



Technische Universität München  
Fakultät für Maschinenwesen  
Lehrstuhl für Umformtechnik und Gießereiwesen

## **Entwicklung eines Verfahrens zur Herstellung von verpressten Spulen für effizientere E-Traktionsantriebe**

**Simon Vogt**

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Maschinenwesen der  
Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines

**Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)**

genehmigten Dissertation.

**Vorsitzender:** Prof. Dr.-Ing. habil. Boris Lohmann

**Prüfer der Dissertation:** 1. Prof. Dr.-Ing. Wolfram Volk  
2. Prof. Dr.-Ing. Jörg Franke

Die Dissertation wurde am 10.04.2019 bei der Technischen Universität München eingereicht  
und durch die Fakultät für Maschinenwesen am 16.09.2019 angenommen.



## **Vorwort und Danksagung**

Diese Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Umformtechnik und Gießereiwesen der Technischen Universität München und wurde vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) im Rahmen des Projekts Hochflexible Produktionssysteme für effizienzgesteigerte E-Traktionsantriebe (HeP E) gefördert.

Für die uneingeschränkte Unterstützung sowie das entgegengebrachte Vertrauen bei der Umsetzung eigener Ideen und der Bearbeitung vielfältigster Problemstellungen möchte ich mich bei der Lehrstuhlleitung bedanken. Namentlich bei Herrn Prof. Dr.-Ing. (i. R.) Hartmut Hoffmann, der mir seit meiner Einstellung am Lehrstuhl und selbst noch jetzt in seinem Ruhestand mit Rat und Tat zur Seite steht, bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Wolfram Volk für die Übernahme der Betreuung dieser Arbeit und Herrn Dr.-Ing. Roland Golle für die fachliche Unterstützung.

Bei den Kolleginnen, Kollegen und Studierenden des Lehrstuhls sowie den Projektpartnern möchte ich mich für die freundschaftliche Zusammenarbeit und Unterstützung bedanken. Um der Gefahr zu entgehen, auch nur einen Namen zu vergessen verzichte ich auf die persönliche Nennung dieser zahlreichen wichtigen Personen, die zum Erfolg meiner Arbeit maßgeblich beigetragen haben.

Mein ganz besonderer Dank gilt meiner gesamten Familie, die mir meinen bisherigen Werdegang ermöglicht hat und mir bei jedem Auf und Ab während dieser Zeit beiseitestand. Besonders möchte ich mich dafür bei meiner Frau Nicky bedanken.

Vielen Dank

Garching, im April 2018

Simon Vogt



## **Kurzfassung**

Im Rahmen der Elektrifizierung des Antriebsstranges im Automobilbau kommen neue Herausforderungen auf die Produktionstechnik zu. Die industrielle Massenfertigung von elektrischen Traktionsantrieben ist hierbei neben der Speicherherstellung ein zentrales Thema. Dies erfordert eine enge Verknüpfung der elektrotechnischen Auslegung mit der produktionstechnischen Umsetzung.

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit fertigungstechnischen Maßnahmen zur Effizienzsteigerung bei E-Traktionsantrieben. Die zentrale Aufgabenstellung ist die Entwicklung einer Fertigungskette zur Herstellung verpresster und verdrillter Spulen sowie die dafür erforderlichen Werkzeuge und Prozesse. Zur Bewertung der fertigungstechnischen Variation wurden zwei Mess- und Auswertemethoden entwickelt und validiert. Sie können den Einfluss auf die Stromverdrängung abbilden, die einer der wesentlichen Verlustmechanismen der gewählten Referenzmaschine ist.

Durch das Verpressen der Spulen können die Erhöhung des Nutzfüllgrades und unterschiedliche Verdrillungsarten bei gleichen Spulenabmessungen untersucht werden. Die Grenzen der Wirkungsgradsteigerung durch diese Maßnahmen werden aufgezeigt und anschließend bewertet. Die Einflüsse auf die Stromverdrängung werden frequenzabhängig betrachtet, sodass je nach Gewichtung der verschiedenen Betriebspunkte eines Motors die bestmögliche Anordnung ausgewählt werden kann.

Über die Bewertung der untersuchten fertigungstechnischen Maßnahmen hinaus ist es mit der dargestellten Methodik möglich, einzelne Spulen relativ zueinander zu bewerten, für die sonst vollständige Maschinen aufgebaut und auf einem Prüfstand getestet werden müssten.



## **Abstract**

The electrification of the powertrain poses one of the main challenges for the production technology in modern automotive engineering. Especially the mass production of electric traction drives is, together with the production of energy storage units, among the most significant production steps in this context. Due to the physical and technical complexity of these drives, the electro-technical design and the corresponding technical implementation for production need to be evaluated simultaneously.

Therefore, this work provides and evaluates manufacturing techniques for significantly increasing the efficiency of electric traction drives. The focus lies on the development of a production chain for the manufacturing of pressed and twisted coils as well as the necessary tools and processes. To better assess the variances in production, two measurement and evaluation methods are developed and validated. These methods allow to map the production method's influence on the current displacement, which is one of the essential loss mechanisms of the chosen reference drive.

By pressing the coils of the drive, the increase in the slot filling ratio and the results of using different types of twisting with identical coil dimensions can be investigated. Applying the method developed, the limits of the increase in efficiency are demonstrated and subsequently evaluated. The current displacement in the coil is assessed as a function of the frequency, allowing to identify the optimal design in dependence on the weighted operating points of the drive.

In addition to the evaluation of the manufacturing techniques described, the method developed also allows to compare single coils with each other without having to build full drives or even test beds as previously necessary.



# Inhaltsverzeichnis

<b>Inhaltsverzeichnis .....</b>	<b>IX</b>
<b>Verzeichnis der Kurzzeichen .....</b>	<b>XI</b>
<b>1 Einleitung .....</b>	<b>1</b>
<b>2 Grundlagen und Stand der Kenntnisse .....</b>	<b>5</b>
2.1 Grundlagen zu Elektromotoren .....	5
2.1.1 Elektrotechnische Grundlagen .....	5
2.1.2 Gleichstrommaschinen .....	12
2.1.3 Synchronmaschinen .....	13
2.1.4 Asynchronmaschinen .....	14
2.1.5 Hybridsynchronmaschinen .....	16
2.2 Fertigungstechnologien im Elektromaschinenbau .....	19
2.2.1 Blechpaket .....	19
2.2.2 Wicklungen .....	22
2.2.3 Isolierwerkstoffe .....	28
2.3 Verlustarten .....	30
2.3.1 Eisenverluste .....	31
2.3.2 Kupferverluste .....	33
<b>3 Zielsetzung und Herangehensweise .....</b>	<b>39</b>
<b>4 Nachweis der Machbarkeit .....</b>	<b>41</b>
4.1 Werkzeugentwurf .....	41
4.2 Durchführung der Vorversuche .....	43
4.3 Simulative Abbildung des Vorversuchs .....	47
4.4 Folgerungen aus den Vorversuchen .....	50
<b>5 Versuchs- und Messeinrichtungen .....</b>	<b>55</b>
5.1 Wickelvorrichtung .....	55
5.2 Versuchswerkzeug .....	57

---

5.3	Heizvorrichtung .....	67
5.4	Statormontage .....	74
5.5	Messtechnik .....	77
5.5.1	LCR-Messung .....	78
5.5.2	Stromzangenmessung.....	84
<b>6</b>	<b>Planung der praktischen Versuche .....</b>	<b>93</b>
6.1	Nomenklatur und Farbschema .....	93
6.2	Statoren .....	95
6.3	Versuchsplan.....	95
<b>7</b>	<b>Ergebnisse.....</b>	<b>97</b>
7.1	Analyse der Wickelversuche mittels LCR-Messung .....	97
7.1.1	Vergleich von Referenz und Demonstrator.....	97
7.1.2	Vergleich von Referenz und Spulen im gezahnten Stator .....	99
7.1.3	Vergleich nach Drahtanzahl und Wicklungstyp .....	101
7.1.4	Bewertung der Streuung der gemessenen Spulen .....	105
7.2	Analyse der Wickelversuche mittels Stromzangenmessung .....	108
7.2.1	Vergleich von Referenz und Demonstrator.....	108
7.2.2	Vergleich von Referenz und Spulen im gezahnten Stator .....	112
7.2.3	Vergleich nach Drahtanzahl und Wicklungstyp .....	113
7.2.1	Bewertung der Streuung der gemessenen Spulen .....	116
7.3	Fazit zur LCR-Messung und Stromzangenmessung.....	118
<b>8</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick.....</b>	<b>121</b>
<b>A</b>	<b>Abbildungsverzeichnis .....</b>	<b>125</b>
<b>B</b>	<b>Tabellenverzeichnis .....</b>	<b>129</b>
<b>C</b>	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>131</b>
<b>D</b>	<b>Studienarbeiten .....</b>	<b>139</b>

## Verzeichnis der Kurzzeichen

Kurzzeichen	Einheit	Bezeichnung
<i>A</i>	mm <sup>2</sup>	Fläche
<i>B</i>	T	Magnetische Flussdichte
<i>B*</i>	S	Blindleitwert bzw. Suszeptanz
<i>C</i>	F	Elektrische Kapazität
CO <sub>2</sub>	-	Kohlenstoffdioxid
DUT	-	Device Under Test
<i>e</i>	-	Eulersche Zahl und Basis der natürlichen Exponentialfunktion
<i>E</i>	Pa	Elastizitätsmodul
<i>F</i>	N	Kraft
<i>f</i>	s <sup>-1</sup>	Frequenz
<i>f<sub>Err</sub></i>	s <sup>-1</sup>	Erregerfrequenz
<i>G</i>	S	Wirkleitwert bzw. Konduktanz
<i>H</i>	A/m	Magnetische Feldstärke
<i>I</i>	A	Elektrische Stromstärke
<i>i</i>	-	Fortlaufende natürliche Zahl, Anzahl
<i>j</i>	-	Imaginäre Einheit ( $j^2 = -1$ )
<i>J</i>	T	Magnetische Polarisation
<i>k</i>	-	Faktor für die Widerstandsüberhöhung
<i>l</i>	M	Länge
<i>L</i>	H	Induktivität
LabVIEW	-	Graphisches Programmiersystem von National Instruments
<i>M</i>	Nm	Drehmoment
<i>n</i>	-	Fortlaufende natürliche Zahl, Anzahl
<i>n<sub>0</sub></i>	s <sup>-1</sup>	Drehfelddrehzahl
<i>n<sub>R</sub></i>	s <sup>-1</sup>	Rotordrehzahl
<i>n<sub>Syn</sub></i>	s <sup>-1</sup>	Drehzahl einer Synchronmaschine
<i>N</i>	-	Magnetischer Nordpol

Kurzzeichen	Einheit	Bezeichnung
$p$	-	Anzahl der Polpaare eines Motors
$P$	W	Leistung
$PKW$	-	Personenkraftwagen
$Q_W$	J	Wärmeenergie
$R$	$\Omega$	Resistanz bzw. Wirkwiderstand
$R_{DC}$	$\Omega$	Gleichstromwiderstand
$R_e$	Pa	Streckgrenze
$R_m$	Pa	Zugfestigkeit
$R_{Ohm}$	$\Omega$	Ohmscher Widerstand
$R_{p0,2}$	Pa	0,2 % Dehngrenze
$RJ45$	-	Standardisierter Steckverbinder
$RS-232$	-	Kommunikationsstandard für serielle Schnittstellen
$RS-485$	-	Kommunikationsstandard für serielle Schnittstellen
$s$	-	Schlupf einer Asynchronmaschine
$S$	-	Magnetischer Südpol
$t$	s	Zeit
$U$	V	Elektrische Spannung
$v$	m/s	Geschwindigkeit
VRD	-	Vector Ratio Detector
$X$	$\Omega$	Reaktanz bzw. Blindwiderstand
$x$	-	Fortlaufende natürliche Zahl, Anzahl
$Y$	S	Admittanz bzw. komplexer Leitwert
$Z$	$\Omega$	Impedanz bzw. komplexer Widerstand
$\alpha_T$	$K^{-1}$	Temperaturkoeffizient des elektrischen Widerstandes
$\varphi$	$^\circ$	Phasenwinkel der Impedanz
$\theta$	rad	Phasenwinkel der Impedanz
$\sigma$	-	Standardabweichung
$\sigma_{lf}$	S/m	Leitfähigkeit des Materials

---

<b>Kurzzeichen</b>	<b>Einheit</b>	<b>Bezeichnung</b>
$\mu$	-	Reibungskoeffizient
$\mu_0$	H/m	Magnetische Feldkonstante
$\mu_p$	H/m	Permeabilität
$\mu_R$	-	Reibbeiwert
$\mu_r$	-	Relative Permeabilität
$\Delta\vartheta$	K	Temperaturänderung
$\delta$	m	Skintiefe
$\nu$	-	Poissonzahl bzw. Querkontraktionszahl
$\pi$	-	Kreiszahl
$\phi$	Tm <sup>2</sup>	Magnetischer Fluss
$\omega$	s <sup>-1</sup>	Kreisfrequenz

---



## 1 Einleitung

Mobilität hat sich zu einem Grundbedürfnis moderner Gesellschaften entwickelt. Die individuelle Personenbeförderung wird hauptsächlich mit PKW bestritten. Damit einhergehend ist der Verkehr für 2 % der CO<sub>2</sub>-Emissionen verantwortlich (Wilhelm et al., 2011). Dieser beachtliche Anteil und die Tatsache, dass jeder einzelne Bürger in irgendeiner Form mit dafür verantwortlich ist, lenken den Fokus vermehrt auf das Mobilitätsverhalten und nicht zuletzt auf die derzeit noch überwiegend eingesetzten Verbrennungsmotoren. Mit der Aufarbeitung der Verstöße gegen das Verbot von Abschaltvorrichtungen (VERORDNUNG (EU) Nr. 168/2013 Art. 19) durch mehrere Automobilhersteller wird deutlich, dass bei den hoch entwickelten Verbrennungsmotoren die Potenziale hinsichtlich der Schadstoffreduzierung mit wirtschaftlich und ökologisch sinnvollen Maßnahmen begrenzt zu sein scheinen. Vorfälle wie der Abgasskandal, dessen Einfluss weit über die Bekanntmachung im September 2015 hinaus reicht, drängen zum radikalen Wandel in der Mobilität. Zur Einhaltung des Klimaschutzplans der deutschen Bundesregierung ist bis 2050 ein treibhausgasneutraler Verkehr notwendig, der volkswirtschaftlich am günstigsten durch die Elektromobilität realisierbar ist (Umwelt Bundesamt, 2016). Der kontrovers diskutierte Wandel hin zur klimaneutralen Verkehrs- und Transportinfrastruktur wird in einer Studie von Kasten et al. (2016) anhand von Szenarien mit Zahlen belegt. Demnach verursachen elektrisch betriebene PKW die geringsten Mehrkosten bei der Abkehr von fossilen Brennstoffen, verglichen mit klimaneutral hergestellten Kraftstoffen für Verbrennungsmotoren. Die vielfach sehr hoch veranschlagten Kosten für die Infrastruktur nehmen bei dieser gesamthaften Betrachtung nur eine untergeordnete Rolle ein. Darüber hinaus führen die zunehmende Verdichtung der Wohnräume, beispielsweise in Megastädten, und die damit verbundene Zunahme des Verkehrs zu verstärkter Luftverschmutzung. Bei den steigenden Mobilitätsanforderungen reicht es nicht aus, die Abgasnormen zu verschärfen und den Verkehr klimaneutral zu gestalten. Ausschlaggebend für die Problemlösung ist die Emissionsfreiheit der Fahrzeuge, was lediglich mit elektrisch angetriebenen Fahrzeugen realisierbar ist. Dabei bleibt offen, ob diese über Batteriespeicher, Brennstoffzellen, Oberleitungen oder beliebige andere Technologien mit elektrischer Energie versorgt werden.

