

TECHNISCHE UNIVERSITÄT  
CHEMNITZ

Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik  
Professur Elektrische Energiewandlungssysteme und Antriebe

Diplomarbeit

# **Entwurf und Berechnung einer Reihe elektrischer Kleinmaschinen mit siebgedruckten Wicklungen**

Tom Fietz

Matrikelnummer: 161583

12. Januar 2012

Verantwortlicher Hochschullehrer: Prof. Dr.-Ing. Ralf Werner

Betreuer: Dipl.-Ing. Patrick Bräuer



# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einführung</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Der prinzipielle Aufbau der zu entwerfenden Kleinmaschinen</b>	<b>2</b>
2.1	Der Aufbau konventioneller Kleinmaschinen . . . . .	2
2.2	Der mechanische Aufbau . . . . .	3
2.3	Gedruckte Wicklungen . . . . .	4
<b>3</b>	<b>Theoretischer Entwurfs- und Rechengang</b>	<b>7</b>
3.1	Maschinenentwurf . . . . .	7
3.1.1	Magnetkreisentwurf . . . . .	7
3.1.2	Abmessungen . . . . .	9
3.1.3	Entwurf der Wicklung . . . . .	10
3.2	Nachrechnung . . . . .	16
3.2.1	OHMScher Widerstand, Nennstrom und Stromdichte . . . . .	16
3.2.2	Magnetische Spannungsabfälle . . . . .	16
3.2.3	Induktivität und Reaktanz . . . . .	18
3.2.4	Kraft, Drehmoment und mechanische Leistung . . . . .	19
3.2.5	Verluste, Wirkungsgrad und Leistungsfaktor . . . . .	20
3.2.6	Ausnutzungsfaktor, Strombelag und Charakteristisches Produkt . . . . .	21
3.3	Bestimmung des Drehmoments . . . . .	22
<b>4</b>	<b>Ein zahlenmäßiger Entwurfsgang anhand einer Beispielmaschine</b>	<b>27</b>
4.1	Vorgaben . . . . .	27
4.2	Maschinenentwurf . . . . .	28
4.2.1	Magnetkreisentwurf . . . . .	28
4.2.2	Abmessungen . . . . .	29
4.2.3	Entwurf der Wicklung . . . . .	29
4.3	Nachrechnung . . . . .	36
4.3.1	OHMScher Widerstand, Nennstrom und Stromdichte . . . . .	36
4.3.2	Magnetische Spannungsabfälle . . . . .	36
4.3.3	Induktivität und Reaktanz . . . . .	37
4.3.4	Kraft, Drehmoment und mechanische Leistung . . . . .	39

4.3.5	Verluste, Wirkungsgrad und Leistungsfaktor . . . . .	40
4.3.6	Ausnutzungsfaktor, Strombelag und Charakteristisches Produkt . . . . .	40
<b>5</b>	<b>Die Maschinenreihe im Detail</b>	<b>42</b>
5.1	Die Maschinenreihe im Vergleich . . . . .	42
5.2	Außendurchmesser 40 mm . . . . .	45
5.3	Ein Vergleich mit am Markt erhältlichen Maschinen . . . . .	48
<b>6</b>	<b>Fertigung und Maschinenpraxis ausgewählter Modelle</b>	<b>50</b>
6.1	Vorbereitungen . . . . .	50
6.2	Die gedruckten Wicklungen . . . . .	50
6.3	Ein praktischer Ausblick . . . . .	54
6.4	Potenzial und Ausblick – Steigerung der Effizienz . . . . .	54
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>56</b>
<b>A</b>	<b>Das FEM-Modell zur Ermittlung der Läuferinduktion</b>	<b>60</b>
<b>B</b>	<b>Die Maschinenreihe</b>	<b>63</b>
<b>C</b>	<b>Praktische Ausführungen zum Maschinenentwurf</b>	<b>91</b>

# Abbildungsverzeichnis

2.1	Schematische Schnittdarstellung der Maschinenwelle mit Permanentmagnet und magnetischem Rückschluss . . . . .	4
2.2	Mikroskopische Aufnahmen einer gedruckten Wicklung . . . . .	6
3.1	Schematisierte Windung zur Veranschaulichung der Berechnung der Länge der Maschinenteile und der Leiterlänge . . . . .	11
3.2	Schaubild zur Berechnung der Leiterbreiten . . . . .	14
3.3	Veranschaulichung zur Luftspaltinduktion . . . . .	18
3.4	Veranschaulichung der Integrationsabschnitte zur Herleitung des Drehmomentanteils der schrägen Maschinenteile . . . . .	23
3.5	Anteile an der Drehmomentbildung der einzelnen Wicklungsabschnitte . . . . .	24
4.1	Zu druckende Wicklungsstruktur der Maschine 40/80-120 . . . . .	32
4.2	Prinzipielles Wicklungsschema für $w_s = 18$ und $p = 1$ . . . . .	35
6.1	Fotografie der gedruckten Wicklungen (im Bild: 16/32-24, 16/64-24 und 40/80-120) . . . . .	52
A.1	Bildschirmfotos des FEM-Modells zur Ermittlung der Läuferinduktionen . . . . .	62
C.1	Maßskizzen für die zu fertigende Maschine des Typs 16/64-24 . . . . .	91

# Diagrammverzeichnis

4.1	B-H-Kennlinie des verwendeten Stahls für den magnetischen Rückschluss . . . . .	38
5.1	Die Ausnutzungsfaktoren der entworfenen Maschinenreihe . . . .	44
5.2	Die Maschinen mit dem Außendurchmesser von 40 mm im Detail	47
A.1	<i>B-H</i> -Kennlinie der im FEM-Modell verwendeten Eisenkobalt-Legierung . . . . .	61
B.1	Mechanische Leistung in Abhängigkeit von Maschinenlänge und Nennspannung der Maschinen . . . . .	63

# Tabellenverzeichnis

4.1	Permeabilität des für den magnetischen Rückschluss verwendeten Stahls . . . . .	37
5.1	Vergleich der Maschinendaten mit anderen Elektronikmotoren . .	49
6.1	Ausgewählte berechnete Werte der angepassten Wicklungen . . .	52
6.2	Gemessene OHMSche Widerstände jeweils einer Spulenseite und daraus abgeleitete spezifische elektrische Widerstände . . . . .	53
A.1	Werte zur $B$ - $H$ -Kennlinie der im FEM-Modell verwendeten Eisenkobalt-Legierung . . . . .	61
B.1	Ergebnisse des Maschinenentwurfs für den Außendurchmesser von 10 mm . . . . .	69
B.2	Ergebnisse des Maschinenentwurfs für den Außendurchmesser von 12,5 mm . . . . .	71
B.3	Ergebnisse des Maschinenentwurfs für den Außendurchmesser von 16 mm . . . . .	73
B.4	Ergebnisse des Maschinenentwurfs für den Außendurchmesser von 20 mm . . . . .	75
B.5	Ergebnisse des Maschinenentwurfs für den Außendurchmesser von 25 mm . . . . .	77
B.6	Ergebnisse des Maschinenentwurfs für den Außendurchmesser von 32 mm . . . . .	79
B.6	Ergebnisse des Maschinenentwurfs für den Außendurchmesser von 32 mm . . . . .	80
B.7	Ergebnisse des Maschinenentwurfs für den Außendurchmesser von 40 mm . . . . .	81
B.8	Ergebnisse des Maschinenentwurfs für den Außendurchmesser von 50 mm . . . . .	83
B.9	Ergebnisse des Maschinenentwurfs für den Außendurchmesser von 63 mm . . . . .	85

B.10 Ergebnisse des Maschinenentwurfs für den Außendurchmesser von 80 mm . . . . .	87
B.11 Ergebnisse des Maschinenentwurfs für den Außendurchmesser von 100 mm . . . . .	89

# Formelzeichen und Einheiten

Vektoren werden in der Notation  $\vec{V}$  gesetzt.

$A$	Flächeninhalt, Strombelag	$m^2, A/m$
$B$	magnetische Flussdichte/Induktion	T
$b$	Breite	m
$C_{\text{mech}}$	Ausnutzungsfaktor/ESSONscher Faktor	$kW \text{ min}/m^3$
$d$	Durchmesser	m
$E$	induzierte Spannung/Gegenurspannung	V
$F$	Kraft	N
$f$	Frequenz	Hz
$H$	magnetische Feldstärke	A/m
$h$	Höhe	m
$I$	elektrischer Strom	A
$L$	Induktivität	H
$l$	Länge	m
$M$	Drehmoment	Nm
$m$	Strangzahl	
$N$	Nutzahl	
$n$	Drehzahl	1/min
$P$	elektrische Wirkleistung	W
$p$	Polpaarzahl	
$q$	Lochzahl/Nutzahl je Pol und Strang	
$R$	OHMscher Widerstand	$\Omega$
$r$	Radius	m
$S$	elektrische Stromdichte	$A/mm^2$
$s$	Weg/Strecke	m
$U$	elektrische Spannung	V
$u$	Umfang	m
$w$	Windungszahl	
$X$	Blindwiderstand/Reaktanz	$\Omega$
$y$	Wicklungsschritt/Spulenweite	

$\beta$	Schrägungskoeffizient	
$\delta$	Luftspaltbreite	m
$\eta$	Wirkungsgrad	
$\mu_0$	magnetische Feldkonstante	$= 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Vs/Am}$
$\mu_r$	relative, magnetische Permeabilität	
$\nu'$	bezogene Ordnungszahl/Polpaarzahl einer Drehwelle	
$\xi$	Wicklungsfaktor	
$\pi$	Kreiszahl	$= 3,141\,592\,654$
$\rho$	spezifischer, elektrischer Widerstand	$\Omega \text{mm}^2/\text{m}$
$\tau$	Teilung	m
$\Phi$	magnetischer Fluss	Vs
$\varphi$	Winkel, Füllfaktor	$^\circ, []$

# 1 Einführung

Elektrische Maschinen werden heutzutage auf mannigfaltigen Gebieten eingesetzt. Sie verrichten ihre Aufgaben in leistungsstarken Industrieantrieben für Erzmühlen oder Stahlwalzen, als Synchrongeneratoren zur Elektroenergieerzeugung, in Fertigungsanlagen wie Backstraßen oder Fließbänder oder auch im Verkehr, in Zügen oder verstärkt nun auch in Automobilen.

Sie erleichtern uns aber auch den Alltag an Stellen, wo sie oft gar nicht wahrgenommen werden. Sie ermöglichen nützliche Helferlein im Auto mithilfe von Servomotoren – Scheibenwischer, Fensterheber oder Seitenspiegelverstellung sind nur ausgewählte Beispiele. Aber auch Fensterrollläden, Klimaanlage oder Fahrstühle benötigen elektrische Antriebe. Darüber hinaus verstecken sie sich als Klein- und Kleinstmaschinen in medizinischen Geräten wie dem Zahnarztbohrer oder in Pflegeprodukten des täglichen Bedarfs von der Haarschneidemaschine, über den Nasenhaartrimmer und Föhn bis hin zur elektrischen Zahnbürste.

Da Elektromotoren also in immer mehr Geräten stecken, müssen auch immer größere Stückzahlen gefertigt werden, die am besten nichts kosten. Es besteht somit die große Herausforderung all die Bedürfnisse ressourcenschonend und kostengünstig zu bedienen. Aus diesem Gedanken heraus entstand am Lehrstuhl die Idee, Wicklungen elektrischer Kleinmaschinen zu drucken. Dies geschieht mithilfe der Siebdrucktechnik, wie es schon heute bei RFID-Chips die Regel ist. Es handelt sich also um ein erprobtes Verfahren, das eine günstige Fertigung großer Stückzahlen erlaubt.

Erste Erfahrungen wurden bereits gesammelt, hier sei auf [10], [11] und [12] verwiesen. Im Rahmen dieser Diplomarbeit sollen diese Grundlagen nun ausgebaut, gefestigt, sowie erweitert werden. Um einen Eindruck und Überblick zu gewinnen, wird im Folgenden eine Reihe elektrischer Kleinmaschinen entworfen.

Hierbei sollen Probleme ausfindig gemacht, Lösungen eruiert und Abweichungen zum konventionellen Entwurf aufgezeigt werden. Im Rahmen dessen werden Berechnungsvorschriften für siebgedruckte Wicklungen abgeleitet und diese schließlich zur Berechnung einer Maschinenreihe mit verschiedenen Außendurchmessern und Längen genutzt. Am Ende der Arbeit sollen ausgewählte Motoren aus der berechneten Reihe stehen, an denen Messungen stattfinden um die verwendeten Algorithmen zu verifizieren.

## 2 Der prinzipielle Aufbau der zu entwerfenden Kleinmaschinen

Zuerst einmal soll auf den grundlegenden Aufbau üblicher Kleinmaschinen eingegangen werden.

### 2.1 Der Aufbau konventioneller Kleinmaschinen

Üblicherweise werden elektrische Kleinmaschinen als elektronisch kommutierte Motoren eingesetzt. Weitere gebräuchliche Bezeichnungen sind auch Elektronik- oder EC-Motor, aber auch BLDC-Motor als Abkürzung für die englische Bezeichnung *brushless direct current motor*. Im engeren Sinne handelt es sich hierbei gar nicht um eine Maschine, sondern um ein Antriebssystem, da der eigentliche elektromagnetische Energiewandler in den meisten Fällen eine übliche Synchronmaschine ist, und diese erst durch die äußere Verschaltung mit Leistungselektronik und Regeleinrichtung zum Elektronikmotor wird.

Hierbei werden also die Vorzüge von Gleichstrom- mit Synchronmotoren kombiniert. Der große Nachteil der Gleichstrommaschine, deren Verschleißteil Kommutator, verschwindet, die gute Regelbarkeit bleibt aber erhalten.

Die im Rahmen dieser Diplomarbeit zu entwerfenden Motoren werden also in der Regel nur einen Bestandteil dieses Antriebssystems ersetzen, die Elektronik bleibt die alte. Herkömmliche Kleinmaschinen, wie sie in Elektronikmotoren verwendet werden, sind also überwiegend Synchronmaschinen – sie besitzen zumeist eine dreisträngige Wicklung, eingebettet in den Nuten des Ständers. Es sind auch mehrsträngige Wicklungen denkbar, was aber aus Kostengründen – neben dem erhöhten Kupferbedarf, wächst auch die Elektronik – nur selten realisiert wird. Der Läufer dieser Maschinen ist elektronisch, oder weit häufiger, permanenterregt.

Dreht sich nun der Läufer, erzeugt dieser vom Ständer aus gesehen ein Drehfeld, welches vom Ständerfeld kompensiert werden muss, um auf einen mechani-

schen Kommutator verzichten zu können. Es wird also der besagte elektronische Kommutator oder Frequenzwandler in Form eines Wechselrichters zwischen die äußeren Gleichspannungs-Klemmen und den Wicklungen der Maschine geschaltet. [3]

Die im Folgenden betrachteten Motoren verfolgen den Ansatz die aufwändigen und somit kostenintensiven Kupferwicklungen durch siebgedruckte zu ersetzen. Diese Grundidee bringt einige Änderungen im prinzipiellen Aufbau der elektrischen Maschinen mit sich. So liegen die gedruckten Wicklungen nicht mehr in den Ständernuten, sondern werden auf eine Folie gedruckt und als *Luftspaltwicklung* verbaut.

Diese grundlegende Änderung bringt weitere Abweichungen mit sich, die sich im Maschinenentwurf bemerkbar machen.

## 2.2 Der mechanische Aufbau

Während die Befestigung bei den bekannten Kupferwicklungen durch die Lagerung in den Nuten und dem späteren Einschließen mittels eines Nutverschlusses sicher gelöst ist, stellt sich die Lagerung einer Luftspaltwicklung schwieriger dar. Schließlich muss eine an sich recht labile Folie fest, ohne Anschlag nach außen oder innen, angebracht werden.

Diese Herausforderung wird derart gelöst, dass die bedruckte Folie auf einen passenden Zylinder gespannt und mit sich selbst verklebt wird. Wird die Folie jetzt wieder vom Zylinder abgezogen, so besitzt sie die notwendige Form und behält diese auch. Die so in Form gebrachte Wicklung kann nun in den Luftspalt gesteckt und auf dafür vorgesehenen Absätzen auf den Lagerschilden festgeklebt werden.

In Folge dieses Vorgehens ergeben sich also zwei Luftspalte – einer zwischen Läufer und Folie, und einer zwischen Folie und Ständer. Dies hat zwar keine prinzipiellen Auswirkungen auf magnetische Eigenschaften der Maschine, hat aber einen erhöhten magnetischen Widerstand zur Folge – jedenfalls, wenn beide Luftspalte so groß sind wie der einzelne einer konventionellen Maschine. Davon muss aber ausgegangen werden, da in der Regel die Luftspalte an der unteren Grenze des Möglichen ausgeführt werden.

Des Weiteren kann durch die Luftspaltwicklung auf die Zahnung des Ständers verzichtet werden, da hier keine Wicklung in Nuten untergebracht werden muss. Das hat positive Auswirkungen auf das Luftspaltfeld, da dieses nicht durch etwaige Zähne abgeplattet wird (siehe Abschnitt 3.2.2, S. 16).

Eine weitere Besonderheit des Maschinentyps ist der *topfförmige*, sich *mitdrehende* magnetische *Rückschluss*. Das vom Permanentmagnet des Läufers erzeugte magnetische Feld schließt sich also über den Ständerrücken, welcher relativ zum Läufer still steht.

Dies bietet den Vorteil, dass die Ummagnetisierungsverluste gegen null streben. Realisiert wird dieser feste Rückschluss derart, dass er topfförmig ausgeführt und auf der Welle fixiert wird. Hierbei muss beachtet werden, dass zwischen

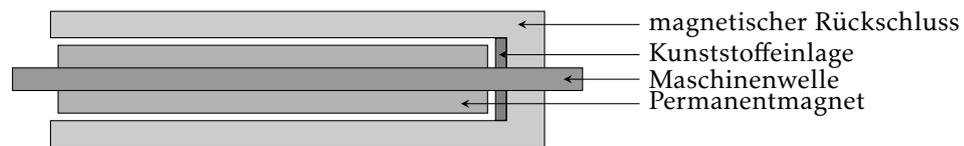


Abbildung 2.1: Schematische Schnittdarstellung der Maschinenwelle mit Permanentmagnet und magnetischem Rückschluss

Topfboden und Permanentmagnet kein magnetischer Kurzschluss entsteht, dies kann z. B. durch eine Kunststoffeinlage bewerkstelligt werden. Eine schematische Darstellung dieses Aufbaus ist in Abbildung 2.1 zu finden.

Im Zuge dieser Ausführung kann streng genommen natürlich nicht mehr vom Ständer gesprochen werden, wenn vom Rückschluss die Rede ist. Genauso ist es technisch falsch vom Anker zu sprechen, da der Energieumsatz der Maschine in der Luftspaltwicklung stattfindet, die räumlich durch einen Luftspalt vom Rückschluss getrennt ist. Beide Bezeichnungen sollen in dieser Arbeit dennoch als Synonym für den magnetischen Rückschluss verwendet werden.

### 2.3 Gedruckte Wicklungen

Das Prinzip elektrische Leiter zu drucken ist nicht vollkommen neu, praktisch angewandt wird dies heute schon millionenfach in RFID-Chips. Diese arbeiten allerdings mit kleinsten Leistungen und Strömen. Lesegeräte arbeiten mit Sendeleistungen von 0,5 W (EU) bis 4 W (USA), wobei die genutzte Leistung im Chip mit einem Kopplungsfaktor von zirka 1 % um zwei Größenordnungen kleiner ist [7].

Die Entwicklung von gedruckten Wicklungen für große Ströme, wie sie in elektrischen Maschinen eingesetzt werden können, steht jedoch noch am Anfang. Somit werden bisher auch nur geringe Wirkungsgrade erzielt, die elektrischen Maschinen mit konventionellen Kupferwicklungen keinesfalls Konkurrenz machen können, zur Zeit werden lediglich Bereiche bis etwa 50 % abgedeckt. Dies liegt hauptsächlich an der vergleichsweise geringen Leitfähigkeit der Druckpaste. Hier kann und muss noch viel von Werkstoffwissenschaftlern geleistet werden. Gleichzeitig sind keine verlässlichen Werte für den spezifischen elektrischen Widerstand bekannt, somit konnte dieser nur anhand von Probedrucken ermittelt werden. Der Wert wurde dann mithilfe des gemessenen OHMschen Widerstandes und den geometrischen Abmessungen herunter gebrochen. Diese Vorgehensweise ist aber natürlich mit Messabweichungen verbunden und führt somit nur zu ungenügenden Ergebnissen. Außerdem ist der spezifische elektrische Widerstand vom Druck- und Trocknungsprozess abhängig, darüber hinaus auch noch von der zu druckenden Geometrie. Das heißt, dass breite Leiter einen anderen spezifischen Widerstand haben als schmale. Da all diese Faktoren noch nicht vollständig untersucht und erfasst sind, muss hier erst einmal mit diesen Einschränkungen

gearbeitet werden. Der vor Beginn der Arbeit ermittelte spezifische elektrische Widerstand liegt bei  $0,25 \Omega \text{mm}^2/\text{m}$  und somit um eine Größenordnung höher als bei Kupfer (Berechnung siehe Abschnitt 4.2.3, S. 29).

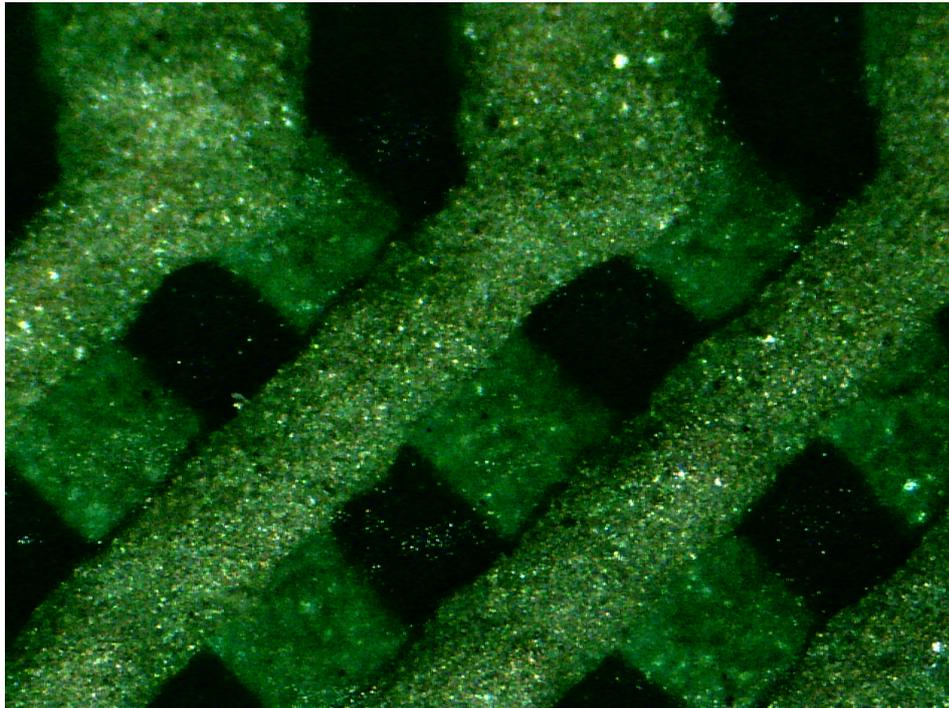
Ein weiterer limitierender Faktor ist die beschränkte Schichtdicke. So sind die im Rahmen dieser Diplomarbeit gedruckten Leiter lediglich  $14 \mu\text{m}$  stark. Folglich sind die erreichten Ströme selbst bei solch hohen zulässigen Stromdichten von  $100 \text{ A}/\text{mm}^2$  nicht sonderlich groß. Weiterhin entspricht die verfügbare Querschnittsfläche nicht einmal dem Produkt aus Leiterbreite und der Schichtdicke, sondern ist in der Praxis kleiner. Dies liegt darin begründet, dass die gedruckte Leiterpaste kleine Hügel statt scharfer Kanten bildet.

Eine weitere Einschränkung der Querschnittsfläche wird durch die Tatsache hervorgerufen, dass sich die Leiterbahnen in den geschrägten Maschinenteilen überlappen, wenn die Leiterbreite im Vergleich zum ungeschrägten Teil unverändert bleibt (siehe hierzu Abschnitt 3.1.3, S. 13). Die Leiterbreite muss also im geschrägten Maschinenteil heruntergesetzt werden, was bei gleichbleibender Stromdichte zu geringeren Stromstärken führt.

