142	0,142	0,142	0,142	0,142
40	0,167	0,160	0,152	0,147	0,146	0,144	0,143	0,141	0,141	0,141	0,141	0,141
60	0,159	0,153	0,146	0,142	0,142	0,142	0,142	0,141	0,140	0,140	0,140	0,140
80	0,156	0,148	0,142	0,139	0,139	0,141	0,141	0,141	0,140	0,140	0,140	0,140
100	0,152	0,144	0,138	0,136	0,136	0,138	0,140	0,140	0,140	0,140	0,140	0,140
120	0,149	0,140	0,135	0,133	0,133	0,135	0,138	0,139	0,140	0,140	0,140	0,139
140	0,144	0,136	0,131	0,129	0,130	0,132	0,135	0,137	0,139	0,139	0,140	0,136
160	0,139	0,132	0,127	0,126	0,126	0,128	0,131	0,135	0,137	0,138	0,137	0,131
180	0,133	0,128	0,123	0,122	0,122	0,124	0,127	0,131	0,134	0,135	0,132	0,127
200	0,127	0,123	0,119	0,118	0,118	0,120	0,123	0,127	0,130	0,131	0,128	0,123
220	0,121	0,117	0,114	0,113	0,114	0,116	0,119	0,122	0,125	0,126	0,123	0,118
240	0,115	0,112	0,109	0,108	0,109	0,111	0,114	0,117	0,120	0,120	0,118	0,113
260	0,110	0,106	0,104	0,104	0,104	0,106	0,109	0,112	0,115	0,113	0,113	0,106
280	0,105	0,102	0,100	0,100	0,100	0,102	0,105	0,107	0,108	0,109	0,110	0,103
300	0,100	0,098	0,096	0,095	0,096	0,097	0,100	0,103	0,103	0,105	0,102	0,099
320	0,096	0,094	0,092	0,092	0,092	0,093	0,096	0,097	0,098	0,101	0,097	0,092
340	0,092	0,090	0,088	0,088	0,088	0,090	0,093	0,093	0,095	0,097	0,092	0,090
360	0,088	0,086	0,085	0,084	0,085	0,086	0,088	0,089	0,092	0,091	0,088	0,086

Virtuelle Magnetflussverkettung in Abhängigkeit von d-Strom (Spalten) und q-Strom (Reihen)

L_{dd}/mH	60	40	20	0	-20	-40	-60	-80	-100	-120	-140	-160
0	0,388	0,489	0,679	1,035	1,152	1,173	1,180	1,182	1,173	1,153	1,173	1,176
20	0,389	0,495	0,678	1,018	1,150	1,172	1,178	1,181	1,172	1,157	1,172	1,176
40	0,390	0,501	0,685	0,979	1,137	1,169	1,177	1,178	1,173	1,165	1,172	1,174
60	0,391	0,508	0,683	0,939	1,102	1,163	1,174	1,176	1,171	1,169	1,171	1,172
80	0,380	0,517	0,680	0,897	1,057	1,145	1,169	1,173	1,171	1,170	1,170	1,169
100	0,368	0,523	0,676	0,858	1,016	1,109	1,158	1,169	1,169	1,169	1,169	1,166
120	0,352	0,521	0,669	0,825	0,975	1,070	1,134	1,161	1,165	1,167	1,167	1,157
140	0,355	0,515	0,657	0,800	0,932	1,033	1,102	1,143	1,158	1,162	1,161	1,133
160	0,364	0,491	0,643	0,779	0,896	0,994	1,065	1,117	1,144	1,153	1,143	1,099
180	0,383	0,471	0,620	0,756	0,868	0,960	1,028	1,083	1,120	1,132	1,108	1,066
200	0,400	0,474	0,590	0,720	0,838	0,930	0,991	1,049	1,083	1,096	1,069	1,035
220	0,409	0,485	0,586	0,692	0,807	0,895	0,959	1,010	1,042	1,053	1,028	0,995
240	0,426	0,494	0,583	0,674	0,764	0,853	0,923	0,967	0,996	1,002	0,983	0,948
260	0,426	0,501	0,580	0,660	0,741	0,820	0,880	0,923	0,953	0,942	0,943	0,893
280	0,435	0,503	0,565	0,637	0,726	0,791	0,842	0,882	0,887	0,905	0,909	0,860
300	0,441	0,488	0,550	0,623	0,706	0,742	0,803	0,845	0,851	0,866	0,847	0,827
320	0,432	0,475	0,551	0,616	0,667	0,713	0,783	0,793	0,804	0,834	0,802	0,773
340	0,428	0,478	0,544	0,584	0,633	0,699	0,752	0,762	0,777	0,803	0,765	0,747
360	0,428	0,477	0,530	0,569	0,619	0,680	0,708	0,725	0,755	0,748	0,729	0,716

Differentielle Längsinduktivität in Abhängigkeit von d-Strom (Spalten) und q-Strom (Reihen)

L_{qd}/mH	60	40	20	0	-20	-40	-60	-80	-100	-120	-140	-160
0	0,575	0,601	0,641	0,675	0,683	0,688	0,695	0,698	0,697	0,695	0,698	0,701
20	0,570	0,602	0,635	0,673	0,689	0,694	0,695	0,697	0,698	0,698	0,699	0,701
40	0,560	0,595	0,631	0,661	0,685	0,693	0,695	0,696	0,698	0,699	0,700	0,700
60	0,557	0,585	0,615	0,644	0,671	0,688	0,692	0,695	0,696	0,697	0,697	0,697
80	0,547	0,576	0,601	0,622	0,648	0,674	0,687	0,691	0,694	0,695	0,695	0,694
100	0,534	0,563	0,583	0,604	0,626	0,651	0,672	0,682	0,690	0,692	0,693	0,693
120	0,517	0,545	0,563	0,582	0,606	0,629	0,653	0,670	0,676	0,682	0,686	0,684
140	0,495	0,520	0,540	0,558	0,578	0,605	0,630	0,651	0,664	0,668	0,669	0,660
160	0,468	0,489	0,513	0,527	0,541	0,564	0,591	0,616	0,633	0,640	0,632	0,608
180	0,446	0,453	0,472	0,494	0,506	0,515	0,530	0,547	0,559	0,563	0,553	0,536
200	0,408	0,412	0,417	0,442	0,462	0,472	0,477	0,484	0,492	0,494	0,489	0,481
220	0,387	0,387	0,380	0,373	0,386	0,412	0,425	0,431	0,431	0,431	0,424	0,404
240	0,359	0,342	0,339	0,329	0,322	0,315	0,317	0,322	0,312	0,312	0,293	0,306
260	0,318	0,318	0,315	0,304	0,280	0,271	0,266	0,256	0,256	0,249	0,254	0,260
280	0,304	0,303	0,282	0,267	0,261	0,254	0,238	0,233	0,227	0,230	0,239	0,240
300	0,289	0,264	0,250	0,249	0,244	0,225	0,218	0,218	0,211	0,212	0,215	0,225
320	0,249	0,237	0,237	0,235	0,214	0,205	0,205	0,195	0,192	0,197	0,199	0,201
340	0,228	0,226	0,223	0,204	0,194	0,193	0,190	0,181	0,178	0,183	0,181	0,187
360	0,218	0,214	0,200	0,184	0,183	0,182	0,167	0,164	0,167	0,161	0,166	0,172

Differentielle Querinduktivität in Abhängigkeit von d-Strom (Spalten) und q-Strom (Reihen)

L_d/mH	60	40	20	0,1	-20	-40	-60	-80	-100	-120	-140	-160
0	0,623	0,715	0,857	0,00	1,111	1,137	1,151	1,159	1,163	1,163	1,163	1,165
20	0,618	0,706	0,838	1,91	1,114	1,139	1,152	1,158	1,162	1,163	1,164	1,165
40	0,602	0,681	0,775	10,81	1,127	1,142	1,153	1,159	1,162	1,163	1,164	1,165
60	0,575	0,639	0,681	24,78	1,153	1,147	1,155	1,160	1,163	1,164	1,165	1,166
80	0,538	0,586	0,566	43,88	1,205	1,156	1,157	1,161	1,163	1,164	1,165	1,166
100	0,490	0,511	0,424	67,81	1,284	1,174	1,162	1,163	1,164	1,165	1,166	1,166
120	0,434	0,429	0,264	95,89	1,386	1,207	1,172	1,166	1,166	1,166	1,166	1,166
140	0,367	0,335	0,081	129,1	1,510	1,249	1,189	1,172	1,168	1,168	1,167	1,165
160	0,294	0,229	0,107	164,3	1,662	1,306	1,215	1,184	1,174	1,170	1,167	1,161
180	0,215	0,109	0,329	203,7	1,832	1,375	1,248	1,201	1,181	1,172	1,165	1,155
200	0,135	0,016	0,571	246,3	2,013	1,450	1,287	1,221	1,190	1,174	1,161	1,147
220	0,054	0,143	0,827	292,3	2,206	1,529	1,329	1,243	1,200	1,175	1,156	1,138
240	0,026	0,267	1,076	340,2	2,420	1,616	1,373	1,267	1,210	1,175	1,149	1,127
260	0,104	0,387	1,317	386,2	2,626	1,703	1,420	1,289	1,219	1,174	1,142	1,115
280	0,181	0,506	1,550	428,1	2,820	1,788	1,461	1,311	1,229	1,173	1,134	1,103
300	0,258	0,621	1,758	468,2	3,008	1,864	1,501	1,334	1,236	1,173	1,129	1,092
320	0,332	0,724	1,958	507,9	3,181	1,935	1,540	1,354	1,243	1,173	1,123	1,082
340	0,400	0,825	2,159	545,6	3,338	2,004	1,579	1,372	1,251	1,174	1,118	1,073
360	0,467	0,925	2,352	579,5	3,493	2,072	1,613	1,389	1,259	1,175	1,114	1,065

Absolute Längsinduktivität in Abhängigkeit von d-Strom (Spalten) und q-Strom (Reihen)

L_q/mH	60	40	20	0	-20	-40	-60	-80	-100	-120	-140	-160
0	1,35	0,86	0,38	0,000	0,153	0,041	0,071	0,078	0,106	0,139	0,087	0,036
20	0,567	0,598	0,628	0,667	0,685	0,690	0,694	0,703	0,696	0,697	0,699	0,701
40	0,565	0,599	0,635	0,670	0,687	0,692	0,695	0,696	0,697	0,699	0,699	0,701
60	0,563	0,596	0,630	0,664	0,684	0,692	0,695	0,696	0,697	0,698	0,699	0,700
80	0,561	0,593	0,625	0,656	0,678	0,689	0,693	0,695	0,696	0,697	0,698	0,699
100	0,557	0,587	0,619	0,647	0,670	0,684	0,691	0,694	0,696	0,697	0,697	0,698
120	0,552	0,582	0,612	0,638	0,661	0,677	0,686	0,691	0,694	0,695	0,696	0,696
140	0,545	0,575	0,603	0,629	0,651	0,668	0,680	0,687	0,691	0,692	0,694	0,693
160	0,537	0,566	0,594	0,618	0,640	0,658	0,671	0,680	0,685	0,688	0,689	0,686
180	0,529	0,556	0,582	0,606	0,627	0,645	0,659	0,669	0,676	0,679	0,678	0,673
200	0,518	0,543	0,568	0,593	0,613	0,630	0,644	0,654	0,661	0,663	0,662	0,657
220	0,507	0,530	0,553	0,576	0,596	0,613	0,626	0,636	0,643	0,645	0,644	0,638
240	0,496	0,516	0,537	0,556	0,576	0,592	0,605	0,615	0,621	0,622	0,620	0,614
260	0,484	0,502	0,520	0,538	0,554	0,569	0,581	0,589	0,594	0,596	0,593	0,588
280	0,472	0,488	0,505	0,520	0,534	0,547	0,557	0,564	0,569	0,570	0,569	0,564
300	0,460	0,475	0,489	0,502	0,515	0,526	0,535	0,542	0,546	0,547	0,546	0,542
320	0,448	0,461	0,473	0,486	0,497	0,507	0,515	0,521	0,524	0,526	0,525	0,521
340	0,435	0,447	0,459	0,470	0,480	0,489	0,496	0,501	0,504	0,506	0,505	0,502
360	0,424	0,435	0,445	0,455	0,464	0,472	0,478	0,483	0,486	0,487	0,487	0,484

Absolute Querinduktivität in Abhängigkeit von d-Strom (Spalten) und q-Strom (Reihen)