Die globalen umweltpolitischen Ziele zur Reduzierung der CO<sub>2</sub>-Emissionen bedingen einen Wandel in der Mobilität. Bei der Umsetzung dieses Wandels ergänzen sich volkswirtschaftliche Ziele und die Situation von einflussreichen Metropolen, da in beiden Fällen elektrisch angetriebene Fahrzeuge zu favorisieren sind. Daher ist gerade im durch die Automobilindustrie geprägten Deutschland die Entwicklung, Auslegung und Produktion elektrischer Maschinen für die Elektromobilität von zentraler Bedeutung.

Die Erfindung des Elektromotors lässt sich aufgrund der vielfältigen Entwicklungen seit der Erfindung der Batterie durch Alessandro Volta im Jahr 1800 nicht genau datieren und einer einzigen Person zuordnen. Die Erfindung des ersten Elektromotors mit nennenswertem Drehmoment wird dem Preußen Moritz Hermann Jacobi im Jahr 1834 zugeschrieben (Doppelbauer, 2017). Seitdem gab es zwar enorme Fortschritte in der Elektrotechnik, die in allen Bereichen des täglichen Lebens Einzug fand, jedoch war die Mobilitätsentwicklung maßgeblich durch Verbrennungsmaschinen geprägt. Umgekehrt ergibt sich daraus der Fokus auf Kraftfahrzeuge bei der Entwicklung von Verbrennungsmotoren. Seit Beginn des 20. Jahrhunderts führte dies zu beachtlichen Entwicklungen im Bereich der Benzin- und Dieselmotorentechnik. Vergleicht man heutige Elektromotoren mit Verbrennungsmotoren ähnlicher Leistung, so fällt auf, dass im relevanten Leistungsbereich über 100 kW hauptsächlich stationäre elektrische Maschinen zu finden sind. Auslegungskriterien wie Gewicht, Bauraum, Effizienz, Lastkollektive, Betriebstemperatur, Crashesicherheit und viele andere weitere haben keine Relevanz oder werden gänzlich anders bewertet. Hinzu kommt, dass diese Motoren meist in sehr geringer Stückzahl, verglichen mit den durch die Automobilindustrie in Aussicht gestellten Stückzahlen, hergestellt werden. So werden große Elektromotoren größtenteils von ausgebildeten Spezialisten in Handarbeit montiert. Neben den noch unausgeschöpften Potenzialen bei der elektrotechnischen Optimierung für automobiler Anwendungen sind also noch viele Fragestellungen im Bereich der Fertigungstechnik zu klären, bis die Elektromotorenproduktion einen Entwicklungsgrad ähnlich dem von Verbrennungsmotoren erreicht. Zwar erscheint die Fertigung von Elektromotoren aufgrund der geringeren Anzahl an Bauteilen zunächst deutlich primitiver, aufgrund der beachtlichen Auswirkungen nur kleiner konstruktiver Änderungen auf das elektromagnetische Verhalten der Maschine ist man jedoch vor völlig neue Herausforderungen gestellt. Dadurch wird die enge Vernetzung und Zusammenarbeit, insbesondere der beiden Ingenieursdisziplinen Elektrotechnik und Maschinenbau, immer wichtiger für die ganzheitliche Optimierung. Gefördert vom Bundesministerium für Bildung und Forschung der Bundesrepublik Deutschland konnte durch das Verbundprojekt „Hochflexible Produktionssysteme für effizienzgesteigerte E-Traktionsantriebe“, in dessen Rahmen die vorliegende Arbeit entstand, ein wesentlicher Beitrag hierzu geleistet werden. Das Projekt fokussierte sich auf die Entwicklung innovativer Herstellungsverfahren für Kupferspulen in Statoren von Traktionsantrieben. Die erreichbare Effizienzsteigerung wurde dabei grundsätzlich unter fertigungstechnischen Gesichtspunkten betrachtet und mit der Herstellung von Demonstratoren unter Beweis gestellt.

Die vorliegende Arbeit widmet sich der umformtechnischen Herstellung von Kupferspulen, die einen höheren Nutzfüllgrad und eine Verdrillung der Windungen ermöglichen, mit dem Ziel

effizientere E-Traktionsantriebe herstellen zu können. Dazu wird der Stand der Technik im Bereich der Elektromotorenfertigung und der Bestimmung der relevanten Verluste beleuchtet. Auf Basis dieser Grundlagen wird das wissenschaftliche Ziel formuliert und die Herangehensweise erarbeitet. Aufbauend auf Vorversuchen wird eine Fertigungskette entwickelt, die anhand der verwendeten Versuchseinrichtungen beschrieben wird. Am Ende dieser Fertigungskette stehen die eingesetzte Messtechnik und die erarbeitete Auswertemethodik, womit die Auswirkungen fertigungstechnischer Variationen auf das elektrische Verhalten nachgewiesen werden können. Im Ergebnisteil werden die Messdaten zusammengeführt und die Auswertungen analysiert. Die Zusammenfassung und ein Ausblick schließen diese Arbeit ab.



## **2 Grundlagen und Stand der Kenntnisse**

Zur Einführung in die Thematik werden zunächst Grundlagen vermittelt und der Stand der Kenntnisse dargelegt. Ein Überblick über verbreitete Arten von Elektromotoren zeigt zunächst die Vielfalt an elektrischen Antriebsmaschinen und deren Funktionsweise auf. Die anschließende Beschreibung zentraler Fertigungstechnologien im Elektromaschinenbau geht auf die wichtigsten Schritte innerhalb der Fertigungskette ein und weist darüber hinaus auf neue durch die Elektromobilität bedingte Herausforderungen hin. Die Ausführungen zur Auslegung von Elektromotoren beschränken sich auf die grundlegenden Vorgehensweisen und wesentlichen Einflussfaktoren. Den bei der Auslegung zu berücksichtigenden Verlustarten ist ein eigenes Unterkapitel gewidmet, da deren Reduzierung die Motivation dieser Arbeit begründet.

### **2.1 Grundlagen zu Elektromotoren**

Elektrische Maschinen gehören zu den elektromechanischen Wandlern. Sie werden eingeteilt in ruhende elektrische Maschinen wie beispielsweise Transformatoren und rotierende elektrische Maschinen, zu denen neben den Elektromotoren auch die Generatoren zählen (Kories und Schmidt-Walter, 2010). Prinzipiell können rotierende elektrische Maschinen als Motor und Generator betrieben werden, wodurch beispielsweise die Rekuperation von Bremsenergie ermöglicht wird. Nach einer kurzen Einführung zu den elektrotechnischen Grundlagen wird die Funktionsweise anhand der drei Grundformen elektrischer Maschinen erläutert. Im Wesentlichen lassen sich alle Ausführungen auf die drei im Folgenden beschriebenen Grundformen Gleichstrommaschine, Synchronmaschine und Asynchronmaschine zurückführen auch wenn die Benennung elektrischer Maschinen oft nach den magnetischen Feldern (Gleichfeld, Wechselfeld, Drehfeld), der Entstehung des Erregerfeldes (elektrisch, permanent), ihrer Bauart (elektronisch kommutiert, bürstenlos) oder ihrer Bewegungsrichtung (rotierend, linear) erfolgt. (Fischer und Linse, 2009; Busch, 2011)

Im Rahmen der folgenden Beschreibung von Elektromotoren werden zunächst die elektrotechnischen Grundlagen, gefolgt von den drei Grundformen elektrischer Maschinen, erklärt. Zuletzt wird auf das Funktionsprinzip einer permanenterregten Hybridsynchronmaschine eingegangen, welche als Referenzmaschine für die Untersuchungen dient.

#### **2.1.1 Elektrotechnische Grundlagen**

Elektromagnetismus ist eine der vier fundamentalen Wechselwirkungen. Die Beschreibung der elektromagnetischen Wechselwirkungen geht auf James Clerk Maxwell zurück, der in den 1860er-Jahren die sogenannten Maxwell-Gleichungen aufgestellt hat. Sie verknüpfen die

Wechselwirkungen von elektrischer Ladung und magnetischem Feld. Im einfachsten Fall wird ein stromdurchflossener elektrischer Leiter betrachtet, der ein Magnetfeld erzeugt. Wie in Abbildung 2-1 a) dargestellt, erzeugt ein vom Strom  $I$  durchflossener Leiter ein Magnetfeld mit der Flussdichte  $B$  tangential zum Leiter, das mit stets geschlossenen, gerichteten Feldlinien dargestellt wird. Durch Wicklung mehrerer Windungen zu einer Spule addieren sich die Magnetfelder gemäß Abbildung 2-1 b) zu einem axialen Magnetfeld innerhalb der Spule. Dabei bilden sich ein magnetischer Nordpol  $N$  und ein magnetischer Südpol  $S$  aus. (Kories und Schmidt-Walter, 2010)

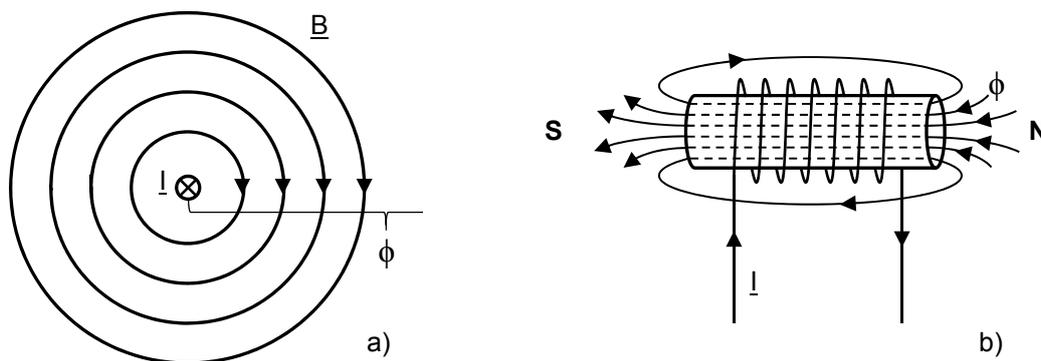


Abbildung 2-1: Elektromagnetische Wechselwirkung eines stromdurchflossenen Leiters (nach Kories und Schmidt-Walter, 2010)

Integriert man über die durch das Magnetfeld durchflossene Fläche  $A$ , so erhält man den magnetischen Fluss  $\phi$ :

$$\Phi = \int_A \underline{B} \cdot d\underline{A}$$

Formel 2-1

Neben der Flussdichte  $B$ , die von der Permeabilität des umgebenden Mediums abhängt, ist die davon unabhängige magnetische Feldstärke  $H$  definiert. Zwischen den beiden Größen steht die Permeabilität  $\mu_p$  als Faktor, die sich aus der magnetischen Feldkonstante  $\mu_0$  und der relativen Permeabilität  $\mu_r$  des umgebenden Mediums zusammensetzt.

$$\underline{B} = \mu_p \cdot \underline{H} = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot \underline{H}$$

Formel 2-2

Ein stromdurchflossener Leiter erzeugt nicht nur ein Magnetfeld, er wird auch selbst dadurch beeinflusst. So erfahren die bewegten Ladungen innerhalb eines Magnetfeldes eine Kraft, die Lorentzkraft genannt wird. Diese Kraft  $\underline{F}$  überträgt sich auf den Leiter der Länge  $\underline{l}$  im Magnetfeld  $\underline{B}$ , der vom Strom  $I$  durchflossen wird.

$$\underline{F} = I \cdot (\underline{l} \times \underline{B})$$

*Formel 2-3*

Die Formel 2-3 ist vektoriell beschrieben, da die Kraft von der Ausrichtung des Leiters zum Magnetfeld abhängt. Die Kraft ist maximal, wenn der Leiter senkrecht zum Magnetfeld steht, und null, wenn beide parallel verlaufen. Da in elektrischen Maschinen, wie in Abbildung 2-1 b) dargestellt, Spulen mit  $n$  Windungen verwendet werden und die Rechtwinkligkeit zwischen Magnetfeld und Leiter gegeben ist, lässt sich die Kraft  $F$  annähern mit:

$$F = n \cdot I \cdot l \cdot B$$

*Formel 2-4*

Da diese Kraft auf jeder Seite des Pols auftritt, ist sie für die Berechnung des Drehmoments  $M$  eines Rotors mit dem Radius  $r$  doppelt anzusetzen.

$$M = 2 \cdot r \cdot n \cdot I \cdot l \cdot B$$

*Formel 2-5*

Der umgekehrte Fall tritt auf, wenn sich ein Leiter in einem Magnetfeld bewegt. In Abhängigkeit des Geschwindigkeitsvektors  $\underline{v}$  des Leiters der Länge  $l$  im Magnetfeld  $\underline{B}$  wird gemäß Formel 2-6 eine Spannung  $U$  induziert. Demensprechend ist  $U$  maximal, wenn sich der Leiter senkrecht zum Magnetfeld bewegt.

$$U = \underline{l} \cdot (\underline{v} \times \underline{B})$$

*Formel 2-6*

Durch die Eigenschaft, dass sich gleichartige magnetische Pole abstoßen und verschiedenartige anziehen, erklärt sich das Funktionsprinzip von Elektromotoren, was zur Drehmomenterzeugung nach Formel 2-5 führt. Die Induktion von Spannungen (Formel 2-6), die selbst wieder zu Stromflüssen und somit magnetischen Feldern führen, bildet die Grundlage für die Fremderregung von Rotoren. Permanentmagnete aus Legierungen mit ferromagnetischem Eisen, Nickel oder Kobalt und bestimmten seltenen Erden können ohne zusätzlichen Strom als Gegenpol für elektrisch erzeugte Felder wirken. Vereinfacht rufen demnach jegliche Magnetfelder eine Kraft hervor, die in einem gewissen Winkel zueinander stehende Magnetfelder paarweise parallel ausrichtet. Diese erzeugt dann das Drehmoment im Motor. (Busch, 2011; Kuchling, 2014)

Im Grunde basiert das Funktionsprinzip aller Elektromotoren auf relativ einfachen Zusammenhängen. Die enge Wechselwirkung und die Koexistenz von elektrischem Strom und magnetischem Feld deuten aber bereits auf die enge Verkettung der Einflussgrößen bei den

bevorstehenden Untersuchungen hin, was eine ganzheitliche Beschreibung aller Effekte sehr schwer macht.