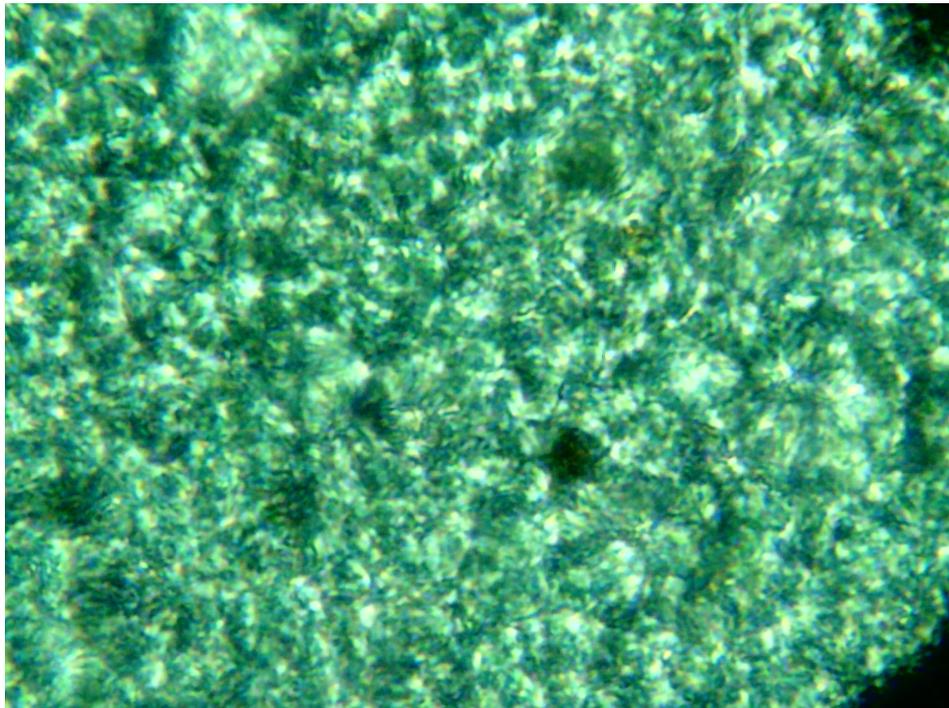
Weiterhin zu beachten sind die nötigen Abstände zwischen gedruckten Bahnen, die durch das Sieb vorgegeben werden. Geringere Abstände als dieses spezifische Grenzmaß sind nicht möglich. In dieser Arbeit wird dieses Maß mit  $100 \mu\text{m}$  angenommen.

Da diese Faktoren dazu beitragen, dass mit einer Folie nur eine geringe Leistung beherrscht werden kann, wird für die im Folgenden zu entwerfenden Maschinen ein Trick angewendet. Da die fertigen Folien vergleichsweise dünn sind, werden pro Maschine zwei Folien parallel genutzt. Dies verdoppelt zwar die mechanische Leistung, allerdings auch die Verluste – der Wirkungsgrad bleibt also unangetastet. Mit einer Stärke von  $50 \mu\text{m}$  der Kunststoffolie und einer gedruckten Schichtdicke von  $14 \mu\text{m}$ , respektive  $40 \mu\text{m}$  der gedruckten Leiter bzw. des Dielektrikums, ergibt sich die Gesamtstärke der gedruckten Wicklung letztlich zu  $158 \mu\text{m}$ .

Praktisch realisiert wird die Wicklung derart, dass insgesamt vier Schichten gedruckt werden. Als erstes werden die Hinleiter gedruckt, die sowohl die Anschlussfährchen tragen, als auch einen gedruckten Sternpunkt, der die Maschine fest verschaltet. Darauf wird eine Schicht Dielektrikum gedruckt, hierbei muss darauf geachtet werden, dass die „Wicklungsköpfchen“ frei bleiben. Auf diese Schicht werden im Anschluss die Rückleiter gedruckt, deren Wicklungsköpfchen die der Hinleiter genau treffen müssen. Zum Schluss wird die Wicklung schließlich noch mit einer weiteren Schicht Dielektrikum überzogen, welches vor allem vor mechanischen Einwirkungen schützen soll. Diese Schichten sind in Abbildung 4.1 auf Seite 32 beispielhaft gezeigt. Abbildung 2.2 zeigt zwei Aufnahmen einer gedruckten Wicklung, die mit dem Mikroskop aufgezeichnet wurden. Die obere Aufnahme, festgehalten mit einer 40-fachen Vergrößerung, zeigt die Leiterstrukturen im Übergangsbereich vom ungeschrägten in den geschrägten Maschinenteil. Die ungeschrägten Leiter sind hier ungefähr  $370 \mu\text{m}$ , die ungeschrägten etwa  $210 \mu\text{m}$  breit. In der zweiten Abbildung ist die Oberflächenstruktur der gedruckten Leiter bei 400-facher Vergrößerung zu sehen, der vermeintliche Lunker im rechten, unteren Quadrant besitzt etwa einen Durchmesser von  $7 \mu\text{m}$ .



(a) Aufnahme des Überganges vom geschrägten in den ungeschrägten Teil, 40-fache Vergrößerung



(b) Detailaufnahme der Leiteroberfläche, 400-fache Vergrößerung

Abbildung 2.2: Mikroskopische Aufnahmen einer gedruckten Wicklung

# 3 Theoretischer Entwurfs- und Rechengang

Im Folgenden soll der Ablauf des Entwurfs und der Nachrechnung der Maschinen beleuchtet werden. Hierbei wird auf die Besonderheiten und spezifischen Probleme des Maschinentyps eingegangen und deren Lösungsansätze aufgezeigt. Darüber hinaus werden Parallelen und Differenzen zum Entwurf einer klassischen Maschine mit Kupferdraht-Wicklungen eruiert.

Für den Entwurf einer Maschine müssen einige ihrer Parameter bereits vor der Berechnung festgelegt werden. Diese unterscheiden sich je nach Entwurfsziel, so kann eine Maschine z. B. auf ein bestimmtes Zielmoment oder ein Bauvolumen ausgelegt werden. In dieser Arbeit ist das Ziel ein vorher definierter Außendurchmesser. Somit gilt es zu Beginn des Entwurfs folgende Parameter festzulegen: Außendurchmesser  $d_a$ , Maschinen- bzw. Eisenlänge  $l_{Fe}$ , Luftspaltbreite  $\delta$ , Nennspannung  $U_N$ , Nenndrehzahl  $n_N$  und Polpaarzahl  $p$ . Somit ergibt sich bereits indirekt die Nennfrequenz der Maschine.

$$f_N = n_N \cdot p \quad (3.0.1)$$

## 3.1 Maschinenentwurf

### 3.1.1 Magnetkreisentwurf

#### Läufer

Am Anfang des Entwurfes steht die Bestimmung der Hauptwelleninduktion. Da es sich bei der zu konstruierenden Maschine um eine permanenterregte Synchronmaschine handelt, wird die Induktion durch den Läufer eingepägt. In dieser Arbeit wird deren Wert mithilfe eines 2D-FEM-Modells (siehe Anhang, Abschnitt A, S. 60) bestimmt.

Zuerst wird der Läuferdurchmesser  $d_L$  festgelegt, mithilfe des FEM-Modells ergibt sich somit die Amplitude der Hauptwelleninduktion  $\hat{B}_p$ , aus derer sich schließlich die mittlere Luftspaltinduktion  $B_m$  berechnen lässt. Diese ergibt sich

als arithmetischer Mittelwert der Hauptwelle über die Polteilung.

$$B_m = \frac{2}{\pi} \hat{B}_p \quad (3.1.1)$$

### Ständer

Für die Konstruktion des Ständers muss die Rückenlänge bestimmt werden. Eine Dimensionierung der Nuten und Zähne ist nicht notwendig, da diese durch den Aufbau der Maschine mit einer Luftspaltwicklung entfallen.

Die Höhe des Rückens wird durch den magnetische Fluss bestimmt, den dieser tragen muss. Dies ist der halbe Hauptfluss  $\Phi_h$ , da sich dieser beim Übergang in den Rücken aufteilen und jeweils zur Hälfte über eine Hemisphäre fließen wird.

$$\Phi_h = B_m \cdot \tau_p \cdot l_i \quad (3.1.2)$$

Zur Bestimmung dessen ist die Polteilung  $\tau_p$  und die ideale Maschinenlänge  $l_i$  notwendig. Die Maschinenlänge ergibt sich als Summe aus Eisenlänge und doppeltem Luftspalt.

$$l_i = l_{Fe} + 2\delta \quad (3.1.3)$$

Die Polteilung setzt den Wicklungsumfang zur Anzahl der Pole ins Verhältnis, der Wicklungsdurchmesser berechnet sich aus dem Läuferdurchmesser und der Luftspaltbreite.

$$d_w = d_L + 2 \frac{\delta}{2} \quad (3.1.4)$$

$$\tau_p = \frac{\pi \cdot d_w}{2p} \quad (3.1.5)$$

Somit ergibt sich der folgende magnetische Fluss für den der Rücken dimensioniert werden muss:

$$\Phi_r = \frac{B_m \cdot \tau_p \cdot l_i}{2} \quad (3.1.6)$$

Die Rückenlänge lässt sich nun mithilfe der grundsätzlichen Forderung

$$A \geq \frac{\Phi}{B_{zul}} \quad (3.1.7)$$

bestimmen.

$$h_r = \frac{\Phi_r}{l_{Fe} \cdot \varphi_{Fe} \cdot B_{r,zul}} \quad (3.1.8)$$

Hierbei ist  $\varphi_{Fe}$  der Eisenfüllfaktor. Dieser ist hier gleich eins, da es sich beim praktisch ausgeführten Rückschluss um einen massiven Metallzylinder handeln

wird. Weil sich dieser mitdreht, relativ zum Läufer also stillsteht, bilden sich keine Wirbelströme, weshalb darauf verzichtet werden kann, den Rücken zu blechen.

Der sich bei der Berechnung ergebende Wert wird gerundet, es ergibt sich  $h_{r, \text{techn}}$ . Für diese Rückenhöhe wird die Induktion im Rücken noch einmal berechnet und überprüft, ob sich diese im zulässigen Bereich befindet.

$$B_{r, \text{techn}} = \frac{\Phi_r}{h_{r, \text{techn}} \cdot l_{\text{Fe}}} \quad (3.1.9)$$

### 3.1.2 Abmessungen

Aus den zuvor ermittelten Werten lassen sich nun weitere Abmessungen der Maschinen(teile) bestimmen. So wird an dieser Stelle überprüft, ob der sich ergebende Außendurchmesser dem gewünschten Ergebnis entspricht. Der am Anfang des Entwurfs gewählte Läuferdurchmesser ergibt zusammen mit dem Luftspalt, dem Rücken und dem Gehäuse, sowie dem Abstand zwischen diesem und dem Rücken der Maschine den Außendurchmesser der Maschine. Bis dieser sich ergebende Außendurchmesser mit dem gewünschten übereinstimmt sind meist mehrere Berechnungen notwendig – der Läuferdurchmesser wird iterativ ermittelt.

$$d_a = d_L + 2\delta + 2h_{r, \text{techn}} + 2h_{\text{Gehäuse}} + 2b_{\text{Rücken-Gehäuse}} \quad (3.1.10)$$

Für die spätere Rechnung und für die Auslegung der Wicklung sind die Längen der einzelnen Maschinenteile zu bestimmen. Dabei ist mit Maschinenteil I der geschrägte und mit Maschinenteil II der ungeschrägte, gerade Teil gemeint. Auf eine gesonderte Betrachtung des Maschinenteils III wird hier verzichtet, da dieser in den elektrischen Eigenschaften mit dem ersten Maschinenteil identisch ist und sich geometrisch lediglich darin unterscheidet, dass dessen Schrägung entgegengesetzt der des ersten Maschinenteils verläuft.

Allgemein errechnet sich die Länge des ersten Maschinenteils wie folgt:

$$l_I = \frac{\tau_p}{2} \tan \alpha \quad (3.1.11)$$

Im Folgenden soll aber die Rechnung auf einen Winkel  $\alpha = 45^\circ$  vereinfacht werden, da die äußeren Maschinenteile entsprechend diesem Winkel geschrägt werden.

$$l_I = \frac{\tau_p}{2} \quad (3.1.12)$$

$$l_{II} = l_{\text{Fe}} - 2 \frac{\tau_p}{2} \quad (3.1.13)$$

Da es sich bei  $l_I$  um die auf die Längsachse der Maschine projizierte Länge handelt, muss zusätzlich noch die Länge längs der Folienoberfläche berechnet werden, die ein einzelner Leiter in diesem Bereich aufweist. In Folge dessen ergibt sich auch

die Leiterlänge einer einzelnen Spulenseite.

$$l_{I, \text{Leiter}} = \frac{l_I}{\sin\left(\frac{\pi}{4}\right)} \quad (3.1.14)$$

$$l_{\text{Spulenseite}} = 2 \cdot l_{I, \text{Leiter}} + l_{II} \quad (3.1.15)$$

### 3.1.3 Entwurf der Wicklung

#### Windungszahl je Strang

Beim herkömmlichen Wicklungsentwurf für Maschinen mit Kupferwicklungen, ergibt sich die Windungszahl indirekt über das Induktionsgesetz. Es wird die Windungszahl gesucht, die notwendig ist, bei gegebenem Hauptfluss, Wicklungsfaktor und Nenndrehzahl die Gegenurspannung zu induzieren.

$$w_S = \frac{\sqrt{2} E_h}{n_N \cdot \xi_p \cdot \Phi_h} \quad (3.1.16)$$

Dieser Ansatz wurde anfangs ebenso verfolgt. Dabei stellte sich zuerst die Frage, wie hoch die Gegenurspannung angesetzt werden soll. Bei Kupferwicklungen wird meist pauschal ein Spannungsabfall von 5 % angenommen, sodass sich

$$E_{h, \text{Cu}} = 0,95 \cdot U_N$$

ergibt. Da der spezifische elektrische Widerstand der verwendeten Silberleitpaste jedoch exorbitant größer ist als der von Kupfer, kann dies hier nicht mehr gelten. Um hierfür einen adäquaten Wert zu finden, wurde ein an einer bereits gedruckten Folie gemessener OHMScher Widerstand mit dem berechneten Widerstand verglichen, den eine Kupfergeometrie hätte.

Die Folie, an der der OHMSche Widerstand gemessen wurde, weist folgende Werte auf.

$$l_{\text{Spulenseite}} = 15 \text{ mm}$$

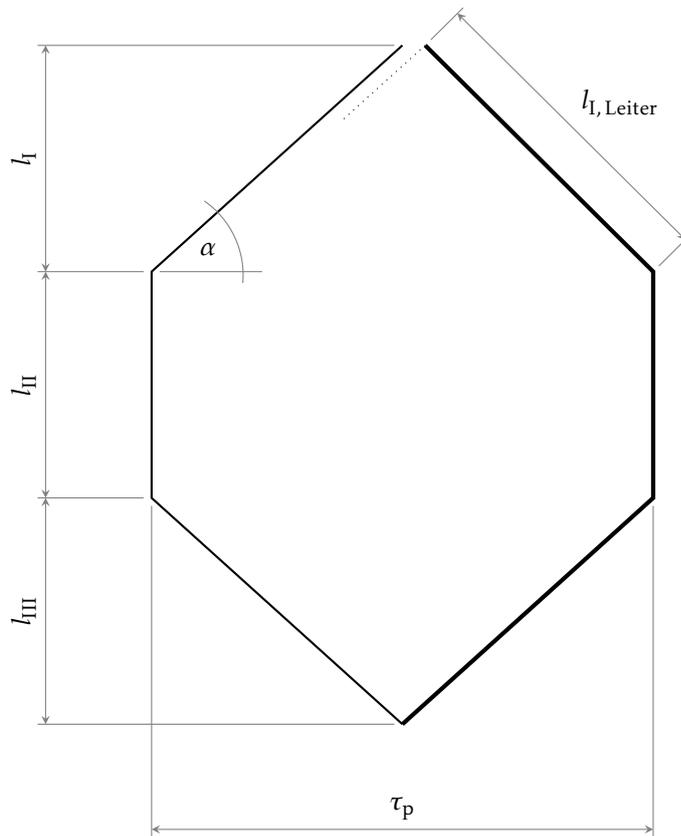
$$w = 15$$

$$A = 250 \cdot 6 \text{ } \mu\text{m}^2$$

$$R_{\text{mess}} = 150 \text{ } \Omega$$

Eine entsprechende Geometrie aus Kupfer, mit einem spezifischen elektrischen Widerstand von  $\rho = 0,017 \text{ } \Omega \text{ mm}^2/\text{m}$ , besäße einen Widerstand von:

$$R_{\text{Cu}} = 2 \frac{\rho \cdot w \cdot 2l}{A} = 10,2 \text{ } \Omega \quad (3.1.17)$$



— Leiterlänge einer Spulenseite

Abbildung 3.1: Schematisierte Windung zur Veranschaulichung der Berechnung der Länge der Maschinenteile und der Leiterlänge

Die führende zwei in der Gleichung ergibt sich aus dem Umstand, dass der Widerstand an den beiden Anfängen zweier Spulen gemessen wurde, die miteinander über den Sternpunkt verbunden sind. Der Widerstand der gedruckten Wicklung ist also rund 15-mal so groß wie der der Kupferwicklung. Somit ergibt sich auch ein 15-mal größerer Spannungsabfall, der bei der gedruckten Wicklung also  $15 \cdot 5\% = 75\%$  der Nennspannung aufweist. Somit muss die Gegenurspannung nur noch ein Viertel der Nennspannung betragen.

$$E_{h,Ag} = 0,25 \cdot U_N \quad (3.1.18)$$

Natürlich stellt dieser Wert nur einen Überschlagswert dar, da er lediglich an einer Wicklungsgeometrie gemessen und die Querschnittsfläche als rechteckig angenommen wurde, was reell nicht der Fall ist. Deswegen soll dies später noch an den aus dieser Arbeit hervorgehenden Wicklungen genauer untersucht werden.

Wird dieser Wert jedoch zu Grunde gelegt, ergeben sich überraschend große Werte für die Windungszahl – dies wurde vom Autor anfangs zwar überrascht zur Kenntnis genommen, aber akzeptiert. Dass die erhaltenen Werte jedoch praktisch nicht ausführbar sind, wurde erst später festgestellt. So sah der erste Ansatz für den Entwurfsgang vor, die Windungszahl über den eben dargestellten Weg zu ermitteln und den Nennstrom über eine gewünschte Stromdichte festzulegen. Dies hätte aber bedeutet, dass die Spannung, die notwendig ist um diesen Strom anzutreiben, inakzeptabel groß geworden wäre. Also wurde ein anderer Weg eingeschlagen.

Die Windungszahl sollte nun aus der Spannung abgeleitet werden. Sie ergibt sich aus einem einfachen Ansatz mithilfe des OHMSchen Gesetzes. Der Strangwiderstand berechnet sich grundsätzlich über:

$$R_{Str} = w_S \frac{\rho \cdot 2 l_{Spulenseite}}{A_{Leiter}} \quad (3.1.19)$$

Die Strangspannung ergibt sich im Folgenden mithilfe der Stromdichte  $S$ .

$$U_{Str} = R_{Str} \cdot I_{Str} \quad (3.1.20a)$$

$$= w_S \frac{\rho \cdot 2 l_{Spulenseite}}{A_{Leiter}} S \cdot \cancel{A_{Leiter}} \quad (3.1.20b)$$

Für die Windungszahl folgt daraus:

$$w_S = \frac{U_{Str}}{\rho \cdot 2 l_{Spulenseite} \cdot S} \quad (3.1.21)$$

Da die Leiterbreite in den äußeren Maschinenteilen aber kleiner sein muss als im mittleren um ein „Zusammenstoßen“ der Leiter zu vermeiden (siehe Abbildung 3.2), ist dieser Rechenansatz lediglich ein Überschlag, der zur Abschätzung der tatsächlichen Windungszahl dient. Diese muss iterativ ermittelt werden, indem sie für die Berechnung des Strangwiderstandes vorgegeben wird und anschließend eine Überprüfung stattfindet, ob die Stromdichte bei ebenfalls gegebener

Spannung und zulässiger Stromdichte eingehalten werden kann. Diese Überprüfung wird in Abschnitt 3.2.1, S. 16 betrachtet.

Praktisch sieht das dann so aus, dass ein Werte für die Windungszahl vorgegeben wird, für die dann die Abmessungen der Leiterbahnen bestimmt werden. Diese leiten sich aus dem vorhandenen Platz auf der Folie und den minimal möglich Abständen zwischen den Leitern her. Für diese Wicklungsgeometrie wird dann aus der angelegten Spannung der Nennstrom der Maschine berechnet, daraus wiederum die erreichte Stromdichte. Liegt deren Wert unterhalb des zulässigen Wertes, kann die Maschine derart gefertigt werden. Dabei wird sich natürlich so nahe wie möglich an die Grenze herangetastet. Diese Art des Entwurfs ist natürlich ein wenig unsauber, musste aber in Ermangelung eines thermischen Modells vollzogen werden. Besser wäre es mithilfe eines thermischen Ersatzschaltbildes zu prüfen, ob die Maschine mit der zu überprüfenden Wicklungsgeometrie und Stromdichte im thermisch zulässigen Bereich bleibt.

Dies hätte aber den Rahmen dieser Arbeit gesprengt und muss auf nachfolgende Untersuchungen verschoben werden.

### Geometrische Abmessungen

Ist die Windungszahl ermittelt, fehlen noch die Abmessungen der Leiterbahnen. Hierzu muss der Umfang der Luftspaltwicklung bekannt sein.

$$u = \pi \cdot \left( d_L + 2 \frac{\delta}{2} \right) \quad (3.1.22)$$

Mit dem Abstand  $b_{\text{Steg}}$  der Leiterbahnen untereinander kann nun die Leiterbreite bestimmt werden. Hierbei muss, wie bereits erwähnt, beachtet werden, dass die Leiter in den Maschinenteilen unterschiedlich breit sind, da sie sonst aneinanderstoßen. Es ergibt sich also als erstes die auf den Umfang projizierte Leiterbreite (siehe Abbildung 3.2). Diese projizierte Länge lässt sich nun auf die tatsächliche Leiterbreite zurückrechnen.

Die projizierte Breite wird derart berechnet, dass alle drei Stränge mit ihren Windungen auf den Umfang passen. Hierzu muss die Anzahl der Stege  $3 \cdot w_S$  mit deren projizierten Breite  $b_{\text{Steg}} + \Delta b$  multipliziert werden. Wird dieser Wert vom Umfang subtrahiert, ergibt sich der Platz, der für die Leiterbahnen zur Verfügung steht. Dieser Platz wird schließlich auf die  $3 \cdot w_S$  Leiterbahnen „aufgeteilt“.