L_{dd}/L_q	60	40	20	0	-20	-40	-60	-80	-100	-120	-140	-160
20	0,685	0,827	1,080	1,527	1,680	1,699	1,698	1,680	1,684	1,662	1,678	1,677
40	0,689	0,837	1,080	1,462	1,654	1,690	1,695	1,692	1,682	1,667	1,676	1,675
60	0,695	0,853	1,083	1,414	1,611	1,681	1,691	1,690	1,680	1,675	1,676	1,674
80	0,679	0,872	1,088	1,367	1,559	1,660	1,686	1,688	1,681	1,678	1,676	1,673
100	0,661	0,891	1,092	1,325	1,517	1,621	1,675	1,684	1,681	1,679	1,676	1,672
120	0,639	0,896	1,094	1,293	1,475	1,581	1,651	1,679	1,679	1,679	1,676	1,662
140	0,651	0,896	1,090	1,273	1,431	1,546	1,620	1,663	1,677	1,678	1,673	1,634
160	0,678	0,867	1,084	1,260	1,401	1,511	1,586	1,641	1,669	1,676	1,659	1,601
180	0,724	0,847	1,065	1,247	1,384	1,489	1,559	1,619	1,657	1,667	1,633	1,583
200	0,771	0,873	1,038	1,215	1,368	1,477	1,539	1,604	1,639	1,653	1,613	1,576
220	0,807	0,916	1,060	1,202	1,355	1,461	1,532	1,589	1,622	1,632	1,598	1,559
240	0,858	0,957	1,086	1,211	1,327	1,441	1,525	1,573	1,605	1,610	1,585	1,544
260	0,880	0,999	1,115	1,227	1,336	1,442	1,516	1,567	1,603	1,581	1,589	1,519
280	0,923	1,030	1,118	1,225	1,359	1,447	1,512	1,564	1,558	1,587	1,598	1,526
300	0,960	1,027	1,126	1,240	1,371	1,411	1,501	1,561	1,559	1,583	1,551	1,527
320	0,964	1,030	1,164	1,268	1,342	1,407	1,521	1,522	1,533	1,587	1,528	1,483
340	0,983	1,067	1,185	1,241	1,320	1,430	1,515	1,520	1,541	1,587	1,515	1,489
360	1,009	1,098	1,189	1,250	1,336	1,441	1,481	1,502	1,553	1,534	1,499	1,480

Verhältnis von differentieller Längs- zu Querinduktivität in Abhängigkeit von d-Strom (Spalten) und q-Strom (Reihen)

M/Nm	60	40	20	0	-20	-40	-60	-80	-100	-120	-140	-160
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20	26	26	25	24	22	20	18	16	14	13	11	10
40	47	47	46	45	42	38	35	31	28	25	22	20
60	68	68	67	65	61	56	51	47	42	38	34	30
80	87	87	86	84	79	74	68	62	56	51	45	40
100	106	106	105	102	97	91	84	77	70	63	56	49
120	124	124	123	120	115	108	100	92	84	76	67	59
140	140	141	139	136	131	124	116	107	97	88	78	69
160	154	155	154	151	145	138	130	120	110	99	89	78
180	168	169	168	164	159	151	143	133	122	110	98	86
200	180	180	179	176	171	163	154	143	132	119	107	94
220	191	191	189	186	181	173	164	153	141	128	115	101
240	200	200	198	195	189	182	172	161	148	135	121	107
260	209	208	206	202	196	188	179	167	154	141	126	112
280	217	216	213	209	202	194	184	173	160	146	131	116
300	224	222	219	214	208	199	189	177	164	150	136	121
320	230	228	224	219	213	204	193	182	168	154	140	125
340	235	233	229	224	217	208	197	185	172	158	143	129
360	240	238	234	228	220	211	201	189	175	161	147	132

Drehmoment in Abhängigkeit von d-Strom (Spalten) und q-Strom (Reihen)

9.6 Gemessene Betriebsparameter

L_d/mH	40	20	0	-20	-40	-60	-80	-100	-120
0	0,775	0,868	0,881	0,895	0,902	0,907	0,909	0,915	0,920
20	0,776	0,865	0,867	0,870	0,884	0,894	0,904	0,909	0,913
40	0,750	0,828	0,851	0,874	0,886	0,895	0,903	0,909	0,915
60	0,725	0,803	0,828	0,854	0,872	0,886	0,895	0,901	0,910
80	0,686	0,744	0,804	0,864	0,872	0,884	0,893	0,901	0,906
100	0,668	0,722	0,769	0,816	0,853	0,868	0,878	0,888	0,896
120	0,657	0,711	0,745	0,780	0,818	0,844	0,860	0,870	0,880
140	0,638	0,677	0,716	0,754	0,781	0,822	0,838	0,855	0,862
160	0,621	0,662	0,700	0,739	0,770	0,797	0,820	0,835	0,845
180	0,611	0,650	0,683	0,716	0,742	0,774	0,794	0,811	0,824
200	0,594	0,629	0,661	0,694	0,725	0,752	0,773	0,790	0,806
220	0,592	0,617	0,647	0,678	0,703	0,728	0,751	0,769	0,784

Längsinduktivität in Abhängigkeit von d-Strom (Spalten) und q-Strom (Reihen)

L_q/mH	40	20	0	-20	-40	-60	-80	-100	-120
20	0,800	0,870	0,830	0,813	0,825	0,812	0,807	0,814	0,843
40	0,701	0,728	0,736	0,743	0,726	0,745	0,726	0,731	0,733
60	0,666	0,681	0,685	0,695	0,706	0,702	0,702	0,705	0,709
80	0,636	0,659	0,684	0,682	0,687	0,684	0,685	0,688	0,689
100	0,617	0,636	0,649	0,663	0,669	0,673	0,674	0,679	0,678
120	0,599	0,616	0,627	0,648	0,659	0,661	0,662	0,666	0,669
140	0,584	0,601	0,622	0,640	0,644	0,653	0,659	0,659	0,663
160	0,575	0,592	0,608	0,623	0,636	0,643	0,648	0,650	0,656
180	0,565	0,580	0,594	0,607	0,622	0,630	0,638	0,641	0,647
200	0,553	0,570	0,585	0,599	0,611	0,619	0,622	0,629	0,633
220	0,540	0,556	0,571	0,583	0,596	0,606	0,611	0,616	0,620

Querinduktivität in Abhängigkeit von d-Strom (Spalten) und q-Strom (Reihen)

Ψ_M/Vs	40	20	0	-20	-40	-60	-80	-100	-120
0	0,118	0,118	0,118	0,118	0,118	0,118	0,118	0,118	0,118
20	0,116	0,118	0,118	0,118	0,118	0,118	0,117	0,115	0,115
40	0,123	0,128	0,125	0,121	0,118	0,113	0,106	0,103	0,096
60	0,126	0,131	0,128	0,123	0,118	0,113	0,103	0,097	0,088
80	0,124	0,127	0,126	0,124	0,118	0,111	0,104	0,094	0,084
100	0,123	0,125	0,125	0,122	0,117	0,110	0,101	0,092	0,083
120	0,123	0,125	0,123	0,119	0,115	0,109	0,100	0,092	0,083
140	0,121	0,121	0,120	0,117	0,113	0,107	0,099	0,089	0,082
160	0,118	0,118	0,117	0,115	0,111	0,105	0,097	0,090	0,081
180	0,115	0,116	0,115	0,112	0,108	0,103	0,096	0,088	0,079
200	0,112	0,112	0,111	0,108	0,105	0,100	0,094	0,086	0,078
220	0,110	0,109	0,108	0,105	0,102	0,097	0,092	0,084	0,076

Virtuelle Magnetflussverkettung in Abhängigkeit von d-Strom (Spalten) und q-Strom (Reihen)

M/Nm	-120	-100	-80	-60	-40	-20	0	20	40
0	3,3	3,1	2,9	2,2	1,5	0,9	0,0	-1,0	-1,6
20	17,0	16,9	17,1	17,1	17,8	17,5	17,5	17,4	17,1
40	30,3	31,2	31,2	32,6	34,1	34,5	35,4	35,9	35,5
60	42,7	44,7	46,0	48,6	50,2	51,7	53,1	53,7	53,5
80	54,8	58,4	62,1	63,6	66,2	68,6	70,4	71,3	71,2
100	67,8	71,5	75,0	79,3	81,7	85,2	87,1	88,1	88,2
120	81,6	85,5	89,5	94,4	97,7	100,8	103,1	104,3	104,5
140	94,0	97,4	103,6	108,3	112,6	115,9	118,2	119,7	120,3
160	105,7	112,3	116,2	121,8	126,2	129,8	132,5	133,9	134,6
180	115,9	122,8	129,2	134,5	139,3	142,9	145,5	147,3	147,7
200	126,0	133,1	140,5	146,0	151,0	154,9	157,8	159,5	160,4
220	135,5	142,3	150,9	156,3	161,5	165,1	168,6	170,4	171,4

Drehmoment in Abhängigkeit von d-Strom (Spalten) und q-Strom (Reihen)

9.7 Berechnete Maschinenverluste

Stromwärmeverluste

I_d/I_q	0	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200	220	240	260	280	300	320	340	360
60	99,4	110,4	143,5	198,7	276,0	375,4	496,8	640,3	805,9	993,6	1203,4	1435,2	1689,1	1965,1	2263,2	2583,4	2925,6	3289,9	3676,3
40	44,2	55,2	88,3	143,5	220,8	320,2	441,6	585,1	750,7	938,4	1148,2	1380,0	1633,9	1909,9	2208,0	2528,2	2870,4	3234,7	3621,1
20	11,0	22,1	55,2	110,4	187,7	287,0	408,5	552,0	717,6	905,3	1115,0	1346,9	1600,8	1876,8	2174,9	2495,0	2837,3	3201,6	3588,0
0	0,0	11,0	44,2	99,4	176,6	276,0	397,4	541,0	706,6	894,2	1104,0	1335,8	1589,8	1865,8	2163,8	2484,0	2826,2	3190,6	3577,0
-20	11,0	22,1	55,2	110,4	187,7	287,0	408,5	552,0	717,6	905,3	1115,0	1346,9	1600,8	1876,8	2174,9	2495,0	2837,3	3201,6	3588,0
-40	44,2	55,2	88,3	143,5	220,8	320,2	441,6	585,1	750,7	938,4	1148,2	1380,0	1633,9	1909,9	2208,0	2528,2	2870,4	3234,7	3621,1
-60	99,4	110,4	143,5	198,7	276,0	375,4	496,8	640,3	805,9	993,6	1203,4	1435,2	1689,1	1965,1	2263,2	2583,4	2925,6	3289,9	3676,3
-80	176,6	187,7	220,8	276,0	353,3	452,6	574,1	717,6	883,2	1070,9	1280,6	1512,5	1766,4	2042,4	2340,5	2660,6	3002,9	3367,2	3753,6
-100	276,0	287,0	320,2	375,4	452,6	552,0	673,4	817,0	982,6	1170,2	1380,0	1611,8	1865,8	2141,8	2439,8	2760,0	3102,2	3466,6	3853,0
-120	397,4	408,5	441,6	496,8	574,1	673,4	794,9	938,4	1104,0	1291,7	1501,4	1733,3	1987,2	2263,2	2561,3	2881,4	3223,7	3588,0	3974,4
-140	541,0	552,0	585,1	640,3	717,6	817,0	938,4	1081,9	1247,5	1435,2	1645,0	1876,8	2130,7	2406,7	2704,8	3025,0	3367,2	3731,5	4117,9
-160	706,6	717,6	750,7	805,9	883,2	982,6	1104,0	1247,5	1413,1	1600,8	1810,6	2042,4	2296,3	2572,3	2870,4	3190,6	3532,8	3897,1	4283,5