Betrachtet man die Verluste elektrischer Komponenten, so ist die Wärmeentwicklung ein einfacher Indikator für die Beurteilung der Effizienz des betreffenden Bauteils. Für den einfachen Fall eines mit dem konstanten Strom  $I$  durchflossenen ohmschen Leiters mit dem Widerstand  $R_{Ohm}$  berechnet sich die Wärmeleistung  $P$  zu:

$$P = I^2 \cdot R_{Ohm}$$

*Formel 2-7*

Der ohmsche Widerstand  $R_{Ohm}$  bestimmt bei gegebenem Strom  $I$  die entstehende Verlustwärme. Durch Querschnittserhöhung oder Wahl eines Werkstoffes mit höherem elektrischem Leitwert lässt sich der Wirkungsgrad dieses Leiters steigern. Der elektrische Widerstand eines Bauteils ist demnach eine wichtige konstruktive Stellgröße, die sich auf die Verluste und somit auch auf den Wirkungsgrad auswirkt.

Im elektrischen Wechselfeld kann jedoch nicht mehr von einem rein ohmschen Verhalten der Leiter ausgegangen werden. Der Widerstand einer elektrischen Komponente im Wechselfeld wird als Impedanz  $Z$  bezeichnet. Wie bei der Berechnung von elektrischen Wechselfeldern üblich, bietet sich für die Impedanz  $Z$  die Darstellung als komplexe Zahl an. (Keysight Technologies Inc., 2016)

$$\underline{Z} = |\underline{Z}|e^{j\varphi} = R + jX$$

*Formel 2-8*

Da komplexe Zahlen auch als Vektoren dargestellt werden können, sind sie im Folgenden ebenso mit einem Unterstrich gekennzeichnet. Somit stellt  $|\underline{Z}|$  den Betrag der Impedanz,  $e$  die Eulersche Zahl,  $j$  die imaginäre Einheit und  $\varphi$  den Phasenwinkel dar. Man spricht hier von der Polarform. In der kartesischen Form (Formel 2-8 rechts) beschreibt der Realteil  $R$  den Wirkwiderstand, auch Resistanz genannt, und der Imaginärteil  $X$  den Blindwiderstand des Bauelements, auch Reaktanz genannt. In Analogie zu den englischen Bezeichnungen resistance und reactance werden im Folgenden die Begriffe Resistanz und Reaktanz verwendet. (Keysight Technologies Inc., 2016)

Der Kehrwert der Impedanz stellt den Leitwert im elektrischen Wechselfeld dar und wird als Admittanz  $Y$  bezeichnet. Entsprechend der Impedanz  $Z$  lässt sich die Admittanz  $Y$  folgendermaßen als komplexe Zahl darstellen:

$$\underline{Y} = \underline{Z}^{-1} = G + jB^*$$

Formel 2-9

Der Realteil  $G$  wird Wirkleitwert, Konduktanz oder englisch conductance, der Imaginärteil  $B^*$  Blindleitwert, Suszeptanz oder englisch susceptance genannt. (Keysight Technologies Inc., 2016)

Die Impedanz ist von der Anregungsfrequenz abhängig. Deshalb werden neben anderen Darstellungsformen häufig der Real- und Imaginärteil der Impedanz über der Frequenz oder der auf eine Bezugsimpedanz normierte Betrag der Impedanz über der Frequenz aufgetragen. Bei elektrischen Maschinen eignet sich diese Darstellungsweise, um die frequenzbedingte Überhöhung der Impedanz gegenüber dem ohmschen Widerstand darzustellen. (Callegaro, 2016)

Die Messung der Impedanz in Abhängigkeit der Anregungsfrequenz erfolgt in der Regel mit Hilfe einer Wechselspannungsbrücke, auch LCR-Messbrücke genannt. Wie der Name bereits andeutet, sind diese Messbrücken geeignet, die Induktivität  $L$ , die Kapazität  $C$  und den Widerstand  $R$  eines Messobjektes zu bestimmen. Reale Bauteile wie die zu betrachtenden Spulen besitzen in der Regel zugleich einen ohmschen Widerstand, eine Kapazität und eine Induktivität, die modellhaft als Parallel- und Reihenschaltung, gegebenenfalls auch mehrerer dieser Elemente, beschrieben werden können. Exemplarisch ist dies in einem möglichen Ersatzschaltbild für reale Spulen in Abbildung 2-2 dargestellt.

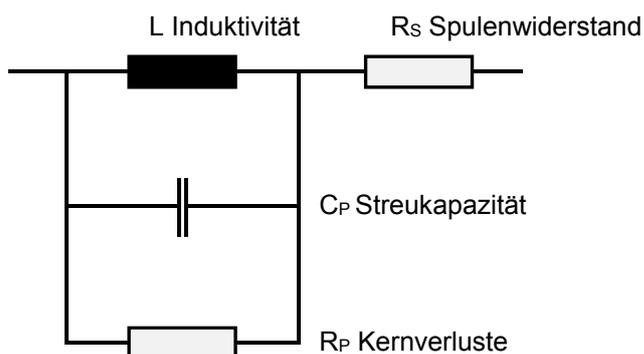


Abbildung 2-2: Ersatzschaltbild realer Spulen (nach Steudler, 2004)

Dies führt dazu, dass reale Bauelemente im Wechselstromkreis keinen einfachen ohmschen Widerstand mehr aufweisen, sondern durch einen komplexen Widerstand  $\underline{Z}$  in Form eines Vektors oder in komplexer Schreibweise dargestellt werden. Zur Verdeutlichung des Messprinzips einer Messbrücke genügt zunächst die einfache Darstellung gemäß Abbildung 2-3, die wie eine Wheatstonesche Brücke aufgebaut ist, jedoch mit einer Wechselspannung gespeist wird.

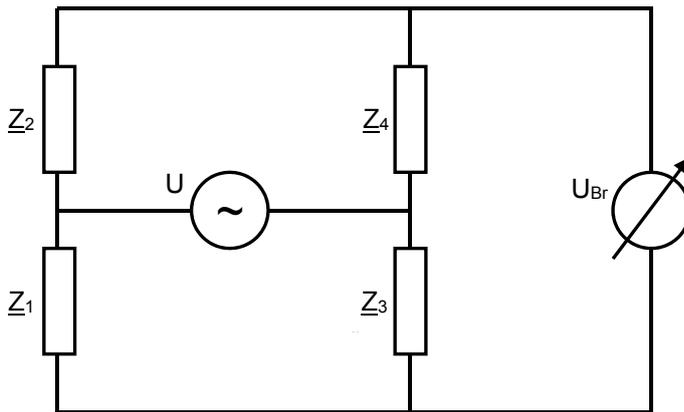


Abbildung 2-3: Prinzipdarstellung einer LCR-Messbrücke

Für die LCR-Messung regt die Wechselspannung  $U$  einen Schwingkreis an, der vier komplexe Widerstände  $Z$  aufweist. Einer der vier komplexen Widerstände stellt das Messobjekt dar, die anderen drei sind bekannt und können so eingestellt werden, dass die Brückenspannung  $U_{Br}$  null wird. Dies geschieht durch mindestens zwei veränderliche Induktivitäten, Kapazitäten oder Widerstände innerhalb der Schaltungen, die vereinfacht durch die Impedanzen  $\underline{Z}$  dargestellt sind. Damit die Brückenspannung  $U_{Br}$  null wird, muss folgende Bedingung erfüllt sein:

$$\frac{\underline{Z}_1}{\underline{Z}_2} = \frac{\underline{Z}_3}{\underline{Z}_4}$$

Formel 2-10

Zu beachten ist, dass die Schreibweise in Formel 2-10 jeweils den Vektor der Impedanz  $\underline{Z}$  beschreibt. Für die Bedingung in Formel 2-10, die für den Brückenabgleich notwendig ist, müssen die Betrags- und Winkelbedingung erfüllt sein:

$$|\underline{Z}_1||\underline{Z}_4| = |\underline{Z}_2||\underline{Z}_3| \text{ und } \varphi_1 + \varphi_4 = \varphi_2 + \varphi_3$$

Formel 2-11

Letztendlich gibt es zahlreiche Brückenarten, die auf verschiedenste Messaufgaben spezialisiert sind. Zumeist werden dabei zwei Impedanzen  $\underline{Z}$  durch möglichst frequenzunabhängige ohmsche Widerstände ersetzt und eine komplexe Impedanz, bestehend aus einstellbaren Widerständen, Kapazitäten und Induktivitäten, zum Abgleich der Brückenschaltung verwendet. Anhand der bekannten Größen und deren Verschaltung kann der zu bestimmende komplexe Widerstand der abgeglichenen Messbrücke berechnet werden. Demnach ist eine für die vorliegende Problemstellung geeignete Brückenschaltung zu identifizieren, worauf bei der Beschreibung der verwendeten Messtechnik in Kapitel 5.5.1 detailliert eingegangen wird.

Mit der Impedanzmessung kann eine gesamthafte Aussage über die gemessene Spule getroffen werden. Darüber hinaus finden sich Arbeiten, die eine Strommessung an den Einzeldrähten der

parallel geführten Leiter der Spulen vornehmen. Die Auswirkungen der Wirbelstromverluste, die eine ungleichmäßige Stromverteilung auf diese Leiter zur Folge haben und somit zu einem höheren Gesamtwiderstand führen, können damit nachgewiesen werden. In der Regel werden Ströme mit einem niederohmigen Messgerät, welches in Reihe geschaltet wird, gemessen. Darin befindet sich ein Shuntwiderstand, an dem die abfallende Spannung bestimmt wird (Bauer, Reuss und Nolle, 2014). Um den zu messenden Stromkreis nicht zu beeinflussen, muss der Shuntwiderstand viel kleiner als der Widerstand des Stromkreises sein. Im Falle von Wicklungen für Elektromotoren ist dies beim vorgegebenen geringen Messstrom nicht einfach realisierbar, da aufgrund des bereits sehr geringen Spulenwiderstandes am noch viel geringeren Shuntwiderstand praktisch keine messbare Spannung mehr abfallen würde. Eine weitere übliche Methode zur Strommessung ist die Messung mittels Stromzange. Dabei wird der zu messende Leiter von einem Ring umschlossen, auf dem sich eine Messspule befindet. Das den Leiter umgebende magnetische Wechselfeld regt den Eisenkern an, auf dem wiederum eine Messspule sitzt, in der ein zum Strom im Leiter proportionaler Strom  $I_{mes}$  induziert wird (Abbildung 2-4 oben). Im Grunde entspricht dies der Funktionsweise eines einfachen Transformators und funktioniert nur für die Messung von Wechselströmen.

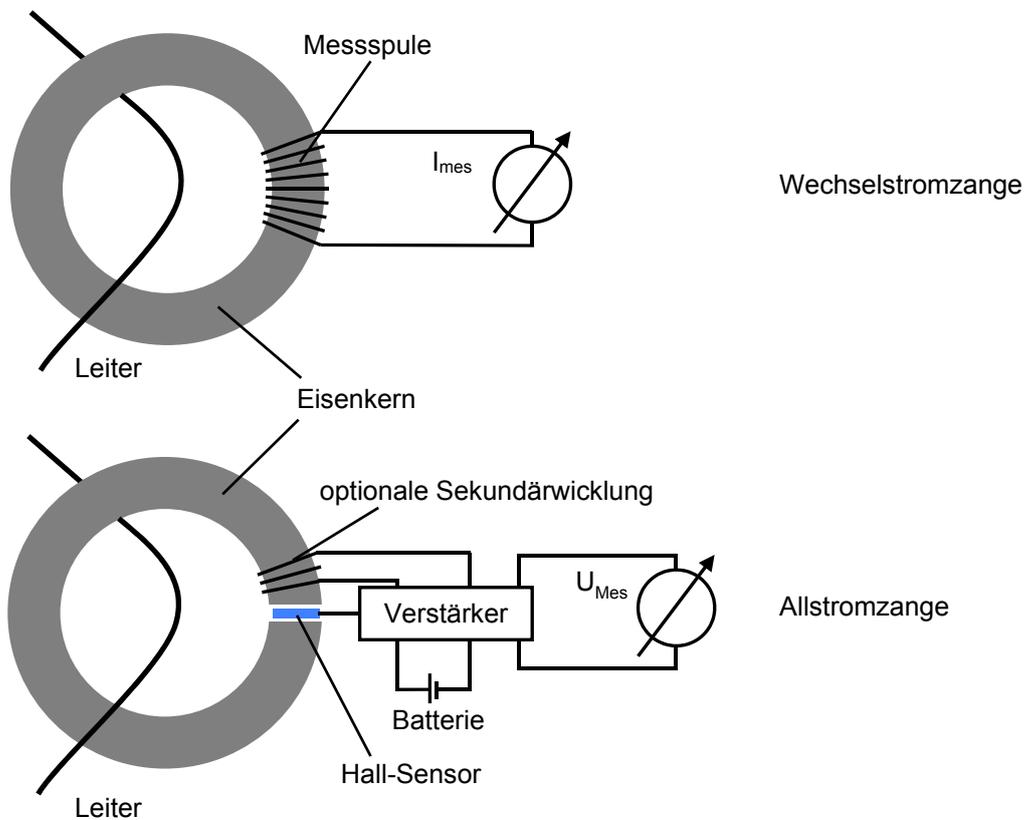


Abbildung 2-4: Funktionsprinzip von Wechselstrom- und Allstrommesszangen (nach Fischer und Linse, 2009)

Um zusätzlich auch Gleichströme messen zu können, werden sogenannte Allstromzangen verwendet. Diese besitzen im Gegensatz zu einer Messspule einen Hall-Sensor, wofür der Eisenkern an der Messstelle unterbrochen sein muss. Der Hall-Sensor liefert eine zum magnetischen Feld im Luftspalt proportionale Spannung, die bei Gleichstrom im zu messenden Leiter konstant und bei Wechselstrom veränderlich ist. Meistens wird jedoch das genauere Kompensationsverfahren angewandt. Der Hall-Sensor dient dabei lediglich als Nullindikator, und der Verstärker erzeugt mit der Sekundärwicklung ein Magnetfeld im Kern, welches das zu messende Feld aufhebt. Zudem sind die Eisenkerne in der Regel geteilt ausgeführt, sodass der zu messende Leiter einfach umfasst werden kann. (Fischer und Linse, 2009)

Somit sind nun die elektrotechnischen Grundlagen beginnend bei den elektromagnetischen Wechselwirkungen, welche die treibenden Kräfte eines Elektromotors sind, bis hin zur Impedanz, die eine Kenngröße für das Betriebsverhalten der Maschine ist, zusammenfassend dargestellt. Die praktische Nutzung zeigt sich in der folgenden Beschreibung der drei Grundformen elektrischer Maschinen. Die nächsten Kapitel gehen auf die Anwendung der physikalischen Prinzipien ein und zeigen spezifische Charakteristika des jeweiligen Maschinentyps auf.

### 2.1.2 Gleichstrommaschinen

Die älteste Bauform ist die Gleichstrommaschine. Sie besteht aus einem Stator, der entweder mit Permanentmagneten oder, wie in Abbildung 2-5 dargestellt, mit stromdurchflossenen Erregerwicklungen versehen ist.