Die projizierte Breite der Stege und somit auch  $\Delta b$  ergeben sich aus den geometrischen Beziehungen im rechtwinkligen Dreieck. Der Wert  $\Delta b$  ist hierbei das Maß, um welches die projizierte Stegbreite gegenüber der geschrägten kürzer ist, bzw. um welches die projizierte Leiterbreite gegenüber der geschrägten länger ist.

$$\cos(\alpha) = \frac{b_{\text{Steg}}}{b_{\text{Steg}} + \Delta b} \quad (3.1.23)$$

$$\Delta b = \frac{b_{\text{Steg}}}{\cos(\alpha)} - b_{\text{Steg}} \quad (3.1.24)$$

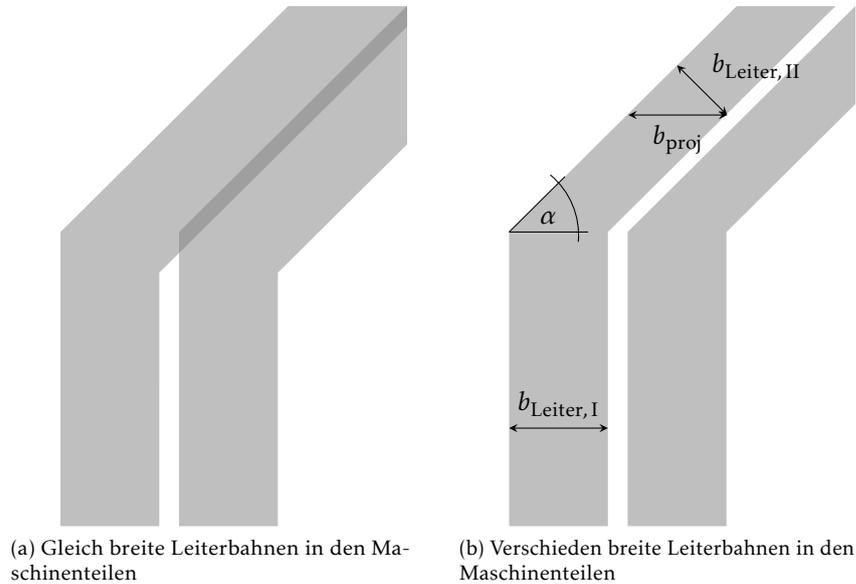


Abbildung 3.2: Schaubild zur Berechnung der Leiterbreiten

$$b_{\text{proj}} = \frac{u - 3 \cdot w_S (b_{\text{Steg}} + \Delta b)}{3 \cdot w_S} \quad (3.1.25)$$

Zur Bestimmung der Leiterbreite für die äußeren Maschinenteile muss die projizierte Leiterbreite schließlich noch zurückgerechnet werden. Für den mittleren Maschinenteil könnte als Leiterbreite die projizierte gesetzt werden, da aber ein geringerer Abstand möglich ist, sollte dieser auch ausgenutzt werden um die Leitverluste gering zu halten. Deshalb wird hier die projizierte Breite um  $\Delta b$  erweitert um wieder die minimal mögliche Stegbreite zu erreichen.

$$b_{\text{Leiter,I}} = b_{\text{proj}} \cdot \cos(\alpha) \quad (3.1.26)$$

$$b_{\text{Leiter,II}} = b_{\text{proj}} + \Delta b \quad (3.1.27)$$

Zusammen mit der Leiterhöhe ergeben sich aus den Werten schließlich die idealen Querschnittsflächen der Leiter.

$$A_{\text{Leiter,I}} = b_{\text{Leiter,I}} \cdot h_{\text{Leiter}} \quad (3.1.28)$$

$$A_{\text{Leiter,II}} = b_{\text{Leiter,II}} \cdot h_{\text{Leiter}} \quad (3.1.29)$$

### Wicklungsfaktor

Der Gesamtwicklungsfaktor für diese Maschine setzt sich aus dem Spulenwicklungs-, dem Gruppenwicklungs- und dem Schrägungsfaktor zusammen. Der

Nutschlitz- oder Breitenfaktor  $\xi_b$  nach JORDAN und LAX darf hier mit eins angenommen werden, da die zu entwerfenden Maschinen aufgrund ihrer Luftspaltwicklung keine Zahnung aufweisen [11].

Mithilfe des Spulwicklungsfaktors wird berücksichtigt, dass die Spannungen der beiden Spulenseiten einer Windung geometrisch addiert werden. Hier spielt das Verhältnis von Spulenweite  $y$  zu Durchmesserschritt  $y_\varnothing$  eine entscheidende Rolle.

$$\xi_{sp} = \sin\left(\frac{v' y \pi}{p y_\varnothing 2}\right) \quad (3.1.30)$$

Der Gruppenwicklungsfaktor wiederum stellt das Verhältnis aus geometrischer Summe zu algebraischer Summe der Spulenspannungen her. Er berücksichtigt somit die räumliche Verteilung der Spulenseiten in  $q$  Nuten.

$$\xi_{gr} = \frac{\sin\left(\frac{v' q \pi}{p y_\varnothing 2}\right)}{q \cdot \sin\left(\frac{v' 1 \pi}{p y_\varnothing 2}\right)} \quad (3.1.31)$$

Durch Schrägstellung der Spulen verringert sich die induzierte Spannung, dies wird durch den Schrägungsfaktor berücksichtigt. Wird um  $N_{schr}$  Nuten geschrägt und ist  $N_\varnothing$  die Anzahl der auf den gesamten Umfang verteilten Nuten, so berechnet sich der Schrägungskoeffizient  $\beta$  zu:

$$\beta = \frac{N_{schr} \cdot 2\pi \cdot p}{N_\varnothing} \quad (3.1.32)$$

Somit ergibt sich der Schrägungsfaktor.

$$\xi_{schr} = \frac{\sin\left(\frac{\beta}{2}\right)}{\frac{\beta}{2}} \quad (3.1.33)$$

Bei der Schrägung muss jedoch zwischen den einzelnen Maschinenteilen unterschieden werden. So entfällt der Schrägungsfaktor für den mittleren, ungeschrägten Teil, während er bei den beiden äußeren Maschinenteilen berücksichtigt werden muss. Folglich ergeben sich für eine Maschine drei Schrägungsfaktoren  $\xi_{schr,I}$ ,  $\xi_{schr,II}$  und  $\xi_{schr,III}$ , wobei  $\xi_{schr,I}$  gleich  $\xi_{schr,III}$  ist.

Der Wicklungsfaktor, der die gesamte Wicklungsgeometrie berücksichtigt, ergibt sich aus der Multiplikation der einzelnen Faktoren. Es ergibt sich für jeden Maschinenteil ein Gesamtwicklungsfaktor:

$$\xi_{p,I} = \xi_b \cdot \xi_{sp} \cdot \xi_{gr} \cdot \xi_{schr,I} \quad (3.1.34)$$

$$\xi_{p,II} = \xi_b \cdot \xi_{sp} \cdot \xi_{gr} \cdot \xi_{schr,II} \quad (3.1.35)$$

$$\xi_{p,III} = \xi_b \cdot \xi_{sp} \cdot \xi_{gr} \cdot \xi_{schr,III} \quad (3.1.36)$$

Wobei wieder gilt:

$$\xi_{p,I} = \xi_{p,III} \quad (3.1.37)$$

## 3.2 Nachrechnung

### 3.2.1 OHMscher Widerstand, Nennstrom und Stromdichte

In der Nachrechnung soll als erstes der OHMsche Widerstand eines Stranges bestimmt werden. Unter Berücksichtigung, dass die äußeren Maschinenteile die selben Abmessungen besitzen, ergibt sich:

$$R_{\text{Str}} = 2 \cdot w_S \cdot \rho \left( \frac{l_{I,\text{Leiter}}}{A_{\text{Leiter},I}} + \frac{l_{II}}{A_{\text{Leiter},II}} + \frac{l_{III,\text{Leiter}}}{A_{\text{Leiter},III}} \right) \quad (3.2.1a)$$

$$= 2 \cdot w_S \cdot \rho \left( \frac{2l_{I,\text{Leiter}}}{A_{\text{Leiter},I}} + \frac{l_{II}}{A_{\text{Leiter},II}} \right) \quad (3.2.1b)$$

Es ergibt sich schließlich der Nennstrom der Maschine und somit die Nennstromdichten in den Maschinenteilen.

$$I_N = \frac{U_{\text{Str}}}{R_{\text{Str}}} = \frac{U_N}{\sqrt{3} R_{\text{Str}}} \quad (3.2.2)$$

$$S_{N,I} = \frac{I_N}{A_{\text{Leiter},I}} \quad (3.2.3)$$

$$S_{N,II} = \frac{I_N}{A_{\text{Leiter},II}} \quad (3.2.4)$$

Hier schließt sich die Iteration der Windungszahl. Liegen die Werte für die Stromdichte außerhalb des zulässigen Bereiches oder sind sie noch zu gering, so muss  $w_S$  auf Seite 13 geändert und die darauf folgenden Rechenschritte wiederholt werden, bis das Ergebnis den Vorgaben entspricht.

### 3.2.2 Magnetische Spannungsabfälle

Die Berechnung der magnetischen Spannungsabfälle gestaltet sich bei dem vorliegenden Maschinentyp recht einfach. Da der Permanentmagnet des Läufers als Quelle für die magnetische Durchflutung fungiert, gilt es lediglich magnetische Spannungsabfälle für drei Gebiete zu berücksichtigen – die beiden Luftspalte und das Rückengebiet des Ständers. Hierbei sind die magnetischen Spannungsabfälle an den Luftspalten gar identisch.

Da im Rückengebiet magnetische Feldstärke und der Integrationsweg parallel verlaufen, ist der magnetische Spannungsabfall hier das Produkt aus beiden Größen. Die Feldstärke wird durch das Produkt aus Induktion und Permeabilität

ausgedrückt, der Integrationsweg ist der halbe Umfang und zweimal die halbe Rückenhöhe.

$$V_r = H_r \cdot s \quad (3.2.5a)$$

$$= \frac{1}{\mu} B_{r, \text{techn}} \left( \frac{u}{2} + 2 \frac{h_{r, \text{techn}}}{2} \right) \quad (3.2.5b)$$

Für den magnetischen Spannungsabfall über den Luftspalten sieht es auf den ersten Blick etwas schwieriger aus. Allgemein berechnet sich dieser nach der Gleichung

$$V_\delta = \frac{B_{\max}}{\mu_0} k_C \delta \quad (3.2.6)$$

Hierbei ist  $B_{\max}$  der Maximalwert der Luftspaltinduktion und ist über den Abplattungsfaktor  $\alpha_p$  mit der Amplitude der Hauptwelleninduktion verknüpft.

$$B_{\max} = \frac{B_m}{\alpha_p} = \frac{2 \hat{B}_p}{\pi \alpha_p} \quad (3.2.7)$$

Der Abplattungsfaktor resultiert aus der Abflachung der Luftspaltinduktion aufgrund der Zahnsättigung. Im Zuge dieser Nichtlinearität flacht die Induktion unter den Zähnen ab und verschleift die Sinusform immer stärker [4, S. 354]. Da bei der vorliegenden Luftspaltwicklung keine Zähne vorhanden sind, tritt dieser Effekt nicht auf. Es gilt also:

$$B_{\max} = B_m = \frac{2}{\pi} \hat{B}_p \quad (3.2.8)$$

Weiterhin ist der CARTERSche Faktor  $k_C$  zu beachten. Dieser berücksichtigt die durch die Nutung von Ständer oder Läufer hervorgerufenen Einsattelungen der Luftspaltinduktion [4, S. 128], welche Induktionserhöhungen zur Folge haben.

$$B_\delta = k_C \cdot B_{\max}$$

Auch dies kann im vorliegenden Fall unberücksichtigt bleiben, da beide Nutungen fehlen. Diese Effekte sind in Abbildung 3.3 bildlich dargestellt. Es ergibt sich also schließlich für den magnetischen Spannungsabfall über den Luftspalt:

$$V_\delta = \frac{2 \hat{B}_p}{\pi \mu_0} \delta \quad (3.2.9)$$

Letztlich ergibt sich die Durchflutung als Summe der magnetischen Spannungsabfälle in der Maschine.

$$\Theta = \sum V = V_r + 2 \cdot V_\delta \quad (3.2.10)$$

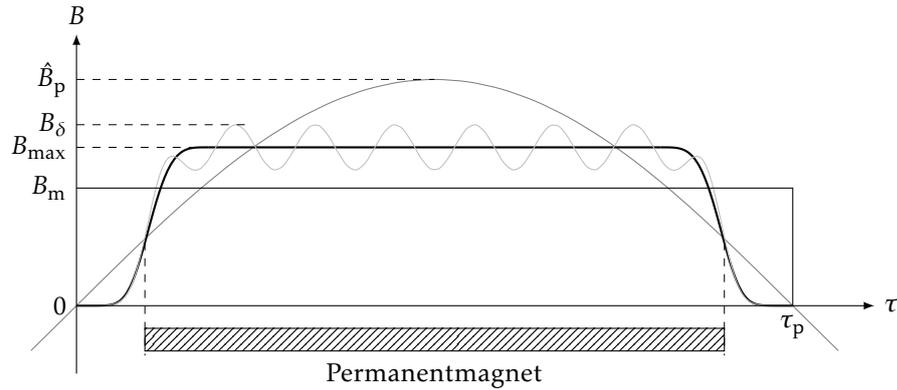


Abbildung 3.3: Veranschaulichung zur Luftspaltinduktion (Grafik entnommen aus [8])

### 3.2.3 Induktivität und Reaktanz

Nach [5, S. 519, Gl. (8.1.29b)] ergibt sich die Selbstinduktivität je Strang aus

$$L_{h, \text{Str}} = \frac{\mu_0}{\delta_{\text{mag}}} \frac{2}{\pi} \underbrace{\tau_p \cdot l_i}_{A_{\text{mag}}} \frac{4}{\pi} \frac{(w_S \xi_p)^2}{2p} \quad (3.2.11)$$

In [11] wird ein Weg aufgezeigt, wie hierbei für den vorliegenden, speziellen Maschinentyp vorgegangen werden kann. Der magnetisch wirksame Luftspalt ergibt sich zu:

$$\delta_{\text{mag}} = \frac{d_L + \delta}{2} \quad (3.2.12)$$

Die von der Wicklung aufgespannte, magnetisch wirksame Fläche  $A_{\text{mag}}$  – in Gleichung (3.2.11) durch das Produkt aus ideeller Maschinenlänge und Polteilung repräsentiert – muss neu bestimmt werden. Hierzu wird die Maschine wieder in drei Teile zerlegt. Die Anteile an der magnetisch aufgespannten Gesamtfläche werden nun einzeln berechnet und schlussendlich addiert.

$$A_{\text{mag, I}} = \frac{1}{w_S} \sum_{n_{w_S}=1}^{w_S} \left( \frac{\tau_p l_I}{2} - (n_{w_S} - 1)(w_S - n_{w_S}) b_{LL}^2 \right) \quad (3.2.13)$$

$$A_{\text{mag, II}} = \frac{1}{w_S} \sum_{n_{w_S}=1}^{w_S} (\tau_p l_{II}) \quad (3.2.14)$$

Hierbei ist  $b_{LL}$  der kleinste Abstand zwischen zwei sich gleichenden Punkten im Wicklungsschema – also beispielsweise der Abstand zwischen den beiden linken

Flanken benachbarter Leiterbahnen.

$$b_{LL} = b_{\text{Leiter,I}} + b_{\text{Steg}} \quad (3.2.15)$$

Außerdem gilt wieder die Gleichheit der beiden äußeren Maschinenteile.

$$A_{\text{mag,III}} = A_{\text{mag,I}}$$

Die Gesamtfläche bildet sich also aus der Summe der Anteile der Teilmaschinen.

$$A_{\text{mag}} = \frac{1}{w_S} \sum_{n_{w_S}=1}^{w_S} \left( \tau_p l_{II} + 2 \cdot \left[ \frac{l_I \tau_p}{2} - (n_{w_S} - 1)(w_S - n_{w_S}) b_{LL}^2 \right] \right) \quad (3.2.16)$$

Werden diese Änderungen getroffen, ergibt sich die einsträngige Hauptinduktivität zu:

$$L_{h,\text{Str}} = \frac{\mu_0}{\delta_{\text{mag}}} \frac{2}{\pi} \frac{4}{\pi} \frac{w_S^2}{2p} \left( A_{\text{mag,II}} \xi_{p,\text{II}}^2 + 2 \cdot A_{\text{mag,I}} \xi_{p,\text{I}}^2 \right) \quad (3.2.17)$$

Schließlich wird noch die dreisträngige Hauptinduktivität und die Hauptreaktanz der Maschine bestimmt.

$$L_h = \frac{3}{2} L_{h,\text{Str}} \quad (3.2.18)$$

$$X_h = 2\pi n_N L_h \quad (3.2.19)$$

Da die Maschinen aber mit zwei parallel geschalteten Folien konzipiert werden, ergeben sich folgende, an den Anschlussklemmen wirksame Induktivität und Reaktanz:

$$L_{h,\text{ges}} = \frac{L_h}{2} \quad (3.2.20)$$

$$X_{h,\text{ges}} = 2\pi n_N L_{h,\text{ges}} \quad (3.2.21)$$

### 3.2.4 Kraft, Drehmoment und mechanische Leistung

Zwei der wichtigsten Parameter einer Maschine sind wohl Drehmoment und mechanische Leistung. Zur Bestimmung dieser Größen muss zuerst die Kraft berechnet werden, die durch die Wechselwirkung von stromdurchflossenen Leitern auf der Folie und dem Permanentmagneten des Läufers entsteht. Für die ausführliche Herleitung sei auf Abschnitt 3.3, S. 22 verwiesen.

Bei diesem Maschinenteil ist zur Berechnung der Kraft das Längenverhältnis der Maschinenteile zueinander notwendig. Wie von der Lorentz-Kraft bekannt, ergibt sich gemeinsam mit Windungszahl, Strom, Induktion und Länge der stromdurchflossenen Leiter die resultierende Kraft.

$$a = \frac{l_I}{l_{II}} \quad (3.2.22)$$

$$\hat{F}_{\text{res}} = i(a) \frac{3}{2\pi} w_S I_N \hat{B}_p l_{II} \quad (3.2.23)$$

Hierbei ist  $i$  eine Funktion von der Länge der Maschinenteile  $l_I$  und  $l_{II}$  und dem Läuferwinkel, bei der die maximale Kraft entsteht (siehe Seite 25).

Somit kann das Drehmoment der Maschine bestimmt werden. Zuerst für eine Folie und schließlich das doppelte Drehmoment für die mit zwei Folien ausgeführte Maschine.

$$M_N = \hat{F}_{\text{res}} \frac{d_L + 2 \frac{\delta}{2}}{2} \quad (3.2.24)$$

$$M_{N,\text{ges}} = 2 \cdot \hat{F}_{\text{res}} \frac{d_L + 2 \frac{\delta}{2}}{2} \quad (3.2.25)$$

Schlussendlich ergeben sich die mechanischen Leistungen aus dem Produkt der Drehmomente mit der Nennwinkelgeschwindigkeit.

$$P_{\text{mech}} = 2 \pi n_N M_N \quad (3.2.26)$$

$$P_{\text{mech,ges}} = 2 \pi n_N M_{N,\text{ges}} \quad (3.2.27)$$

### 3.2.5 Verluste, Wirkungsgrad und Leistungsfaktor

Nach Bestimmung der Leistungsdaten sollen nun die Verluste und der Wirkungsgrad ermittelt werden. In erster Näherung kann davon ausgegangen werden, dass sämtliche wesentlichen Verluste, OHMsche Verluste sind. Ummagnetisierungsverluste treten nahezu keine auf, da sich der Rückschluss mitdreht und die Relativgeschwindigkeit zum Läufer gleich null ist.

Ummagnetisierungsverluste in konstruktionsbedingten Teilen, z. B. den Lagern, sollen vernachlässigt werden, ebenso mechanische Verluste durch Reibung.

Die Ohmschen Verluste in den stromdurchflossenen Leitern der Folie können anhand des Nennstromes und des Strangwiderstandes berechnet werden. Dies soll gleich für zwei Folien geschehen.

$$P_{\text{Ohm,ges}} = 3 \cdot \frac{R_{\text{Str}}}{2} \cdot (2 \cdot I_N)^2 \quad (3.2.28)$$

Diese Verluste und die abgegebene mechanische Leistung müssen von der zugeführten elektrischen Wirkleistung gedeckt werden.

$$P_{\text{el,ges}} = P_{\text{mech,ges}} + P_{\text{Ohm,ges}} \quad (3.2.29)$$

Im Anschluss daran lässt sich der Leistungsfaktor als Verhältnis aus Wirk- und Scheinleistung bestimmen.

$$\cos \varphi = \frac{P_{\text{el,ges}}}{2 \cdot 3 \cdot U_N I_N} \quad (3.2.30)$$

Der Phasenwinkel zwischen Wirk- und Scheinleistung bzw. Strom und Spannung ist somit

$$\varphi = \arccos(\cos \varphi) \quad (3.2.31)$$

Mithilfe dieser Größen kann nun der Wirkungsgrad berechnet werden. Dieser ergibt sich aus abgegebener mechanischer Leistung und der zugeführten elektrischen Wirkleistung.

$$\eta = \frac{P_{\text{mech, ges}}}{2 \cdot 3 \cdot U_N I_N \cos \varphi} \quad (3.2.32)$$

Im Anschluss hieran soll noch die Wärmeverlustleistung bezogen auf die Wärmeenergie abgebende Oberfläche der Wicklung betrachtet werden. Somit ist ein Vergleich zwischen den verschiedenen Maschinengrößen möglich um zu überprüfen, ob die kleineren Maschinen eventuell zu stark ausgelastet werden.

$$\psi = \frac{P_{\text{Ohm, ges}}}{\pi \left( d_L + 2 \frac{\delta}{2} \right) l_{\text{Fe}}} \quad (3.2.33)$$

### 3.2.6 Ausnutzungsfaktor, Strombelag und Charakteristisches Produkt

Um Vergleichswerte mit konventionellen Maschinen zu erhalten, soll schließlich noch der Ausnutzungsfaktor oder ESSONscher Faktor, sowie das Charakteristische Produkt errechnet werden.

$$C_{\text{mech}} = \frac{P_{\text{mech}}}{(d_L + 2 \cdot \delta)^2 l_i n_N} \quad (3.2.34)$$

$$C_{\text{mech, ges}} = \frac{P_{\text{mech, ges}}}{(d_L + 2 \cdot \delta)^2 l_i n_N} \quad (3.2.35)$$

Zur Bestimmung des charakteristischen Produktes muss zuerst der Strombelag errechnet werden.

$$A_S = \frac{2 \cdot w_S \cdot 3 \cdot I_N}{\pi (d_L + 2 \cdot \delta)} \quad (3.2.36)$$

$$A_{S, \text{ges}} = \frac{2 \cdot w_S \cdot 3 \cdot 2 \cdot I_N}{\pi (d_L + 2 \cdot \delta)} \quad (3.2.37)$$

Da das Charakteristische Produkt das Produkt aus Strombelag und -dichte ist, ergeben sich vier Werte. Naturgemäß muss für den mittleren und die äußeren Maschinenteile unterschieden werden, da diese unterschiedliche Stromdichten

aufweisen. Darüber hinaus ergibt sich noch eine Unterscheidung für die Maschine mit einer und mit zwei Folien.

$$AS_I = A_S \cdot S_{N,I} \quad (3.2.38)$$

$$AS_{I,ges} = A_{S,ges} \cdot S_{N,I} \quad (3.2.39)$$

$$AS_{II} = A_S \cdot S_{N,II} \quad (3.2.40)$$

$$AS_{II,ges} = A_{S,ges} \cdot S_{N,II} \quad (3.2.41)$$

### 3.3 Bestimmung des Drehmoments<sup>1</sup>

Die LORENTZ-Kraft berechnet sich allgemein durch

$$\vec{F}_L = (\vec{I} \times \vec{B}) \cdot l \quad (3.3.1)$$

Dessen Betrag ergibt sich somit zu

$$F_L = |\vec{F}_L| = I \cdot B \cdot l \cdot \sin(\alpha) \quad (3.3.2)$$

Wobei  $\alpha$  der Winkel zwischen dem Strom- und Induktionsvektor ist. Für den Fall eines Läufers in einer elektrischen Maschine wird dieser Winkel  $90^\circ$  und somit dessen Sinus zu eins.

$$F_L = I \cdot B \cdot l \quad (3.3.3)$$

Für die verwendete Wicklung in der Form einer Raute mit zusätzlichem geraden Mittelteil hält die Berechnung der LORENTZ-Kraft noch einige Stolpersteine bereit.

So erzeugen die schrägen Teile der Wicklung eine Kraft, die zusätzlich zur gewünschten Tangentialkomponente eine Axialkomponente (bezogen auf den Läufer) besitzt. Zweitere hat aber keinen Einfluss auf die Drehmomentbildung in der Maschine. Am einfachsten ist es, direkt bei der Berechnung der Kraft die auf die Längsachse des Läufers projizierte Länge  $l'$  zu verwenden.

Jetzt kann jedoch nicht einfach die Kraft auf eine Windung berechnet und diese stur mit der Windungszahl multipliziert werden, weil sich in den Bereichen der Wicklung, in denen sich Leiter des gleichen Stranges kreuzen kein Drehmoment erzeugt wird (siehe Abbildung 3.5). Aufgrund dessen wird im Folgenden ein anderer Ansatz gewählt.