Ummagnetisierungsverluste bei 1200 min⁻¹

I_d/I_q	0	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200	220	240	260	280	300	320	340	360
60	243,8	241,3	237,5	232,9	230,7	229,7	229,3	230,3	232,3	235,7	238,4	244,1	254,1	260,1	267,6	279,5	289,1	294,4	303,1
40	215,6	211,9	207,7	203,9	201,8	200,7	202,1	205,3	210,1	215,1	219,9	227,5	235,0	241,5	252,3	264,4	272,3	282,7	296,6
20	180,9	176,6	172,5	169,2	168,3	169,1	172,5	178,0	185,2	193,2	202,3	211,3	217,6	226,7	238,9	247,4	259,0	274,1	288,0
0	137,3	132,0	129,5	130,1	133,4	137,9	144,6	151,9	161,1	171,8	183,8	195,6	205,0	215,7	223,9	234,5	249,4	263,7	275,3
-20	97,3	92,5	91,6	95,9	101,5	109,3	118,1	129,0	141,3	153,8	167,8	182,8	195,8	204,4	214,1	227,5	240,6	254,2	271,2
-40	66,6	63,6	64,9	69,5	77,2	86,1	96,6	109,8	125,7	141,7	156,9	172,7	187,2	197,9	209,7	221,1	235,1	253,3	274,7
-60	43,3	42,0	44,2	49,9	58,2	68,8	81,1	95,7	114,3	134,0	152,0	168,7	185,1	197,7	207,8	220,5	236,4	255,8	274,6
-80	25,5	25,5	29,4	36,2	45,2	56,6	70,6	87,3	107,7	130,2	150,8	170,3	188,5	200,9	211,8	226,1	243,0	261,1	281,0
-100	13,1	14,8	19,8	27,1	37,3	50,6	66,8	85,7	108,4	133,4	156,7	177,6	196,4	208,9	219,9	231,5	246,8	265,4	287,6
-120	7,5	9,6	15,8	25,2	37,3	52,3	70,2	90,6	114,4	139,9	163,1	184,2	201,9	213,2	222,0	233,7	248,4	266,4	285,2
-140	12,6	15,1	21,2	30,5	43,0	57,9	75,7	97,3	123,1	149,8	172,1	190,8	205,0	213,7	222,2	233,5	246,0	261,5	279,5
-160	25,7	27,9	33,4	41,9	53,2	67,7	85,5	107,8	134,2	158,4	177,2	193,0	206,3	211,5	215,9	224,4	236,7	252,0	270,7

Ummagnetisierungsverluste bei 2400 min⁻¹

I_d/I_q	0	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200	220	240	260	280	300	320	340	360
60	669,1	662,9	653,4	641,4	636,6	635,3	635,6	640,0	647,1	658,3	667,6	685,9	716,6	735,8	759,8	796,6	826,8	844,7	872,5
40	577,4	568,1	557,9	548,7	544,6	543,3	549,3	561,0	576,9	593,0	608,7	632,6	656,1	676,9	710,7	748,2	773,5	806,6	849,9
20	470,6	459,7	450,1	442,6	441,9	446,1	457,9	475,6	498,2	523,8	552,1	580,3	600,7	629,4	667,0	694,2	730,7	777,5	820,8
0	348,9	335,6	329,6	331,9	341,4	354,3	373,7	395,7	423,6	456,2	492,7	529,3	559,2	592,7	619,0	652,4	698,3	742,8	779,6
-20	244,9	232,8	230,9	241,8	256,4	276,9	300,3	329,5	363,6	400,1	441,7	487,1	527,2	555,2	586,2	627,6	668,4	711,1	763,7
-40	165,9	158,6	162,0	174,1	193,8	216,8	243,7	277,8	319,3	362,6	406,1	453,0	497,5	531,9	569,2	605,2	648,6	704,5	770,0
-60	106,7	103,7	109,6	124,0	144,9	171,9	203,6	240,9	288,7	340,0	388,8	437,2	486,2	526,1	559,3	599,5	648,8	708,1	765,9
-80	61,9	61,9	71,8	89,1	111,9	140,6	176,2	218,9	271,0	328,9	383,0	437,7	491,0	530,5	566,4	611,8	664,3	720,0	781,3
-100	31,3	35,5	47,8	65,7	91,5	125,3	166,0	214,3	272,1	336,3	396,7	454,6	509,5	549,2	586,1	624,1	672,0	729,4	797,0
-120	18,0	23,0	38,0	61,0	91,1	129,1	174,2	226,1	286,9	352,2	412,4	471,0	522,7	559,2	589,6	627,9	674,2	730,0	788,4
-140	30,2	36,3	51,2	74,1	105,4	142,8	188,1	242,9	308,8	377,0	436,0	488,4	531,0	560,7	590,5	627,9	668,3	717,0	773,0
-160	62,4	67,7	81,3	102,6	131,2	168,0	213,2	269,8	337,4	399,7	450,6	496,5	537,3	557,8	575,8	604,9	644,4	692,5	750,4

Ummagnetisierungsverluste bei 3600 min⁻¹

I_d/I_q	0	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200	220	240	260	280	300	320	340	360
60	1309,2	1297,4	1279,4	1256,6	1248,1	1246,7	1248,5	1258,3	1273,2	1296,5	1316,1	1353,4	1415,7	1454,9	1503,9	1578,8	1640,6	1677,9	1735,3
40	1118,5	1101,0	1081,9	1064,8	1058,0	1057,0	1070,3	1095,4	1128,6	1162,0	1194,7	1243,4	1291,4	1334,2	1402,7	1479,0	1530,8	1598,7	1687,2
20	903,5	883,0	865,3	851,6	851,4	860,6	885,1	921,3	967,5	1020,0	1078,1	1135,7	1177,9	1236,2	1312,3	1368,1	1442,5	1537,5	1625,9
0	661,1	636,1	625,3	630,5	649,7	676,0	715,4	759,9	816,0	882,1	956,1	1030,8	1092,1	1160,4	1214,2	1282,0	1374,9	1465,5	1540,9
-20	458,0	435,8	433,1	454,9	483,5	523,3	569,2	626,5	694,1	767,2	850,9	942,9	1024,9	1082,9	1146,2	1230,0	1312,7	1399,7	1506,6
-40	304,4	291,4	298,5	322,2	360,6	405,6	458,2	524,5	605,2	690,0	776,4	871,2	962,2	1033,2	1109,6	1183,0	1270,8	1384,1	1516,6
-60	192,3	187,0	198,3	225,5	265,5	317,4	378,5	451,3	543,8	643,6	739,2	835,8	935,4	1018,1	1087,2	1168,9	1268,6	1388,7	1506,2
-80	110,5	110,7	128,7	160,3	202,3	256,2	324,2	406,5	507,7	619,7	725,3	832,8	940,8	1023,3	1098,3	1190,9	1296,9	1409,9	1534,4
-100	55,6	63,1	85,1	117,6	164,4	226,4	303,2	395,4	507,2	631,8	749,4	862,8	973,9	1057,2	1135,0	1213,3	1310,2	1426,4	1563,5
-120	32,1	40,9	67,6	108,8	163,3	232,9	317,2	416,3	533,8	660,9	778,2	892,9	997,9	1075,3	1140,3	1219,0	1312,9	1426,0	1545,2
-140	53,8	64,7	91,2	132,5	189,2	258,2	343,1	447,8	574,8	707,6	822,4	926,2	1014,2	1078,3	1142,3	1219,0	1301,5	1400,7	1515,1
-160	111,5	121,1	145,7	184,5	237,1	305,6	391,4	500,1	630,7	752,1	851,7	944,2	1029,1	1075,4	1115,3	1175,3	1255,8	1353,9	1472,0

Ummagnetisierungsverluste bei 4800 min⁻¹

I_d/I_q	0	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200	220	240	260	280	300	320	340	360
60	1949,2	1931,9	1905,4	1871,8	1859,7	1858,2	1861,4	1876,5	1899,4	1934,7	1964,5	2020,8	2114,7	2174,0	2248,0	2361,0	2454,4	2511,1	2598,0
40	1659,6	1633,9	1605,8	1581,0	1571,5	1570,7	1591,4	1629,8	1680,4	1731,0	1780,6	1854,2	1926,7	1991,4	2094,8	2209,7	2288,1	2390,8	2524,5
20	1336,5	1306,3	1280,5	1260,7	1260,9	1275,1	1312,3	1366,9	1436,8	1516,2	1604,1	1691,2	1755,0	1843,1	1957,7	2041,9	2154,2	2297,6	2431,1
0	973,3	936,5	921,0	929,0	958,1	997,7	1057,0	1124,0	1208,3	1307,9	1419,4	1532,2	1624,9	1728,0	1809,3	1911,7	2051,5	2188,2	2302,2
-20	671,1	638,8	635,3	667,9	710,5	769,8	838,0	923,5	1024,6	1134,2	1260,1	1398,7	1522,5	1610,6	1706,3	1832,4	1957,1	2088,3	2249,5
-40	442,9	424,2	435,1	470,2	527,4	594,3	672,6	771,1	891,1	1017,5	1146,8	1289,5	1426,8	1534,5	1649,9	1760,7	1893,0	2063,6	2263,3
-60	277,8	270,4	287,0	327,1	386,1	462,8	553,5	661,7	799,0	947,2	1089,6	1234,4	1384,7	1510,1	1615,1	1738,3	1888,4	2069,3	2246,5
-80	159,2	159,5	185,6	231,4	292,7	371,8	472,2	594,1	744,3	910,6	1067,7	1227,9	1390,7	1516,1	1630,3	1770,1	1929,5	2099,9	2287,6
-100	79,9	90,7	122,4	169,4	237,2	327,6	440,3	576,5	742,3	927,3	1102,2	1271,1	1438,3	1565,3	1683,9	1802,5	1948,4	2123,5	2330,0
-120	46,2	58,8	97,1	156,7	235,5	336,8	460,3	606,6	780,7	969,6	1143,9	1314,8	1473,1	1591,3	1691,0	1810,2	1951,6	2122,0	2301,9
-140	77,4	93,0	131,2	190,8	273,0	373,6	498,1	652,6	840,8	1038,1	1208,9	1363,9	1497,4	1595,9	1694,0	1810,2	1934,7	2084,5	2257,3
-160	160,5	174,4	210,1	266,5	343,0	443,3	569,6	730,4	924,0	1104,6	1252,7	1392,0	1521,0	1592,9	1654,7	1745,7	1867,1	2015,3	2193,6

Ummagnetisierungsverluste bei 6000 min⁻¹

I_d/I_q	0	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200	220	240	260	280	300	320	340	360
60	3465,6	3437,7	3394,6	3338,7	3322,8	3326,7	3338,7	3371,7	3418,9	3489,2	3550,4	3661,6	3843,1	3961,1	4107,2	4326,4	4509,2	4623,4	4794,6
40	2877,5	2836,0	2792,4	2755,1	2746,9	2755,6	2803,8	2884,8	2987,3	3087,9	3186,5	3329,9	3472,5	3601,8	3803,6	4027,3	4182,9	4384,2	4644,3
20	2230,0	2182,7	2145,3	2119,5	2130,5	2167,8	2247,7	2360,1	2500,6	2659,9	2832,4	3001,8	3129,3	3303,2	3526,9	3695,0	3915,3	4194,0	4454,3
0	1526,4	1473,2	1457,0	1481,4	1543,1	1624,3	1741,5	1875,8	2043,2	2239,7	2458,7	2678,9	2861,4	3063,5	3227,6	3430,8	3703,8	3971,5	4197,1
-20	992,4	946,7	946,4	1003,1	1078,6	1186,5	1315,3	1478,3	1672,8	1885,7	2131,1	2401,0	2641,7	2817,8	3010,0	3258,9	3505,6	3765,2	4080,6
-40	641,0	614,6	632,2	686,3	775,0	881,4	1010,4	1181,6	1400,5	1639,0	1890,1	2167,7	2435,0	2648,6	2877,9	3101,0	3363,5	3697,6	4086,8
-60	396,7	386,5	411,5	470,9	558,6	673,8	812,9	983,8	1214,1	1481,9	1753,1	2034,9	2326,9	2573,5	2785,2	3033,5	3331,4	3686,8	4036,1
-80	224,9	225,6	263,2	329,5	419,2	535,9	685,5	870,6	1106,4	1391,6	1684,3	1994,2	2308,3	2556,4	2786,6	3066,4	3384,0	3722,6	4093,4
-100	112,9	128,1	172,9	239,8	337,2	469,1	635,2	838,8	1092,6	1398,6	1718,4	2045,7	2369,7	2621,4	2861,4	3105,5	3399,5	3747,5	4154,2
-120	65,6	83,3	137,1	221,4	334,3	481,2	662,7	880,5	1145,7	1458,3	1777,5	2107,7	2415,2	2652,1	2857,2	3102,8	3390,0	3731,9	4093,2
-140	109,6	131,5	185,4	270,2	388,2	534,4	718,0	948,4	1239,1	1570,2	1885,7	2188,6	2453,9	2657,3	2863,0	3106,2	3365,1	3669,7	4016,5
-160	227,5	247,3	298,2	379,4	490,5	637,9	825,6	1069,6	1380,2	1696,7	1979,6	2254,8	2510,1	2667,7	2810,4	3006,7	3257,9	3558,0	3913,8