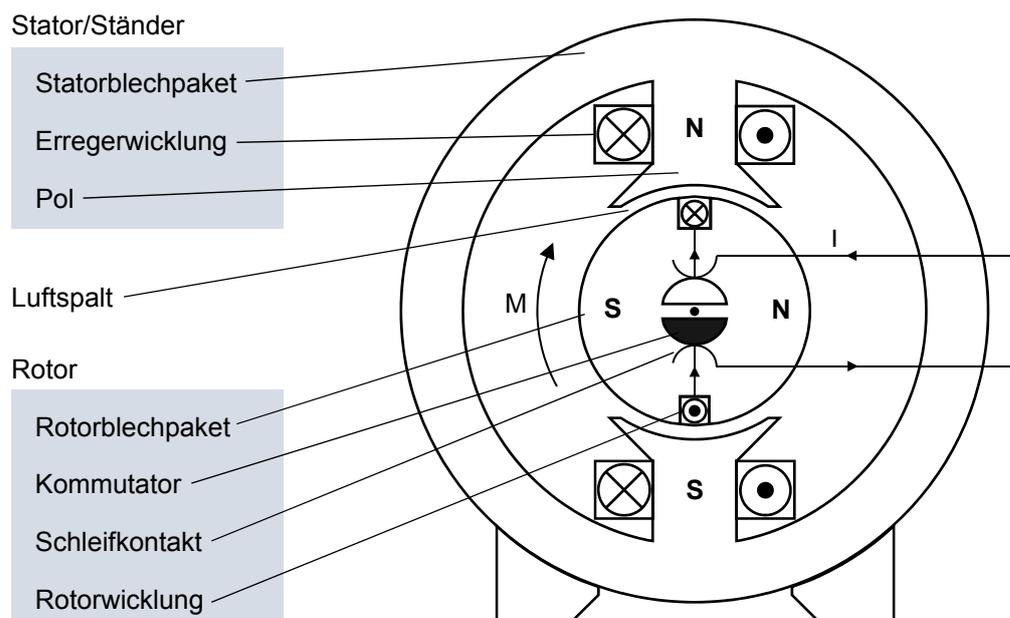


Abbildung 2-5: Gleichstrommaschine (nach Kories und Schmidt-Walter, 2010)

Die Erregerwicklungen erzeugen ein Magnetfeld im Luftspalt zwischen Rotor und Stator. Die Schleifkontakte, die den Strom auf die Lamellen des Kommutators übertragen, sind so angeordnet, dass die Rotorwicklung immer in diejenige Richtung mit Strom durchflossen wird, sodass das erzeugte Magnetfeld ein Moment in stets gleicher Richtung gegenüber dem Magnetfeld des Stators erzeugt. Dadurch wird letztendlich ein Drehmoment erzeugt. Im Allgemeinen können Gleichstrommaschinen durch Drehung des Rotors aufgrund einer äußeren Kraft auch als Generatoren eingesetzt werden. Durch den Kommutator wird dann ein pulsierender Gleichstrom erzeugt. Ein Vorteil dieses Maschinentyps liegt darin, dass sich die Drehzahl sehr einfach und genau einstellen lässt. Aufgrund der mit der Drehzahl zunehmenden Gegeninduktion im Rotor ist die Drehzahl einer Gleichstrommaschine annähernd proportional zur anliegenden Spannung. Auch ohne Last ist somit ein unzulässiges Hochdrehen der Maschine ausgeschlossen. Berücksichtigt man die lastabhängige Ankerrückwirkung, so ergeben sich sehr komplexe Problemstellungen, denen unter anderem mit Wendepol- und Kompensationswicklungen entgegengewirkt wird, was die Komplexität dieses vermeintlich einfachen Maschinentyps verdeutlicht, jedoch zum Verständnis der Wirkweise nichts beiträgt. Die Schwachstelle dieser Motoren sind die Schleifkontakte, da diese verschleifen und durch Abrieb den Motor verschmutzen. (Müller und Ponick, 2006; Kories und Schmidt-Walter, 2010; Busch, 2011)

Nach der Einteilung von Kories und Schmidt-Walter (2010) in Gleichstrom- und Drehstrommotoren sind die mit einphasigem Wechselstrom betriebenen Maschinen den Gleichstrommaschinen zugeordnet. Gleichstromreihenschlussmotoren, auch Universalmotoren genannt, sind hierbei die am weitesten verbreitete Bauform, die sowohl mit Wechsel- als auch Gleichstrom betrieben werden können. Sie werden in großen Stückzahlen für Haushaltsgeräte und tragbare Elektrowerkzeuge hergestellt.

### **2.1.3 Synchronmaschinen**

Wie auch die im nachfolgenden Kapitel beschriebenen Asynchronmaschinen gehören die Synchronmaschinen zu den Drehstrommotoren und unterscheiden sich damit wesentlich von der vorangegangenen Gleichstrommaschine. Die Speisung erfolgt durch ein mehrphasiges Drehfeld mit konstanter Amplitude und Winkelgeschwindigkeit. Symmetrische dreiphasige Antriebssysteme geben ein zeitlich konstantes Drehmoment ab, was umgekehrt auch für entsprechende Generatoren gilt. Dieser maßgebliche Vorteil ist somit der Hauptgrund für die weite Verbreitung von Drehstrommaschinen mit drei Phasen. (Kories und Schmidt-Walter, 2010; Busch, 2011)

Die Synchronmaschine (Abbildung 2-6) ist gekennzeichnet durch einen permanent- oder elektrisch erregten Rotor, der die gleiche Polpaarzahl wie der Stator besitzt. Das Statorfeld

zieht den Rotor, sodass sich beide synchron drehen. Somit ist die Drehzahl des Motors gleich der Drehfelddrehzahl. Der sich ergebende Schlupfwinkel zwischen Rotor- und Statorpol wächst mit höherem Drehmoment. Wird der Maximalwert des Schlupfwinkels überschritten, so fällt der Motor außer Tritt und hält an. (Kories und Schmidt-Walter, 2010)

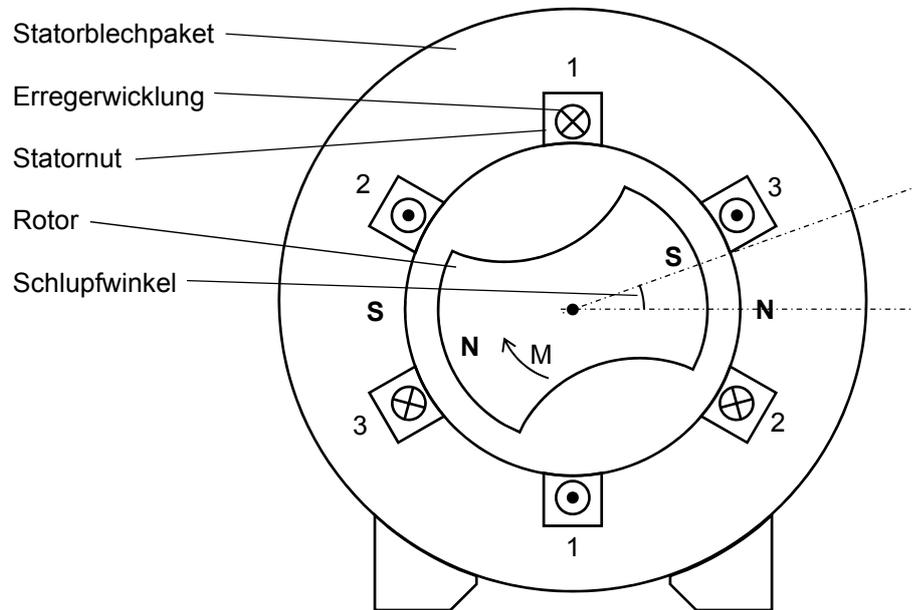


Abbildung 2-6: Synchronmaschine (nach Kories und Schmidt-Walter, 2010)

Da die Drehfelddrehzahl die Drehzahl  $n_{syn}$  des Synchronmotors vorgibt, lässt sich diese konstruktiv gemäß Formel 2-12 durch eine höhere Polpaarzahl  $p$  herabsetzen und ansonsten nur durch die Erregerfrequenz  $f_{Err}$  steuern, wofür Frequenzumrichter verwendet werden. (Fischer und Linse, 2009)

$$n_{syn} = \frac{f_{Err}}{p}$$

Formel 2-12

Mit Ausnahme von wie in Abbildung 2-6 dargestellten permanenterregten Rotoren sind verschleißanfällige Schleifringe oder eine induktive Übertragung des Erregerstroms auf den Rotor vorzusehen. Nur bei permanenterregten Maschinen erfolgt die Erregung über den Stator, auch Ständer genannt. (Müller und Ponick, 2006)

#### 2.1.4 Asynchronmaschinen

Unter den Drehfeldmaschinen ist der Asynchronmotor am weitesten verbreitet, da er ohne Wechselrichter und Permanentmagnete auskommt und somit sehr kostengünstig ist. Es gibt aber auch abgewandelte Formen der Asynchronmaschine, die für den einphasigen Wechselstrombetrieb geeignet sind. Im Falle eines wie in Abbildung 2-7 dargestellten

Schleifringläufers besitzt der Rotor, auch Läufer genannt, die gleiche Polpaarzahl wie der Stator. Das durch die Erregerwicklungen erzeugte Magnetfeld induziert ähnlichen einem Transformator eine Spannung in der Rotorwicklung. Schließt man den Stromkreis in der Rotorwicklung, so ergeben sich ein Stromfluss sowie ein Magnetfeld, welches beim Anlaufen des Motors die Erregerfrequenz besitzt. Dreht sich der Rotor, so werden die Frequenz und die Amplitude der Rotorspannung geringer. Sie hängen von der Relativgeschwindigkeit zwischen Stator Drehfeld und Rotor ab. Der Rotorstrom und das Stator Drehfeld bewirken letztendlich das Drehmoment. (Kories und Schmidt-Walter, 2010; Fischer und Linse, 2009)

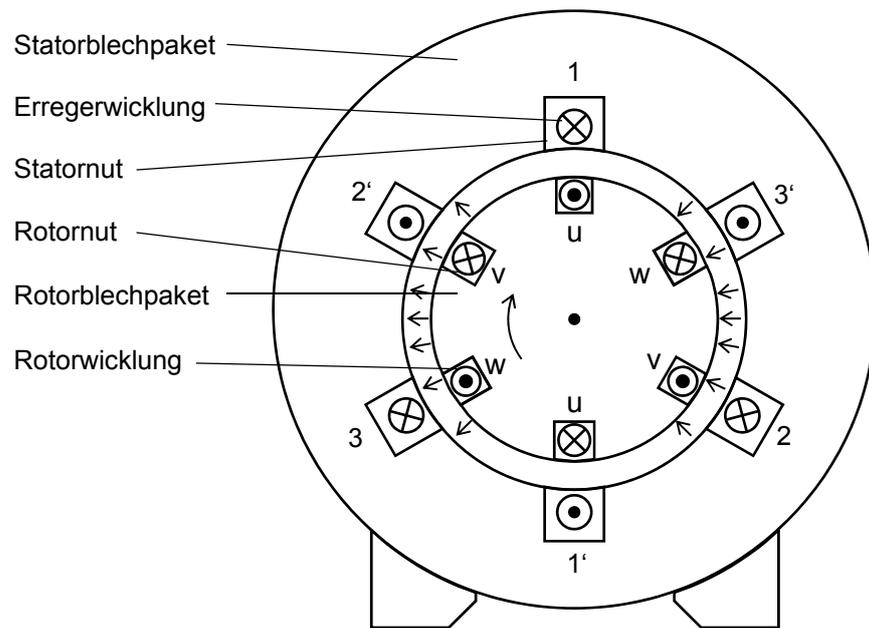


Abbildung 2-7: Asynchronmaschine (nach Kories und Schmidt-Walter, 2010)

Sobald die Rotordrehzahl die Drehfelddrehzahl erreicht, wird keine Spannung mehr im Rotor induziert, und das Drehmoment ist null. Hierfür wäre aber ein verlust- und reibungsfreier Rotor notwendig, sodass in der Realität immer ein gewisses Drehmoment und somit Schlupf anliegt. Im Gegensatz zum Schlupfwinkel bei der Synchronmaschine ist bei der Asynchronmaschine der Schlupf  $s$  gemäß Formel 2-13 als Differenz zwischen Drehfelddrehzahl  $n_0$  und Rotordrehzahl  $n_R$  bezogen auf die Drehfelddrehzahl  $n_0$  definiert. (Fuest und Döring, 2000)

$$s = \frac{n_0 - n_R}{n_0}$$

Formel 2-13

Daraus ergibt sich, dass die Drehzahl von Asynchronmaschinen weitestgehend durch die Drehfelddrehzahl festgelegt ist. So liegt die theoretische Drehzahl für Maschinen mit einem Polpaar im 50 Hz Drehstromnetz bei  $3000 \text{ min}^{-1}$ , bei zwei Polpaaren bei  $1500 \text{ min}^{-1}$  und bei drei Polpaaren nur noch bei  $1000 \text{ min}^{-1}$ . (Kories und Schmidt-Walter, 2010)

Schließt man die Rotorwicklungen direkt auf dem Rotor kurz, so werden keine verschleißanfälligen Schleifkontakte benötigt. Man spricht dann vom Kurzschlussläufer oder Käfigläufer. Als Käfigläufer werden in der Regel Maschinen bezeichnet, deren Rotoren einen zumeist aus Aluminium, seltener aus Kupfer oder Bronze gegossenen Käfig besitzen, welcher alle in den Rotornuten verlaufenden Stäbe kurzschließt (Abbildung 2-8). Dazu wird die Schmelze in das fertige Rotorblechpaket eingegossen, sodass eine feste Verbindung entsteht. (Fuest und Döring, 2000)

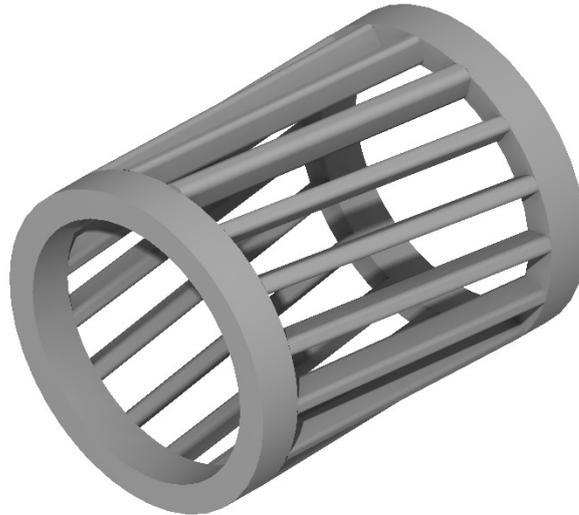


Abbildung 2-8: Leitersystem eines Käfigläufers (nach Fuest und Döring, 2000)

Käfigläufer sind sehr robust und kostengünstig herzustellen, bieten aber aufgrund der dauerhaften leitenden Verbindung aller Stäbe keine Möglichkeit mehr, durch Schaltung der Pole die Drehzahl zu ändern oder durch Schaltung von Widerständen zur Anlaufstromreduzierung einen Sanftanlauf zu ermöglichen. Lediglich die Schaltung des Stators mittels Stern-Dreieck-Anlaufschaltung führt zu reduzierten Anlaufströmen, was jedoch nur für das Anlaufen ohne Last geeignet ist. Auch deswegen werden diese Schaltungen bereits häufig durch Frequenzumrichter ersetzt. Eine weit verbreitete Variante der Käfigläufer sind die Stromverdrängungsläufer, die den in dieser Arbeit näher betrachteten Stromverdrängungseffekt nutzen. Da der Rotor nur beim Anlaufen der Maschine mit einem hochfrequenten Wechselfeld erregt wird, kann die frequenzabhängige Widerstandserhöhung durch die Stromverdrängung zur Begrenzung des Anlaufstroms genutzt werden. (Müller und Ponick, 2009; Kories und Schmidt-Walter, 2010)

### 2.1.5 Hybridsynchronmaschinen

Die Untersuchungen in der vorliegenden Arbeit beziehen sich auf eine Referenzmaschine, die als Hybridsynchronmaschine bezeichnet wird. Dieses Kapitel überträgt die Kenntnisse der drei

vorangegangenen Grundformen auf einen spezifischen Maschinentyp und schließt damit die Grundlagen zu Elektromotoren ab.