Es kann für jeden infinitesimal kleinen Abschnitt  $ds$  des Ständers die darauf wirkende Kraft  $dF$  bestimmt werden. Für diese Betrachtung muss noch die Windungsdichte

$$v = \frac{3 \cdot w_S}{2\pi r_S} \quad (3.3.4)$$

<sup>1</sup>Dieser Abschnitt orientiert sich an Otto Stemme und Peter Wolf [9]

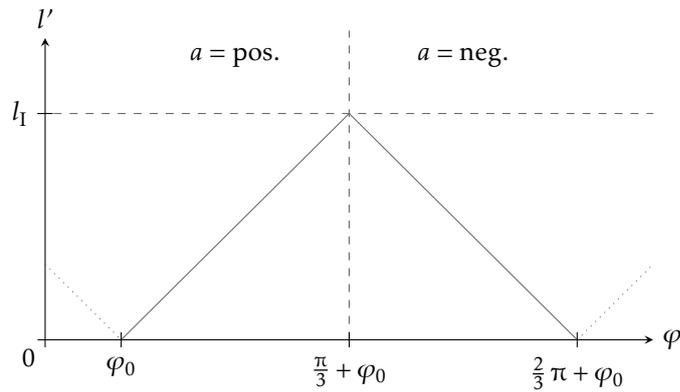


Abbildung 3.4: Veranschaulichung der Integrationsabschnitte zur Herleitung des Drehmomentanteils der schrägen Maschinenteile

eingeführt werden. Diese bezieht die gesamte Windungszahl auf den Ständerumfang. Es ergibt sich das Differential der Kraft.

$$dF = I \cdot B \cdot l'(\varphi) \cdot \nu \cdot ds \quad (3.3.5)$$

Hier stellt  $\nu \cdot ds$  die Windungszahl für den betrachteten unendlich kleinen Abschnitt dar. Mit

$$\begin{aligned} ds &= r_S \cdot d\varphi \\ B &= \hat{B}_p \cdot \sin(\varphi) \\ l'(\varphi) &= a \cdot \varphi \\ a &= \pm \frac{l_1}{\pi/3} = \pm \frac{3 \cdot l_1}{\pi} \end{aligned}$$

ergibt sich allgemein für die Kraft

$$dF = \frac{3}{\pi} I \cdot \hat{B}_p \cdot l_1 \cdot \varphi \cdot \nu \cdot r_S \cdot \sin(\varphi) \cdot d\varphi \quad (3.3.6)$$

Bei der Ermittlung der Gesamtkraft mittels Integration, müssen sechs Bereiche betrachtet werden. Das sind die drei kraftbildenden Rauten, die jeweils in zwei Abschnitte unterschieden werden müssen – einmal für eine wachsende und einmal für eine fallende projizierte Länge. Da jedoch noch nicht bekannt ist, für welchen Winkel des Rotors das Drehmoment maximal wird, muss dies in Abhängigkeit von dessen Stellung geschehen. Es wird also die Koordinate  $(\varphi - \varphi_0)$  variabel gehalten.

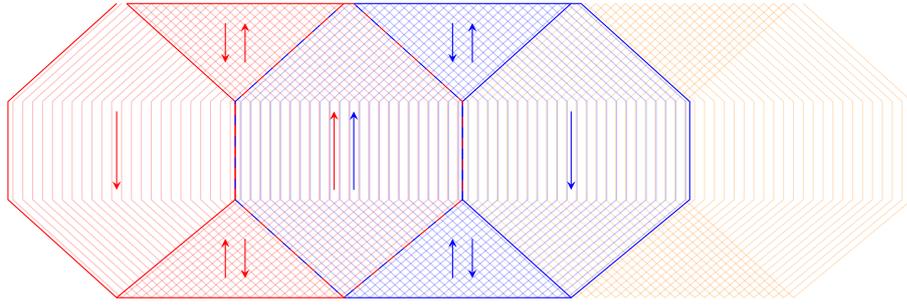


Abbildung 3.5: Anteile an der Drehmomentbildung der einzelnen Wicklungsabschnitte

Somit ergeben sich die sechs Integrationsbereiche wie folgt:

$$\begin{aligned}
 F_{\text{schr}} = \frac{3}{\pi} I \cdot \hat{B}_p \cdot l_1 \cdot \nu \cdot r_S & \left[ \int_0^{\varphi_0 + \pi/3} (\varphi - \varphi_0) \sin(\varphi) \, d\varphi - \int_{\varphi_0 + \pi/3}^{\varphi_0 + 2/3\pi} (\varphi - \varphi_0 - \frac{2}{3}\pi) \sin(\varphi) \, d\varphi \right. \\
 & - \left( 2 \cdot \int_{\varphi_0 + 2/3\pi}^{\varphi_0 + \pi} (\varphi - \varphi_0 - \pi) \sin(\varphi) \, d\varphi - 2 \cdot \int_{\varphi_0 + \pi}^{\varphi_0 + 4/3\pi} (\varphi - \varphi_0 - \frac{4}{3}\pi) \sin(\varphi) \, d\varphi \right) \\
 & \left. + \int_{\varphi_0 + 4/3\pi}^{\varphi_0 + 5/3\pi} (\varphi - \varphi_0 - \frac{5}{3}\pi) \sin(\varphi) \, d\varphi - \int_{\varphi_0 + 5/3\pi}^{\varphi_0 + 2\pi} (\varphi - \varphi_0 - 2\pi) \sin(\varphi) \, d\varphi \right] \quad (3.3.7)
 \end{aligned}$$

Ein Minus vor dem Integral resultiert aus einer fallenden projizierten Länge, eine zwei im Integral zeigt den doppelten wirksamen Strom bzw. zwei stromdurchflossene Leiter im Gebiet, wie in Abbildung 3.5 in der mittleren Raute mit den zwei gleichsinnigen Pfeilen. Da hier der Strom in entgegengesetzter Richtung der beiden Nachbargebiete fließt, werden dessen Anteile auch subtrahiert – daher das Minus vor den beiden zugehörigen Integralen.

Die Lösung dieser Gleichung erfolgt mithilfe des Computer-Algebrasystems (CAS) Maple 13.0.

$$F_{\text{schr}} = \frac{3}{\pi} I \cdot \hat{B}_p \cdot l_1 \cdot \nu \cdot r_S \underbrace{\left[ 3 \sin(\varphi_0) + \frac{2}{3} \pi \cos(\varphi_0) - \frac{\pi}{3} \sqrt{3} \sin(\varphi_0) \right]}_{g(\varphi_0)} \quad (3.3.8)$$

Als nächstes soll das Drehmoment für den geraden Teil der Maschine bestimmt werden. Dies geschieht nach dem selben Ansatz wie für den schrägen Maschinenteil. Hier genügt es jedoch die Wicklung in drei Bereiche aufzuteilen, außerdem

muss nicht berücksichtigt werden, dass sich die Länge ändert, denn diese bleibt über den gesamten Integrationsbereich konstant.

$$F_{\text{ger}} = I \cdot \hat{B}_p \cdot l_{\text{II}} \cdot \nu \cdot r_S \left[ \int_{\varphi_0}^{2/3\pi+\varphi_0} \sin(\varphi) \, d\varphi - 2 \cdot \int_{2/3\pi+\varphi_0}^{4/3\pi+\varphi_0} \sin(\varphi) \, d\varphi + \int_{4/3\pi+\varphi_0}^{2\pi+\varphi_0} \sin(\varphi) \, d\varphi \right] \quad (3.3.9)$$

Das Minus zeigt hier wieder die umgekehrte Stromrichtung an und die Zwei den doppelten Strom bzw. zwei stromdurchflossene Leiter. Die Lösung erfolgt über das CAS.

$$F_{\text{ger}} = I \cdot \hat{B}_p \cdot l_{\text{II}} \cdot \nu \cdot r_S \underbrace{\left[ \frac{3}{2} \cos(\varphi_0) + \frac{5}{2} \sqrt{3} \sin(\varphi_0) - \cos\left(\frac{\pi}{3} + \varphi_0\right) - 1 \right]}_{h(\varphi_0)} \quad (3.3.10)$$

Damit ergibt sich die Gesamtkraft. Der „untere“, schräge Maschinenteil liefert den selben Anteil an der Gesamtkraft wie der „obere“ ( $l_I = l_{\text{III}}$ ).

$$F_{\text{res}} = 2 \cdot F_{\text{schr}} + F_{\text{ger}} \quad (3.3.11a)$$

$$= I \cdot \hat{B}_p \cdot l_{\text{II}} \cdot \nu \cdot r_S \underbrace{\left[ 2 \frac{3}{\pi} \frac{l_I}{l_{\text{II}}} g(\varphi_0) + h(\varphi_0) \right]}_{i(\varphi_0, l_I, l_{\text{II}})} \quad (3.3.11b)$$

Für die Berechnung des Drehmomentes interessiert natürlich das maximale Drehmoment. Hierfür liefert das CAS einen Ausdruck, der nicht sonderlich praktikabel zu handhaben ist. Der Übersichtlichkeit halber werden deswegen einige Konstanten eingeführt.

$$a = \frac{l_I}{l_{\text{II}}}$$

$$b = \sqrt{\frac{81 a^2 - 18 \sqrt{3} \pi a^2 + 27 \sqrt{3} \pi a + 7 \pi^2 a^2 - 7 \pi^2 a + 7 \pi^2}{(4a+1)^2}}$$

Somit lauten die Ergebnisse wie folgt:

$$\varphi_{0, \text{max}} = -\arctan\left(\frac{-18a + 2\sqrt{3}\pi a - 3\sqrt{3}\pi}{\pi(4a+1)}\right)$$

$$i(\varphi_{0, \text{max}}, l_I, l_{\text{II}}) = \frac{1}{2\pi(4a+1)b} \left[ 324a^2 - 72\sqrt{3}\pi a^2 + 99\sqrt{3}\pi a + 28\pi^2 a^2 - 23\pi^2 a + 24\pi^2 \right. \\ \left. - 8 \sin\left(-\varphi_{0, \text{max}} + \frac{\pi}{6}\right) \pi b a - 2 \sin\left(-\varphi_{0, \text{max}} + \frac{\pi}{6}\right) \pi b - 8\pi b a - 2\pi b \right]$$

Mithilfe dieser Werte und unter Berücksichtigung der Windungsdichte folgt für die maximale Kraft:

$$\hat{F}_{\text{res}} = i(\varphi_{0,\text{max}}, l_{\text{I}}, l_{\text{II}}) \frac{3}{2\pi} w_{\text{S}} \cdot I \cdot \hat{B}_{\text{p}} \cdot l_{\text{II}} \quad (3.3.12)$$

Das maximale Drehmoment ergibt sich dann durch Multiplikation mit dem Wicklungsdurchmesser.

$$\hat{M} = \hat{F}_{\text{res}} \cdot r_{\text{S}} \quad (3.3.13a)$$

$$= i(\varphi_{0,\text{max}}, l_{\text{I}}, l_{\text{II}}) \frac{3}{2\pi} w_{\text{S}} \cdot I \cdot \hat{B}_{\text{p}} \cdot l_{\text{II}} \cdot r_{\text{S}} \quad (3.3.13b)$$

# 4 Ein zahlenmäßiger Entwurfsgang anhand einer Beispielmachine

Um einen tieferen Einblick in den Entwurf des Maschinentyps zu gewinnen, soll nun beispielhaft die Maschinenberechnung für eine ausgewählte Maschine gezeigt werden. Es handelt sich um die Maschine des Typs 40/80-120. Die Nomenklatur der Maschinenbezeichnung ist einfach gehalten. Am Beginn der Bezeichnung befindet sich der Außendurchmesser in Millimeter, gefolgt durch die Eisenlänge in Millimeter – beide Werte sind durch einen Schrägstrich voneinander getrennt. Gefolgt werden diese Werte von der Nennspannung der Maschine in Volt, welche durch einen Bindestrich abgesetzt ist.

Die Ergebnisse für die anderen Maschinen der Reihe finden sich übersichtlich im Anhang in den Tabellen B.1 bis B.11.

## 4.1 Vorgaben

Beim praktischen Entwurf werden zu allererst einige Rahmenparameter vorgegeben. So soll die Maschine auf einen bestimmten Außendurchmesser angepasst werden. Innerhalb dieses Maßes werden mehrere Kombinationen aus Maschinenlänge und Nennspannung berechnet.

Darüber hinaus steht die Nenndrehzahl und die Polpaarzahl fest, außerdem wurde in Voruntersuchungen festgestellt, dass eine Stromdichte von  $100 \text{ A/mm}^2$  realisierbar ist.

Für die im Folgenden zu entwerfende Maschine lauten diese Werte:

$$d_a = 40 \text{ mm}$$

$$l_{\text{Fe}} = 80 \text{ mm}$$

$$U_N = 120 \text{ V}$$

$$n_N = 10\,000 \text{ min}^{-1}$$

$$p = 1$$

Um den nutzbaren Bauraum zu kennen, muss auch noch festgelegt werden, welche Werte für die Gehäusestärke und den Abstand zwischen magnetischem Rückschluss und dem Gehäuse gelten.

$$h_{\text{Gehäuse}} = 1 \text{ mm}$$

$$b_{\text{Rücken-Gehäuse}} = 1 \text{ mm}$$

## 4.2 Maschinenentwurf

### 4.2.1 Magnetkreisentwurf

#### Läufer

Die Iteration für den Läufer ergibt einen Durchmesser von 20 mm.

$$d_L = 20 \text{ mm} \quad (4.2.1)$$

Das FEM-Modell liefert hierfür folgende Amplitude der Hauptwelleninduktion, wodurch sich die mittlere Induktion ergibt.

$$\hat{B}_p = 1,334 \text{ T} \quad (4.2.2)$$

$$B_m = \frac{2}{\pi} \hat{B}_p = 0,849 \text{ T} \quad (4.2.3)$$

#### Ständer

Als nächstes sollen die Abmessungen des Rückschlusses bestimmt werden. Hierzu ist die Kenntnis der ideellen Länge und der Polteilung notwendig. Der Luftspalt soll später 1 mm betragen.

$$l_i = l_{\text{Fe}} + 2\delta = 82,00 \text{ mm} \quad (4.2.4)$$

$$d_w = d_L + 2\frac{\delta}{2} = 22,00 \text{ mm} \quad (4.2.5)$$

$$\tau_p = \frac{\pi \cdot d_w}{2p} = 32,99 \text{ mm} \quad (4.2.6)$$

Der Fluss im Rücken der Maschine ergibt sich schließlich zu:

$$\Phi_r = \frac{B_m \cdot \tau_p \cdot l_i}{2} = 1,1484 \text{ mVs} \quad (4.2.7)$$

Nun kann die notwendige Rückenlänge berechnet werden. Hierfür wird die zulässige Rückeninduktion vorgegeben. Da es sich um einen massiven Rückschluss handelt, kann der Eisenfüllfaktor in der Rechnung unberücksichtigt bleiben.

$$B_{r,\text{zul}} = 2 \text{ T} \quad (4.2.8)$$

$$h_r = \frac{\Phi_r}{l_{\text{Fe}} \cdot B_{r,\text{zul}}} = 7,18 \text{ mm} \quad (4.2.9)$$

Dieser Wert wird zur technischen Umsetzung schließlich gerundet, woraus sich eine andere Rückeninduktion ableitet.

$$h_{r, \text{techn}} = 7,00 \text{ mm} \quad (4.2.10)$$

$$B_{r, \text{techn}} = \frac{\Phi_r}{h_{r, \text{techn}} \cdot l_{\text{Fe}}} = 2,051 \text{ T} \quad (4.2.11)$$

### 4.2.2 Abmessungen

Für die Iteration des Läuferdurchmessers ist die Berechnung des Außendurchmessers unerlässlich – an dieser Stelle jedoch eigentlich deplatziert, da das Ergebnis bereits bekannt ist.

$$d_a = d_L + 2\delta + 2h_{r, \text{techn}} + 2h_{\text{Gehäuse}} + 2b_{\text{Rücken-Gehäuse}} = 40 \text{ mm} \quad (4.2.12)$$

Nach Gleichung (3.1.12) ergibt sich die Länge des geschrägten Maschinenteils aus der Polteilung und dem Schrägungswinkel. Die Länge des ungeschrägten Maschinenteils ist die Differenz aus der Eisenlänge und den Längen der beiden geschrägten Teile.

$$l_I = l_{\text{III}} = \frac{\tau_p}{2} = 16,49 \text{ mm} \quad (4.2.13)$$

$$l_{\text{II}} = l_{\text{Fe}} - 2 \frac{\tau_p}{2} = 47,01 \text{ mm} \quad (4.2.14)$$

Schließlich wird noch die Leiterlänge in den geschrägten Maschinenteilen berechnet und im Anschluss daran die Länge einer Spulenseite.

$$l_{I, \text{Leiter}} = \frac{l_I}{\sin\left(\frac{\pi}{4}\right)} = 23,33 \text{ mm} \quad (4.2.15)$$

$$l_{\text{Spulenseite}} = 2l_{I, \text{Leiter}} + l_{\text{II}} = 93,66 \text{ mm} \quad (4.2.16)$$

### 4.2.3 Entwurf der Wicklung

#### Windungszahl je Strang

Nun soll am praktischen Beispiel gezeigt werden, dass das Finden der Windungszahl je Strang nach dem im Abschnitt 3.1.3, S. 10 angegebenen Schema funktioniert. Dazu muss erst noch der spezifische elektrische Widerstand der Silberleitpaste berechnet werden. Hierfür wird wieder die bekannte Beispielfolie aus genanntem Abschnitt herangezogen. Aus deren Geometrie und Abmessungen ergibt sich der spezifische elektrische Widerstand zu:

$$\rho = \frac{R_{\text{mess}} \cdot A}{2 \cdot w \cdot 2l} = 0,250 \frac{\Omega \text{mm}^2}{\text{m}} \quad (4.2.17)$$

Nun soll die Windungszahl auf konventionelle Art und Weise ermittelt werden. Hierzu sind neben den bereits bekannten Werten für die Nenndrehzahl und den Hauptfluss, noch der Wicklungsfaktor und die Gegenurspannung vonnöten. Letztere lässt sich auf die in genanntem Abschnitt beschriebene Weise bestimmen.

$$E_h = 0,25 \cdot U_N = 30 \text{ V} \quad (4.2.18)$$

Der genaue Wicklungsfaktor wird im weiteren Verlauf des Rechenganges noch berechnet – dieser wurde aber schon einmal an einer Wicklung ermittelt, die denselben prinzipiellen Aufbau aufweist. Somit kann erst einmal die Windungszahl konservativ bestimmt werden.

$$\Phi_h = 2 \cdot \Phi_r = 2,30 \text{ mVs} \quad (4.2.19)$$

$$\xi_{p,I} = 0,698 \quad (4.2.20)$$

$$\xi_{p,II} = 0,729 \quad (4.2.21)$$

$$w_S(\xi_{p,I}) = \frac{\sqrt{2} E_h}{n_N \cdot \xi_{p,I} \cdot \Phi_h} = 158,8 \quad (4.2.22)$$

$$w_S(\xi_{p,II}) = \frac{\sqrt{2} E_h}{n_N \cdot \xi_{p,II} \cdot \Phi_h} = 152,0 \quad (4.2.23)$$

Da diese Werte – wie sich gleich zeigen wird – nicht realisierbar sind, müssen sich auch keine Gedanken gemacht werden, welcher Wicklungsfaktor nun korrekterweise eingesetzt werden muss. Wird nun die Spannung bestimmt, die nötig ist einen Strom durch die eben berechnete Zahl von Leitern zu treiben, der die gewünschte Stromdichte von  $100 \text{ A/mm}^2$  zur Folge hat, ergibt sich ein unpraktikabler Wert.

$$U_{\text{Str}}(w_S = 159) = w_S \cdot \rho \cdot 2 l_{\text{Spulenseite}} \cdot S = 740 \text{ V} \quad (4.2.24)$$

Damit ist klar, dass dieser Weg nicht beschritten werden kann. Die Windungszahl muss auf eine geeignetere Weise bestimmt werden. Dies soll also wie im Abschnitt 3.1.3, S. 10 beschrieben, geschehen. Über diesen Ansatz ergibt sich die Windungszahl in erster Näherung:

$$w_{S,\text{Näherung}} = \frac{U_{\text{Str}}}{\rho \cdot 2 l_{\text{Spulenseite}} \cdot S} = 15 \quad (4.2.25)$$

Der erste Blick offenbart sofort, dass hier ein eklatanter Unterschied zwischen den Ergebnissen der verschiedenen Rechenwege besteht. Nun ist das eben errechnete Ergebnis aber noch nicht der Endwert, da noch die Verringerung der Leiterbreiten in den geschrägten Maschinenteilen berücksichtigt werden muss.

Dies bedingt eine Iteration über die Stromdichten, die im Abschnitt 4.3.1, S. 36 später bestimmt wird. Letztlich ergibt sich die erforderliche Windungszahl je Strang zu:

$$w_S = 18 \quad (4.2.26)$$

### Geometrische Abmessungen

Jetzt können die Abmessungen für die Leiterbahnen berechnet werden. Hierzu muss zuerst der Umfang der Luftspaltwicklung bestimmt werden, da dieser der Breite der Folie entspricht, die mit der Wicklung bedruckt wird.

$$u = \pi \cdot \left( d_L + 2 \frac{\delta}{2} \right) = 65,97 \text{ mm} \quad (4.2.27)$$

Wie im Teilstück 2.3 bereits erläutert, sind einige Druckparameter durch das Sieb und die Paste vorgegeben. So stehen die Abstände zwischen den einzelnen Leiterbahnen, sowie die maximale Höhe der Leiterbahnen fest.

$$b_{\text{Steg}} = 100 \text{ } \mu\text{m} \quad (4.2.28)$$

$$h_{\text{Leiter}} = 14 \text{ } \mu\text{m} \quad (4.2.29)$$

Zur Berechnung der gesuchten Größen muss noch bestimmt werden, um wie viel größer die projizierte Breite der Stege im geschrägten Maschinenteil im Vergleich zum minimal möglichen Wert ist. Die Maschinen werden mit einem Schrägungswinkel von  $45^\circ$  gebaut.

$$\Delta b = \frac{b_{\text{Steg}}}{\cos(\alpha)} - b_{\text{Steg}} = 41 \text{ } \mu\text{m} \quad (4.2.30)$$

Im Folgenden ergibt sich die projizierte Leiterbreite, womit sich die praktisch auszuführenden Leiterbreiten berechnen lassen.

$$b_{\text{proj}} = \frac{u - 3 \cdot w_S (b_{\text{Steg}} + \Delta b)}{3 \cdot w_S} = 1080 \text{ } \mu\text{m} \quad (4.2.31)$$

$$b_{\text{Leiter, I}} = b_{\text{proj}} \cdot \cos(\alpha) = 759 \text{ } \mu\text{m} \quad (4.2.32)$$

$$b_{\text{Leiter, II}} = b_{\text{proj}} + \Delta b = 1120 \text{ } \mu\text{m} \quad (4.2.33)$$

Hieraus ergeben sich nun die Leiterquerschnitte.

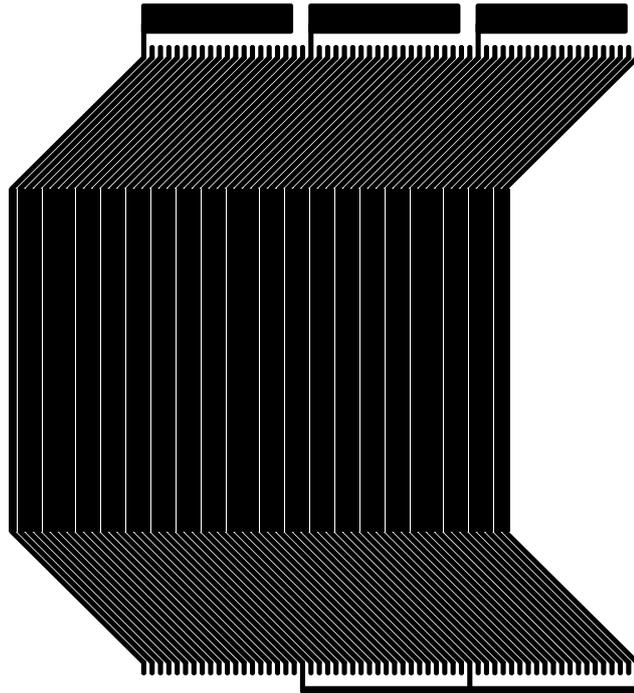
$$A_{\text{Leiter, I}} = b_{\text{Leiter, I}} \cdot h_{\text{Leiter}} = 10600 \text{ } \mu\text{m}^2 \quad (4.2.34)$$

$$A_{\text{Leiter, II}} = b_{\text{Leiter, II}} \cdot h_{\text{Leiter}} = 15700 \text{ } \mu\text{m}^2 \quad (4.2.35)$$

Mit all diesen Werten kann schließlich die Wicklungsstruktur konstruiert werden, die später dann auf ein Sieb übertragen und gedruckt wird. Diese Struktur ist für die Beispielmachine in Abbildung 4.1 gezeigt.