Ummagnetisierungsverluste bei 7200 min⁻¹

I_d/I_q	0	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200	220	240	260	280	300	320	340	360
60	4981,9	4943,5	4883,8	4805,5	4786,0	4795,2	4815,9	4866,8	4938,4	5043,6	5136,2	5302,3	5571,5	5748,1	5966,3	6291,9	6564,1	6735,7	6991,2
40	4095,4	4038,1	3979,0	3929,3	3922,4	3940,5	4016,1	4139,7	4294,2	4444,9	4592,4	4805,6	5018,3	5212,2	5512,4	5844,8	6077,7	6377,6	6764,0
20	3123,5	3059,0	3010,2	2978,3	3000,2	3060,6	3183,1	3353,2	3564,4	3803,7	4060,8	4312,5	4503,6	4763,2	5096,1	5348,1	5676,4	6090,4	6477,6
0	2079,5	2010,0	1993,1	2033,8	2128,0	2250,8	2426,1	2627,6	2878,1	3171,4	3498,1	3825,7	4097,9	4399,0	4645,8	4950,0	5356,0	5754,8	6092,0
-20	1313,8	1254,6	1257,6	1338,3	1446,7	1603,1	1792,6	2033,1	2320,9	2637,3	3002,1	3403,3	3761,0	4025,1	4313,7	4685,3	5054,1	5442,2	5911,7
-40	839,1	805,0	829,3	902,4	1022,6	1168,4	1348,2	1592,0	1910,0	2260,5	2633,3	3045,9	3443,2	3762,7	4105,8	4441,4	4834,1	5331,6	5910,3
-60	515,5	502,6	536,0	614,7	731,0	884,8	1072,3	1306,0	1629,2	2016,5	2416,6	2835,4	3269,1	3637,0	3955,4	4328,7	4774,5	5304,3	5825,6
-80	290,7	291,7	340,8	427,6	545,7	700,0	898,7	1147,0	1468,4	1872,5	2300,8	2760,5	3225,8	3596,7	3943,0	4362,8	4838,6	5345,4	5899,2
-100	145,9	165,5	223,5	310,1	437,3	610,7	830,1	1101,0	1442,9	1869,9	2334,6	2820,3	3301,1	3677,6	4038,8	4408,5	4850,7	5371,5	5978,4
-120	85,0	107,7	177,2	286,1	433,0	625,7	865,2	1154,4	1510,8	1947,1	2411,1	2900,5	3357,3	3712,8	4023,4	4395,4	4828,4	5341,9	5884,4
-140	141,7	170,0	239,6	349,6	503,5	695,3	937,9	1244,2	1637,4	2102,3	2562,4	3013,3	3410,3	3718,7	4032,1	4402,1	4795,5	5255,0	5775,7
-160	294,4	320,1	386,3	492,3	637,9	832,5	1081,6	1408,7	1836,5	2288,8	2706,4	3117,7	3499,1	3742,4	3966,1	4267,8	4648,6	5100,8	5633,9

Ummagnetisierungsverluste bei 8400 min⁻¹

I_d/I_q	0	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200	220	240	260	280	300	320	340	360
60	6498,3	6449,3	6372,9	6272,4	6249,1	6263,7	6293,1	6362,0	6457,9	6598,1	6722,1	6943,1	7300,0	7535,2	7825,4	8257,4	8618,9	8848,0	9187,8
40	5313,4	5240,2	5165,6	5103,5	5097,9	5125,4	5228,5	5394,7	5601,2	5801,9	5998,3	6281,2	6564,0	6822,5	7221,3	7662,3	7972,5	8371,0	8883,8
20	4017,0	3935,4	3875,0	3837,2	3869,8	3953,4	4118,5	4346,3	4628,3	4947,4	5289,2	5623,2	5877,8	6223,3	6665,2	7001,2	7437,6	7986,7	8500,8
0	2632,7	2546,7	2529,1	2586,2	2713,0	2877,4	3110,7	3379,4	3713,0	4103,2	4537,4	4972,4	5334,4	5734,5	6064,0	6469,1	7008,3	7538,1	7986,9
-20	1635,1	1562,5	1568,7	1673,5	1814,8	2019,7	2269,9	2587,9	2969,1	3388,9	3873,0	4405,6	4880,2	5232,3	5617,4	6111,7	6602,6	7119,2	7742,7
-40	1037,2	995,4	1026,4	1118,5	1270,3	1455,4	1685,9	2002,5	2419,4	2882,1	3376,6	3924,2	4451,4	4876,8	5333,7	5781,7	6304,6	6965,7	7733,7
-60	634,3	618,7	660,4	758,4	903,5	1095,8	1331,7	1628,2	2044,3	2551,2	3080,1	3635,9	4211,3	4700,4	5125,5	5623,8	6217,5	6921,7	7615,2
-80	356,5	357,9	418,4	525,7	672,2	864,1	1112,0	1423,4	1830,5	2353,5	2917,3	3526,8	4143,3	4636,9	5099,3	5659,2	6293,2	6968,2	7705,0
-100	179,0	202,9	274,0	380,5	537,3	752,2	1025,1	1363,3	1793,2	2341,2	2950,8	3594,9	4232,5	4733,8	5216,2	5711,5	6301,8	6995,5	7802,7
-120	104,4	132,2	217,3	350,9	531,8	770,1	1067,6	1428,3	1875,9	2435,8	3044,7	3693,4	4299,3	4773,6	5189,6	5688,0	6266,8	6951,8	7675,6
-140	173,9	208,5	293,8	429,0	618,7	856,2	1157,8	1539,9	2035,7	2634,4	3239,2	3837,9	4366,7	4780,1	5201,2	5698,1	6226,0	6840,3	7535,0
-160	361,3	392,9	474,5	605,3	785,4	1027,0	1337,6	1747,9	2292,8	2880,8	3433,2	3980,5	4488,2	4817,2	5121,7	5528,8	6039,4	6643,6	7354,1

Rotor-Ummagnetisierungsverluste bei 1200 min⁻¹

I_d/I_q	0	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200	220	240	260	280	300	320	340	360
60	5,8	6,0	6,8	8,7	11,6	14,1	15,5	16,5	17,2	17,7	18,7	20,1	21,3	21,3	21,4	22,3	22,6	22,7	23,4
40	5,5	5,3	6,2	9,1	11,5	13,3	14,6	15,7	16,8	17,5	18,4	19,7	20,4	20,8	21,8	22,6	22,6	23,0	23,8
20	4,3	4,2	6,1	9,4	10,5	12,1	13,5	14,6	15,8	16,5	17,3	18,5	19,3	20,6	22,0	22,3	22,7	23,4	23,9
0	3,3	3,4	5,8	8,7	9,2	10,8	12,4	13,7	14,9	15,6	16,5	17,7	19,1	20,8	21,5	22,1	22,9	23,7	24,7
-20	2,9	3,0	4,8	7,2	7,6	9,3	10,9	12,4	13,9	15,0	16,3	17,6	19,1	20,3	21,3	22,3	23,3	24,2	25,3
-40	3,1	2,9	3,9	6,1	6,6	7,9	9,6	11,5	13,2	14,7	16,2	17,6	19,0	20,2	21,4	22,5	23,5	24,6	25,7
-60	3,1	3,1	3,3	5,3	6,3	7,7	9,9	12,0	13,8	15,4	16,7	18,2	19,3	20,1	21,1	22,4	23,6	24,9	25,4
-80	2,9	2,7	3,2	5,1	6,8	8,2	10,1	12,5	14,6	16,1	17,8	19,3	20,3	21,2	22,3	23,5	24,2	24,7	25,1
-100	3,0	3,2	3,5	5,8	7,8	9,2	10,6	13,1	15,2	17,2	18,9	20,4	21,5	22,9	23,8	23,8	24,0	23,9	24,3
-120	3,6	3,6	4,2	6,5	9,0	10,4	11,5	13,5	15,9	18,0	19,5	20,7	22,0	23,0	23,0	22,7	22,4	22,4	22,7
-140	4,1	4,1	5,2	7,5	10,0	11,7	12,8	14,2	16,2	18,0	19,7	20,8	21,4	22,2	22,8	22,8	22,5	22,2	22,0
-160	4,8	5,1	6,6	9,0	11,3	13,1	14,2	15,1	16,4	17,8	19,1	20,3	20,4	20,8	21,6	22,2	22,5	22,2	22,4

Rotor-Ummagnetisierungsverluste bei 2400 min⁻¹

I_d/I_q	0	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200	220	240	260	280	300	320	340	360
60	18,4	19,3	21,6	27,6	37,1	45,1	49,7	52,9	54,9	56,5	59,4	64,0	67,8	67,8	68,1	70,9	71,7	72,1	74,3
40	17,5	17,1	19,9	29,3	36,9	42,5	46,6	50,3	53,6	55,8	58,6	62,8	65,1	65,9	69,4	71,8	71,8	73,2	75,6
20	13,8	13,5	19,4	30,2	33,6	38,6	43,1	46,7	50,6	52,6	55,2	59,0	61,3	65,6	69,9	70,8	72,3	74,4	76,1
0	10,6	11,1	18,6	27,9	29,3	34,6	39,5	43,7	47,5	49,6	52,4	56,2	60,7	66,2	68,5	70,1	72,8	75,4	78,4
-20	9,3	9,7	15,1	23,0	24,1	29,6	34,6	39,5	44,1	47,7	51,8	55,8	60,8	64,6	67,6	70,9	73,8	76,7	80,2
-40	9,6	9,0	12,2	19,1	20,9	25,0	30,4	36,2	41,8	46,7	51,2	55,9	60,2	63,9	67,8	71,2	74,6	78,1	81,6
-60	9,8	9,6	10,2	16,4	19,7	24,3	31,1	37,9	43,6	48,6	52,9	57,5	61,2	63,6	66,8	70,7	74,7	78,7	80,5
-80	8,9	8,4	9,7	15,7	21,2	25,7	31,7	39,4	45,9	50,8	56,1	61,1	64,3	66,9	70,4	74,3	76,6	77,9	79,3
-100	9,3	9,6	10,7	17,6	24,1	28,5	33,2	41,1	47,9	54,2	59,8	64,4	68,0	72,4	75,3	75,3	75,8	75,5	76,7
-120	11,0	11,0	12,7	20,0	27,6	32,2	35,9	42,4	49,8	56,5	61,6	65,5	69,6	72,9	72,9	71,8	70,7	70,5	71,5
-140	12,4	12,6	15,8	22,9	30,5	35,9	39,8	44,4	50,8	56,6	62,0	65,7	67,7	70,0	71,9	72,0	70,8	69,8	69,2
-160	14,6	15,6	20,0	27,4	34,5	40,0	43,8	47,0	51,4	55,9	60,1	64,2	64,4	65,6	68,1	70,0	71,0	70,0	70,4

Rotor-Ummagnetisierungsverluste bei 3600 min⁻¹

I_d/I_q	0	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200	220	240	260	280	300	320	340	360
60	37,7	39,5	44,1	56,5	76,1	92,3	101,8	108,3	112,3	115,5	121,4	130,8	138,5	138,5	139,1	144,7	146,5	147,2	151,7
40	36,0	35,0	40,6	60,0	75,7	87,0	95,4	103,0	109,7	114,1	119,8	128,4	132,9	134,6	141,6	146,6	146,6	149,5	154,4
20	28,3	27,6	39,7	62,0	68,8	79,1	88,3	95,6	103,5	107,7	112,9	120,6	125,1	134,0	142,9	144,7	147,5	152,0	155,3
0	21,8	22,7	38,2	57,2	60,1	70,9	80,7	89,3	97,2	101,4	107,0	114,9	124,0	135,3	139,9	143,1	148,6	153,8	160,1
-20	19,0	20,0	31,0	47,1	49,3	60,4	70,8	80,7	90,0	97,4	105,8	114,0	124,2	132,0	138,0	144,6	150,5	156,5	163,6
-40	19,5	18,4	24,8	38,9	42,5	50,9	61,9	73,6	85,2	95,1	104,5	114,1	122,8	130,4	138,4	145,3	152,2	159,3	166,5
-60	19,8	19,5	20,7	33,1	39,9	49,3	63,2	77,1	88,8	99,0	107,9	117,2	124,8	129,7	136,2	144,2	152,2	160,3	164,0
-80	17,9	17,0	19,5	31,5	42,9	52,0	64,4	80,0	93,3	103,4	114,3	124,5	130,9	136,2	143,4	151,4	156,0	158,8	161,5
-100	18,6	19,3	21,4	35,4	48,5	57,6	67,2	83,5	97,5	110,2	121,7	131,1	138,5	147,4	153,3	153,4	154,3	153,8	156,2
-120	22,0	22,1	25,4	40,0	55,5	65,0	72,8	85,9	101,1	114,9	125,3	133,3	141,8	148,4	148,4	146,2	144,0	143,4	145,4
-140	24,7	25,3	31,6	45,8	61,3	72,3	80,5	90,0	103,0	115,0	126,1	133,8	137,8	142,5	146,3	146,6	144,2	142,0	140,6
-160	29,2	31,3	40,0	54,9	69,2	80,4	88,3	95,1	104,2	113,5	122,2	130,6	131,0	133,5	138,7	142,5	144,4	142,3	143,1