Die gewählte Maschine ist eine permanenterrechte Synchronmaschine, wie sie in Kapitel 2.1.3 bereits dargestellt ist. Die zugrundeliegenden Auswahlkriterien für diesen Maschinentyp als Traktionsantrieb für Elektrofahrzeuge sind im Konferenzbeitrag von Merwerth (2014) beschrieben. Demnach lieferte der Vergleich mit anderen Konzepten durchwegs sehr gute Bewertungen in den Kriterien:

- Konstante Leistung über den Geschwindigkeitsbereich
- Drehmoment zu Statorstromfluss
- Effizienz über den gesamten Arbeitsbereich
- Gewicht

Bei der Hybridsynchronmaschine wird neben den Permanentmagneten auch die Reluktanz des Rotorblechpakets genutzt, um Drehmoment zu erzeugen. Die zugrundeliegende Kraft ist die Reluktanzkraft und wird auch als Maxwellsche Kraft oder Maxwellsche Zugspannung bezeichnet. Neben der in Kapitel 2.1.1 beschriebenen Lorentzkraft, welche auf stromdurchflossene Leiter wirkt und somit die Grundlage der Elektromotoren darstellt, wirkt diese Kraft auf Grenzflächen zwischen Gebieten unterschiedlicher Permeabilität (Müller, Vogt und Ponick, 2008). In Gloor (2010) und Gerling (2016) wird sie sehr anschaulich anhand eines Hubmagneten, wie in Abbildung 2-9 dargestellt, hergeleitet. Durch den Strom  $I$  in einer Spule wird ein magnetischer Fluss  $B$  durch den Hubmagneten erzeugt, der sich über einen Luftspalt auf einen Eisenanker überträgt. Durch die Änderung der magnetischen Energie im Luftspalt entsteht die stets anziehende Reluktanzkraft  $F$ . Die damit verbundene Änderung des magnetischen Widerstands wird als Reluktanz bezeichnet.

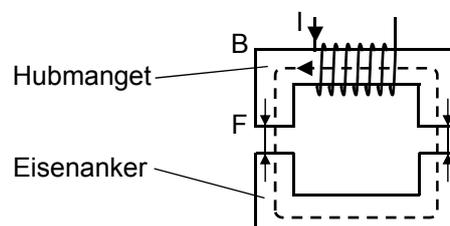


Abbildung 2-9: *Elektromechanische Energiewandlung am Beispiel eines Hubmagneten (nach Gloor, 2010; Gerling, 2016)*

Überträgt man das Beispiel des Hubmagneten auf einen Motor, so entsprechen die Wicklungen auf den Statorzähnen dem Hubmagneten. Auf der Rotorseite werden über den Umfang verteilte Bereiche benötigt, die wie der Eisenanker wirken. Somit sind, entsprechend der den Eisenanker umgebenden Luft, auch Bereiche geringer magnetischer Leitfähigkeit erforderlich. Bei

Reluktanzmaschinen werden diese Pole und Lücken beispielsweise durch Aussparungen im Rotorblechpaket hergestellt (Abbildung 2-10). Da diese Aussparungen den magnetischen Fluss behindern, werden sie als Flusssperrern bezeichnet.

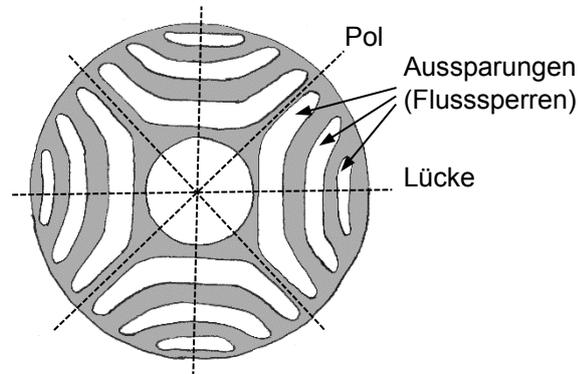


Abbildung 2-10: Rotorblech einer Synchron-Reluktanzmaschine (nach Gloor, 2010; Gerling, 2016)

Das Drehmoment ergibt sich aus der anziehenden Reluktanzkraft zwischen dem Pol und dem korrespondierenden Zahn des Stators, der um den sogenannten Polwinkel versetzt ist. Durch das Drehfeld des Stators wandert der korrespondierende Zahn des Stators, sodass eine Drehbewegung entsteht. Ein wesentlicher Vorteil von Reluktanzmaschinen ist, dass keine Stromwärmeverluste im Rotor erzeugt werden. Die Abwärme entsteht nur in den Statorspulen, die einfacher zu kühlen sind. (Gerling, 2016)

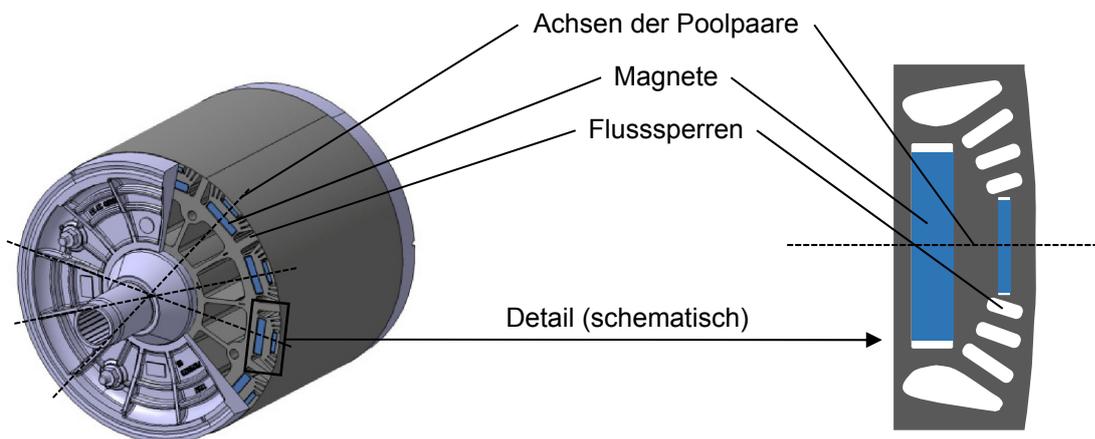


Abbildung 2-11: Rotor einer Hybridsynchronmaschine (nach Merwerth, 2014)

Nutzt man nun ein Blechpaket, welches hinsichtlich der Reluktanz optimiert ist und zudem Permanentmagnete aufnehmen kann, so lassen sich Hybridsynchronmaschinen mit hoher Leistungsdichte und gutem Wirkungsgrad über einen großen Drehzahlbereich entwickeln (Abbildung 2-11).

## 2.2 Fertigungstechnologien im Elektromaschinenbau

Nach den elektrotechnischen Grundlagen und der Funktionsweise elektrischer Maschinen folgt nun ein Überblick über die zur Herstellung des Rotors einer Hybridsynchronmaschine notwendigen Fertigungstechnologien. Aufgrund der vielfältigen Varianten erfolgt dies exemplarisch am in dieser Arbeit betrachteten Stator. Dennoch ist die Fertigungskette weitestgehend auf andere Statorbauformen und sogar teilweise auf die Rotorherstellung übertragbar. In Abbildung 2-12 ist gemäß Risch et al. (2016) der Ablauf der Rotorfertigung dargestellt, der um die zugeführten Materialien ergänzt ist.

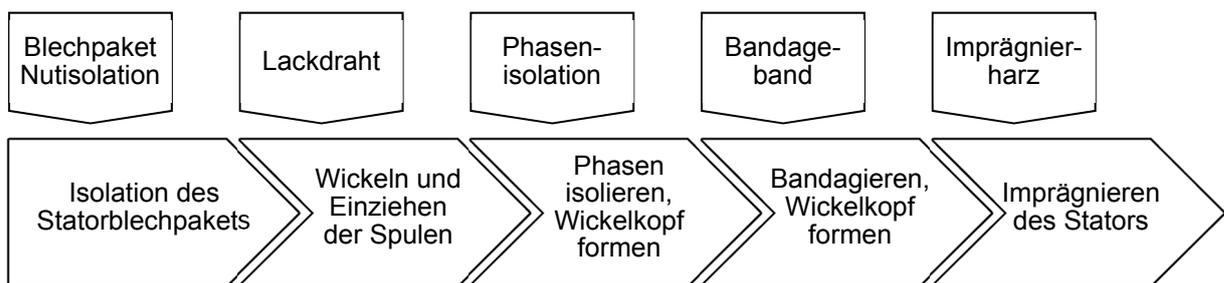


Abbildung 2-12: Fertigungskette eines Stators (nach Risch et al., 2016)

So sind die wesentlichen benötigten Materialien das Blechpaket, der Lackdraht und Isolierwerkstoffe. Für die Montage des Stators müssen zunächst die Nuten des Blechpakets mit Isolationspapier versehen werden, damit im Anschluss der zu Spulen gewickelte Lackdraht in mehreren Lagen eingebracht werden kann. Nach dem Einbringen der Nutisolation sowie dem Verschalten und Prüfen der Spulen werden die Wickelköpfe geformt, bandagiert und nochmals geformt, sodass ein kompakter Wickelkopf entsteht. Das abschließende Imprägnieren sorgt für die mechanische Stabilität, zusätzliche elektrische Isolation und bessere thermische Leitfähigkeit für die Kühlung. Die Hauptbestandteile des Stators sind demnach das Blechpaket, der gewickelte Lackdraht und diverse Isolierwerkstoffe, auf deren Verarbeitung im Folgenden eingegangen wird.

### 2.2.1 Blechpaket

Das Blechpaket besteht aus hunderten dünner Blechlagen, die zu einem Paket verbunden werden müssen. Das Blech wird im Gegensatz zu gewöhnlichen Konstruktionswerkstoffen nicht anhand der mechanischen Festigkeit, sondern im Hinblick auf die Anwendung bezüglich der magnetischen Kennwerte charakterisiert. Aufgrund der Forderungen nach hohen Drehzahlen gewinnt jedoch bei Rotoren die mechanische Festigkeit wegen der hohen Fliehkräfte ebenfalls immer mehr an Bedeutung. Elektroband ist der mengenmäßig am weitesten verbreitete weichmagnetische Werkstoff. Für rotierende Maschinen werden in der Regel sogenannte nichtkornorientierte Sorten verwendet, die im Gegensatz zu den

kornorientierten Varianten weitestgehend isotrope Eigenschaften besitzen. Hierfür kommen kohlenstoffarme Stähle mit bis zu 3,5 % Silizium zum Einsatz, die durch mehrere Walz- und Glühprozesse zu Elektroband verarbeitet werden. Das Elektroband kann mit und ohne bereits erfolgter Schlussglühung bezogen werden. Bei nicht schlussgeglühten Bändern werden die fertigen Blechpakete erst nach dem Stanzpaketieren gegläht. Neben den unbeschichteten, blanken Erzeugnissen sind Bänder mit diversen isolierenden Beschichtungen erhältlich, die die Ausbildung von Wirbelströmen über die Blechlagen hinweg verhindern. Zusätzlich zu diesen Beschichtungen können Backlackbeschichtungen aufgetragen werden, die eine Sonderform des Paketierens ermöglichen. Wichtigste Kenngröße für die Auswahl von Elektrobandern ist aber die Permeabilität, also die magnetische Leitfähigkeit. Sie wird bestimmt durch die magnetische Feldstärke  $H$ , die benötigt wird, um eine bestimmte magnetische Polarisation  $J$  im Werkstoff hervorzurufen. Die erreichbare Magnetisierbarkeit und die durch das magnetische Wechselfeld hervorgerufenen Ummagnetisierungsverluste werden anhand von dynamischen Hystereseschleifen, wie in Abbildung 2-13 schematisch erklärt, beurteilt. (Schoppa, 2001)

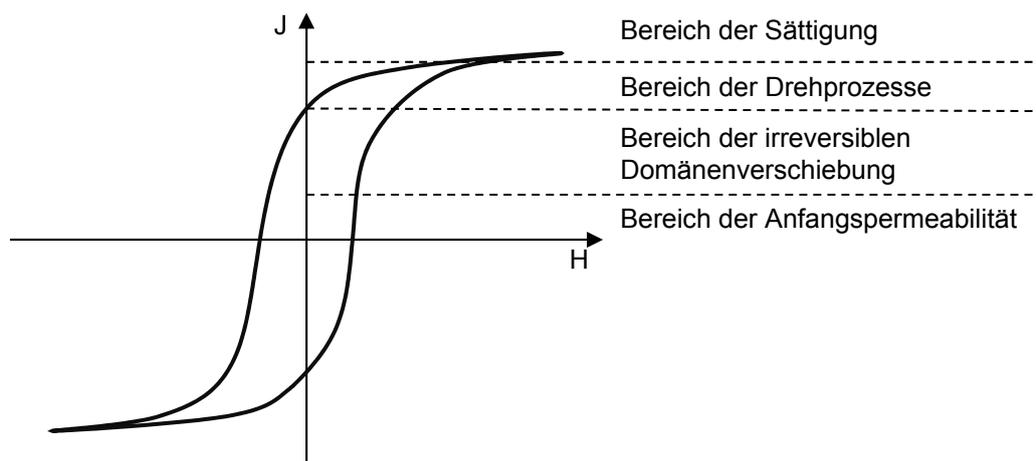


Abbildung 2-13: Dynamische Hystereseschleife (nach Schoppa, 2001)

Im Bereich der Anfangspermeabilität finden lediglich reversible Prozesse statt. Dabei werden magnetische Domänenwände verschoben, und innerhalb der Domänen finden Drehprozesse der Magnetmomente statt. Im Bereich der irreversiblen Domänenverschiebung ist das magnetische Feld bereits so hoch, dass die Magnetisierung auch ohne äußeres Feld aufrechterhalten bliebe. Die Permeabilität ist in diesem Bereich am größten. Steigert man die Feldstärke, so kommt es zu weiteren reversiblen Drehungen der Magnetmomente, die aber nur noch einen geringen Anstieg in der Magnetisierung hervorrufen, bevor letztendlich die Sättigung des Materials eintritt. Die Fläche der Hystereseschleife spiegelt somit den Energiebedarf für die Ummagnetisierung des Materials und somit die dadurch hervorgerufenen Verluste wider. Der

Bereich der Sättigung gibt Auskunft darüber, bis zu welcher Feldstärke eine Ummagnetisierung des betreffenden Werkstoffes möglich ist. (Schoppa, 2001)

Durch die nachfolgenden Verarbeitungsschritte wird jedoch das Ausgangsmaterial weiter geschädigt. Nach Schoppa (2001) werden die Blechzuschnitte, auch Lamellen genannt, im Wesentlichen durch Stanzen, Laserschneiden und selten mittels Wasserstrahlschneiden hergestellt (Tabelle 2-1).