### Wicklungsfaktor

In den theoretischen Überlegungen wurde bereits dargelegt, dass der Nutschlitz- oder Breitenfaktor nach JORDAN und LAX für die in dieser Arbeit ausgeführten Maschinen vernachlässigbar ist. Somit gilt es nur den Spulenwicklungs-, den Gruppenwicklungs- und den Schrägungsfaktor zu bestimmen.

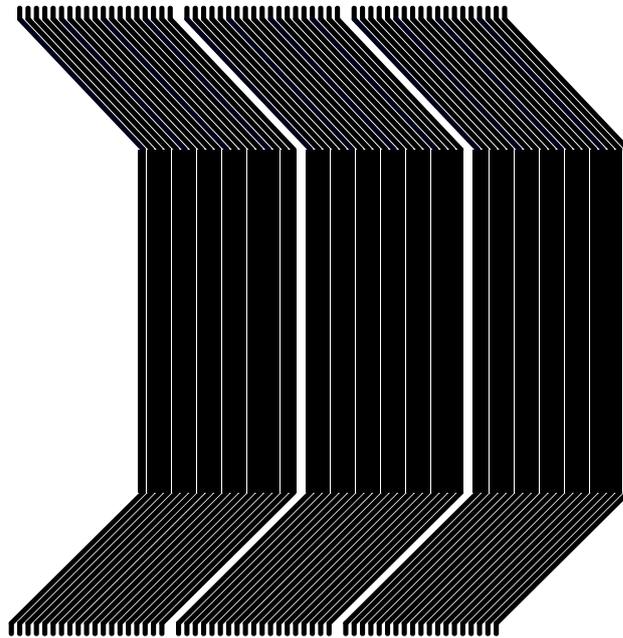


(a) Erste Schicht: Hinleiter (Silberpaste)



(b) Zweite Schicht: Dielektrikum

Abbildung 4.1: Zu druckende Wicklungsstruktur der Maschine 40/80-120



(c) Dritte Schicht: Rückleiter (Silberpaste)



(d) Vierte Schicht: Schutzschicht (Dielektrikum)

Abbildung 4.1: Zu druckende Wicklungsstruktur der Maschine 40/80-120

Die Ordnungszahl der Drehwelle ist gleich der Polpaarzahl der Maschine.

$$v' = p = 1 \quad (4.2.36)$$

Der Spulenwicklungsfaktor ergibt sich dann mit der Spulenweite

$$y = w_S + 1 = 19 \quad (4.2.37)$$

und dem Durchmesserschritt

$$y_\varnothing = \frac{3 \cdot w_S}{2} = 28. \quad (4.2.38)$$

$$\xi_{sp} = \sin\left(\frac{v' \cdot y \cdot \pi}{p \cdot y_\varnothing \cdot 2}\right) = 0,896 \quad (4.2.39)$$

Zur Berechnung des Gruppenwicklungsfaktors wird zusätzlich die virtuelle Lochzahl benötigt.

$$q = w_S = 18 \quad (4.2.40)$$

$$\xi_{gr} = \frac{\sin\left(\frac{v' \cdot q \cdot \pi}{p \cdot y_\varnothing \cdot 2}\right)}{q \cdot \sin\left(\frac{v' \cdot 1 \cdot \pi}{p \cdot y_\varnothing \cdot 2}\right)} = 0,828 \quad (4.2.41)$$

Die beiden Maschinenteile I und III weisen eine Schrägstellung der Leiter von

$$N_{schr} = 9 \quad (4.2.42)$$

Nuten gegenüber den insgesamt

$$N_\varnothing = 3 \cdot w_S = 54 \quad (4.2.43)$$

auf den gesamten Umfang verteilten Nuten auf. Der Schrägungskoeffizient berechnet sich zu:

$$\beta = \frac{N_{schr} \cdot 2\pi \cdot p}{N_\varnothing} = 1,047 \quad (4.2.44)$$

Schließlich ergibt sich der Schrägungsfaktor.

$$\xi_{schr,I} = \xi_{schr,III} = \frac{\sin\left(\frac{\beta}{2}\right)}{\frac{\beta}{2}} = 0,954 \quad (4.2.45)$$

Dementsprechend lassen sich die Wicklungsfaktoren für die einzelnen Maschinenteile bestimmen.

$$\xi_{p,I} = \xi_{p,III} = \xi_b \cdot \xi_{sp} \cdot \xi_{gr} \cdot \xi_{schr,I} = 0,708 \quad (4.2.46)$$

$$\xi_{p,II} = \xi_b \cdot \xi_{sp} \cdot \xi_{gr} \cdot \xi_{schr,II} = 0,742 \quad (4.2.47)$$

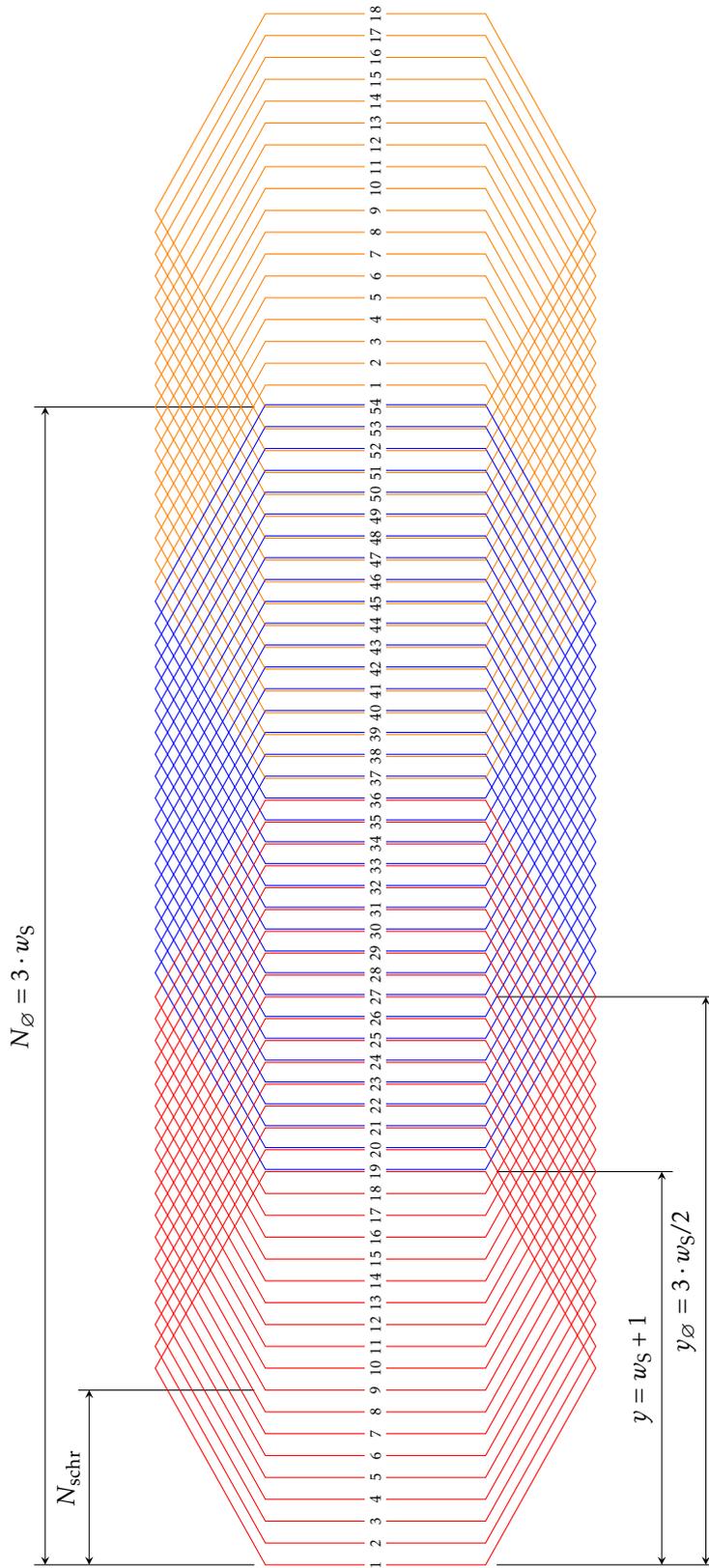


Abbildung 4.2: Prinzipielles Wicklungsschema für  $w_s = 18$  und  $p = 1$

## 4.3 Nachrechnung

### 4.3.1 OHMscher Widerstand, Nennstrom und Stromdichte

Für die Iteration der Windungszahl je Strang (siehe Seite 29 ff.) müssen die Stromdichten in den unterschiedlichen Leiterabschnitten bestimmt werden. Da durch die geschrägte und ungeschrägte Maschine der selbe Strom fließt, wird die Stromdichte durch den Leiterquerschnitt der geschrägten Teilmaschine beschränkt.

Zur Bestimmung der Stromdichten muss aber zunächst der Nennstrom der Maschine bekannt sein, welcher sich aus Strangspannung und -widerstand ergibt. Der OHMsche Widerstand setzt sich aus den Leiterabschnitten der drei Maschinenteile zusammen. Da aber die beiden geschrägten Teilmaschinen denselben Leiterquerschnitt aufweisen, kann die Rechnung vereinfacht werden.

$$R_{\text{Str}} = 2 \cdot w_S \cdot \rho \left( \frac{2l_{\text{Leiter,I}}}{A_{\text{Leiter,I}}} + \frac{l_{\text{II}}}{A_{\text{Leiter,II}}} \right) = 66,2 \Omega \quad (4.3.1)$$

Der Nennstrom ist schließlich laut OHmschem Gesetz das Verhältnis von Strangspannung zu Strangwiderstand – die Strangspannung kann natürlich auch über die verkettete Nennspannung ausgedrückt werden.

$$I_N = \frac{U_N}{\sqrt{3} R_{\text{Str}}} = 1,04 \text{ A} \quad (4.3.2)$$

In der Folge ergeben sich die Nennstromdichten.

$$s_{N,I} = \frac{I_N}{A_{\text{Leiter,I}}} = 97,5 \frac{\text{A}}{\text{mm}^2} \quad (4.3.3)$$

$$s_{N,II} = \frac{I_N}{A_{\text{Leiter,II}}} = 66,4 \frac{\text{A}}{\text{mm}^2} \quad (4.3.4)$$

Meist klappt es nicht, dass die Stromdichte in den geschrägten Maschinenteilen genau dem gewünschten Wert von  $100 \text{ A/mm}^2$  entspricht, hier muss dann mit Fingerspitzengefühl die geeignetere Windungszahl gewählt werden. Im vorliegenden Fall wurde sich zu Gunsten des Wirkungsgrades für eine geringere Stromdichte entschieden.

### 4.3.2 Magnetische Spannungsabfälle

Zuerst soll der magnetische Spannungsabfall im Rückschluss der Maschine ermittelt werden. Dieser muss den halben Luftspaltfluss tragen, da dieser sich aufteilt und somit durch jedes Joch des Rückens jeweils nur noch die Hälfte fließt. Dementsprechend stellt sich die Induktion ein, mit deren Hilfe die Feldstärke im betreffenden Gebiet dargestellt wird. Die Induktion im Rückschluss wurde im Abschnitt 4.2.1, S. 28 festgelegt. Die relative Permeabilität des Rückenmaterials kann aus dessen  $B$ - $H$ -Kennlinie entnommen werden. Diese wurde im Auftrag

Tabelle 4.1: Permeabilität des für den magnetischen Rückschluss verwendeten Stahls

$B$ in T	$H$ in A/cm	$\mu_r$
1,28	727,70	1399,7
1,73	5035,76	273,4
1,86	10668,83	138,7
1,95	16516,17	94,0
2,01	22459,36	71,2
2,05	28475,85	57,3
2,11	40666,70	41,3
2,14	52970,31	32,1
2,23	114702,65	15,5
2,39	238274,46	8,0

am Institut für Festkörper- und Werkstoffforschung Dresden gemessen. Aus den dabei ermittelten Werten lässt sich die Permeabilität über die Beziehung

$$\mu_r = \frac{B}{\mu_0 \cdot H} \quad (4.3.5)$$

berechnen. Die berechneten Werte für die Permeabilität finden sich in Tabelle 4.1, die Kennlinie in Diagramm 4.1.

Der magnetische Spannungsabfall über den Ständerrücken ergibt sich zu:

$$V_r = \frac{1}{\mu} B_{r, \text{techn}} \left( \frac{u}{2} + 2 \frac{h_{r, \text{techn}}}{2} \right) = 53,17 \text{ A} \quad (4.3.6)$$

Für den magnetischen Spannungsabfall über dem Luftspalt zeichnet sich der Luftspaltfluss verantwortlich, dessen Induktion wurde mithilfe des FEM-Modells bestimmt.

$$V_\delta = \frac{2 \hat{B}_p}{\pi \mu_0} \delta = 675,70 \text{ A} \quad (4.3.7)$$

Schließlich ergibt sich die Durchflutung als Summe der magnetischen Spannungsabfälle.

$$\Theta = \sum V = V_r + 2 \cdot V_\delta = 2396,04 \text{ A} \quad (4.3.8)$$

### 4.3.3 Induktivität und Reaktanz

Der kleinste Abstand zwischen zwei sich gleichenden Punkten im Wicklungsschema setzt sich aus Leiterbreite und Stegbreite zusammen.

$$b_{LL} = b_{\text{Leiter, I}} + b_{\text{Steg}} = 859 \mu\text{m} \quad (4.3.9)$$

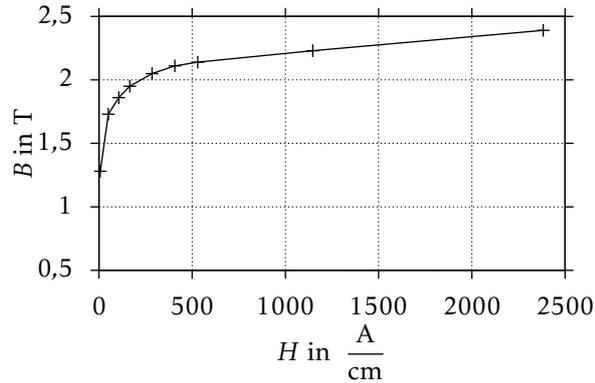


Diagramm 4.1: B-H-Kennlinie des verwendeten Stahls für den magnetischen Rückschluss

Somit lassen sich die magnetisch wirksamen Flächen der Teilmaschinen ermitteln.

$$A_{\text{mag,I}} = \frac{1}{w_S} \sum_{n_{w_S}=1}^{w_S} \left( \frac{\tau_p l_I}{2} - (n_{w_S} - 1)(w_S - n_{w_S}) b_{LL}^2 \right) = 239 \text{ mm}^2 \quad (4.3.10)$$

$$A_{\text{mag,II}} = \frac{1}{w_S} \sum_{n_{w_S}=1}^{w_S} (\tau_p l_{II}) = 1550 \text{ mm}^2 \quad (4.3.11)$$

Daraufhin kann die einsträngige Hauptinduktivität der Maschine bestimmt werden.

$$L_{h,\text{Str}} = \frac{\mu_0}{\delta_{\text{mag}}} \frac{2}{\pi} \frac{4}{\pi} \frac{w_S^2}{2p} (A_{\text{mag,II}} \xi_{p,II}^2 + 2 \cdot A_{\text{mag,I}} \xi_{p,I}^2) = 16,39 \text{ } \mu\text{H} \quad (4.3.12)$$

Dabei haben die Teilmaschinen folgende Anteile an der Gesamtinduktivität:

$$L_{h,\text{Str,I}} = 3,6 \text{ } \mu\text{H} \quad (4.3.13)$$

$$L_{h,\text{Str,II}} = 12,8 \text{ } \mu\text{H} \quad (4.3.14)$$

Schließlich muss noch die dreisträngige Hauptinduktivität für das Ersatzschaltbild bestimmt werden, ebenso die Reaktanz.

$$L_h = \frac{3}{2} L_{h,\text{Str}} = 24,6 \text{ } \mu\text{H} \quad (4.3.15)$$

$$X_h = 2\pi n_N L_h = 25,7 \text{ m}\Omega \quad (4.3.16)$$

Letztlich muss noch beachtet werden, dass die Synchronmaschine mit zwei parallelgeschalteten Folien ausgeführt wird.

$$L_{h,ges} = \frac{L_h}{2} = 12,3 \mu\text{H} \quad (4.3.17)$$

$$X_{h,ges} = 2\pi n_N L_{h,ges} = 12,9 \text{ m}\Omega \quad (4.3.18)$$

#### 4.3.4 Kraft, Drehmoment und mechanische Leistung

Zur Berechnung der Kraft auf die stromdurchflossenen Leiter der gedruckten Wicklung wird das Verhältnis der Längen der Teilmaschinen benötigt. Für die vorliegende Maschine, deren Länge nur etwa doppelt so groß ist wie ihr Durchmesser, ist dieses Verhältnis eher klein – schließlich wird mit zunehmender Maschinenlänge nur noch der mittlere Teil größer, da die Länge der geschrägten Teile durch den Schrägswinkel und die Polteilung feststeht.

$$a = \frac{l_I}{l_{II}} = 0,351 \quad (4.3.19)$$

Wird nun dieses Längenverhältnis, neben Windungszahl, Nennstrom, Induktion und Länge des mittleren Maschinenteils, in die Gleichung für die maximale Kraft zwischen Permanentmagnet und Folie eingesetzt, so ergeben sich:

$$\hat{F}_{res} = i(a) \frac{3}{2\pi} w_S I_N \hat{B}_p l_{II} = 3,05 \text{ N} \quad (4.3.20)$$

Multipliziert mit dem Radius der Wicklung ergibt sich das Drehmoment.

$$M_N = \hat{F}_{res} \frac{d_L + 2 \frac{\delta}{2}}{2} = 33,3 \text{ mNm} \quad (4.3.21)$$

Dieser Wert stellt das Drehmoment dar, welches von einer bedruckten Folie bewirkt wird. Die reale Maschine soll aber zur Drehmomentmaximierung mit zwei identischen Folien bestückt werden.

$$M_{N,ges} = 2 \cdot M_N = 64,6 \text{ mNm} \quad (4.3.22)$$

Die Nenndrehzahl für die Maschine soll bei  $10\,000 \text{ min}^{-1}$  liegen. Damit ergibt sich für die abgegebene Leistung pro Folie:

$$P_{mech} = 2\pi n_N M_N = 33,6 \text{ W} \quad (4.3.23)$$

Die mechanische Nennleistung für die praktisch ausgeführte Maschine ist also

$$P_{mech,ges} = 2 \cdot P_{mech} = 67,8 \text{ W} \quad (4.3.24)$$

### 4.3.5 Verluste, Wirkungsgrad und Leistungsfaktor

Mit Kenntnis des OHMSchen Widerstandes und des Nennstroms lassen sich die Leitungsverluste bestimmen.

$$P_{\text{Ohm, ges}} = 3 \cdot \frac{R_{\text{Str}}}{2} \cdot (2 \cdot I_{\text{N}})^2 = 435,3 \text{ W} \quad (4.3.25)$$

Dieser Wert ist, verglichen mit konventionellen Maschinen mit Kupferwicklungen, bezogen auf die mechanische Leistung natürlich enorm hoch. Dies liegt an der kleinen Querschnittsfläche und dem fünfzehnmal so großen spezifischen elektrischen Widerstand verglichen mit Kupfer.

Dies spiegelt sich selbstverständlich im Wirkungsgrad wider. Zur Berechnung dessen, muss erst noch der  $\cos \varphi$  der Maschine berechnet werden. Er stellt das Verhältnis von elektrischer Wirk- zu elektrischer Scheinleistung her.

$$P_{\text{el, ges}} = P_{\text{mech, ges}} + P_{\text{Ohm, ges}} = 503,1 \text{ W} \quad (4.3.26)$$

$$\cos \varphi = \frac{P_{\text{el, ges}}}{2 \cdot 3 \cdot U_{\text{N}} I_{\text{N}}} = 0,666 \quad (4.3.27)$$

Der Phasenwinkel zwischen Spannung und Strom beträgt demnach

$$\varphi = \arccos(\cos \varphi) = 48,2^\circ \quad (4.3.28)$$

Somit kann der Wirkungsgrad errechnet werden.

$$\eta = \frac{P_{\text{mech, ges}}}{2 \cdot 3 \cdot U_{\text{N}} I_{\text{N}} \cos \varphi} = 0,134 \quad (4.3.29)$$

Die Wärmeverlustleistung bezogen auf die Folienoberfläche beträgt:

$$\psi = \frac{P_{\text{Ohm, ges}}}{\pi \left( d_{\text{L}} + 2 \frac{\delta}{2} \right) l_{\text{Fe}}} = 82,2 \frac{\text{mW}}{\text{mm}^2} \quad (4.3.30)$$

Diese Werte sind jedoch mit Vorsicht zu genießen, da sie vor allem aufgrund der Unsicherheit bezüglich des spezifischen elektrischen Widerstandes (siehe Abschnitt 2.3, S. 4) nur als erster Überschlag gelten können und in weiteren Messungen verifiziert werden müssen.

### 4.3.6 Ausnutzungsfaktor, Strombelag und Charakteristisches Produkt

Um weitere Vergleichswerte mit anderen Maschinen zu erhalten, soll noch der Ausnutzungsfaktor oder ESSONscher Faktor der Maschine bestimmt werden. Dieser kann wieder für eine Folie und für die praktische Ausführung mit zwei Folien

angegeben werden.

$$C_{\text{mech}} = \frac{P_{\text{mech}}}{(d_L + 2 \cdot \delta)^2 l_i n_N} = 0,085 \frac{\text{kW min}}{\text{m}^3} \quad (4.3.31)$$

$$C_{\text{mech, ges}} = \frac{P_{\text{mech, ges}}}{(d_L + 2 \cdot \delta)^2 l_i n_N} = 0,169 \frac{\text{kW min}}{\text{m}^3} \quad (4.3.32)$$

Ein weiterer Faktor um elektrische Maschinen untereinander vergleichen zu können, ist das Charakteristische Produkt. Es stellt das Produkt aus Strombelag und -dichte dar. Hierfür muss erst noch der Strombelag berechnet werden.

$$A_S = \frac{2 \cdot w_S \cdot 3 \cdot I_N}{\pi (d_L + 2 \cdot \delta)} = 1,630 \frac{\text{A}}{\text{mm}} \quad (4.3.33)$$

$$A_{S, \text{ges}} = \frac{2 \cdot w_S \cdot 3 \cdot 2 \cdot I_N}{\pi (d_L + 2 \cdot \delta)} = 3,270 \frac{\text{A}}{\text{mm}} \quad (4.3.34)$$

Somit ergeben sich die vier Charakteristischen Produkte der Maschine. Für den geschrägten und den ungeschrägten Teil, jeweils mit einer und mit zwei Folien.

$$AS_I = A_S \cdot S_{N, I} = 159 \frac{\text{A}}{\text{mm}} \frac{\text{A}}{\text{mm}^2} \quad (4.3.35)$$

$$AS_{I, \text{ges}} = A_{S, \text{ges}} \cdot S_{N, I} = 319 \frac{\text{A}}{\text{mm}} \frac{\text{A}}{\text{mm}^2} \quad (4.3.36)$$

$$AS_{II} = A_S \cdot S_{N, II} = 109 \frac{\text{A}}{\text{mm}} \frac{\text{A}}{\text{mm}^2} \quad (4.3.37)$$

$$AS_{II, \text{ges}} = A_{S, \text{ges}} \cdot S_{N, II} = 218 \frac{\text{A}}{\text{mm}} \frac{\text{A}}{\text{mm}^2} \quad (4.3.38)$$

# 5 Die Maschinenreihe im Detail

Nachdem in den vorangegangenen Kapiteln die Grundsteine für den Entwurfsgang gelegt wurden, sollen nun Ergebnisse für die praktische Umsetzung ermittelt werden. Hierzu wurde eine komplette Maschinenreihe nach der RENARD-Serie R10 mit elf verschiedenen Außendurchmessern von 10 mm bis 100 mm berechnet. Für jeden Außendurchmesser wurden mehrere Maschinenlängen – zwischen dem ein- bis fünffachen des Durchmessers – und Nennspannungen bestimmt. Aus diesen Ergebnismatrizen können dann die geeignetsten Maschinen ausgewählt werden.

Sämtliche Ergebnisse der Maschinenreihe sind tabellarisch im Anhang zu finden.

## 5.1 Die Maschinenreihe im Vergleich

Charakteristisch für eine elektrische Maschine ist deren mechanische Leistung. Anhand dieses Wertes soll ein Vergleich der einzelnen berechneten Maschinen untereinander erfolgen.