Rotor-Ummagnetisierungsverluste bei 4800 min⁻¹

I_d/I_q	0	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200	220	240	260	280	300	320	340	360
60	63,8	66,8	74,6	95,6	128,7	156,3	172,3	183,2	190,0	195,3	205,1	221,0	234,1	234,1	235,0	244,5	247,5	248,8	256,3
40	60,8	59,2	68,7	101,6	128,1	147,3	161,5	174,3	185,5	193,0	202,5	217,1	224,6	227,4	239,2	247,7	247,7	252,6	260,8
20	48,0	46,7	67,2	104,9	116,5	133,8	149,3	161,7	175,1	182,1	190,8	203,8	211,5	226,5	241,5	244,6	249,3	256,8	262,4
0	37,1	38,5	64,7	96,8	101,7	120,0	136,5	151,0	164,3	171,3	180,8	194,2	209,5	228,7	236,3	241,8	251,1	259,9	270,5
-20	32,2	33,8	52,4	79,7	83,4	102,2	119,6	136,4	152,0	164,5	178,8	192,6	209,8	223,0	233,1	244,3	254,2	264,4	276,4
-40	32,9	31,1	41,8	65,7	71,8	86,0	104,5	124,3	143,9	160,6	176,4	192,6	207,5	220,3	233,8	245,4	257,0	269,1	281,2
-60	33,4	32,9	34,8	55,7	67,2	83,1	106,6	130,1	150,0	167,1	182,1	197,9	210,6	219,0	229,8	243,3	256,9	270,7	276,9
-80	30,1	28,6	32,8	52,9	72,2	87,6	108,6	135,0	157,4	174,4	192,9	210,2	221,0	229,8	242,0	255,6	263,4	268,0	272,5
-100	31,2	32,3	35,9	59,4	81,6	97,0	113,3	140,8	164,4	186,0	205,4	221,2	233,7	248,8	258,8	258,9	260,4	259,6	263,5
-120	37,0	37,0	42,6	67,2	93,2	109,4	122,6	144,8	170,4	193,9	211,5	225,0	239,4	250,6	250,5	246,7	242,9	241,9	245,3
-140	41,4	42,5	53,1	76,9	102,9	121,5	135,4	151,6	173,6	194,0	212,7	225,9	232,6	240,4	246,9	247,4	243,2	239,4	236,9
-160	48,9	52,6	67,1	92,1	116,1	135,0	148,5	160,1	175,6	191,3	206,1	220,3	221,0	225,3	234,0	240,4	243,6	240,0	241,3

Rotor-Ummagnetisierungsverluste bei 6000 min⁻¹

I_d/I_q	0	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200	220	240	260	280	300	320	340	360
60	96,5	101,0	112,8	144,5	194,7	236,5	260,7	277,1	287,2	295,2	309,9	333,8	353,6	353,6	354,9	369,3	373,9	375,8	387,2
40	92,1	89,6	103,9	153,8	193,9	222,8	244,3	263,7	280,5	291,8	306,1	328,0	339,4	343,5	361,2	374,1	374,2	381,6	394,0
20	72,6	70,6	101,7	158,8	176,2	202,4	225,8	244,6	264,7	275,2	288,4	307,9	319,5	342,0	364,9	369,5	376,5	387,9	396,4
0	56,2	58,3	97,9	146,6	153,9	181,5	206,4	228,3	248,3	258,9	273,1	293,4	316,6	345,5	357,0	365,2	379,2	392,4	408,6
-20	48,8	51,1	79,1	120,5	126,0	154,3	180,6	206,0	229,6	248,4	270,0	291,0	317,0	336,9	352,1	368,9	383,7	399,1	417,3
-40	49,5	46,8	62,9	98,9	108,1	129,5	157,5	187,4	217,0	242,4	266,2	290,7	313,3	332,6	353,0	370,5	387,9	406,2	424,5
-60	50,2	49,5	52,2	83,5	101,0	125,1	160,5	196,1	226,1	252,1	274,8	298,6	317,9	330,4	346,8	367,1	387,6	408,5	417,9
-80	44,9	42,7	49,0	79,2	108,3	131,6	163,4	203,3	237,2	262,9	290,9	317,1	333,5	346,6	365,0	385,6	397,3	404,2	411,1
-100	46,5	48,2	53,6	88,7	122,2	145,6	170,3	211,8	247,6	280,3	309,7	333,7	352,7	375,4	390,4	390,5	392,8	391,5	397,5
-120	55,1	55,2	63,6	100,3	139,5	163,9	184,1	217,7	256,5	292,1	318,8	339,3	361,1	378,0	377,9	372,1	366,2	364,7	369,7
-140	61,7	63,4	79,2	114,8	153,8	181,8	203,3	227,8	261,2	292,2	320,5	340,6	350,9	362,5	372,4	373,2	366,7	360,8	356,8
-160	73,1	78,5	100,2	137,3	173,2	201,9	222,6	240,6	264,1	288,0	310,6	332,2	333,2	339,7	352,7	362,5	367,2	361,7	363,7

Rotor-Ummagnetisierungsverluste bei 7200 min⁻¹

I_d/I_q	0	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200	220	240	260	280	300	320	340	360
60	136,4	142,8	159,4	201,0	274,8	334,3	368,7	391,9	406,1	417,3	438,1	471,9	500,1	499,7	501,8	522,1	528,6	531,2	547,4
40	130,2	127,2	147,0	217,5	273,6	315,2	345,5	375,2	396,7	412,8	432,8	463,8	479,6	485,5	509,7	528,8	528,9	539,9	556,9
20	102,7	99,9	143,8	224,7	249,3	286,4	319,4	345,9	374,4	389,2	407,8	435,3	451,7	483,6	515,8	522,4	532,2	548,3	560,4
0	79,6	82,4	138,6	207,4	217,7	256,7	292,0	322,8	351,1	366,0	386,2	414,8	447,5	488,5	504,8	516,2	536,0	554,6	577,5
-20	69,1	72,3	112,1	170,5	178,2	218,2	255,3	291,3	324,7	351,1	382,7	411,3	448,3	476,2	497,6	521,4	542,3	564,0	590,0
-40	70,0	66,2	88,9	144,3	151,3	182,9	222,1	264,8	307,9	342,6	376,3	410,8	442,8	470,0	498,8	522,7	546,6	573,6	599,8
-60	71,0	69,9	73,7	118,0	142,8	176,6	226,6	277,1	319,5	355,9	387,6	421,8	448,7	466,9	489,5	518,8	547,8	577,1	591,0
-80	63,3	60,3	69,1	111,7	152,9	185,9	230,8	287,5	335,5	371,5	411,0	447,9	471,3	489,6	515,6	543,7	561,4	570,9	580,9
-100	65,7	68,0	75,6	125,2	172,7	205,7	240,6	299,3	350,5	395,8	437,5	471,4	498,4	530,4	551,5	551,8	554,5	554,0	561,5
-120	77,7	77,9	89,7	141,5	196,7	231,3	260,1	307,5	362,5	412,2	450,2	479,3	510,4	534,0	533,8	525,8	517,4	515,2	522,3
-140	87,1	89,4	111,8	161,8	217,0	256,9	287,1	321,9	368,9	413,2	452,9	481,3	495,8	512,2	526,2	527,2	518,1	509,7	504,7
-160	103,1	110,8	141,4	193,4	244,3	284,6	312,4	339,7	373,0	406,8	438,9	469,1	470,7	479,8	498,3	512,1	518,7	511,0	513,8

Rotor-Ummagnetisierungsverluste bei 8400 min⁻¹

I_d/I_q	0	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200	220	240	260	280	300	320	340	360
60	183,0	191,6	213,8	269,5	368,7	448,5	494,7	525,7	544,7	559,5	587,4	632,6	670,4	669,9	672,6	699,9	708,6	712,2	733,9
40	174,8	170,6	197,2	291,9	367,2	422,9	463,5	503,3	532,1	553,7	580,3	621,9	643,0	650,8	683,2	708,9	709,0	723,8	746,5
20	137,9	134,1	192,9	301,5	334,5	384,2	428,4	464,0	502,1	522,0	546,8	583,6	605,6	648,2	691,6	700,3	713,4	735,0	751,2
0	106,9	110,6	186,0	278,3	292,0	344,3	391,6	432,9	470,8	490,7	517,8	556,1	600,0	655,0	676,7	692,1	718,5	743,4	774,2
-20	92,7	96,9	150,3	228,6	238,9	292,5	342,3	390,5	435,3	470,7	513,1	551,5	601,1	638,5	667,0	699,5	726,9	756,0	790,9
-40	93,7	88,7	119,0	193,2	202,6	244,9	297,5	354,7	412,5	459,1	504,3	550,6	593,6	630,0	668,6	700,6	732,6	768,8	804,0
-60	95,0	93,5	98,6	157,7	191,0	236,4	303,4	371,2	428,0	476,8	519,4	565,2	601,4	625,7	656,0	695,2	734,0	773,4	792,0
-80	84,4	80,5	92,3	149,2	204,4	248,8	308,9	385,0	449,3	497,7	550,7	600,2	631,5	656,0	690,8	728,5	752,3	765,0	778,3
-100	87,6	90,6	100,8	167,1	230,7	275,1	322,0	400,7	469,3	530,2	586,0	631,6	667,8	710,7	739,0	739,4	742,9	742,3	752,2
-120	103,6	103,9	119,7	188,8	262,7	309,1	348,0	411,5	485,3	552,0	603,1	642,1	683,9	715,6	715,2	704,4	693,1	690,1	699,6
-140	116,1	119,2	149,1	215,8	289,6	343,1	383,9	430,6	493,7	553,2	606,6	644,8	664,2	686,2	704,9	706,3	694,0	682,6	675,8
-160	137,5	147,8	188,6	258,0	325,9	380,0	417,6	454,5	499,2	544,6	587,8	628,3	630,4	642,8	667,5	685,9	694,7	684,4	688,1

Gesamtverluste bei 1200 min⁻¹

I_d/I_q	0	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200	220	240	260	280	300	320	340	360
60	348,9	357,7	387,8	440,3	518,3	619,1	741,6	887,2	1055,4	1247,0	1460,4	1699,5	1964,6	2246,6	2552,3	2885,2	3237,3	3607,0	4002,7
40	265,2	272,4	302,3	356,6	434,1	534,1	658,2	806,2	977,6	1171,0	1386,5	1627,3	1889,4	2172,1	2482,1	2815,2	3165,2	3540,5	3941,5
20	196,3	202,9	233,8	289,0	366,4	468,2	594,5	744,6	918,7	1115,0	1334,6	1576,8	1837,7	2124,2	2435,8	2764,7	3119,1	3499,2	3900,0
0	140,6	146,5	179,4	238,1	319,2	424,8	554,4	706,6	882,6	1081,6	1304,2	1549,1	1813,8	2102,3	2409,3	2740,6	3098,5	3478,0	3876,9
-20	111,2	117,6	151,6	213,5	296,8	405,7	537,5	693,4	872,7	1074,2	1299,1	1547,2	1815,7	2101,6	2410,3	2744,8	3101,1	3480,0	3884,4
-40	113,8	121,7	157,1	219,1	304,7	414,2	547,9	706,4	889,6	1094,8	1321,2	1570,3	1840,1	2128,0	2439,1	2771,7	3129,0	3512,7	3921,5
-60	145,7	155,5	191,1	253,9	340,5	451,9	587,8	748,0	934,0	1143,0	1372,1	1622,1	1893,6	2182,9	2492,1	2826,2	3185,6	3570,6	3976,3
-80	205,1	215,9	253,4	317,3	405,4	517,4	654,8	817,4	1005,5	1217,2	1449,2	1702,1	1975,2	2264,5	2574,5	2910,2	3270,1	3653,0	4059,7
-100	292,1	305,0	343,5	408,2	497,7	611,8	750,9	915,8	1106,2	1320,9	1555,6	1809,8	2083,7	2373,5	2683,6	3015,3	3373,0	3755,9	4164,8
-120	408,6	421,7	461,6	528,5	620,3	736,2	876,6	1042,5	1234,2	1449,6	1684,0	1938,2	2211,1	2499,4	2806,3	3137,8	3494,5	3876,7	4282,3
-140	557,6	571,3	611,5	678,4	770,6	886,5	1027,0	1193,4	1386,8	1603,0	1836,8	2088,4	2357,1	2642,5	2949,8	3281,3	3635,7	4015,2	4419,5
-160	737,0	750,6	790,6	856,8	947,8	1063,3	1203,7	1370,4	1563,8	1777,0	2006,9	2255,7	2523,1	2804,7	3107,9	3437,1	3792,0	4171,3	4576,6