*Tabelle 2-1: Anwendungsbeispiele für die üblichen Schneidverfahren von Elektrobandlamellen (nach Schoppa, 2001)*

<b>Schneidverfahren</b>	<b>Geschnittene Menge</b>	<b>Maschinenart</b>
Stanzen (Komplettbeschnitt oder Stanzpaketieren)	Mittlere Stückzahl (< 1 Mio. Bleche / Jahr)	Alle Maschinenarten (z. B. IEC 1 ... 10 kW, Vorschaltgeräte)
Stanzen (Folgeschnitt)	> 1 Mio. Bleche / Jahr	Alle Maschinenarten (z. B. IEC 1 ... 315 kW)
Rondenschnitt bzw. ab ø ca. 750 mm Kreisschere; Vorstufe des Einzelnutverfahrens	Kleinere Stückzahl oder Prototypenfertigung	Großmaschinen
Einzelnutverfahren	Kleinere Stückzahl oder Prototypenfertigung	Größere Maschinen (z. B. ab IEC 75 kW)
Laserschneiden	Kleinere Stückzahl oder Prototypenfertigung	Alle Maschinenarten, bes. Großmaschinen
Wasser-Abrasivestrahlschneiden	Sehr kleine Stückzahl oder Prototypenfertigung	Alle Maschinenarten; bei komplizierten Lamellenformen nur bedingt geeignet

Die am häufigsten angewendete Methode ist hierbei das Stanzen oder Scherschneiden in unterschiedlichen Ausprägungen. So wird im Komplettschnitt die Lamelle in einem Hub hergestellt, was für einfache Formen ausreichend ist. Bei komplexeren Geometrien oder höheren Genauigkeitsanforderungen sind Folgeverbundwerkzeuge erforderlich. Hierbei erfolgt die Fertigung in mehreren Stufen, sodass zusätzlich auch ein mehrstufiger Schneidprozess oder ein abschließendes Verknüpfen der Bleche in einem Werkzeug ermöglicht werden. Man spricht dann von Stanzpaketieren. (Schoppa, 2001)

Neben dem Stanzpaketieren gibt es noch weitere Verfahren, die dazu dienen, das Lamellenpaket bis zum nächsten Fertigungsschritt zu fixieren. Ein Überblick über Verfahren, Produktionsmengen und Anwendungsbeispiele ist in Tabelle 2-2 dargestellt.

Tabelle 2-2: Anwendungsbeispiele für die üblichen Befestigungsverfahren von Elektrobändlamellen (nach Schoppa, 2001)

Verbindungsverfahren	Produzierte Menge	Maschinenart
Stanzpaketieren	Ab 500.000 Pakete / Jahr (in einigen Fällen ab 300.000 Pakete / Jahr)	Kleinmaschinen, Universal- motoren, Asynchronmotoren bis IEC Baureihe 90 (bis $\varnothing$ 140 mm, sowie bis Paketlänge 140 mm), Motoren für Automobilindustrie und Haushaltstechnik, Vorschaltgeräte
Laserpaketieren	200.000 ... 500.000 Pakete / Jahr	Wie oben
Schweißen	Keine Angaben	Bahnmotoren, Hocheffizienz- motoren, Großmaschinen, Vorschaltgeräte
Verkleben	Keine Angaben	Hocheffizienzmotoren, einige (bes. große) Linearantriebe
Nieten	Keine Angaben	Asynchronmotoren IEC Baureihe 56 bis 185, Vorschaltgeräte
Klammern	Keine Angaben	Asynchronmotoren IEC Baureihe 56 bis 185, Hocheffizienzmotoren
Verschrauben	Keine Angaben	Sehr selten verwendet (z. B. bei Prototypen)
Zusammenhalten der Lamellen mit Wicklungen	Keine Angaben	Einige Hermetikmotoren

Das Einbringen der Wicklungen, das Tränken mit Imprägnierharz und das Einpressen in das Gehäuse erhöhen die Festigkeit des Stators zusätzlich. Jedoch bringt jeder weitere Verarbeitungsschritt eine Beeinflussung des Blechpakets mit sich, was sich in zusätzlichen Verlusten niederschlägt.

### 2.2.2 Wicklungen

Bis auf sehr wenige Ausnahmen bestehen die Wicklungen von Elektromotoren aus Kupfer. Dies ist begründet durch die gute Leitfähigkeit von reinem Elektrolytkupfer ( $58 \cdot 10^6$  S/m) bei einem akzeptablen Preis gegenüber teurem Silber, welches eine nur geringfügig höhere Leitfähigkeit ( $61 \cdot 10^6$  S/m) besitzt. Das seltener eingesetzte, preiswerte Aluminium besitzt bereits eine deutlich geringere Leitfähigkeit ( $34 \cdot 10^6$  S/m) und außerdem eine geringere Festigkeit. Zur Erhöhung der Warmfestigkeit werden Kupferlegierungen mit Silber oder Zirkon

eingesetzt, welche die Leitfähigkeit nur geringfügig verringern. (Wiedemann und Kellenberger, 1967)

Für die Herstellung von Spulen muss der gezogene Kupferdraht isoliert werden. Dies geschieht durch den Auftrag mehrerer Lackschichten. Wie in Abbildung 2-14 dargestellt, bedeckt ein Grundlack (engl. Primer) den Blankdraht, um eine gute Verbindung zum eigentlichen Isolationslack (engl. Overcoat) herzustellen. Zusätzlich können Funktionsschichten wie Gleitmittel oder Backlack aufgetragen werden. In der Regel werden diese Lacke selbst in mehreren Schichten aufgetragen. (Hagedorn, Sell-Le Blanc und Fleischer, 2016)

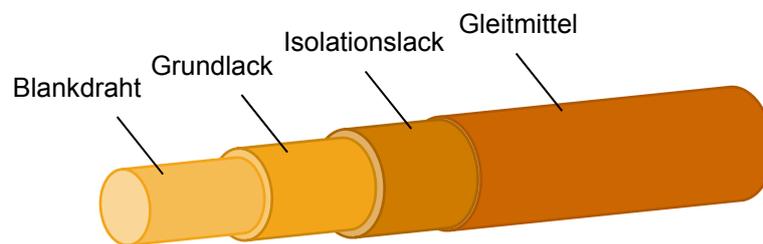


Abbildung 2-14: Aufbau eines Leiters für Wickelgüter (nach Hagedorn, Sell-Le Blanc und Fleischer, 2016)

Neben den preiswert herstellbaren Runddrähten sind nahezu beliebige Abmessungen verfügbar. Die Bezeichnungen für die Produkte sind dabei vielfältig und meist weit gefasst. Auch häufig eingesetzte Flach- oder Rechteckdrähte werden beispielsweise von Foliendicke bis hin zu massiven Stäben angeboten. Durch die große Auswahl an Querschnitten ist es möglich, den jeweiligen Nutquerschnitt bestmöglich auszunutzen. Der Nutfüllgrad beschreibt hierbei das Verhältnis von Kupferquerschnittsfläche zu Nutquerschnittsfläche. Um die durch die Stromverdrängung bedingten Wechselstromverluste gering zu halten, werden oft unterteilte Leiter in Form von parallel geschalteten Drähten verwendet, die zudem noch hinsichtlich ihrer Lage in der Nut umgeschichtet werden müssen. Insbesondere in der Hochfrequenztechnik werden hierfür Litzen, welche aus einer Vielzahl dünner verdrehter Runddrähte hergestellt sind, verwendet. Bei sehr großen Motoren und Generatoren kommen meist rechteckige Leiter zum Einsatz. Für die Umschichtung hat sich hierbei eine Methode bewährt, die nach ihrem Erfinder als Roebelstab bezeichnet wird und in Abbildung 2-15 schematisch dargestellt ist. (Müller, Vogt und Ponick, 2008; Hagedorn, Sell-Le Blanc und Fleischer, 2016)

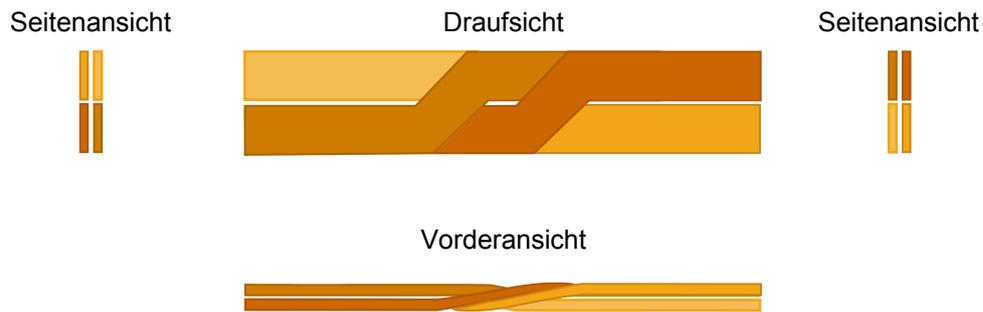


Abbildung 2-15: Schematische Darstellung eines Roebelstabes (nach Müller, Vogt und Ponick, 2008)

Die isolierten und gegebenenfalls unterteilten Leiter müssen schließlich zu Spulen verarbeitet werden. Bei starren Leitern erfolgt dies hauptsächlich durch Biegung der bereits im Stator montierten Leiterenden und anschließendem Verschweißen, wie es bei der Herstellung des Traktionsantriebes für den Chevy Spark in Abbildung 2-16 gezeigt ist.

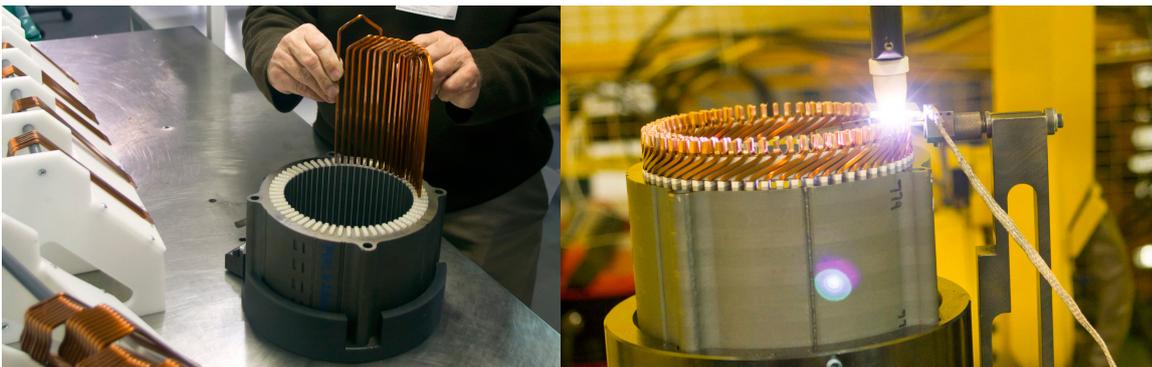


Abbildung 2-16: Montage und Schweißen eines Hairpinstators (Sherman, 2011)

Runddrähte werden hingegen gewickelt, was eine deutlich geringe Anzahl an Fügstellen erfordert. Die Gestaltung der Wicklungen einer Maschine und deren Montageart ist eine der Kernkompetenzen bei der Auslegung elektrischer Maschinen. So sei an dieser Stelle auf Sequenz (1950) verwiesen, der verschiedenartigste Ständerwicklungen detailliert beschreibt. Nach Müller, Vogt und Ponick (2008) lassen sich die Bezeichnungen von am Energieumsatz beteiligten Wicklungen nach den in Tabelle 2-3 aufgeführten Kennzeichen ordnen.

*Tabelle 2-3: Allgemeine Bezeichnungen von am Energieumsatz beteiligten Wicklungen (nach Müller, Vogt und Ponick, 2008)*

<b>Kennzeichnendes</b>	<b>Bezeichnung</b>
Spulenweite	Durchmesserspule gesehnte Spule
Spulenwindungszahl	Spulenwicklung Stabwicklung
Zahl der Schichten	Einschichtwicklung Zweischichtwicklung
Art der Herstellung	Formspulen- oder Einlegewicklung Träufelwicklung Einziehwicklung Halbformspulenwicklung
Form der Spulen bzw. Wicklungsköpfe	Rechteckspulenwicklung Trapezspulenwicklung Evolventenwicklung Korbwicklung, Formspulenwicklung
Führung der Schaltverbindung von einer Spule	Schleifenwicklung Wellenwicklung
Zahl der Wicklungskopfebene bei Rechteckspulenwicklung	Zweiebenen- oder Zweietagenwicklung Dreiebenen- oder Dreietagenwicklung
Lage der Wicklungsköpfe bei Korb- oder Evolventenwicklung	Zylindermantel- oder Zylinderwicklung Kegelmantelwicklung Stirnwicklung

Zudem lassen sich aus fertigungstechnischer Sicht die Wicklungen nach ihrem Wickelschema unterteilen. Nach Hagedorn, Sell-Le Blanc und Fleischer (2016) werden sie in wilde Wicklungen, orthozyklische Wicklungen, Schraubenwicklungen, Kreuzwicklungen, Pilgerschrittwicklungen und Ringkernwicklungen eingeteilt. Die betrachteten Elektromotoren mit gewickelten Spulen besitzen praktisch durchwegs wilde Wicklungen. Wegen der geordneten Ablage des Drahtes besäßen zwar orthozyklische Wicklungen einen deutlich höheren Nutfüllgrad, jedoch ist die Herstellung dieser Wicklungen für die Massenproduktion meist zu kostenintensiv. Die übrigen Wickelschemata finden nur in anderen elektromagnetischen Wandlern Anwendung. Für die Fertigung wilder Wicklungen, bei denen der Draht ungeordnet auf den Spulenkörper aufgebracht wird, sind die Wickelverfahren Linear-, Flyer- und Nadelwickeln als wichtigste Vertreter zu nennen (Abbildung 2-17).