Im Allgemeinen sind die Trends zu erkennen, dass mit zunehmender Maschinenlänge und mit fallender Nennspannung die mechanische Leistung zunimmt. Dies ist plausibel und leicht zu erklären. Die Gleichung für die LORENTZ-Kraft lautet:

$$\vec{F}_L = (\vec{I} \times \vec{B}) \cdot l \quad (5.1.1)$$

Es tritt also deutlich hervor, dass ein längerer stromdurchflossener Leiter eine größere Kraft erzeugt, genau wie es bei diesen Maschinen der Fall ist. Verstärkt wird dieser Effekt dadurch, dass mit zunehmender Maschinenlänge nur der gerade Anteil zunimmt, weil der ungerade durch Schrägungswinkel und Umfang, die konstant bleiben, festgelegt ist. Dass der gerade Maschinenteil einen höheren Anteil zum Drehmoment leistet als der ungerade, wirkt sich zunehmend positiv aus.

Die Beobachtung, dass die Leistung mit zunehmender Spannung abnimmt, lässt sich damit begründen, dass hierbei meist auch die Stromstärke sinkt, die ja proportional zur LORENTZ-Kraft ist. Diese wiederum wird meist kleiner, weil bei einer höheren Nennspannung der Widerstand der Leiterbahnen steigen muss, um den Spannungsabfall aufbringen zu können.

Diese Zusammenhänge sind in der folgenden Tabelle kurz dargestellt.

	$w_S$	$R_{Str}$ in $\Omega$	$I_N$ in A	$\hat{F}_{res}$ in N
40/80-48	7	9,36	2,96	3,36
40/80-60	9	15,7	2,20	3,21
40/80-120	18	66,2	1,04	3,05
40/80-230	34	263	0,51	2,80
40/40-60	14	25,5	1,36	1,15
40/80-60	9	15,7	2,20	3,21
40/120-60	7	12,6	2,74	5,21
40/160-60	5	8,04	4,30	8,20
40/200-60	5	9,71	3,56	8,72

In der Tabelle sind die oben aufgeführten Zusammenhänge klar nachvollziehbar. Im ersten Teil der Tabelle nimmt der Strom und somit die resultierende Kraft mit steigender Spannung deutlich ab – dies kann auch die größere Windungszahl nicht ausgleichen. Der zweite Teil der Tabelle verdeutlicht, dass mit wachsender Maschinenlänge die Kraft zunimmt – bei dieser Betrachtung darf allerdings weder Strom, noch Windungszahl unbeachtet bleiben. So verdoppelt sich zwar der Strom zwischen den Maschinen 40/40-60 und 40/120-60, allerdings halbiert sich auch die Windungszahl. Somit bleibt das Produkt aus Strom und Windungszahl gleich, die Zunahme der resultierenden Kraft muss also auf die größere Maschinenlänge zurückzuführen sein. Noch besser ist dies bei den Maschinen 40/160-60 und 40/200-60 zu beobachten. Hier bleibt die Windungszahl dieselbe, der Strom sinkt sogar, dennoch nimmt die Kraft zu.

Hin und wieder werden diese allgemeinen Trends durchbrochen. Dies liegt dann meist daran, dass durch die Wahl der Windungszahl die Stromdichte überdurchschnittlich weit herabgesetzt wurde. Wenn sich beispielsweise bei der Wahl der einen Windungszahl eine Stromdichte knapp über der zulässigen Grenze von  $100 \text{ A/mm}^2$  ergibt, so kann es sein, dass bei der Wahl der kleineren Windungszahl die Stromdichte weit unter die Grenze fällt. Dies tritt vorwiegend bei kleinen Windungszahlen auf, bei der die Verringerung um eins einen besonders großen Einfluss hat. So bewirkt zum Beispiel die Änderung der Windungszahl um eins bei der Maschine 40/200-48 Folgendes:

$w_S$	$R_{Str}$ in $\Omega$	$I_N$ in A	$\hat{F}_{res}$ in N
3	3,44	8,05	11,8
4	6,18	4,48	8,74

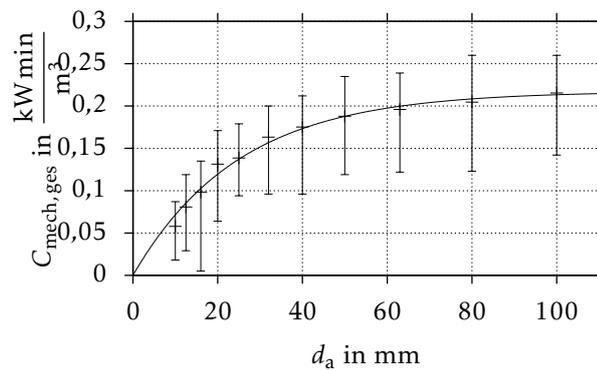


Diagramm 5.1: Die Ausnutzungsfaktoren der entworfenen Maschinenreihe

Diese kleine Änderung der Windungszahl hat also einen ungemeinen Einfluss auf die abgegebene Leistung der Maschine. Deswegen kann nicht allgemein gesagt werden, dass es am günstigsten ist eine lange Maschine mit geringer Nennspannung zu konstruieren, die optimale Maschine kann auch abseits dieser Maßgaben liegen.

Weiterhin auffällig sind die recht hohen Werte für das charakteristische Produkt  $AS$  der Maschinen. Werden  $100 \dots 350 \text{ A/mm}^2$  – „je nach Maschinengröße und Intensität der Kühlung“ – in [5, S. 581] als zulässige elektrische Beanspruchung genannt, so liefert der Entwurfsgang zum Teil Werte über dieser Grenze, meist aber Werte im oberen Teil des Bereiches. Und dies obwohl aufgrund der passiven Luftkühlung eher geringere Werte zu avisieren wären. Allerdings kann dies bis zu ausführlichen praktischen Tests als zulässig gelten, da aufgrund der flachen Struktur der Wicklung, welche ein günstiges Verhältnis von stromführender zu wärmeabgebender Oberfläche bietet, eine sehr gute Abfuhr der Verlustleistung möglich ist. Dies spiegelt sich auch in der Annahme für die Stromdichte wider. Werden bei Kupferwicklungen Werte von  $3 \dots 7 \text{ A/mm}^2$  angesetzt, können für siebgedruckte Wicklungen bis zu  $100 \text{ A/mm}^2$  verantwortet werden.

Demgegenüber steht ein vergleichsweise kleiner Strombelag, der eine Größenordnung unterhalb des empfohlenen Bereichs liegt. Für Synchronmaschinen mit indirekter Luftkühlung gelten  $30 \dots 120 \text{ A/mm}$  als Richtwert [5], während im Entwurf lediglich  $2 \dots 4 \text{ A/mm}$  erreicht werden. Bedingt durch den hohen spezifischen elektrischen Widerstand, sind solche Ergebnisse wenig überraschend, da der Strombelag proportional zur Stromstärke ist. Das grundsätzliche Entwurfskriterium, dass die Wahl einer hohen Stromstärke einen kleinen Strombelag bedingt, wird hier also weiterhin erfüllt.

Eine vergleichende Aussage über den Ausnutzungsfaktor oder ESSONschen Faktor zu treffen, gestaltet sich äußerst schwierig, da [5] nur Werte für Maschinen

mit einer Leistung pro Polpaar von größer als 10 kVA angibt. Für Asynchronmaschinen beginnt das Diagramm schon bei 100 W, hierfür ist ein Bereich von etwa  $0,9 \dots 1,9 \text{ kW min/m}^3$  angegeben. Darüber hinaus ist ein Diagramm für Gleichstrommaschinen zu finden, dies gibt für einen Ankerdurchmesser von 10 cm einen Bereich von  $1 \dots 1,7 \text{ kW min/m}^3$  an.

Dabei handelt es sich zwar um andere Maschinentypen, es kann aber davon ausgegangen werden, dass die Werte für Synchronmaschinen eher über diesen liegen. Da die entworfenen Maschinen dieser Arbeit aber allesamt deutlich unter den vorher genannten Bereichen liegen, muss konstatiert werden, dass die Ausnutzungsfaktoren im Vergleich mit konventionellen Wicklungen schlechter abschneiden. Dies ist wenig verwunderlich, da die entworfenen Maschinen im Vergleich zu Maschinen gleicher Größe, aber mit Kupferwicklungen, eine geringere Leistungsabgabe aufweisen (siehe hierzu Abschnitt 5.3, S. 48).

In Diagramm 5.1 ist der Ausnutzungsfaktor abhängig vom Maschinendurchmesser gezeigt, der Graph stellt hierbei den Mittelwert dar. Zusätzlich ist die Spanne vom kleinsten bis zum größten Wert innerhalb desselben Durchmessers abgebildet. Grundsätzlich steigt der Ausnutzungsfaktor mit zunehmendem Maschinendurchmesser, dieser Anstieg flacht aber ab, sodass der Trend einer Logarithmus-Funktion gleicht.

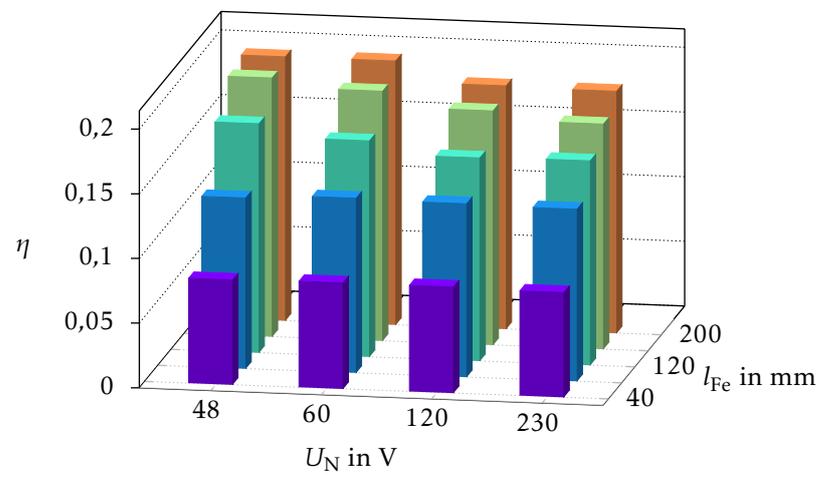
## 5.2 Außendurchmesser 40 mm

Wie in den vorangegangenen Abschnitten bereits besprochen wurde, haben Maschinenlänge und Nennspannung einen großen Einfluss auf die Nennleistung, allerdings ist auch der indirekte Einfluss der Stromdichte ein entscheidender Parameter. Dies soll nun noch einmal kurz anhand der Maschinen mit 40 mm Außendurchmesser dargestellt werden.

Im Diagramm 5.2b ist deutlich zu erkennen, dass die resultierende Kraft mit größerer Maschinenlänge immer weiter steigt. Der Einfluss der Nennspannung ist im Vergleich hierzu eher gering. Gleichzeitig wird bei einem Vergleich mit den zugehörigen Stromdichten, dargestellt in Diagramm 5.2c, deutlich, dass diese in Zusammenhang mit der Ausnutzung der Maschine steht.

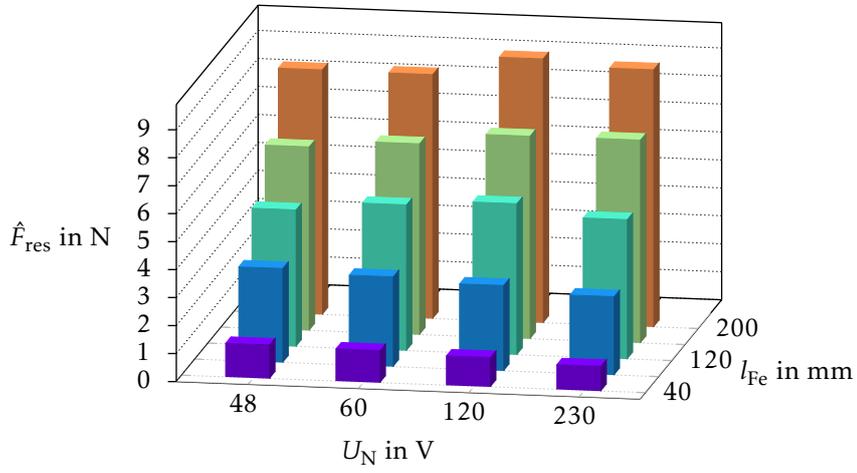
Im Wettbewerb zu einer hohen Leistung, zu erreichen mit großen Stromdichten, steht der Wirkungsgrad der Maschine. Soll dieser groß sein, um unnötige Verluste zu vermeiden, müssen Einschränkungen in der mechanischen Leistung hingenommen werden.

Diagramm 5.2a stellt den Wirkungsgrad für diese Maschinen dar. Auffällig ist, dass die Maschinen, die einen vergleichsweise hohen Wirkungsgrad aufweisen, eine niedrige Stromdichte und abgegebene Leistung zeigen. Dies untermauert den zuvor beschriebenen Zusammenhang. Natürlich kann von der Stromdichte nicht auf die Leistung in absoluten Zahlen geschlossen werden, sondern lediglich auf eine Tendenz zu Maschinen mit gleichen Abmessungen.

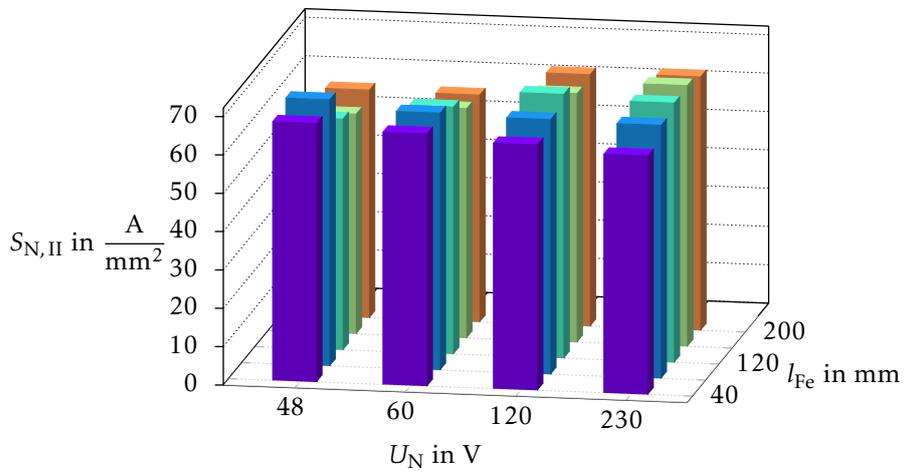


(a) Wirkungsgrad in Abhängigkeit von Maschinenlänge und Nennspannung

Diagramm 5.2: Die Maschinen mit dem Außendurchmesser von 40 mm im Detail



(b) Resultierende Kraft in Abhängigkeit von Maschinenlänge und Nennspannung



(c) Stromdichte in Abhängigkeit von Maschinenlänge und Nennspannung

Diagramm 5.2: Die Maschinen mit dem Außendurchmesser von 40 mm im Detail

### 5.3 Ein Vergleich mit am Markt erhältlichen Maschinen

Es folgt ein kurzer Vergleich mit am Markt erhältlichen Motoren. Hierzu wurden Motoren der renommierten Hersteller FAULHABER und MAXON MOTOR herausgesucht [1], [13]. Bei den beiden Modellen handelt es sich um bürstenlose Gleichstrommotoren mit elektronischer Kommutierung.

Ein kurzer Vergleich der wichtigsten Größen (siehe Tabelle 5.1) zeigt, dass die in dieser Arbeit berechnete Maschine nur rund ein Drittel der marktüblichen Leistung abgibt und der Wirkungsgrad nicht einmal ein Sechstel dessen erreicht, was die Servomotoren mit den herkömmlichen Kupferwicklungen leisten.

Diese Werte spiegeln die Erwartungen recht gut wider. Angesichts des spezifischen elektrischen Widerstandes, der mit dem Fünfzehnfachen von Kupfer angesetzt wurde, ist es sogar überraschend, dass der Wirkungsgrad doch vergleichsweise groß wird. Mechanische Leistung und Drehmoment liegen mit einem Drittel der Vergleichsmaschinen in einem Bereich, der den Einsatz der Maschinen in Bezug auf die Anschaffungskosten vielleicht sogar rechtfertigte, wenn nicht die stark erhöhten Betriebskosten, hervorgerufen durch den schlechten Wirkungsgrad, wären. Abschließend muss auch hier festgestellt werden, dass diese Art des Wicklungsaufbaus ein großes Potenzial bietet. Bereits jetzt in einem so frühen Stadium der Entwicklung können recht passable Ergebnisse vorgezeigt werden, deren jetzige Makel durch intensivierte Forschung und Entwicklung auf diesem Gebiet so weit ausgemerzt werden können, dass in gar nicht allzu langer Zeit, technisch, wie wirtschaftlich praktikable Lösungen bereitstehen werden.

Tabelle 5.1: Vergleich der Maschinendaten mit anderen Elektronikmotoren

	40/80-120	FAULHABER 4490 048 B	MAXON MOTOR EC 40 393025
Außendurchmesser			
$d_a$ in mm	40	44	40
Maschinenlänge			
in mm	80	90	80
Nennspannung			
$U_N$ in V	120	48	48
Nennstrom			
$I_N$ in A	1,04	4,58 <sup>a</sup>	3,67
Leerlaufdrehzahl			
$n_0$ in $\text{min}^{-1}$	10 000	11 000	9840
Nenndrehmoment			
$M_N$ in mNm	64,6	191	164
mechanische Leistung			
$P_{\text{mech}}$ in W	67,8	200	170
Anschl.widerst. Phase–Phase			
in $\Omega$		0,720	0,806
Anschlussinduk. Phase–Phase			
in $\mu\text{H}$		236	337
Wirkungsgrad			
$\eta$	0,134	0,86	0,89

<sup>a</sup>nicht direkt im Datenblatt angegeben, ermittelt aus Produkt von Stromkonstante und Nenndrehmoment

# 6 Fertigung und Maschinenpraxis ausgewählter Modelle

## 6.1 Vorbereitungen

Ursprünglich war vorgesehen, dass im Rahmen dieser Diplomarbeit drei der entworfenen Maschinen gefertigt werden, um die theoretische Vorarbeit überprüfen und Schlüsse für die weitere Entwicklung auf diesem Gebiet ziehen zu können. Leider war dem Autor die Umsetzung nicht vergönnt, da die Permanentmagnete für den Läufer nicht zu beschaffen waren. Maßanfertigungen wurden aufgrund der Mindermenge abgelehnt oder waren finanziell nicht zu stemmen. Auch der Versuch aus vorkonfektionierter Ware mittels Erodieren passende Magnete herzustellen, scheiterte an den genannten Problemen.

Da jedoch bis zuletzt versucht wurde dieses Problem zu lösen, wurden auch sämtliche Vorarbeiten für die Fertigung geleistet. So sind stellvertretend im Anhang die Maßskizzen für Läufer, Rückschluss, Lagerschild und Gehäuse für die zu fertigende Maschine des Typs 16/64-24 zu finden. Für diese Maschine sollte eine Welle mit einem Durchmesser von 1,5 mm verwendet werden. Weiterhin war angedacht Maschinen des Typs 40/80-120 und 40/160-120 zu fertigen – hierfür war ein Wellendurchmesser von 3,0 mm vorgesehen. Die passenden Kugellager für die Maschinen wären folgendem Typs gewesen:

$$\begin{array}{llll} 16/64-24 & d_i = 1,5 \text{ mm} & d_a = 4,0 \text{ mm} & b = 2,0 \text{ mm} \\ 40/xx-120 & d_i = 3,0 \text{ mm} & d_a = 7,0 \text{ mm} & b = 3,0 \text{ mm} \end{array}$$

## 6.2 Die gedruckten Wicklungen

Obwohl es leider nicht gelang die Maschinen im Ganzen zu fertigen, so wurden doch wenigstens einige Wicklungen gedruckt um hieran Messungen vornehmen und Erfahrungen gewinnen zu können. So wurden die Wicklungen für die Maschinen 16/32-24, 16/64-24, 40/80-120 und 40/160-120 wie in den vorangegangenen Kapiteln entworfen, gedruckt. Hierbei musste beim ersten Versuch leider festgestellt werden, dass dies mit der an der Universität zur Verfügung stehenden Technik so nicht umsetzbar ist.

Daraufhin wurden neue Siebe angefertigt, mit angepassten Parametern. So beträgt der neue Abstand  $b_{\text{Steg}}$  der Leiter zueinander jetzt 210  $\mu\text{m}$  bis 220  $\mu\text{m}$ . Die neuen Werte sind in der Tabelle 6.1 aufgeführt. Trotz dieser Verdopplung des Abstandes wurden die neuen Wicklungen nicht perfekt, es treten immer wieder, für das Auge zum Teil nicht erkennbare, Kurzschlüsse auf. Bei dem verwendeten Sieb handelt es sich um ein Exemplar aus dem Gewebe PET 1500 der Firma Sefar mit 61 Fäden pro Zentimeter und einer Fadendicke von 64  $\mu\text{m}$ . Bespannt wurde das Sieb mit einem Spannwinkel von  $22,5^\circ$  und es weist eine Gewebespannung von zirka  $16 \text{ N/cm}^2$  auf. Gedruckt wurde mit der Silberleitpaste DuPont 5029 auf das Substrat DuPont Teijin Melinex 401 – einer 50  $\mu\text{m}$  starken PET-Folie. Als Dielektrikum wurde DuPont 5018G verwendet. Unter diesen Voraussetzungen wurde sogar eine Schichtdicke von 15  $\mu\text{m}$  erreicht.

Da sich der Termin zum Druck der Wicklungen mit dem neuen Sieb recht nahe am Abgabetermin der Diplomarbeit befand, gelang es auch nicht mehr einen zweiten Versuch zu unternehmen, um einwandfreie Wicklungen herzustellen. An einigen Exemplaren konnten aber Messungen vorgenommen werden, allerdings war es eben nicht möglich einen Strangwiderstand zu messen, da an jeder der gedruckten Wicklungen mindestens ein Kurzschluss vorlag. Für die Maschine 16/32-24 mit den feinsten Strukturen war weiterhin nur eine einzige Wicklung kein kompletter Ausschuss, und bei dieser Wicklung war der dritte Strang bereits an den Wickelköpfchen kurzgeschlossen, so dass nur an zwei Strängen gemessen werden konnte. Ein ähnliches Problem bestand bei der Maschine 40/160-120 obwohl hier vergleichsweise grobe Strukturen vorliegen, wahrscheinlich wurden einfach nicht die geeigneten Druckparameter gefunden. Jedenfalls waren hier auch nur Messungen an einer Schicht Rückleiter möglich.

Stattdessen wurden die Messungen an den einzelnen Spulenseiten durchgeführt, was ebenso gute Ergebnisse liefert. Aus all den Messwerten der einzelnen Spulenseiten einer Wicklung wird dann der arithmetische Mittelwert gebildet und über eine einfache Verhältnisgleichung der spezifische elektrische Widerstand der vermessenen Leiter gebildet.

$$\frac{\rho_{\text{mess}}}{\rho_{\text{Rechnung}}} = \frac{\bar{R}_{\text{mess}}}{R_{\text{Spulenseite}}} \quad (6.2.1)$$

Die Ergebnisse liefern einen deutlich größeren spezifischen elektrischen Widerstand als angenommen, sie bestätigen aber auch, dass dieser von der gedruckten Geometrie abhängt. In Tabelle 6.2 finden sich die Mess- und zugehörigen Rechenwerte wieder. Der so ermittelte spezifische elektrische Widerstand reicht vom dreifachen bis über vierfachen des angenommenen Wertes. Er nimmt für die zunehmenden Leiterbreiten der Maschinen 16/xx-24 und 40/80-120 ab, ist bei der deutlich größeren Leiterbreite der Maschine 40/160-120 dann aber wieder größer. Es liegt also nahe, dass es ein Minimum, das heißt ein Maximum der Leitfähigkeit gibt – auf diese Leiterbreite sollten die Maschinen also ausgelegt werden.