Gesamtverluste bei 2400 min⁻¹

I_d/I_q	0	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200	220	240	260	280	300	320	340	360
60	786,9	792,6	818,5	867,7	949,7	1055,7	1182,1	1333,2	1507,9	1708,4	1930,4	2185,1	2473,6	2768,8	3091,1	3450,8	3824,2	4206,7	4623,1
40	639,1	640,4	666,1	721,5	802,3	906,0	1037,5	1196,5	1381,2	1587,2	1815,5	2075,4	2355,1	2652,8	2988,0	3348,2	3715,6	4114,5	4546,6
20	495,4	495,2	524,7	583,2	663,2	771,7	909,5	1074,3	1266,4	1481,7	1722,4	1986,2	2262,8	2571,8	2911,8	3260,1	3640,3	4053,5	4484,8
0	359,5	357,7	392,4	459,1	547,4	664,9	810,6	980,4	1177,7	1400,1	1649,1	1921,4	2209,6	2524,6	2851,3	3206,5	3597,3	4008,7	4435,0
-20	265,2	264,6	301,2	375,3	468,2	593,5	743,5	921,0	1125,2	1353,1	1608,5	1889,8	2188,8	2496,7	2828,7	3193,5	3579,5	3989,5	4431,9
-40	219,7	222,8	262,5	336,7	435,6	562,0	715,7	899,1	1111,9	1347,6	1605,5	1888,9	2191,7	2505,7	2845,0	3204,6	3593,6	4017,4	4472,7
-60	215,9	223,7	263,3	339,1	440,6	571,6	731,5	919,1	1138,2	1382,2	1645,1	1929,9	2236,5	2554,9	2889,3	3253,6	3649,1	4076,7	4522,7
-80	247,4	258,0	302,3	380,8	486,4	618,9	782,0	975,9	1200,1	1450,5	1719,7	2011,2	2321,6	2639,7	2977,3	3346,8	3743,7	4165,2	4614,2
-100	316,6	332,2	378,6	458,7	568,3	705,8	872,7	1072,4	1302,6	1560,7	1836,4	2130,8	2443,2	2763,3	3101,2	3459,4	3850,0	4271,5	4726,7
-120	426,5	442,5	492,3	577,7	692,8	834,8	1005,0	1206,9	1440,7	1700,4	1975,5	2269,8	2579,5	2895,3	3223,8	3581,1	3968,6	4388,5	4834,3
-140	583,5	601,0	652,1	737,4	853,5	995,7	1166,3	1369,2	1607,0	1868,8	2142,9	2430,9	2729,4	3037,4	3367,2	3724,9	4106,4	4518,4	4960,1
-160	783,5	800,9	852,0	936,0	1048,9	1190,5	1361,0	1564,3	1801,8	2056,4	2321,3	2603,1	2898,0	3195,7	3514,3	3865,5	4248,3	4659,6	5104,3

Gesamtverluste bei 3600 min⁻¹

$\frac{L_d}{L_q}$	0	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200	220	240	260	280	300	320	340	360
60	1446,2	1447,3	1467,0	1511,8	1600,2	1714,4	1847,1	2006,9	2191,5	2405,6	2640,8	2919,3	3243,3	3558,6	3906,2	4306,9	4712,7	5115,0	5563,3
40	1198,6	1191,2	1210,8	1268,4	1354,5	1464,2	1607,3	1783,6	1989,0	2214,5	2462,6	2751,8	3058,2	3378,7	3752,3	4153,7	4547,8	4982,9	5462,7
20	942,9	932,7	960,2	1024,0	1107,9	1226,7	1381,9	1568,9	1788,6	2032,9	2306,0	2603,2	2903,8	3247,0	3630,1	4007,8	4427,3	4891,1	5369,3
0	682,9	669,8	707,7	787,0	886,5	1022,9	1193,5	1390,1	1619,7	1877,7	2167,1	2481,5	2805,8	3161,4	3517,9	3909,2	4349,8	4809,9	5278,0
-20	488,1	477,8	519,3	612,4	720,5	870,8	1048,4	1259,3	1501,7	1769,8	2071,8	2403,8	2749,8	3091,7	3459,1	3869,7	4300,5	4757,8	5258,2
-40	368,1	365,0	411,7	504,6	623,9	776,7	961,7	1183,2	1441,1	1723,5	2029,1	2365,3	2718,9	3073,6	3456,0	3856,4	4293,3	4778,1	5304,2
-60	311,5	317,0	362,5	457,3	581,4	742,0	938,5	1168,7	1438,6	1736,2	2050,4	2388,2	2749,3	3112,9	3486,5	3896,4	4346,4	4839,0	5346,6
-80	305,1	315,4	369,0	467,8	598,5	760,8	962,7	1204,2	1484,2	1794,0	2120,3	2469,8	2838,2	3201,8	3582,2	4003,0	4455,8	4935,9	5449,5
-100	350,2	369,4	426,6	528,3	665,5	836,0	1043,9	1295,8	1587,2	1912,2	2251,1	2605,8	2978,1	3346,4	3728,2	4126,7	4566,8	5046,8	5572,6
-120	451,6	471,5	534,5	645,6	792,9	971,4	1184,9	1440,6	1738,8	2067,5	2405,0	2759,5	3126,9	3486,9	3850,0	4246,7	4680,5	5157,4	5665,0
-140	619,5	642,0	707,9	818,6	968,0	1147,4	1361,9	1619,6	1925,3	2257,8	2593,5	2936,8	3282,8	3627,5	3993,4	4390,6	4812,9	5274,2	5773,6
-160	847,2	870,0	936,4	1045,3	1189,5	1368,6	1583,7	1842,7	2147,9	2466,4	2784,5	3117,2	3456,5	3781,2	4124,3	4508,4	4933,0	5393,3	5898,6

Gesamtverluste bei 4800 min⁻¹

$\frac{L_d}{L_q}$	0	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200	220	240	260	280	300	320	340	360
60	2112,3	2109,1	2123,5	2166,1	2264,4	2389,8	2530,5	2700,0	2895,3	3123,6	3373,0	3677,1	4037,9	4373,2	4746,3	5188,8	5627,5	6049,8	6530,7
40	1764,6	1748,3	1762,8	1826,1	1920,4	2038,2	2194,4	2389,2	2616,6	2862,4	3131,3	3451,3	3785,3	4128,7	4542,0	4985,6	5406,2	5878,1	6406,4
20	1395,5	1375,1	1402,9	1476,0	1565,0	1695,9	1870,1	2080,7	2329,4	2603,5	2909,9	3241,8	3567,3	3946,3	4374,1	4781,5	5240,7	5756,0	6281,5
0	1010,3	986,0	1029,9	1125,2	1236,4	1393,7	1591,0	1816,0	2079,2	2373,4	2704,2	3062,2	3424,2	3822,5	4209,5	4637,5	5128,8	5638,6	6149,7
-20	714,4	694,6	742,9	858,0	981,6	1159,0	1366,1	1612,0	1894,2	2204,0	2553,9	2938,2	3333,2	3710,4	4114,3	4571,8	5048,5	5554,2	6113,9
-40	520,0	510,4	565,2	679,5	819,9	1000,5	1218,7	1480,6	1785,6	2116,5	2471,3	2862,1	3268,2	3664,7	4091,7	4534,2	5020,3	5567,3	6165,6
-60	410,6	413,7	465,4	581,5	729,3	921,2	1156,9	1432,1	1754,9	2107,9	2475,0	2867,5	3284,4	3694,1	4108,1	4565,0	5070,9	5629,9	6199,8
-80	365,9	375,7	439,2	560,3	718,2	912,0	1154,9	1446,8	1784,9	2155,9	2541,3	2950,6	3378,1	3788,3	4212,8	4686,3	5195,7	5735,0	6313,7
-100	387,0	410,0	478,5	604,2	771,5	976,6	1227,1	1534,2	1889,3	2283,5	2687,6	3104,1	3537,8	3955,8	4382,6	4821,4	5311,0	5849,6	6446,5
-120	480,6	504,3	581,3	720,7	902,8	1119,6	1377,8	1689,7	2055,1	2455,1	2856,8	3273,1	3699,7	4105,1	4502,7	4938,3	5418,1	5951,9	6521,6
-140	659,8	687,5	769,4	908,0	1093,5	1312,0	1571,9	1886,1	2261,9	2667,3	3066,5	3466,6	3860,7	4243,0	4645,7	5082,6	5545,1	6055,4	6612,1
-160	916,0	944,6	1028,0	1164,4	1342,3	1560,9	1822,2	2138,0	2512,6	2896,7	3269,4	3654,7	4038,3	4390,5	4759,1	5176,7	5643,5	6152,3	6718,5

Gesamtverluste bei 6000 min⁻¹

$\frac{L_d}{L_q}$	0	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200	220	240	260	280	300	320	340	360
60	3661,4	3649,1	3650,9	3681,8	3793,6	3938,5	4096,2	4289,1	4512,0	4777,9	5063,6	5430,6	5885,8	6279,8	6725,3	7279,1	7808,7	8289,1	8858,2
40	3013,7	2980,8	2984,6	3052,4	3161,6	3298,6	3489,6	3733,5	4018,5	4318,2	4640,7	5037,9	5445,8	5855,1	6372,8	6929,5	7427,5	8000,4	8659,3
20	2313,7	2275,4	2302,2	2388,7	2494,4	2657,3	2882,0	3156,6	3482,9	3840,5	4235,9	4656,6	5049,6	5522,0	6066,6	6559,6	7129,1	7783,5	8438,7
0	1582,6	1542,5	1599,1	1727,4	1873,6	2081,7	2345,4	2645,0	2998,1	3392,8	3835,9	4308,2	4767,7	5274,8	5748,5	6280,0	6909,2	7554,5	8182,7
-20	1052,3	1019,9	1080,8	1234,0	1392,3	1627,8	1904,4	2236,4	2619,9	3039,4	3516,2	4038,9	4559,5	5031,5	5536,9	6122,8	6726,6	7365,9	8085,9
-40	734,7	716,6	783,4	928,7	1103,9	1331,0	1609,5	1954,1	2368,2	2819,8	3304,4	3838,4	4382,2	4891,1	5438,8	5999,6	6621,9	7338,5	8132,4
-60	546,3	546,4	607,2	753,1	935,5	1174,2	1470,1	1820,3	2246,1	2727,5	3231,2	3768,8	4333,9	4869,0	5395,2	5984,0	6644,6	7385,2	8130,3
-80	446,4	456,0	533,0	684,6	880,8	1120,1	1423,0	1791,5	2226,8	2725,4	3255,8	3823,8	4408,1	4945,3	5492,1	6112,7	6784,3	7494,1	8258,1
-100	435,4	463,3	546,6	703,9	912,1	1166,7	1479,0	1867,6	2322,8	2849,1	3408,1	3991,2	4588,1	5138,5	5691,6	6256,1	6894,6	7605,6	8404,7
-120	518,1	547,0	642,4	818,5	1047,8	1318,6	1641,7	2036,6	2506,3	3042,1	3597,7	4180,2	4763,5	5293,3	5796,3	6356,3	6979,9	7684,7	8437,3
-140	712,3	746,9	849,7	1025,3	1259,6	1533,2	1859,6	2258,1	2747,8	3297,6	3851,2	4406,0	4935,4	5426,6	5940,2	6504,3	7099,0	7762,1	8491,2
-160	1007,1	1043,4	1149,1	1322,6	1546,9	1822,3	2152,3	2557,7	3057,5	3585,5	4100,7	4629,4	5139,6	5579,7	6033,5	6559,8	7157,9	7816,9	8561,0