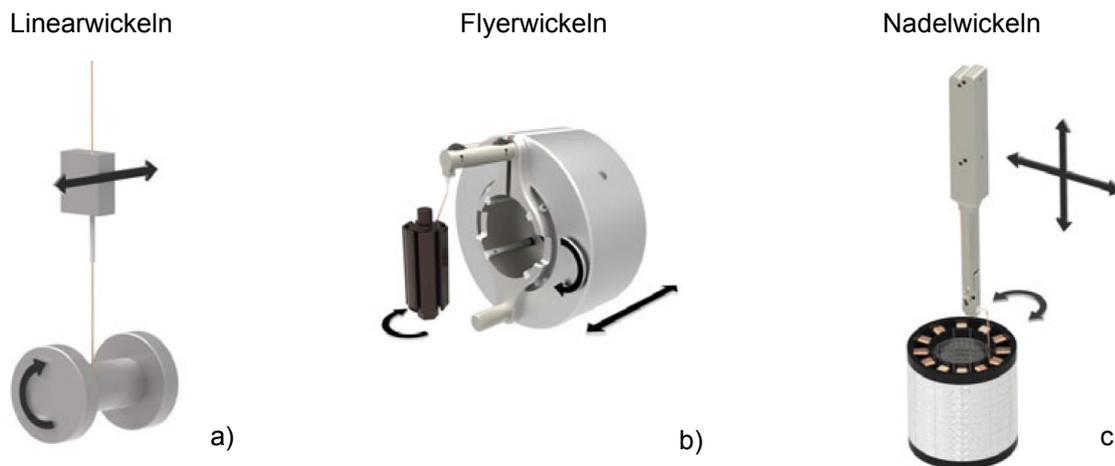


Abbildung 2-17: Kinematik der Wickelverfahren (nach Hagedorn, Sell-Le Blanc und Fleischer, 2016)

Beim Linearwickeln rotiert der Spulenkörper, und die Drahtzuführung bewegt sich lediglich linear, um den Draht gleichmäßig zu verteilen (Abbildung 2-17 a)). Der sogenannte Flyer rotiert beim Flyerwickeln um den Spulenkörper herum und wird zusätzlich linear verschoben. Oft werden damit, wie in Abbildung 2-17 b) gezeigt, Rotoren oder Statorsterne direkt bewickelt, weshalb die Rotationsachse am Rotor das schrittweise Weiterdrehen der Zähne verdeutlichen soll. Es entfallen damit weitere Montageprozesse für die Spulen. Ist die Zugänglichkeit zur Nut sehr eingeschränkt, so bietet sich das Nadelwickeln an (Abbildung 2-17 c)). Dazu wird der Draht durch ein Rohr geführt, welches als Nadel bezeichnet wird, um den Draht mit einer hohen Lagegenauigkeit in der Nut ablegen zu können. Je nach Komplexität der Drahtführung, insbesondere bei aufwändigen Wickelköpfen verteilter Wicklungen, sind mehr als die beiden dargestellten Linearachsen erforderlich. Die Rotationsachse in Abbildung 2-17 c) verdeutlicht wieder die Möglichkeit, das Blechpaket schrittweise direkt zu bewickeln. Je komplexer die Kinematik ist, desto langsamer und damit kostenintensiver wird die Herstellung der Spule. Je nach in Tabelle 2-3 aufgelisteter Ausprägung der Spule bieten bestimmte Fertigungsverfahren Vorteile oder schließen sich aus. Die Spulen der in dieser Arbeit betrachteten Maschine werden mittels Linearwickeltechnik hergestellt. Abbildung 2-18 zeigt eine Vorrichtung, die zur manuellen Herstellung dieser Spulen aufgebaut wurde.



Abbildung 2-18: Vorrichtung zum Linearwickeln

Da bei der gewählten Wickeltechnik der Stator nicht direkt bewickelt wird, muss die Wicklung erst noch in den Stator eingebracht werden. Die Spulen können je nach Form des Blechpakets axial, radial von innen oder radial von außen gefügt werden. Für den in der vorliegenden Arbeit untersuchten Maschinentyp eignet sich am besten das weit verbreitete Einziehen der Wicklungen (Abbildung 2-19).

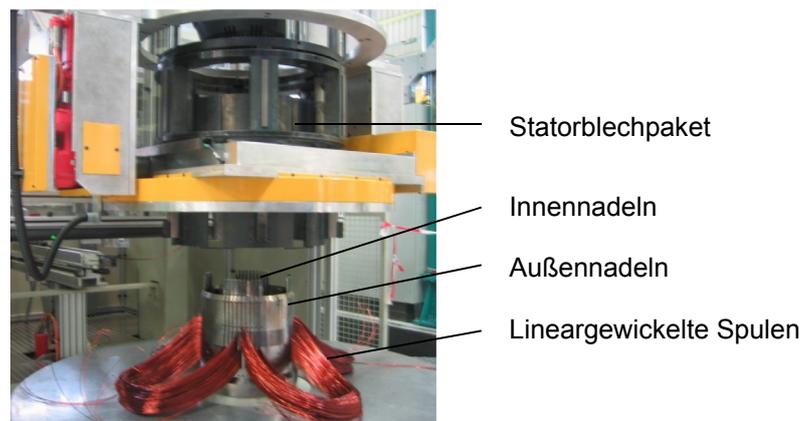


Abbildung 2-19: Einziehmaschine der Otto Rist GmbH & Co. KG (nach Risch et al., 2016)

Das axiale Einziehen ist das produktivste Verfahren für die Einbringung von wilden Wicklungen in halbgeschlossene Nuten, sodass im betrachteten Fall das Schablonenwickeln der begrenzende Faktor für die Ausbringung ist. Die inneren Einziehnadeln schützen den Lackdraht vor Verletzungen, wenn er durch die rauen Nutschlitzkanten gezogen wird, und sorgen dafür, dass die einzuziehenden Drähte sich nicht verklemmen. Der in Abbildung 2-20 schematisch dargestellte Einziehpilz, auch Einziehstern genannt, ist derart geformt, dass er die Drähte zwischen den inneren Nadeln hindurch in die Nuten hineinschiebt und gleichzeitig die Drähte entlang der Längsachse durch die Nut zieht (Abbildung 2-20 b)), bis der obere Wickelkopf über die Einziehnadeln abgestreift wird (Abbildung 2-20 c)). Die äußeren Einziehnadeln halten die Drähte in der Nut und führen die Deckschieber ein. (Tzscheutschler, Olbrisch und Jordan, 1990)

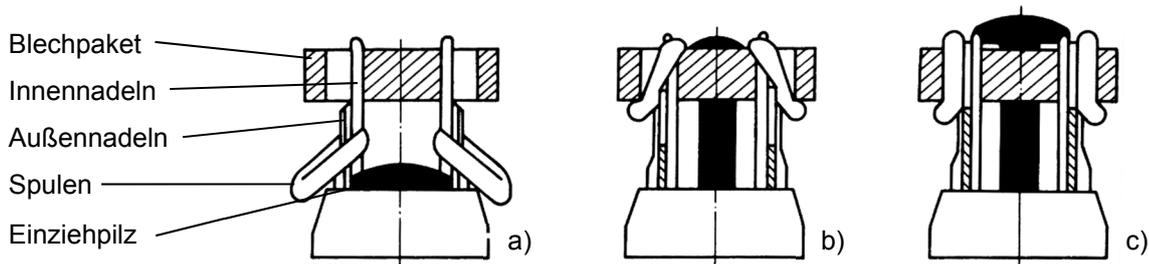


Abbildung 2-20: Phasen des Einziehens von Spulen (nach Tzscheuschler, Olbrisch und Jordan, 1990)

Die für das Einziehen verwendeten Werkzeuge erfordern eine besonders hohe Präzision sowie Oberflächenqualität und durchwegs abgerundete Kanten. Die Einarbeitung dieser Werkzeuge erfordert demnach viel Erfahrung und handwerkliches Können.

An dieser Stelle sei ergänzend das Treufelverfahren erwähnt, welches ohne Werkzeugaufwand die manuelle Montage der Spulen ermöglicht. Hierbei werden die Drähte nacheinander mit Hilfe einer polierten Nadel manuell in die Nutschlitz gedrückt (Abbildung 2-21). Mit diesem Verfahren können auch die sonst eingezogenen Wicklungen montiert werden. Es eignet sich daher für die Herstellung von Prototypen. (Tzscheuschler, Olbrisch und Jordan, 1990)

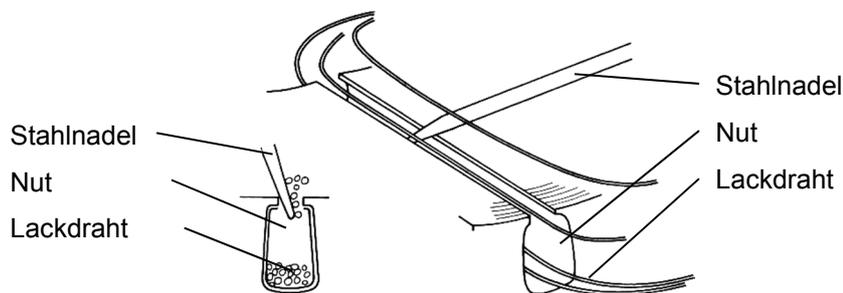


Abbildung 2-21: Einsetzen von Treufelspulen (nach Tzscheuschler, Olbrisch und Jordan, 1990)

Nach dem Einziehen werden die Wickelköpfe geformt und verschaltet. Es folgt die Phasenisolation, das Bandagieren und schließlich das Imprägnieren, worüber anhand der Isolierwerkstoffe im folgenden Kapitel ein Überblick gegeben wird.

### 2.2.3 Isolierwerkstoffe

Zur Führung des Stroms sind die Isolierwerkstoffe ebenso bedeutend wie die Leiterwerkstoffe. Die Vielzahl verfügbarer Isolierwerkstoffe macht die Auswahl wie auch die zusammenfassende Darstellung sehr schwierig. Dies ist unter anderem bedingt durch die verschiedenartigen Anforderungen, wie beispielsweise hohe Durchschlagfestigkeit, hohe Kriechstromfestigkeit, gute thermische Leitfähigkeit, hohe Temperaturbeständigkeit, gute chemische Beständigkeit, hohe mechanische Festigkeit und geringe Kosten. Nachdem diese Ziele schwer vereinbar sind,

gibt es je nach Gewichtung der Anforderungen speziell angepasste Isolierwerkstoffe. Die verwendeten Isolierwerkstoffe haben direkten Einfluss auf die Wärmeleitung, Spannungssicherheit und insbesondere auch auf die geometrische Gestaltung des Motors. So sind Isolationsdicken und Kriechwege konstruktiv vorzusehen. Eine verbreitete Klassifizierung der Isolierwerkstoffe ist die Einteilung nach Temperaturklassen nach DIN EN 60085, wie sie in Tabelle 2-4 aufgelistet sind. Sie sind definiert durch die maximal zulässige Temperatur, die dauerhaft an einem isolierten Teil der Maschine herrschen darf, ohne dass die Funktionstüchtigkeit bei der üblichen Gebrauchsdauer eingeschränkt wird. (Wiedemann und Kellenberger, 1967)

Tabelle 2-4: Isolierstoffklassen (nach DIN EN 60085)

Thermische Klasse in °C	Buchstabenbezeichnung
90	Y
105	A
120	E
130	B
155	F
180	H
200	N
220	R
250	-

Der belastungsgerechten Auslegung des Isoliersystems der betrachteten Maschine wurde im Rahmen des Projekts, in dem auch die vorliegende Arbeit entstand, eine besondere Bedeutung zugewiesen. So wurden die Spannungsverteilung bei verschiedenen Betriebszuständen analysiert, diverse Isolierwerkstoffe charakterisiert und ein Isoliersystem mit Duroplast Spritzguss untersucht. (Risch et al., 2016)

### 2.3 Verlustarten

Wie Kapitel 2.1 bereits verdeutlicht, herrschen komplexe Wechselwirkungen zwischen verschiedenen physikalischen Größen, die meist nur in einer idealisierten Form unter Vernachlässigung anderer Effekte beschrieben werden können. Hierbei werden in der Regel fertigungstechnische Einflüsse noch gar nicht adressiert. Die Gesamtheit der Effekte führt zu verschiedensten Verlusten, die in diversen Arbeiten bereits theoretisch und versuchstechnisch untersucht wurden. Aufgrund der Wechselwirkungen können die Verluste meist nicht isoliert betrachtet werden. Dennoch lassen sich die maßgeblichen Verluste dem Ort ihrer Entstehung zuordnen. So kann grob in Eisenverluste, Kupferverluste und Reibungsverluste unterteilt werden. Zusätzliche Verluste und ihre Entstehung sind in entsprechender Fachliteratur wie zum Beispiel Müller und Ponick (2009) detailliert beschrieben. Da die Eisen- und Kupferverluste die größte Relevanz haben und zudem durch die Fertigung beeinflusst werden, wird im Folgenden näher darauf eingegangen.

### 2.3.1 Eisenverluste

Die in den Blechpaketen entstehenden Eisenverluste sind durch die Ummagnetisierung bedingt und setzen sich wiederum aus zahlreichen Einzelverlusten zusammen. So wurden bereits in Kapitel 2.2.1 die Hystereseverluste anhand einer dynamischen Hystereseschleife verdeutlicht. Da die verwendeten Blechwerkstoffe auch elektrisch leitend sind, bilden sich darin Wirbelströme aus, die zu Wirbelstromverlusten führen. Nach Schoppa (2001) wie auch Kories und Schmidt-Walter (2010) werden die Hystereseverluste meist als linear frequenzabhängiger und die Wirbelstromverluste als quadratisch frequenzabhängiger Einfluss betrachtet. Da deren Summe aber nicht mit den realen Ummagnetisierungsverlusten übereinstimmt, wird ein zusätzlicher anomaler Wirbelstromverlust addiert oder ein Anomaliefaktor multipliziert. Diese stark vereinfachte Betrachtungsweise behandelt zwar viele bereits untersuchte untergeordnete Verluste nur summenhaft in Form der anormalen Verluste, spiegelt aber die Problematik bei der Messung magnetischer Eigenschaften sehr gut wider. Denn dazu werden vorwiegend Epsteinrahmen nach DIN EN 60404-2, Tafelmessgeräte nach DIN IEC 60404-3 und Ringproben nach DIN EN 60404-6 verwendet. Tafelmessgeräte werden auch häufig als Single Sheet Tester (SST) bezeichnet. Bei allen Verfahren werden genormte Proben mit einer festgelegten Frequenz und Polarisation durch eine Erregerspule ummagnetisiert. Mit Hilfe einer Messspule werden schließlich die Verluste bestimmt. Diese Messverfahren bilden das reale Verhalten des Werkstoffes sehr gut ab, die Rückführung auf einzelne Verlustarten ist jedoch nur bedingt möglich. Schoppa (2001) gibt einen Überblick über diese Messmethoden und bestimmt damit die Verluste, die auf die Fertigungsverfahren zurückgeführt werden können. Damit lassen sich die Auswirkungen der Verarbeitungsschritte auf das Magnetisierungsverhalten (Tabelle 2-5) und das Verlustverhalten (Tabelle 2-6) zumindest qualitativ bewerten. Auf Basis üblicher Arbeitsinduktionen und Baugrößen schätzt Schoppa (2001) die Auswirkungen der Be- und Verarbeitung auf die Eisenverluste bei Traktionsantrieben für Elektrofahrzeuge als sehr hoch ein.