Tabelle 6.1: Ausgewählte berechnete Werte der angepassten Wicklungen

	16/32-24	16/64-24	40/80-120	40/160-120
$w_S$	11	6	20	12
$b_{\text{Steg}}$ in $\mu\text{m}$	210	220	210	220
$b_{\text{Leiter,I}}$ in $\mu\text{m}$	230	588	570	1080
$b_{\text{Leiter,II}}$ in $\mu\text{m}$	230	915	890	1610
$R_{\text{Str}}$ in $\Omega$	42,8	16,7	89,6	48,7
$R_{\text{Spulenseite}}$ in $\Omega$	1,96	1,39	2,24	2,03

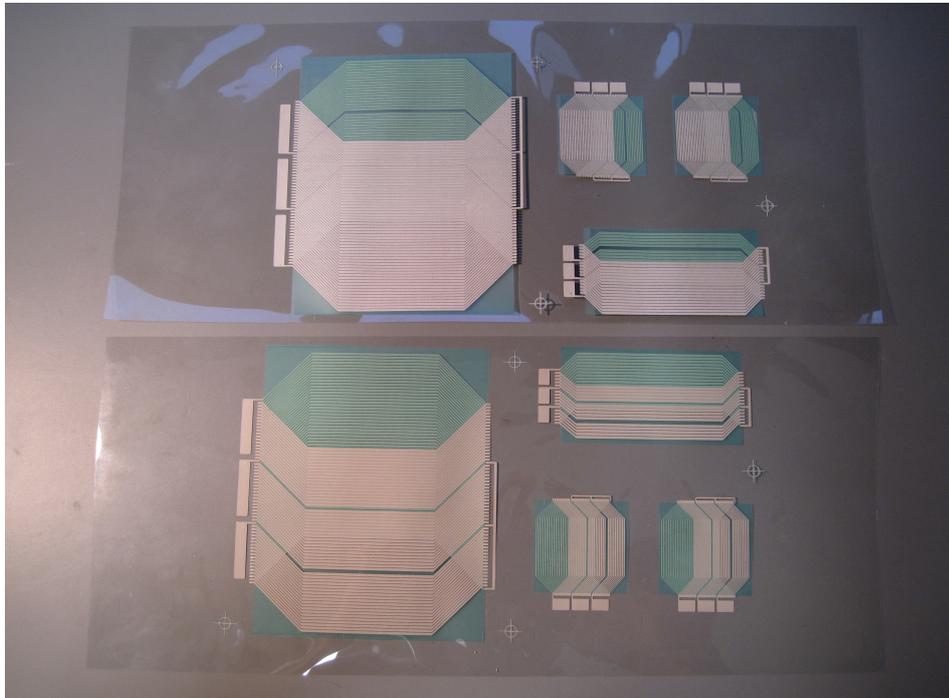


Abbildung 6.1: Fotografie der gedruckten Wicklungen (im Bild: 16/32-24, 16/64-24 und 40/80-120)

Tabelle 6.2: Gemessene OHMsche Widerstände jeweils einer Spulenseite und daraus abgeleitete spezifische elektrische Widerstände

<b>16/32-24</b> – OHMscher Widerstand gemessen an einer Spulenseite in $\Omega$										
1. Strang	— <sup>a</sup>	10,0	9,5	9,5	9,5	8,8	8,7	8,7	8,7	9,0
2. Strang	9,8	9,5	9,6	4,7	9,6	9,8	9,5	9,6	9,6	9,8
3. Strang	kurzgeschlossen									
$\bar{R}_{\text{mess}}$	= 8,871 $\Omega$				$\rho_{\text{mess}}$ = 1,103 $\Omega \text{mm}^2/\text{m}$					
<b>16/64-24</b> – OHMscher Widerstand gemessen an einer Spulenseite in $\Omega$										
1. Strang	10,4	4,0	3,9	3,8	3,9	4,8				
2. Strang	5,2	3,9	3,9	3,9	3,9	2,8				
3. Strang	5,7	3,8	3,9	3,9	3,8	4,2				
$\bar{R}_{\text{mess}}$	= 4,428 $\Omega$				$\rho_{\text{mess}}$ = 0,796 $\Omega \text{mm}^2/\text{m}$					
<b>40/80-120</b> – OHMscher Widerstand gemessen an einer Spulenseite in $\Omega$										
1. Strang	12,3	5,5	8,6	9,3	8,1	7,9	5,9	10,2	10,0	9,6
	9,3	7,5	7,1	5,9	8,5	9,6	10,0	9,5	9,4	8,5
2. Strang	8,6	8,9	6,8	6,7	8,5	9,3	5,6	6,0	9,4	6,6
	9,3	8,3	5,9	8,4	9,3	9,9	10,2	9,8	9,5	10,5
3. Strang	16,4	9,6	10,6	10,4	7,3	7,8	7,8	5,0	8,1	8,0
	6,9	10,2	10,1	10,5	10,5	10,3	9,3	9,5	9,6	8,2
$\bar{R}_{\text{mess}}$	= 8,772 $\Omega$				$\rho_{\text{mess}}$ = 0,979 $\Omega \text{mm}^2/\text{m}$					
<b>40/160-120</b> – OHMscher Widerstand gemessen an einer Spulenseite in $\Omega$										
1. Strang	7,9	7,8	7,8	7,8	7,7	7,7	7,8	7,7	7,8	8,0
2. Strang	7,9	7,8	7,8	7,7	7,9	7,8	7,8	7,9	7,8	8,1
3. Strang	8,0	7,8	7,8	7,8	7,8	7,9	7,8	7,7	7,9	8,1
$\bar{R}_{\text{mess}}$	= 7,836 $\Omega$				$\rho_{\text{mess}}$ = 0,965 $\Omega \text{mm}^2/\text{m}$					

<sup>a</sup>Leiter unterbrochen

### 6.3 Ein praktischer Ausblick

Wäre es zu einer Fertigung der Maschinen gekommen, hätte voraussichtlich festgestellt werden können, dass die Maschinen bei Blockbestromung schlecht oder gar nicht anlaufen. Diese Erwartung begründet sich dadurch, dass keinerlei Vorkehrungen getroffen wurden um die Ausrichtung des Läufers zu bestimmen. Hierfür wäre eine Einrichtung zur Lagedekodierung erforderlich.

Perspektivisch bietet es sich bei dieser Art der Maschine an beim Druck gleich HALL-Sensoren zu berücksichtigen. Auf diese Weise wäre es problemlos möglich die Lage des Rotors zu bestimmen und dem Betrieb als Elektronikmotor stünde nichts im Wege. Es ist jedoch auch jede andere Art von Lagedekodierung möglich, ein Absolut- oder Inkrementalwertgeber auf optischer Basis ist genauso denkbar, wie ein Resolver.

Für einen Probelauf der Maschinen hätte vorerst aber sicherlich ein kleiner Anstoß gereicht um die Maschinen zum Anlaufen zu bewegen.

Bei ersten Messungen und Versuchen an probeweise gedruckten Wicklungen wurde das Phänomen beobachtet, dass nach gewisser Zeit der Widerstand der Wicklung sinkt. Konkret bedeutet dies, dass die Einwirkung von Hitze einen positiven Einfluss auf den spezifischen elektrischen Widerstand der gedruckten Paste hat. So sank der spezifische elektrische Widerstand auf die Hälfte bis zu einem Drittel des anfangs gemessenen Wertes.

Der Grund für dieses Verhalten liegt wahrscheinlich im Ausgasen der organischen Zusätze der Druckpaste, eine Mischung aus Silberpartikeln, Lösungsmittel und Bindemitteln. Durch das Einwirken des Stromes wird der Leiter erhitzt und die organischen Lösungsmittel verdampfen, zurück bleibt immer reineres Silber, wodurch sich der spezifische elektrische Widerstand verbessert.

### 6.4 Potenzial und Ausblick – Steigerung der Effizienz

Da die Werte für die mechanische Leistung und den Wirkungsgrad momentan noch verbesserungswürdig sind, wurde nach Wegen gesucht, wie diese optimiert werden können.

Zum einen besteht die Möglichkeit die Wicklungen einmalig noch stärker zu erhitzen, um auch die letzten Überreste der organischen Verbindungen zu verflüchtigen. Hierzu ist jedoch ein hitzebeständiges Trägermaterial notwendig, auf das die Wicklungen gedruckt werden. Denn im Moment ist für das Ausglühen die Kunststoffolie limitierend, die nicht über 150 °C erhitzt werden kann, da sie dann beginnt zu schrumpfen, was die Leiterbahnen zerstören kann und außerdem die spätere Verarbeitung unmöglich macht. Denkbar ist die Verwendung von Keramik als Substrat, welches in der Lage ist höhere Temperaturen zu verwinden, hier sind bis zu 300K Übertemperatur möglich.

Ein weiterer Ansatzpunkt, der ein großes Potenzial bietet, ist die Galvanisie-

rung der gedruckten Wicklung. Hierbei werden die Leiterbahnen mit Kupfer überzogen, was zu einer enormen Verbesserung der Leitfähigkeit führt. Wird davon ausgegangen, dass die vorhandenen Leiter aus Silberpaste mit einer  $10\ \mu\text{m}$  starken Schicht Kupfer überzogen werden, könnten Verbesserungen erreicht werden, die am Beispiel der bereits besprochenen Maschine 40/80-120 dargestellt werden sollen.

Der Wicklungswiderstand der entworfenen Maschine liegt derzeit bei  $66,17\ \Omega$ , der OHMsche Widerstand einer Kupferschicht böte einen Widerstand von  $6,24\ \Omega$ . Dieser Wert ergibt sich bei gegebener Geometrie unter Voraussetzung einer rechteckigen Querschnittsfläche.

$$h_{\text{Cu}} = 10\ \mu\text{m} \quad (6.4.1)$$

$$R_{\text{Cu}} = 2 \cdot w_{\text{S}} \cdot \rho \left( \frac{2 l_{\text{I, Leiter}}}{b_{\text{Leiter, I}} \cdot h_{\text{Cu}}} + \frac{l_{\text{II}}}{b_{\text{Leiter, II}} \cdot h_{\text{Cu}}} \right) = 6,24\ \Omega \quad (6.4.2)$$

Die beiden Leiterschichten können als parallel geschaltete Widerstände betrachtet werden, womit sich schließlich der Gesamtwiderstand der galvanisierten Wicklung ergibt:

$$R_{\text{galv}} = \frac{R_{\text{Str}} \cdot R_{\text{Cu}}}{R_{\text{Str}} + R_{\text{Cu}}} = 5,70\ \Omega \quad (6.4.3)$$

Der Wicklungswiderstand betrüge also nicht mal mehr ein Zehntel des alten Wertes. Dieselbe Maschine müsste nun natürlich mit einem Zehntel der Ausgangsspannung betrieben werden, da sonst viel zu große Stromdichten aufträten. Die so gespeiste Maschine würde eine mechanische Leistung von  $78,85\ \text{W}$  und einen Wirkungsgrad von  $0,608$  liefern. Es resultierten also etwa  $11\ \text{W}$  mehr Leistung – ein Plus von rund einem Sechstel –, der Wirkungsgrad würde aber mehr als vervierfacht.

## 7 Zusammenfassung

Die Technik, elektrische Maschinen mit siebgedruckten Wicklungen auszustatten statt mit schweren, komplizierten und teuren Kupferwicklungen, bietet ein großes Potenzial, das in Zukunft erst noch richtig ausgeschöpft werden kann. Die ersten Ergebnisse theoretischer, aber auch praktischer Natur lassen schon erahnen was hier an Vorteilen, aber auch noch an Arbeit steckt. Mit dieser Wicklungstechnologie könnten die Probleme der konventionellen Kupferwicklungen – zumindest auf einigen Einsatzgebieten – bald der Vergangenheit angehören, so entfällt das aufwendige Wickeln und es kann Bauraum eingespart werden, was natürlich positive Auswirkungen auf Ressourcen und Preis hat.

Momentan muss aber konstatiert werden, dass diese Vorteile von den vorläufigen Unzulänglichkeiten aufgewogen werden. So ist der Wirkungsgrad zur Zeit noch recht gering, so dass selbst etwaige geringe Anschaffungskosten von den hohen Betriebskosten aufgefressen würden. Darüber hinaus ist der Ausnutzungsfaktor derzeit noch klein, die Maschinen fallen also deutlich größer aus als konventionell ausgeführte derselben Leistungsklasse.

Diese Einschränkungen sind allerdings alle auf die verwendete Silberleitpaste und deren vergleichsweise geringe spezifische elektrische Leitfähigkeit zurückzuführen. Dieses Problem wurde bereits erkannt und nach möglichen Lösungen gesucht. Einige von diesen Lösungen sind problemlos umzusetzen, bedürfen aber noch näherer Untersuchungen. So steht als nächster Schritt an, die gedruckten Leiterbahnen mittels Galvanisieren mit einer dünnen Kupferschicht zu überziehen, was einen deutlichen Fortschritt in der Verringerung des OHMschen Widerstandes bringen wird. Außerdem soll sich ein eher zufällig beobachteter Effekt zunutze gemacht werden, so verbessert sich der Widerstand unter Einwirkung von Wärme, da sich derart höchstwahrscheinlich die organischen Lösemittel verflüchtigen. Im Weiteren Verlauf der Forschung auf diesem Gebiet dürften auch noch weitere Verbesserungen bei der verwendeten Druckpaste anstehen, da die bisher verwendete Paste für Anwendungen mit geringen elektrischen Leistungen gedacht ist. Siebgedruckte elektrische Schaltungen hoher Leistungsklassen stecken momentan noch in den Kinderschuhen.

Die ausführliche Betrachtung des Entwurfsganges in dieser Arbeit beförderte einige Besonderheiten an den Tag. So ist die bekannte Art zur Ermittlung der Windungszahl je Strang hier nicht anwendbar, außerdem hält der Aufbau der

Maschine aus geschrägtem und ungeschrägtem Teil einige Hürden bereit.

Damit der Entwurfsgang noch technisch einwandfrei wird, ist es notwendig ein thermisches Modell für den Maschinentyp aufzustellen um die Bestimmung der Windungszahl auf ein festes Fundament zu stellen, da der in dieser Arbeit gewählte Weg noch etwas unsauber ist. Darüber hinaus müssen noch verlässliche Werte für den spezifischen elektrischen Widerstand gefunden werden, hierzu ist aber eine ausführliche Untersuchung unumgänglich, da dieser von einer Unmenge Faktoren abhängt. Diese Untersuchungen sind mit Blick auf das vermutete Maximum der elektrischen Leitfähigkeit bei einer bestimmten Leiterbreite natürlich auch ein Schlüssel zur Effizienzsteigerung.

Da es im Rahmen dieser Arbeit leider nicht gelungen ist zum Abschluss tatsächlich auch einige der entworfenen Maschinen zu fertigen um hieran einige Messungen und Versuche vorzunehmen, ist ein nächster wichtiger Schritt für dieses Thema, genau dies einmal zu tun. Auf diese Weise könnten die gefunden Algorithmen und angestellten Berechnungen überprüft und verifiziert werden.



# Anhang

# A Das FEM-Modell zur Ermittlung der Läuferinduktion

Für die Auslegung der Maschine ist die Kenntnis der Luftspaltinduktion notwendig, hieraus wird der Hauptfluss berechnet, welcher die Induktion im Rückschluss der Maschine bestimmt – ein Kriterium für die magnetische Belastung der Maschine.

Die Bestimmung der Luftspaltinduktion geschieht rechnergestützt über ein FEM-Modell mithilfe des freien Programms FEMM<sup>2</sup>. Dies wird unter Zuhilfenahme eines Skriptes umgesetzt, welches von MATLAB<sup>3</sup> heraus FEMM steuert und die benötigten Werte wieder zurückgibt.

Das FEM-Modell an sich beruht auf einem zeitunabhängigen, planaren, magnetischen Problem. Es wird eine Kreisfläche mit dem Durchmesser  $d_L$  definiert, der magnetisiertes Neodym-Eisen-Bor zugewiesen wird. Um diese Fläche herum ist ein 1 mm starker Luftspalt angeordnet, daran schließt sich ein Gebiet mit weichmagnetischem Material an, in diesem Falle eine Eisenkobalt-Legierung. Dessen Ausmaße werden ausreichend groß gewählt, damit keine Sättigung auftritt, womit eine Rückwirkung auf den Luftspalt ausgeschlossen wird.

Mithilfe des Skriptes wird nun für eine Reihe Läuferdurchmesser diese Anordnung erstellt und gelöst. Im Postprozessor wird dann die Induktion über den Luftspalt ermittelt und deren größter Wert gespeichert. Dieser Wert wird dann im Maschinenentwurf als  $\hat{B}_p$  verwendet.

Für die Zuweisung des Materials wird für Luft der Standardeintrag aus FEMM verwendet. Für die Eisenkobalt-Legierung wird eine neue Materialkennlinie angelegt (siehe Tabelle A.1), ebenso wird das Läufermaterial neu hinzugefügt. Die Neodym-Eisen-Bor-Legierung für den Läufer wird wie folgt modelliert:

relative Permeabilität	1,049
Koerzitivfeldstärke	1 114 000 A/m
elektrische Leitfähigkeit	0,667 MS/m

<sup>2</sup>Programm: FINITE ELEMENT METHOD MAGNETICS Version 4.2, <http://www.femm.info/wiki/HomePage>, besucht am 14. 09. 2011

<sup>3</sup>Toolbox OCTAVEFEMM, <http://www.femm.info/wiki/OctaveFEMM>, besucht am 14. 09. 2011

Tabelle A.1: Werte zur  $B$ - $H$ -Kennlinie der im FEM-Modell verwendeten Eisenkobalt-Legierung

$B$ in T	$H$ in A/m	Fortsetzung	
0,290	81	2,054	1290
0,438	106	2,118	2209
0,589	136	2,147	3233
0,796	179	2,177	4549
1,020	233	2,206	7297
1,198	283	2,241	11554
1,398	344	2,271	18294
1,559	402	2,289	25071
1,783	536	2,312	36690
1,898	670	2,341	62037
1,990	893		

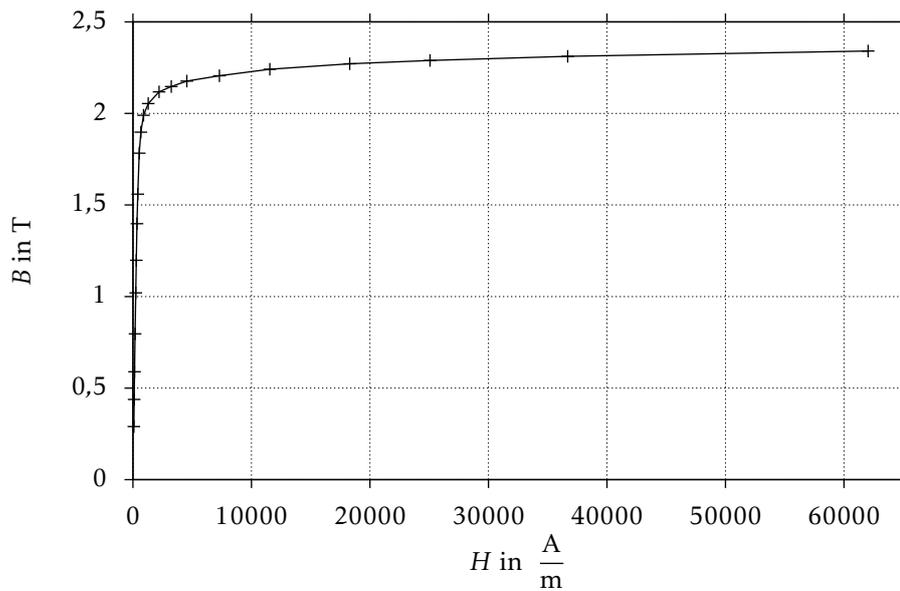
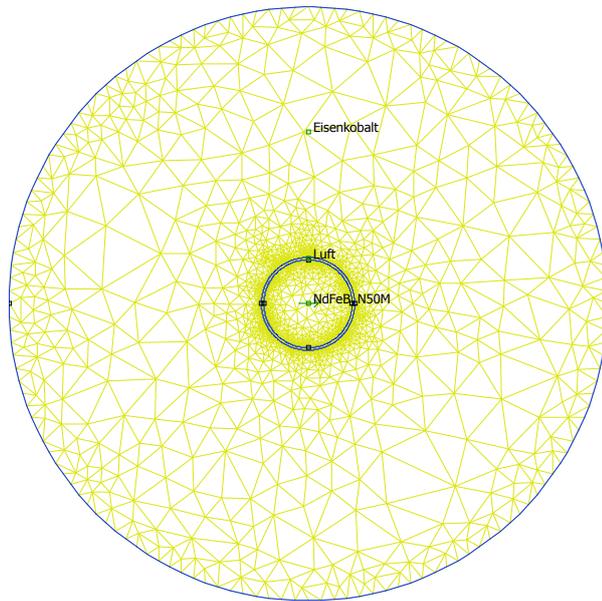
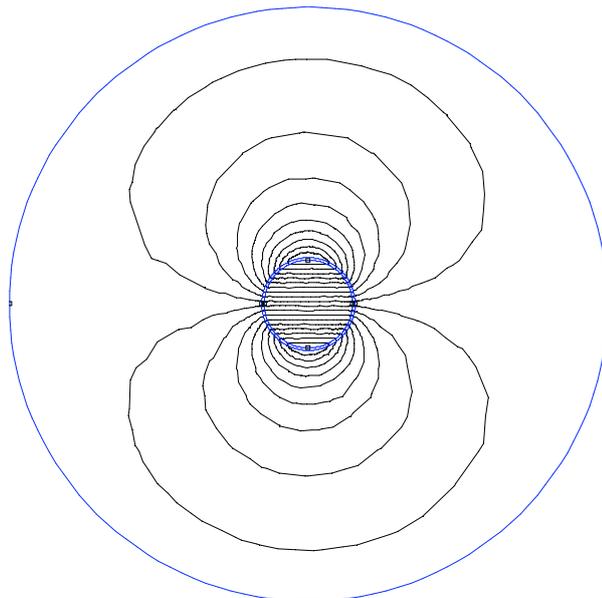


Diagramm A.1:  $B$ - $H$ -Kennlinie der im FEM-Modell verwendeten Eisenkobalt-Legierung



(a) Präprozessor



(b) Postprozessor

Abbildung A.1: Bildschirmfotos des FEM-Modells zur Ermittlung der Läuferinduktionen

# B Die Maschinenreihe

(a) Außendurchmesser 10 mm

Diagramm B.1: Mechanische Leistung in Abhängigkeit von Maschinenlänge und Nennspannung der Maschinen

(b) Außendurchmesser 12,5 mm

(c) Außendurchmesser 16 mm

Diagramm B.1: Mechanische Leistung in Abhängigkeit von Maschinenlänge und Nennspannung der Maschinen

(d) Außendurchmesser 20 mm

(e) Außendurchmesser 25 mm

Diagramm B.1: Mechanische Leistung in Abhängigkeit von Maschinenlänge und Nennspannung der Maschinen

(f) Außendurchmesser 32 mm

(g) Außendurchmesser 40 mm

Diagramm B.1: Mechanische Leistung in Abhängigkeit von Maschinenlänge und Nennspannung der Maschinen

(h) Außendurchmesser 50 mm

(i) Außendurchmesser 63 mm

Diagramm B.1: Mechanische Leistung in Abhängigkeit von Maschinenlänge und Nennspannung der Maschinen

(j) Außendurchmesser 80 mm

(k) Außendurchmesser 100 mm

Diagramm B.1: Mechanische Leistung in Abhängigkeit von Maschinenlänge und Nennspannung der Maschinen



Tabelle B.1: Ergebnisse des Maschinenentwurfs für den Außendurchmesser von 10 mm

	10/40-3	10/40-6	10/40-12	10/40-24	10/50-3	10/50-6	10/50-12	10/50-24	
$\Phi_h$									mVs
$B_{r, \text{techn}}$									T
$w_S$									$\mu\text{m}$
$b_{\text{Leiter, I}}$									$\mu\text{m}$
$b_{\text{Leiter, II}}$									$\Omega$
$R_{\text{Str}}$									A
$I_N$									A/mm <sup>2</sup>
$S_{N, I}$									A/mm <sup>2</sup>
$S_{N, II}$									A
$\Theta$									$\mu\text{H}$
$L_{h1}$									m $\Omega$
$X_{h, \text{ges}}$									mN
$\hat{F}_{\text{res}}$									mNm
$MN_{\text{ges}}$									mW
$P_{\text{mech, ges}}$									W
$P_{\text{Ohm}}$									
$\cos \varphi$									
$\eta$									
$\Psi$									
$C_{\text{mech, ges}}$									mW/mm <sup>2</sup>
$A_{S, \text{ges}}$									kWmin/m <sup>3</sup>
$AS_{I, \text{ges}}$									A/mm
$AS_{II, \text{ges}}$									A/mm A/mm <sup>2</sup>
									A/mm A/mm <sup>2</sup>
	$d_L =$				$\hat{\beta}_p =$				$h_{r, \text{techn}} =$