Gesamtverluste bei 7200 min⁻¹

I_d/I_q	0	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200	220	240	260	280	300	320	340	360
60	5217,7	5196,7	5186,7	5205,2	5336,8	5504,9	5681,4	5899,1	6150,4	6454,5	6777,7	7209,4	7760,7	8213,0	8731,3	9397,4	10018,2	10556,8	11214,9
40	4269,8	4220,5	4214,3	4290,4	4416,9	4575,9	4803,2	5100,1	5441,6	5796,1	6173,3	6649,4	7131,8	7607,6	8230,2	8901,8	9476,9	10152,2	10942,0
20	3237,3	3181,0	3209,2	3313,4	3437,1	3634,1	3911,0	4251,1	4656,4	5098,1	5583,6	6094,7	6556,0	7123,6	7786,8	8365,5	9045,9	9840,2	10625,9
0	2159,1	2103,4	2175,8	2340,6	2522,3	2783,5	3115,5	3491,3	3935,8	4431,7	4988,2	5576,3	6135,2	6753,3	7314,4	7950,2	8718,3	9500,0	10246,5
-20	1393,9	1349,0	1424,9	1619,1	1812,5	2108,3	2456,4	2876,5	3363,2	3893,7	4499,8	5161,5	5810,1	6378,1	6986,1	7701,7	8433,7	9207,9	10089,7
-40	953,3	926,4	1006,5	1190,2	1394,7	1671,4	2011,8	2441,9	2968,6	3541,5	4157,8	4836,7	5519,9	6142,7	6812,6	7492,2	8251,1	9139,9	10131,2
-60	685,8	682,9	753,2	931,4	1149,8	1436,7	1795,7	2223,4	2754,6	3366,0	4007,6	4692,4	5406,9	6069,0	6708,1	7430,8	8247,9	9171,3	10093,0
-80	530,6	539,7	630,8	815,3	1051,9	1338,6	1703,6	2152,1	2687,1	3314,9	3992,5	4720,9	5463,5	6128,7	6799,0	7567,1	8402,9	9283,5	10233,7
-100	487,6	520,5	619,2	810,7	1062,6	1368,4	1744,2	2217,3	2775,9	3435,9	4152,0	4903,5	5665,2	6349,8	7030,1	7720,3	8507,4	9392,1	10392,8
-120	560,1	594,1	708,5	924,5	1203,8	1530,4	1920,2	2400,3	2977,3	3650,9	4362,8	5113,1	5854,9	6510,1	7118,5	7802,6	8569,5	9445,1	10381,1
-140	769,8	811,4	936,5	1151,7	1438,1	1769,1	2163,4	2647,9	3253,8	3950,7	4660,3	5371,4	6036,8	6637,6	7263,0	7954,3	8680,8	9496,2	10398,4
-160	1104,0	1148,5	1278,5	1491,7	1765,4	2099,6	2498,1	2996,0	3622,6	4296,4	4955,9	5629,2	6266,1	6794,6	7334,8	7970,4	8700,1	9508,9	10431,3

Gesamtverluste bei 8400 min⁻¹

I_d/I_q	0	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200	220	240	260	280	300	320	340	360
60	6780,6	6751,3	6730,3	6740,7	6893,8	7087,6	7284,6	7528,0	7808,4	8151,3	8512,9	9010,9	9659,5	10170,2	10761,2	11540,7	12253,1	12850,1	13598,0
40	5532,3	5466,0	5451,1	5538,9	5685,9	5868,4	6133,6	6483,1	6884,0	7294,0	7726,8	8283,1	8841,0	9383,3	10112,5	10899,4	11551,9	12329,5	13251,5
20	4165,9	4091,5	4123,1	4249,1	4391,9	4624,7	4955,4	5362,3	5848,0	6374,6	6951,0	7553,7	8084,2	8748,4	9531,7	10196,6	10988,3	11923,4	12840,0
0	2739,6	2668,3	2759,2	2963,9	3181,7	3497,7	3899,7	4353,2	4890,4	5488,2	6159,1	6864,4	7524,2	8255,2	8904,6	9645,2	10553,1	11472,1	12338,1
-20	1738,9	1681,5	1774,2	2012,5	2241,3	2599,3	3020,7	3530,5	4122,0	4764,8	5501,1	6303,9	7082,0	7747,6	8459,2	9306,2	10166,8	11076,8	12121,6
-40	1175,1	1139,2	1233,7	1455,2	1693,7	2020,5	2425,0	2942,3	3582,6	4279,5	5029,0	5854,7	6678,9	7416,7	8210,3	9010,5	9907,7	10969,1	12158,8
-60	828,6	822,6	902,5	1114,9	1370,5	1707,6	2131,9	2639,7	3278,2	4021,7	4802,8	5636,3	6501,7	7291,2	8044,7	8902,4	9877,2	10985,0	12083,5
-80	617,6	626,0	731,5	950,9	1229,9	1565,5	1995,0	2526,0	3163,0	3922,0	4748,6	5639,4	6541,3	7335,3	8130,6	9048,3	10048,3	11100,3	12236,9
-100	542,5	580,6	694,9	922,9	1220,6	1579,3	2020,5	2581,0	3245,1	4041,6	4916,8	5838,3	6766,0	7586,2	8395,0	9210,9	10147,0	11204,4	12407,8
-120	605,5	644,6	778,6	1036,5	1368,5	1752,7	2210,4	2778,2	3465,2	4279,5	5149,2	6068,7	6970,5	7752,4	8466,1	9273,8	10183,6	11229,9	12349,5
-140	831,0	879,8	1028,1	1285,1	1626,0	2016,3	2480,1	3052,4	3777,0	4622,8	5490,7	6359,6	7161,7	7873,0	8610,9	9429,3	10287,2	11254,4	12328,7
-160	1205,4	1258,4	1413,8	1669,1	1994,5	2389,6	2859,2	3449,9	4205,1	5026,3	5831,6	6651,3	7414,9	8032,3	8659,7	9405,3	10266,9	11225,1	12325,8

9.8 Gemessene Verluste und Wirkungsgrade

i_q/i_d	-120	-100	-80	-60	-40	-20	0	20	40
0	427	315	188	122	51	6	11	37	77
20	419	334	217	126	65	56	41	53	91
40	395	309	290	205	88	90	101	95	153
60	517	527	335	291	230	158	163	178	236
80	730	520	335	363	368	263	244	254	315
100	729	649	566	474	389	342	367	393	447
120	858	814	712	561	560	491	438	561	543
140	1145	1063	857	804	710	722	697	728	733
160	1337	1214	1066	1018	938	944	898	942	970
180	1695	1473	1296	1252	1142	1134	1100	1118	1163
200	1916	1804	1620	1528	1465	1437	1441	1389	1446
220	2337	2194	1911	1831	1730	1774	1759	1773	1824

Gemessene Verluste über i_d (Spalten) und i_q (Reihen) bei 600 min^{-1} incl. Reibung

ges	-120	-100	-80	-60	-40	-20	0	20	40
0	343	198	121	100	133	212	312	407	591
20	451	329	278	207	223	256	399	533	664
40	524	418	314	297	265	359	433	573	682
60	654	538	502	417	385	443	464	701	738
80	793	685	621	522	511	565	736	736	860
100	1052	883	839	707	680	734	767	826	931
120	1441	1143	961	934	892	954	991	1131	1173
140	1583	1366	1179	1309	1239	1356	1300	1244	1267
160	1859	1745	1681	1568	1345	1417	1442	1511	1583
180	2133	1995	1901	1738	1778	1768	1871	1782	1865
200	2556	2551	2220	2155	2181	2084	2069	2045	2175

Gemessene Verluste über i_d (Spalten) und i_q (Reihen) bei 2400 min^{-1} incl. Reibung

I_q/I_d	-120	-100	-80	-60	-40	-20	0
0	314	289	289	289	325	458	589
20	512	358	307	244	415	601	784
40	501	567	444	551	553	720	843
60	778	859	507	509	828	776	934
80	1146	1032	741	883	915	961	1212

Gemessene Verluste über i_d (Spalten) und i_q (Reihen) bei 3600 min^{-1} incl. Reibung

I_q/I_d	-120	-100	-80	-60	-40	-20	0	20	40
220	74,7	77,0	80,6	82,6	83,2	83,7	84,6	84,2	84,9
200	76,7	79,1	81,2	84,1	84,7	86,6	86,5	85,9	85,9
180	78,3	79,1	83,7	85,6	86,4	87,3	88,3	87,6	87,3
160	78,2	81,0	84,0	87,8	88,9	89,0	89,3	89,2	87,9
140	80,9	83,0	85,4	88,5	89,6	90,8	90,8	90,6	89,7
120	80,5	84,1	86,4	89,1	89,9	91,3	91,5	92,1	90,3
100	80,6	83,9	87,8	90,5	92,1	93,3	93,4	93,3	93,0
80	79,7	88,7	90,1	95,5	94,2	94,8	94,6	93,4	93,4
60	82,2	85,4	89,8	90,8	94,0	96,0	95,5	95,0	93,7
40	71,8	81,5	90,4	91,3	94,6	97,1	97,0	95,1	92,3
20	63,9	70,7	81,9	90,9	93,5	96,1	97,2	96,1	90,8
0	72,3	76,6	83,6	89,8	94,6	95,3	96,5	95,5	92,4
20	83,2	86,7	87,5	91,1	96,2	96,1	95,8	96,1	93,7
40	84,3	84,6	89,9	91,5	93,4	95,5	95,5	95,1	93,6
60	82,9	87,9	92,3	91,9	92,1	94,4	94,9	94,8	93,6
80	85,7	87,7	89,5	91,5	93,2	94,2	93,9	93,5	92,7
100	86,0	87,2	89,0	91,6	91,9	93,0	93,8	92,3	92,6
120	84,2	85,6	88,7	89,7	91,1	91,2	91,6	91,4	91,4
140	83,6	85,7	87,6	88,6	89,7	89,9	90,5	90,2	90,0
160	81,6	84,4	86,6	87,4	88,8	89,1	89,5	89,5	89,1
180	81,0	82,7	84,9	86,1	87,0	87,4	87,6	88,1	87,8
200	78,9	80,7	83,6	84,7	85,8	85,7	86,1	86,1	85,9

Wirkungsgrad über i_d (Spalten) und i_q (Reihen) bei 600 min^{-1} incl. Reibung

I_q/I_d	-120	-100	-80	-60	-40	-20	0	20	40
200	92,6	92,9	93,3	93,2	94,4	94,5	94,8	94,6	94,4
180	93,0	93,3	94,1	94,8	94,9	95,5	95,3	95,2	94,8
160	93,6	93,8	94,8	95,0	95,8	95,4	95,6	95,3	95,0
140	93,2	94,3	94,9	95,2	95,5	95,5	95,8	95,9	95,6
120	94,0	95,4	95,2	95,7	96,0	96,0	96,4	96,0	95,7
100	94,4	94,6	95,7	95,6	96,5	96,5	96,8	96,3	95,8
80	93,8	95,2	97,1	97,8	97,7	96,9	96,9	96,8	95,5
60	94,0	96,3	96,5	98,0	96,6	96,4	97,1	96,0	95,7
40	92,7	96,9	96,6	96,9	97,5	96,4	95,8	94,6	94,3
20	90,8	93,5	95,8	96,7	96,1	95,6	93,9	90,2	88,6
0	87,7	91,1	92,8	94,8	94,6	94,1	91,3	88,8	88,0
20	92,5	94,2	95,8	96,2	96,8	95,9	95,2	93,9	93,3
40	93,6	95,0	95,6	96,5	96,9	96,6	96,6	95,0	95,0
60	94,2	95,2	95,9	96,7	96,9	96,7	95,9	96,0	95,6
80	93,8	95,1	95,6	96,4	96,7	96,6	96,6	96,4	96,1
100	93,0	94,7	95,7	96,1	96,4	96,3	96,3	95,8	95,8
120	93,3	94,5	95,5	95,3	95,7	95,5	95,8	96,0	96,0
140	93,1	93,8	94,4	95,0	95,8	95,8	95,8	95,7	95,5
160	92,9	93,7	94,3	95,0	95,0	95,2	95,1	95,4	95,2
180	92,2	92,6	93,9	94,3	94,4	94,8	95,0	95,1	94,9

Wirkungsgrad über i_d (Spalten) und i_q (Reihen) bei 2400 min^{-1} incl. Reibung

I_q/I_d	-120	-100	-80	-60	-40	-20	0
80	95,7	96,6	96,6	97,2	97,1	97,5	96,4
60	95,1	95,0	97,1	96,6	96,9	97,1	96,3
40	95,6	95,4	97,6	96,5	96,3	96,2	95,3
20	91,1	92,3	97,2	95,3	94,9	92,8	91,6
0	90,6	93,6	94,7	96,0	93,5	91,0	88,8
20	95,3	94,9	96,2	95,5	95,7	94,6	94,0
40	95,1	94,8	97,1	97,2	95,7	96,1	95,4
60	94,5	95,3	96,8	96,4	96,4	96,4	95,0

Wirkungsgrad über i_d (Spalten) und i_q (Reihen) bei 3600 min^{-1} incl. Reibung

9.9 Regelungskennfelder

Längsströme für die Interpolation innerhalb Drehmoment und Drehzahl in der Regelung

M/n	0	600	1200	1800	2400	3000	3600	4200	4800	5400	6000	6600	7200	7800	8400
0	0,0	-20,0	-30,7	-41,4	-52,5	-66,5	-75,1	-81,3	-85,8	-91,1	-94,8	-98,9	-100,8	-102,6	-105,8
10	-0,7	-17,1	-28,3	-39,0	-50,0	-62,6	-71,4	-77,1	-81,5	-86,0	-89,9	-93,4	-94,7	-96,0	-99,3
20	1,6	-14,3	-25,8	-36,5	-47,4	-58,9	-67,8	-73,1	-77,4	-81,3	-85,3	-88,3	-89,2	-90,1	-93,5
30	3,6	-11,7	-23,4	-34,0	-44,8	-55,4	-64,3	-69,2	-73,4	-76,9	-81,0	-83,7	-84,3	-84,8	-88,2
40	5,4	-9,3	-21,0	-31,4	-42,1	-52,0	-60,8	-65,4	-69,5	-72,8	-77,0	-79,3	-79,7	-80,0	-83,3
50	7,1	-6,9	-18,5	-28,8	-39,4	-48,7	-57,2	-61,5	-65,7	-68,8	-73,1	-75,2	-75,4	-75,6	-78,9
60	8,5	-4,6	-16,0	-26,2	-36,6	-45,3	-53,6	-57,7	-61,8	-64,9	-69,3	-71,3	-71,5	-71,6	-74,7
70	9,9	-2,3	-13,4	-23,4	-33,6	-42,0	-49,9	-53,8	-57,9	-61,0	-65,6	-67,5	-67,6	-67,8	-70,7
80	11,2	-0,1	-10,7	-20,5	-30,6	-38,5	-46,1	-49,9	-53,8	-57,2	-61,9	-63,7	-63,9	-64,1	-66,9
90	12,5	2,2	-7,9	-17,4	-27,3	-35,0	-42,1	-45,8	-49,7	-53,3	-58,0	-59,9	-60,2	-60,5	-63,0
100	13,8	4,5	-4,9	-14,2	-23,8	-31,3	-38,0	-41,5	-45,3	-49,2	-54,0	-55,9	-56,4	-56,9	-59,1
110	15,2	7,0	-1,9	-10,8	-20,1	-27,4	-33,6	-37,0	-40,8	-44,9	-49,8	-51,8	-52,4	-53,1	-55,1
120	16,7	9,5	1,4	-7,2	-16,1	-23,3	-29,0	-32,3	-36,0	-40,4	-45,3	-47,4	-48,2	-49,1	-50,8
130	18,4	12,2	4,8	-3,3	-11,9	-18,9	-24,1	-27,3	-30,9	-35,6	-40,5	-42,7	-43,7	-44,7	-46,2
140	20,3	15,1	8,5	0,8	-7,4	-14,2	-18,8	-21,9	-25,4	-30,4	-35,3	-37,6	-38,7	-39,9	-41,2
150	22,4	18,1	12,3	5,2	-2,5	-9,0	-13,2	-16,2	-19,5	-24,8	-29,5	-32,0	-33,3	-34,6	-35,7
160	24,9	21,5	16,4	9,9	2,8	-3,5	-7,2	-10,1	-13,3	-18,7	-23,3	-25,8	-27,3	-28,7	-29,6
170	27,7	25,0	20,8	15,0	8,4	2,4	-0,8	-3,5	-6,5	-12,0	-16,5	-19,1	-20,6	-22,1	-22,9
180	30,8	28,9	25,4	20,4	14,5	8,9	6,1	3,6	0,8	-4,7	-9,0	-11,6	-13,2	-14,7	-15,4
190	34,5	33,1	30,4	26,1	20,9	15,9	13,4	11,2	8,6	3,3	-0,7	-3,4	-5,0	-6,3	-7,0
200	38,6	37,7	35,7	32,3	27,9	23,5	21,3	19,3	17,0	12,0	8,3	5,7	4,1	3,0	2,3
210	43,2	42,7	41,3	38,9	35,3	31,7	29,8	28,1	26,0	21,6	18,1	15,7	14,2	13,4	12,5
220	48,4	48,1	47,2	45,9	43,3	40,6	38,9	37,5	35,8	31,9	28,9	26,7	25,4	24,9	23,9
230	54,2	54,0	53,6	53,4	51,8	50,2	48,6	47,6	46,2	43,2	40,7	38,7	37,7	37,8	36,5
240	60,0	60,0	60,0	60,0	60,0	60,0	59,0	58,5	57,5	55,5	53,5	51,8	51,3	52,0	50,4

Querströme für die Interpolation innerhalb Drehmoment und Drehzahl in der Regelung

M/n	0	600	1200	1800	2400	3000	3600	4200	4800	5400	6000	6600	7200	7800	8400
0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
10	7,4	8,2	8,7	9,0	9,6	10,4	11,0	11,5	11,8	12,1	12,4	12,9	13,1	13,1	13,5
20	18,4	19,6	20,6	21,5	22,7	23,8	25,0	25,6	26,2	26,6	27,2	27,6	27,7	27,6	28,3
30	28,7	30,2	31,6	33,0	34,6	36,1	37,7	38,5	39,3	39,8	40,7	41,0	41,0	41,0	41,7
40	38,4	40,1	41,9	43,6	45,6	47,4	49,3	50,3	51,3	51,9	53,0	53,4	53,3	53,3	54,2
50	47,7	49,6	51,5	53,6	55,8	57,9	60,1	61,2	62,4	63,1	64,5	64,9	64,8	64,8	65,8
60	56,8	58,7	60,8	63,0	65,5	67,8	70,2	71,4	72,7	73,6	75,2	75,7	75,6	75,7	76,7
70	65,7	67,6	69,8	72,2	74,9	77,3	79,8	81,1	82,5	83,6	85,4	86,0	85,9	86,1	87,1
80	74,6	76,5	78,7	81,2	84,0	86,5	89,1	90,4	91,9	93,3	95,2	95,9	95,9	96,1	97,2
90	83,8	85,6	87,8	90,3	93,1	95,7	98,3	99,7	101,3	102,8	104,9	105,7	105,8	106,1	107,1
100	93,3	95,0	97,1	99,6	102,5	105,1	107,6	109,0	110,6	112,4	114,6	115,5	115,7	116,1	117,1
110	103,4	105,0	106,9	109,3	112,1	114,8	117,1	118,6	120,2	122,1	124,5	125,5	125,9	126,3	127,3
120	114,2	115,5	117,3	119,6	122,4	125,0	127,2	128,6	130,2	132,4	134,8	135,9	136,4	137,0	137,9
130	125,7	126,9	128,5	130,7	133,3	135,9	137,9	139,3	140,9	143,2	145,6	146,9	147,5	148,2	149,0
140	138,3	139,3	140,7	142,7	145,1	147,6	149,5	150,8	152,4	154,8	157,3	158,7	159,4	160,1	160,9
150	152,0	152,8	154,0	155,8	158,1	160,4	162,1	163,4	164,9	167,4	169,9	171,4	172,2	173,0	173,7
160	167,1	167,7	168,7	170,2	172,3	174,5	176,0	177,1	178,6	181,2	183,7	185,2	186,1	186,9	187,6
170	183,6	184,0	184,8	186,1	188,0	190,0	191,3	192,4	193,7	196,3	198,8	200,3	201,3	202,1	202,7
180	201,7	202,0	202,6	203,7	205,3	207,1	208,2	209,2	210,4	213,0	215,4	217,0	218,0	218,8	219,4
190	221,6	221,7	222,2	223,0	224,4	226,0	226,9	227,8	228,9	231,5	233,7	235,3	236,3	237,1	237,6
200	243,5	243,5	243,8	244,4	245,6	246,9	247,7	248,5	249,5	251,8	253,9	255,5	256,5	257,1	257,7
210	267,4	267,4	267,6	268,0	268,9	270,0	270,6	271,3	272,2	274,3	276,2	277,8	278,7	279,2	279,8
220	293,6	293,6	293,7	294,0	294,6	295,4	296,0	296,5	297,2	299,1	300,8	302,2	303,0	303,3	304,0
230	322,2	322,3	322,4	322,4	322,8	323,3	323,9	324,3	324,9	326,4	327,8	329,1	329,8	329,8	330,6
240	353,4	353,6	353,7	353,7	353,8	354,0	354,6	354,9	355,3	356,3	357,5	358,6	359,0	358,8	359,8

Verluste innerhalb Drehmoment und Drehzahl in der Regelung

M/n	0	600	1200	1800	2400	3000	3600	4200	4800	5400	6000	6600	7200	7800	8400
0	0,0	57,9	108,5	160,0	213,0	263,4	301,7	327,6	364,7	427,4	480,8	493,6	486,9	492,9	542,2
10	1,9	58,9	108,6	159,0	212,2	264,0	302,2	328,3	366,3	431,6	488,1	504,1	501,4	511,2	563,8
20	7,7	64,7	114,3	165,5	220,2	273,9	315,3	344,4	386,0	456,4	518,6	539,0	538,5	551,8	609,8
30	18,6	76,3	127,5	181,0	238,9	296,4	343,6	378,7	426,8	502,9	571,5	601,6	613,1	636,5	701,7
40	36,5	95,6	149,0	206,0	268,0	331,2	386,2	430,4	485,9	564,9	639,3	686,0	719,8	762,5	833,7
50	57,7	119,3	176,9	239,3	308,3	380,2	445,9	502,3	566,0	647,3	728,6	796,4	858,5	924,9	1003,6
60	85,2	150,1	212,6	280,6	356,4	437,3	512,9	579,8	652,0	739,0	829,7	917,0	1004,1	1092,5	1181,1
70	116,0	183,4	250,6	324,5	409,3	502,4	589,8	668,4	752,4	849,2	952,0	1060,3	1171,3	1280,6	1382,0
80	156,1	224,5	294,0	372,1	464,1	567,9	668,4	759,5	855,1	963,3	1081,0	1210,6	1347,1	1480,0	1595,0
90	205,1	277,7	352,4	437,4	537,2	650,4	762,1	865,9	973,1	1091,8	1223,3	1377,9	1544,7	1704,3	1833,3
100	257,3	333,2	414,2	507,6	617,7	743,0	869,2	987,4	1108,5	1240,6	1390,7	1575,2	1778,1	1969,6	2117,8
110	319,5	397,1	482,4	582,4	701,7	839,1	978,7	1111,1	1246,5	1393,2	1564,5	1779,9	2018,8	2242,3	2410,4
120	380,3	467,0	564,0	678,4	813,8	969,3	1127,2	1276,1	1429,3	1597,1	1795,8	2053,0	2338,2	2602,8	2795,4
130	469,4	549,9	642,0	754,8	894,7	1060,5	1231,1	1392,6	1561,5	1753,7	1987,1	2283,5	2610,7	2913,5	3137,8
140	563,2	649,2	748,9	873,1	1028,9	1215,3	1406,5	1586,8	1779,1	2005,8	2288,5	2644,1	3034,7	3394,9	3663,7
150	666,7	755,7	861,5	995,2	1165,8	1372,1	1583,8	1781,3	1997,8	2264,3	2600,3	3019,2	3474,2	3895,1	4214,4
160	790,9	883,0	994,3	1137,2	1322,4	1548,7	1779,5	1994,2	2235,6	2545,1	2938,5	3422,1	3944,2	4429,0	4802,7
170	947,7	1044,0	1161,7	1315,2	1516,4	1764,3	2017,0	2249,7	2519,1	2877,9	3334,7	3891,6	4488,6	5045,2	5477,2
180	1130,0	1231,0	1356,4	1523,1	1745,0	2021,2	2302,2	2557,9	2862,6	3285,9	3826,9	4474,5	5162,9	5807,7	6319,1
190	1344,7	1450,4	1583,7	1762,8	2004,2	2307,6	2616,3	2895,6	3233,7	3716,5	4338,9	5078,2	5861,1	6595,3	7186,4
200	1627,3	1737,1	1876,5	2064,6	2319,7	2642,9	2973,4	3272,4	3640,7	4178,8	4879,2	5709,5	6588,0	7412,5	8079,7
210	1982,7	2099,3	2248,8	2452,8	2732,0	3088,2	3452,4	3780,7	4190,9	4798,3	5583,4	6501,1	7466,2	8367,6	9090,8
220	2410,2	2535,3	2697,4	2920,6	3228,2	3621,5	4021,6	4379,2	4830,1	5506,0	6385,8	7414,1	8490,8	9502,9	10337,3
230	2945,8	3081,2	3258,1	3503,0	3841,8	4275,4	4712,2	5097,3	5598,5	6378,7	7394,2	8556,2	9762,7	10904,3	11870,9
240	3673,0	3814,0	3999,1	4257,7	4618,7	5085,5	5557,7	5972,7	6523,8	7404,7	8555,9	9857,8	11200,5	12476,9	13579,9