Tabelle B.2: Ergebnisse des Maschinenentwurfs für den Außendurchmesser von 12,5 mm

	12,5/50-6	12,5/50-12	12,5/50-24	12,5/50-48	12,5/62,5-6	12,5/62,5-12	12,5/62,5-24	12,5/62,5-48	
$\Phi_h$									mVs
$B_{r, \text{techn}}$									T
$w_s$									$\mu\text{m}$
$b_{\text{Leiter, I}}$									$\mu\text{m}$
$b_{\text{Leiter, II}}$									$\Omega$
$R_{\text{Str}}$									A
$I_N$									A/mm <sup>2</sup>
$S_{N, I}$									A/mm <sup>2</sup>
$S_{N, II}$									A
$\Theta$									$\mu\text{H}$
$L_{h1}$									m $\Omega$
$X_{h, \text{ges}}$									mN
$F_{\text{res}}$									mNm
$M_{N, \text{ges}}$									mW
$P_{\text{mech, ges}}$									W
$P_{\text{Ohm}}$									
$\cos \varphi$									
$\eta$									
$\Psi$									
$C_{\text{mech, ges}}$									mW/mm <sup>2</sup>
$A_{S, \text{ges}}$									kWmin/m <sup>3</sup>
$AS_{I, \text{ges}}$									A/mm
$AS_{II, \text{ges}}$									A/mm A/mm <sup>2</sup>
									A/mm A/mm <sup>2</sup>
	$d_L =$				$\hat{B}_p =$				$h_{r, \text{techn}} =$



Tabelle B.3: Ergebnisse des Maschinenentwurfs für den Außendurchmesser von 16 mm

$\Phi_h$	16/64-12	16/64-24	16/64-48	16/64-60	16/80-12	16/80-24	16/80-48	16/80-60	mVs
$B_r, \text{techn}$									T
$w_s$									$\mu\text{m}$
$b_{\text{Leiter, I}}$									$\mu\text{m}$
$b_{\text{Leiter, II}}$									$\Omega$
$R_{\text{Str}}$									A
$I_N$									A/mm <sup>2</sup>
$S_{N, I}$									A/mm <sup>2</sup>
$S_{N, II}$									A
$\Theta$									$\mu\text{H}$
$L_{h1}$									m $\Omega$
$X_{h, \text{ges}}$									mN
$\hat{F}_{\text{res}}$									mNm
$MN, \text{ges}$									mW
$P_{\text{mech, ges}}$									W
$P_{\text{Ohm}}$									
$\cos \varphi$									
$\eta$									
$\Psi$									
$C_{\text{mech, ges}}$									mW/mm <sup>2</sup>
$A_S, \text{ges}$									kWmin/m <sup>3</sup>
$AS_I, \text{ges}$									A/mm
$AS_{II, \text{ges}}$									A/mm A/mm <sup>2</sup>
									A/mm A/mm <sup>2</sup>
	$d_L =$		$\hat{\beta}_p =$		$\hat{\beta}_p =$		$h_r, \text{techn} =$		







Tabelle B.5: Ergebnisse des Maschinenentwurfs für den Außendurchmesser von 25 mm

	25/100-12	25/100-24	25/100-48	25/100-60	25/125-12	25/125-24	25/125-48	25/125-60
$\Phi_h$								mVs
$B_r, \text{techn}$								T
$w_s$								$\mu\text{m}$
$b_{\text{Leiter, I}}$								$\mu\text{m}$
$b_{\text{Leiter, II}}$								$\Omega$
$R_{\text{Str}}$								A
$I_N$								A/mm <sup>2</sup>
$S_{N, I}$								A/mm <sup>2</sup>
$S_{N, II}$								A
$\Theta$								$\mu\text{H}$
$L_{h1}$								m $\Omega$
$X_{h, \text{ges}}$								mN
$\hat{F}_{\text{res}}$								mNm
$MN, \text{ges}$								mW
$P_{\text{mech, ges}}$								W
$P_{\text{Ohm}}$								
$\cos \varphi$								
$\eta$								
$\Psi$								
$C_{\text{mech, ges}}$								mW/mm <sup>2</sup>
$A_S, \text{ges}$								kWmin/m <sup>3</sup>
$AS_I, \text{ges}$								A/mm
$AS_{II, \text{ges}}$								A/mm A/mm <sup>2</sup>
								A/mm A/mm <sup>2</sup>
	$d_L =$				$\hat{\beta}_p =$		$h_r, \text{techn} =$	





Tabelle B.7: Ergebnisse des Maschinenentwurfs für den Außendurchmesser von 40 mm

	40/40-48	40/40-60	40/40-120	40/40-230	40/80-48	40/80-60	40/80-120	40/80-230	40/120-48	40/120-60	40/120-120	40/120-230
$\Phi_h$												
$B_{r, \text{techn}}$												
$w_S$												
$b_{\text{Leiter, I}}$												
$b_{\text{Leiter, II}}$												
$R_{\text{Str}}$												
$I_N$												
$S_{N, I}$												
$S_{N, II}$												
$\Theta$												
$L_{h1}$												
$X_{h, \text{ges}}$												
$F_{\text{res}}$												
$M_{N, \text{ges}}$												
$P_{\text{mech, ges}}$												
$P_{\text{Ohm}}$												
$\cos \varphi$												
$\eta$												
$\psi$												
$C_{\text{mech, ges}}$												
$A_{S, \text{ges}}$												
$AS_{I, \text{ges}}$												
$AS_{II, \text{ges}}$												
		$d_L =$			$\hat{B}_p =$				$h_{r, \text{techn}} =$			





Tabelle B.8: Ergebnisse des Maschinenentwurfs für den Außendurchmesser von 50 mm

	50/200-48	50/200-60	50/200-120	50/200-230	50/250-48	50/250-60	50/250-120	50/250-230	
$\Phi_h$									mVs
$B_r, \text{ techn}$									T
$w_s$									$\mu\text{m}$
$b_{\text{Leiter, I}}$									$\mu\text{m}$
$b_{\text{Leiter, II}}$									$\Omega$
$R_{\text{Str}}$									A
$I_N$									A/mm <sup>2</sup>
$S_{N, I}$									A/mm <sup>2</sup>
$S_{N, II}$									A
$\Theta$									$\mu\text{H}$
$L_{h1}$									m $\Omega$
$X_{h, \text{ ges}}$									mN
$f_{r, \text{ res}}$									mNm
$M_{N, \text{ ges}}$									mW
$P_{\text{mech, ges}}$									W
$P_{\text{Ohm}}$									
$\cos \varphi$									
$\eta$									
$\Psi$									
$C_{\text{mech, ges}}$									mW/mm <sup>2</sup>
$A_{S, \text{ ges}}$									kWmin/m <sup>3</sup>
$A_{S, I, \text{ ges}}$									A/mm
$A_{S, II, \text{ ges}}$									A/mm A/mm <sup>2</sup>
									A/mm A/mm <sup>2</sup>
	$d_L =$				$\hat{B}_p =$				$h_r, \text{ techn} =$

Tabelle B.9: Ergebnisse des Maschinenentwurfs für den Außendurchmesser von 63 mm

$\Phi_h$	63/63-60	mVs
$B_r, \text{techn}$	63/63-120	T
$w_s$	63/63-230	
$b_{\text{Leiter, I}}$	63/63-400	$\mu\text{m}$
$b_{\text{Leiter, II}}$	63/126-60	$\mu\text{m}$
$R_{\text{Str}}$	63/126-120	$\Omega$
$I_N$	63/126-230	A
$S_{N, I}$	63/126-400	A/mm <sup>2</sup>
$S_{N, II}$	63/189-60	A/mm <sup>2</sup>
$\Theta$	63/189-120	A
$L_{h1}$	63/189-230	$\mu\text{H}$
$X_{h, \text{ges}}$	63/189-400	m $\Omega$
$F_{\text{res}}$		N
$M_{N, \text{ges}}$		mNm
$P_{\text{mech, ges}}$		W
$P_{\text{Ohm}}$		W
$\cos \varphi$		
$\eta$		
$\Psi$		
$C_{\text{mech, ges}}$		mW/mm <sup>2</sup>
$A_{S, \text{ges}}$		kWmin/m <sup>3</sup>
$AS_{I, \text{ges}}$		A/mm
$AS_{II, \text{ges}}$		A/mm A/mm <sup>2</sup>
		A/mm A/mm <sup>2</sup>
	$d_L =$	
		$\hat{B}_p =$
		$h_{r, \text{techn}} =$



Tabelle B.10: Ergebnisse des Maschinenentwurfs für den Außendurchmesser von 80 mm

$\Phi_h$	80/80-120		mVs
$B_r, \text{techn}$	80/80-230		T
$w_s$	80/80-400		$\mu\text{m}$
$b_{\text{Leiter, I}}$	80/80-690		$\mu\text{m}$
$b_{\text{Leiter, II}}$	80/160-120		$\Omega$
$R_{\text{Str}}$	80/160-230		A
$I_N$	80/160-400		A/mm <sup>2</sup>
$S_{N, I}$	80/160-690		A/mm <sup>2</sup>
$S_{N, II}$	80/240-120		A
$\Theta$	80/240-230		$\mu\text{H}$
$L_{h1}$	80/240-400		m $\Omega$
$X_{h, \text{ges}}$	80/240-690		N
$F_{\text{res}}$	80/240-900		mNm
$M_{N, \text{ges}}$	80/240-1200		W
$P_{\text{mech, ges}}$	80/240-1500		W
$P_{\text{Ohm}}$	80/240-1800		
$\cos \varphi$	80/240-2100		
$\eta$	80/240-2400		
$\Psi$	80/240-2700		
$C_{\text{mech, ges}}$	80/240-3000		mW/mm <sup>2</sup>
$A_{S, \text{ges}}$	80/240-3300		kWmin/m <sup>3</sup>
$AS_{I, \text{ges}}$	80/240-3600		A/mm
$AS_{II, \text{ges}}$	80/240-3900		A/mm A/mm <sup>2</sup>
	80/240-4200		A/mm A/mm <sup>2</sup>
	80/240-4500		
	80/240-4800		
	80/240-5100		
	80/240-5400		
	80/240-5700		
	80/240-6000		
	80/240-6300		
	80/240-6600		
	80/240-6900		
	80/240-7200		
	80/240-7500		
	80/240-7800		
	80/240-8100		
	80/240-8400		
	80/240-8700		
	80/240-9000		
	80/240-9300		
	80/240-9600		
	80/240-9900		
	80/240-10200		
	80/240-10500		
	80/240-10800		
	80/240-11100		
	80/240-11400		
	80/240-11700		
	80/240-12000		
	80/240-12300		
	80/240-12600		
	80/240-12900		
	80/240-13200		
	80/240-13500		
	80/240-13800		
	80/240-14100		
	80/240-14400		
	80/240-14700		
	80/240-15000		
	80/240-15300		
	80/240-15600		
	80/240-15900		
	80/240-16200		
	80/240-16500		
	80/240-16800		
	80/240-17100		
	80/240-17400		
	80/240-17700		
	80/240-18000		
	80/240-18300		
	80/240-18600		
	80/240-18900		
	80/240-19200		
	80/240-19500		
	80/240-19800		
	80/240-20100		
	80/240-20400		
	80/240-20700		
	80/240-21000		
	80/240-21300		
	80/240-21600		
	80/240-21900		
	80/240-22200		
	80/240-22500		
	80/240-22800		
	80/240-23100		
	80/240-23400		
	80/240-23700		
	80/240-24000		
	80/240-24300		
	80/240-24600		
	80/240-24900		
	80/240-25200		
	80/240-25500		
	80/240-25800		
	80/240-26100		
	80/240-26400		
	80/240-26700		
	80/240-27000		
	80/240-27300		
	80/240-27600		
	80/240-27900		
	80/240-28200		
	80/240-28500		
	80/240-28800		
	80/240-29100		
	80/240-29400		
	80/240-29700		
	80/240-30000		
	80/240-30300		
	80/240-30600		
	80/240-30900		
	80/240-31200		
	80/240-31500		
	80/240-31800		
	80/240-32100		
	80/240-32400		
	80/240-32700		
	80/240-33000		
	80/240-33300		
	80/240-33600		
	80/240-33900		
	80/240-34200		
	80/240-34500		
	80/240-34800		
	80/240-35100		
	80/240-35400		
	80/240-35700		
	80/240-36000		
	80/240-36300		
	80/240-36600		
	80/240-36900		
	80/240-37200		
	80/240-37500		
	80/240-37800		
	80/240-38100		
	80/240-38400		
	80/240-38700		
	80/240-39000		
	80/240-39300		
	80/240-39600		
	80/240-39900		
	80/240-40200		
	80/240-40500		
	80/240-40800		
	80/240-41100		
	80/240-41400		
	80/240-41700		
	80/240-42000		
	80/240-42300		
	80/240-42600		
	80/240-42900		
	80/240-43200		
	80/240-43500		
	80/240-43800		
	80/240-44100		
	80/240-44400		
	80/240-44700		
	80/240-45000		
	80/240-45300		
	80/240-45600		
	80/240-45900		
	80/240-46200		
	80/240-46500		
	80/240-46800		
	80/240-47100		
	80/240-47400		
	80/240-47700		
	80/240-48000		
	80/240-48300		
	80/240-48600		
	80/240-48900		
	80/240-49200		
	80/240-49500		
	80/240-49800		
	80/240-50100		
	80/240-50400		
	80/240-50700		
	80/240-51000		
	80/240-51300		
	80/240-51600		
	80/240-51900		
	80/240-52200		
	80/240-52500		
	80/240-52800		
	80/240-53100		
	80/240-53400		
	80/240-53700		
	80/240-54000		
	80/240-54300		
	80/240-54600		
	80/240-54900		
	80/240-55200		
	80/240-55500		
	80/240-55800		
	80/240-56100		
	80/240-56400		
	80/240-56700		
	80/240-57000		
	80/240-57300		
	80/240-57600		
	80/240-57900		
	80/240-58200		
	80/240-58500		
	80/240-58800		
	80/240-59100		
	80/240-59400		
	80/240-59700		
	80/240-60000		
	80/240-60300		
	80/240-60600		
	80/240-60900		
	80/240-61200		
	80/240-61500		
	80/240-61800		
	80/240-62100		
	80/240-62400		
	80/240-62700		
	80/240-63000		
	80/240-63300		
	80/240-63600		
	80/240-63900		
	80/240-64200		
	80/240-64500		
	80/240-64800		
	80/240-65100		
	80/240-65400		
	80/240-65700		
	80/240-66000		
	80/240-66300		
	80/240-66600		
	80/240-66900		
	80/240-67200		
	80/240-67500		
	80/240-67800		
	80/240-68100		
	80/240-68400		
	80/240-68700		
	80/240-69000		
	80/240-69300		
	80/240-69600		
	80/240-69900		
	80/240-70200		
	80/240-70500		
	80/240-70800		
	80/240-71100		
	80/240-71400		
	80/240-71700		
	80/240-72000		
	80/240-72300		
	80/240-72600		
	80/240-72900		
	80/240-73200		
	80/240-73500		
	80/240-73800		
	80/240-74100		
	80/240-74400		
	80/240-74700		
	80/240-75000		
	80/240-75300		
	80/240-75600		
	80/240-75900		
	80/240-76200		
	80/240-76500		
	80/240-76800		
	80/240-77100		
	80/240-77400		
	80/240-77700		
	80/240-78000		
	80/240-78300		
	80/240-78600		
	80/240-78900		
	80/240-79200		
	80/240-79500		
	80/240-79800		
	80/240-80100		
	80/240-80400		
	80/240-80700		
	80/240-81000		
	80/240-81300		
	80/240-81600		
	80/240-81900		
	80/240-82200		
	80/240-82500		
	80/240-82800		
	80/240-83100		
	80/240-83400		
	80/240-83700		
	80/240-84000		
	80/240-84300		
	80/240-84600		
	80/240-84900		
	80/240-85200		
	80/240-85500		
	80/240-85800		
	80/240-86100		
	80/240-86400		
	80/240-86700		
	80/240-87000		



Tabelle B.1.1: Ergebnisse des Maschinenentwurfs für den Außendurchmesser von 100 mm

$\Phi_h$	100/100-120	mVs
$B_{r, \text{techn}}$	100/100-400	T
$w_s$	100/100-690	$\mu\text{m}$
$b_{\text{Leiter, I}}$	100/200-230	$\mu\text{m}$
$b_{\text{Leiter, II}}$	100/200-400	$\Omega$
$R_{\text{Str}}$	100/300-120	A
$I_N$	100/300-230	A/mm <sup>2</sup>
$SN_{\text{I}}$	100/300-400	A/mm <sup>2</sup>
$SN_{\text{II}}$	100/200-690	A
$\Theta$	100/200-120	$\mu\text{H}$
$L_{h1}$	100/200-230	m $\Omega$
$X_{h, \text{ges}}$	100/200-400	N
$F_{\text{res}}$	100/300-690	mNm
$M_{N, \text{ges}}$	100/300-120	W
$P_{\text{mech, ges}}$	100/300-230	W
$P_{\text{Ohm}}$	100/300-400	
$\cos \varphi$	100/100-120	
$\eta$	100/100-230	
$\Psi$	100/100-400	
$C_{\text{mech, ges}}$	100/100-690	mW/mm <sup>2</sup>
$A_{S, \text{ges}}$	100/200-120	kWmin/m <sup>3</sup>
$AS_{\text{I, ges}}$	100/200-230	A/mm
$AS_{\text{II, ges}}$	100/200-400	A/mm A/mm <sup>2</sup>
	100/200-690	A/mm A/mm <sup>2</sup>
	100/300-120	
	100/300-230	
	100/300-400	
	100/300-690	
	$d_L =$	
	$\hat{B}_p =$	
	$h_{r, \text{techn}} =$	

Tabelle B.1.1: Ergebnisse des Maschinenentwurfs für den Außendurchmesser von 100 mm

	100/400-120	100/400-230	100/400-400	100/400-690	100/500-120	100/500-230	100/500-400	100/500-690	
$\Phi_h$									mVs
$B_r, \text{techn}$									T
$w_s$									$\mu\text{m}$
$b_{\text{Leiter, I}}$									$\mu\text{m}$
$b_{\text{Leiter, II}}$									$\Omega$
$R_{\text{Str}}$									A
$I_N$									A/mm <sup>2</sup>
$S_{N, I}$									A/mm <sup>2</sup>
$S_{N, II}$									A
$\Theta$									$\mu\text{H}$
$L_{h1}$									m $\Omega$
$X_{h, \text{ges}}$									mN
$F_{\text{res}}$									mNm
$M_{N, \text{ges}}$									mW
$P_{\text{mech, ges}}$									W
$P_{\text{Ohm}}$									
$\cos \varphi$									
$\eta$									
$\Psi$									
$C_{\text{mech, ges}}$									mW/mm <sup>2</sup>
$A_{S, \text{ges}}$									kWmin/m <sup>3</sup>
$AS_{I, \text{ges}}$									A/mm
$AS_{II, \text{ges}}$									A/mm A/mm <sup>2</sup>
									A/mm A/mm <sup>2</sup>
	$d_L =$				$\hat{B}_p =$				$h_{r, \text{techn}} =$

# **C Praktische Ausführungen zum Maschinenentwurf**

(a) Lagerschild

Abbildung C.1: Maßskizzen für die zu fertigende Maschine des Typs 16/64-24

(b) Läufer

(c) magnetischer Rückschluss

Abbildung C.1: Maßskizzen für die zu fertigende Maschine des Typs 16/64-24

(d) Gehäuse

Abbildung C.1: Maßskizzen für die zu fertigende Maschine des Typs 16/64-24

*Dokument des Instituts für Festkörper- und Werkstoffforschung Dresden zur  
Messung der Magnetisierungskurve des für den magnetischen Rückschluss ver-  
wendeten Stahls*

# Literaturverzeichnis

- [1] „Antriebssysteme“, Dr. Fritz Faulhaber GmbH & Co. KG, 2011.
- [2] Werner Cermak: „Lehrbuch für den Siebdrucker – Arbeitsbeschreibungen mit Hinweisen auf Fehlerquellen und Rezeptvorschriften“, 6. Aufl., Leipzig: VEB Fachbuchverlag, 1972.
- [3] Germar Müller und Bernd Ponick: *Elektrische Maschinen*, Bd. 1: „Grundlagen elektrischer Maschinen“, 9. Aufl., 3 Bde., Weinheim: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2006, ISBN: 3-527-40524-0.
- [4] Germar Müller und Bernd Ponick: *Elektrische Maschinen*, Bd. 3: „Theorie elektrischer Maschinen“, 6. Aufl., 3 Bde., Weinheim: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2009, ISBN: 3-527-40526-8.
- [5] Germar Müller, Karl Vogt und Bernd Ponick: *Elektrische Maschinen*, Bd. 2: „Berechnung elektrischer Maschinen“, 6. Aufl., 3 Bde., Weinheim: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2008, ISBN: 3-527-40525-9.
- [6] Helmut Kipphan (Hrsg.): „Handbuch der Printmedien – Technologien und Produktionsverfahren“, Berlin, Heidelberg, u. a.: Springer, 2000, ISBN: 3-54066941-8.
- [7] Matthias Lampe, Christian Floerkemeier und Stephan Haller: „Einführung in die RFID-Technologie“, in: *Das Internet der Dinge – Ubiquitous Computing und RFID in der Praxis*, hrsg. von Elgar Fleisch und Friedemann Mattern, Springer-Verlag, 2005, S. 69–86.
- [8] Mathias Lindner: „Untersuchung von modernen Magnetkreismaterialien und Wicklungstechnologien für energetisch hocheffiziente Antriebsmotoren“, Diplomarbeit, Technische Universität Chemnitz 2009.

- [9] Otto Stemme und Peter Wolf: „Wirkungsweise und Eigenschaften hochdynamischer Gleichstrom-Kleinstmotoren“, Broschüre, MAXON MOTOR AG, Nov. 1994 , URL: [http://test.maxonmotor.com/docsx/Download/Product/Pdf/Beschr\\_Wirkungsweise\\_Gleichstrommotoren\\_d.pdf](http://test.maxonmotor.com/docsx/Download/Product/Pdf/Beschr_Wirkungsweise_Gleichstrommotoren_d.pdf) (besucht am 19.09.2011).
- [10] Patrick Bräuer, Matthias Bartscht und Ralf Werner: „Reduzierung des Bau- raums bei einem aktiven dreipoligen Radialmagnetlager unter Verwendung von siebgedruckten Wicklungen“, in: *8. Workshop Magnetlagertechnik*, Zittau- Chemnitz 2011.
- [11] Patrick Bräuer und Ralf Werner: „Herstellung von Wicklungen rotierender Kleinantriebe mittels Siebdruckverfahren“, in: *VDI Antriebssysteme 2011*.
- [12] Patrick Bräuer, Thomas Schuhmann und Ralf Werner: „Screen Printed Windings for Small-Power Electrical Machines“, englischsprachig, in: *The 8th France-Japan and 6th Europe-Asia Congress on Mechatronics*, Yokohama, Japan 2010.
- [13] „Programm 2011/12 – Hochpräzise Antriebe und Systeme“, Maxon Motor AG, 2011.
- [14] „UV-Technologie – Der Praxisleitfaden für alle Druckverfahren“, Wiesbaden: Arbeitskreis UV-Druck – eine Initiative der Berufsgenossenschaft Druck und Papierverarbeitung, ISBN: 3-00-019370-7.



## Zentrales Prüfungsamt

(Anschrift: TU Chemnitz, 09107 Chemnitz)

### Selbstständigkeitserklärung\*

Name: Fietz	<b>Bitte Ausfüllhinweise beachten:</b>  1. Nur Block- oder Maschinenschrift verwenden.
Vorname: Tom	
geb. am: 15. Dezember 1987	
Matr.-Nr.: 161583	

Ich erkläre gegenüber der Technischen Universität Chemnitz, dass ich die vorliegende Diplomarbeit  selbstständig und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Quellen und Hilfsmittel angefertigt habe.

Die vorliegende Arbeit ist frei von Plagiaten. Alle Ausführungen, die wörtlich oder inhaltlich aus anderen Schriften entnommen sind, habe ich als solche kenntlich gemacht.

Diese Arbeit wurde in gleicher oder ähnlicher Form noch bei keinem anderen Prüfer als Prüfungsleistung eingereicht und ist auch noch nicht veröffentlicht.

Datum: .....

Unterschrift: .....

Fietz