*Tabelle 2-5: Bewertung des Einflusses verschiedener Verarbeitungsschritte auf das Magnetisierungsverhalten des schlussgeglühten, nichtkornorientierten Elektrobandes (nach Schoppa, 2001)*

<b>Verarbeitungsschritt</b>	<b>Arbeitsbereich &lt; 0,5 T</b>	<b>Arbeitsbereich 0,5 T &lt; 1,5 T</b>	<b>Arbeitsbereich &gt; 1,5 T</b>
Schneiden	gering	hoch	sehr gering
Verpressen der Lamellen	kein	gering bis mittel	kein
Schweißen	gering	mittel	kein
Kleben	kein	gering	kein
Stanzpaketieren, Nieten	sehr gering	gering bis mittel	sehr gering
Einschrumpfen der Magnetkerne ins Gehäuse	sehr gering	gering bis mittel	sehr gering

*Tabelle 2-6: Bewertung des Einflusses verschiedener Verarbeitungsschritte auf das Verlustverhalten des schlussgeglühten, nichtkornorientierten Elektrobandes (nach Schoppa, 2001)*

<b>Verarbeitungsschritt</b>	<b>Arbeitsbereich &lt; 0,5 T</b>	<b>Arbeitsbereich 0,5 T &lt; 1,5 T</b>	<b>Arbeitsbereich &gt; 1,5 T</b>
Schneiden	gering	mittel	hoch
Verpressen der Lamellen (beschichtet)	kein	kein	kein
Verpressen der Lamellen (unbeschichtet)	kein	sehr gering	gering bis mittel
Schweißen	sehr gering	gering	mittel
Kleben	kein	sehr gering	gering
Stanzpaketieren, Nieten	sehr gering	gering	mittel
Einschrumpfen der Magnetkerne ins Gehäuse	gering	gering	mittel

Auch von Steentjes et al. (2014a) und Steentjes et al. (2014b) wird der Einfluss verschiedener Trennverfahren und Wärmebehandlungen anhand von Messungen mit einem Tafelmessgerät aufgezeigt. Die ansonsten negativen Bearbeitungseinflüsse werden von Weiss et al. (2017) genutzt, um gezielt Bereiche herzustellen, in denen ohnehin eine schlechte Ummagnetisierbarkeit gewünscht wird. Um die lokalen Eigenschaftsveränderungen sichtbar zu machen, wird dabei die Neutronen-Gitter-Interferometrie verwendet, die durch Brechung der Neutronen an den magnetischen Domänenwänden die Domänenendichte lokal auflösen kann. Die

Dichte der magnetischen Domänen gibt wiederum Aufschluss darüber, wie stark der jeweilige Bereich magnetisiert ist. Damit lässt sich der Fertigungseinfluss lokal bildlich auflösen. Die vielfältigen Entstehungsmechanismen von Eisenverlusten finden aber auch in der Modellbildung Beachtung. So berücksichtigt Bertotti (1988) mikroskopische Einflüsse wie Textur und Korngröße. Dieses Modell wird beispielsweise von Henrotte und Hameyer (2010) aufgegriffen und um weitere Einflüsse ergänzt. Für die Berücksichtigung der Eisenverluste in der FEM-Modellierung können Dlala, Belahcen und Arkkio (2010) als Beispiel herangezogen werden.

Letztendlich werden theoretisch wie auch experimentell verschiedenartigste Einflüsse und Wechselwirkungen auf die Eisenverluste untersucht. Ob deren Auswirkungen aber für die betreffende Maschine relevant sind, hängt von vielen Faktoren ab. So sind immer wieder vergleichende Untersuchungen bei genau definierten Variationen der Einflussgrößen und den jeweiligen Randbedingungen erforderlich.

### 2.3.2 Kupferverluste

Ebenso wie die Eisenverluste können auch die Kupferverluste nicht allgemeingültig formuliert werden. Grundlegend zu unterscheiden sind aber Gleichstrom- und Wechselstromverluste. Nach Müller, Vogt und Ponick (2008) werden die Gleichstromverluste als Grundverluste, Wicklungsverluste oder Stromwärmeverluste bezeichnet. Sie beruhen auf dem ersten Jouleschen Gesetz, welches besagt, dass die durch den Stromfluss erzeugte Wärme proportional zur elektrischen Leistung des Stromkreises ist. Für einen mit dem Strom  $I$  durchflossenen ohmschen Leiter mit dem Widerstand  $R_{Ohm}$  berechnet sich die Leistung  $P$  zu:

$$P = I^2 \cdot R_{Ohm}$$

*Formel 2-14*

Bei Wechselstrom sind die Effektivwerte und der Wirkwiderstand für die Erwärmung relevant. Durch den quadratischen Einfluss trägt die Stromstärke besonders stark zur Erwärmung bei. Zudem können die verwendeten Leiterwerkstoffe nicht als idealer ohmscher Leiter angesehen werden. Die temperaturbedingte Widerstandserhöhung wird in der Regel mit Hilfe des Temperaturkoeffizienten  $\alpha_T$  linear angenähert. Für Kupfer liegt dieser bei  $43 \cdot 10^{-4} \text{ K}^{-1}$  (Hering, Bressler und Gutekunst, 2017). Somit erhöht sich der Widerstand je 10 K Temperaturerhöhung um beachtliche 4,3 %, was wiederum die Verluste erhöht. Diesem Dilemma wird mit entsprechender Luft- oder Wasserkühlung begegnet. Eine verbesserte Wärmeabfuhr und damit verbundene Steigerung der Leistungsdichte kann aber bereits bei der Gestaltung der Spulen erfolgen. Die Arbeiten von Stöck (Stöck, 2016; Stöck, Lohmeyer und Meboldt, 2015) zeigen

ein innovatives Wicklungsdesign für Traktionsantriebe mit Formlitzten unter besonderer Berücksichtigung der thermischen Leitfähigkeit der Wicklungen.

Letztendlich lassen sich die Gleichstromverluste mit einem größeren Leiterquerschnitt reduzieren, der zu einem geringen Widerstand, größerer Wärmekapazität und besserer Wärmeleitung führt. Bei ansonsten gleichbleibenden Randbedingungen und somit gleichen geometrischen Verhältnissen führt dies unweigerlich zur Forderung höherer Nutzfällgrade. Da jedoch die betrachteten Maschinen mit Wechselstrom betrieben werden, sind die dadurch bedingten Verluste ebenfalls zu berücksichtigen.

Ist die Frequenz des Stroms im Verhältnis zum Durchmesser des Leiters sehr hoch, so treten zusätzlich Wirbelströme auf, die letztendlich zu zusätzlichen ohmschen Verlusten führen. Diese Wirbelstromverluste werden durch Wirbelströme, die durch magnetische Wechselfelder induziert werden, hervorgerufen. Hierbei werden zwei Ursachen für die Verluste unterschieden. Zunächst ist der Skin-Effekt zu nennen, der die ungleichmäßige Stromdichteverteilung innerhalb des Leiters beschreibt. Zudem kann das magnetische Wechselfeld außerhalb des Leiters mit einem weiteren Leiter korrelieren, was durch den Proximity-Effekt erklärt werden kann. Wie in Abbildung 2-22 a) dargestellt, erzeugt der Strom  $I$  ein Wechselfeld im Leiter, welches basierend auf dem Faradayschen Gesetz ein elektrisches Feld  $H$  induziert. Gemäß Abbildung 2-22 b) bilden sich aufgrund dieses Feldes Wirbelströme aus, die in der Mitte des Leiters dem initialen Strom entgegenwirken und dort die Stromdichte abschwächen. Am Rand hingegen erhöht sich die Stromdichte. (Biela, 2012)

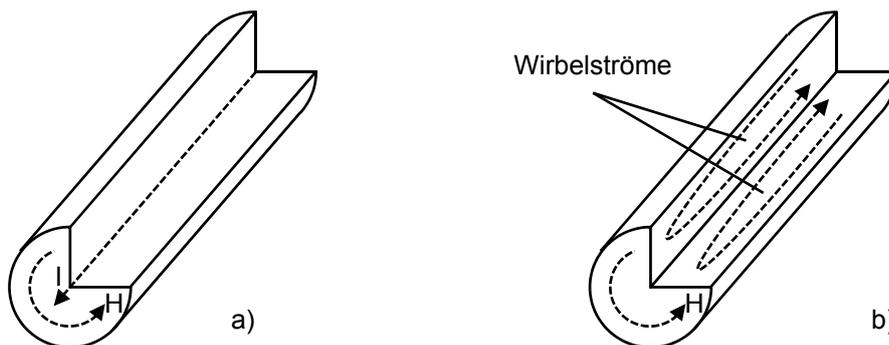


Abbildung 2-22: Skin-Effekt (nach Biela, 2012)

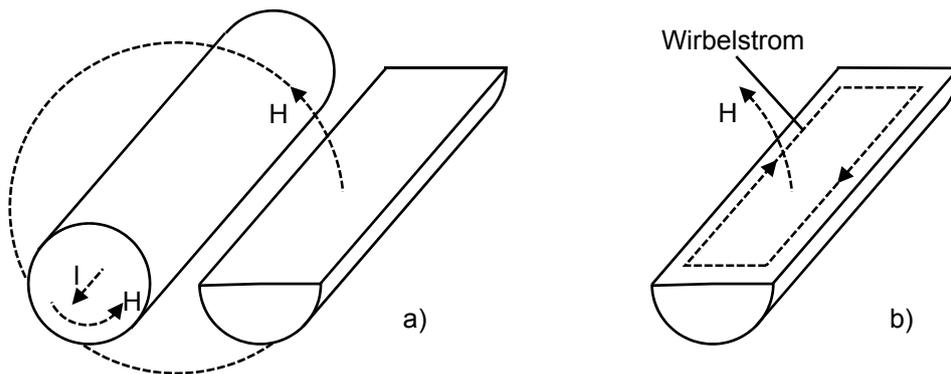
Die Stromdichte fällt in Form einer  $e^x$ -Funktion zur Leitermitte hin ab. Als technisch relevante Größe wird in der Regel die Skintiefe  $\delta$  angegeben, die den Abstand vom Leiterrand beschreibt, bei dem die Stromdichte auf  $1/e$  des Spitzenwertes abgefallen ist (Biela, 2012). Sie berechnet sich zu:

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi \cdot \mu_0 \cdot \sigma_l \cdot f}}$$

*Formel 2-15*

Demnach ist die Skintiefe  $\delta$  von der Leitfähigkeit  $\sigma_l$  des Materials (für Kupfer ca. 56 MS/m) und der Frequenz  $f$  des Stroms abhängig. Bei den betrachteten Traktionsantrieben kann von einer maximalen Anregungsfrequenz unter 2 kHz ausgegangen werden, womit sich eine Skintiefe von 1,5 mm ergibt. Bei den bei eingezogenen Wicklungen üblichen Drahtdurchmessern von etwa 1 mm hat dieser Effekt somit keinen relevanten Einfluss.

Die zweite Ursache für Wirbelstromverluste wird mit dem Proximity-Effekt beschrieben. So erzeugt der Wechselstrom  $I$  in einem Leiter ein magnetisches Wechselfeld  $H$  auch außerhalb dieses Leiters (Abbildung 2-23 a)). In einem zweiten Leiter, der sich in diesem Wechselfeld befindet, wird dadurch ein elektrisches Feld erzeugt, welches zu einem Wirbelstrom führt (Abbildung 2-23 b)). Dieser Wirbelstrom verändert zwar den effektiven Strom in diesem Leiter nicht, jedoch verschiebt sich dadurch die Stromdichte innerhalb des zweiten Leiters, wenn dieser ebenfalls stromdurchflossen ist. Zudem beeinflusst das durch den Strom erzeugte Wechselfeld des zweiten Leiters den Strom im ersten Leiter. (Biela, 2012)



*Abbildung 2-23: Proximity-Effekt (nach Biela, 2012)*

Fließen die Ströme der beiden Leiter entgegengesetzt, so erhöht sich die Stromdichte jeweils auf der dem anderen Leiter zugewandten Seite (Abbildung 2-24 a)). Fließen die Ströme hingegen in die gleiche Richtung, so erhöht sich die Stromdichte auf der Gegenseite (Abbildung 2-24 b)).

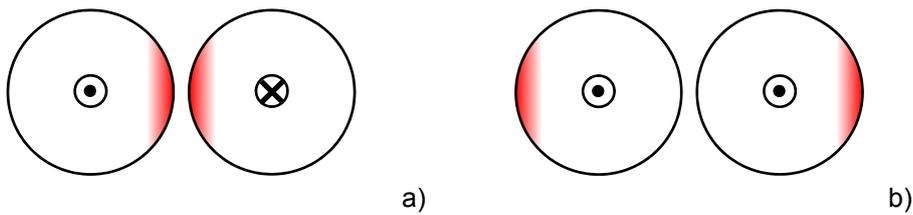


Abbildung 2-24: Stromdichte aufgrund des Proximity-Effekts (nach Biela, 2012)

Analog zum Skin-Effekt ist deshalb der Wechselstromwiderstand deutlich höher als der Gleichstromwiderstand des Leiters. Letztendlich addieren sich die beiden Effekte, sodass messtechnisch nur die resultierende Erhöhung des Wechselstromwiderstandes bestimmt werden kann. Da der formelmäßige Zusammenhang der Auswirkungen der beiden Effekte auf die Impedanz der Problembeschreibung nicht zuträglich ist, wird an dieser Stelle auf entsprechende Fachliteratur verwiesen. Prinzipiell kann für eine gegebene Frequenz und Stromstärke ein optimaler Drahtdurchmesser berechnet werden. Zur Reduzierung der Wirbelstromverluste werden jedoch üblicherweise Litzendrähte anstatt Massivleiter verwendet. Damit wird der Stromfluss auf mehrere parallel geschaltete Drähte verteilt und somit die Verluste in den Einzeladern in bestimmten Frequenzbereichen gesenkt. Teils wird dies auch als Segmentierung des Leiters bezeichnet. Die resultierenden Wirbelströme und die dadurch verursachten Verluste müssen dann jedoch mit Hilfe von FEM-Simulationen berechnet werden. Die Parallelschaltung von dünnen Einzeladern reduziert die Wirbelstromverluste am wirksamsten, wenn die Drähte zusätzlich verdrillt werden, wodurch sich die induzierten elektrischen Felder im Idealfall aufheben. Hierzu werden meist lackisolierte Drähte verwendet, die derart verdrillt werden, dass innerhalb jedes Nutdurchgangs jeder Draht jede Position im Bündel einnimmt. In der Praxis werden jedoch zum Ausgleich von Toleranzen deutlich kürzere Schlaglängen eingesetzt. Befindet sich nun die betrachtete Litze in einem Magnetfeld, welches beispielsweise durch weitere Leiter induziert wird, so wirkt sich der Proximity-Effekt auch auf diese Paarung aus. Hierbei spricht man vom externen Proximity-Effekt. Betrachtet man die oben beschriebenen Felder und Verluste, die durch den Strom im Leiter selbst erzeugt werden, so nennt man dies den inneren Proximity-Effekt. (Biela, 2012)

Überträgt man die genannten Wechselwirkungen auf die Wicklungen eines realen Elektromotors, so machen die Verluste aufgrund des sogenannten externen Proximity-Effekts einen beachtlichen Anteil aus. Die durch die zahlreichen Windungen der Spulen erzeugten Felder beeinflussen sich gegenseitig, führen aber erst zu dem Magnetfeld, welches elektrische Energie in mechanische Energie umwandelt. Zur effizienten Lenkung dieses Magnetfeldes eignen sich weichmagnetische Materialien, welche im Fall eines Elektromotors meist aus Blechpaketen hergestellt werden. Aufgrund der unterschiedlichen magnetischen Permeabilität

der Luft im Nutschlitz und des die Spule umgebenden Blechpakets ergibt sich, wie in Abbildung 2-25 dargestellt, eine ungleichmäßige Ausprägung des Magnetfeldes und somit, wegen des oben genannten externen Proximity-Effekts, eine ungleiche Verteilung der Stromdichte. Für die am Nutgrund befindlichen Drähte ist die Flussverkettung am größten und führt deswegen zur Widerstandserhöhung. Der Strom wird in Richtung Nutschlitz verdrängt und führt zu zusätzlichen frequenzabhängigen Verlusten sowie zur scheinbaren Widerstandserhöhung der Spule. Man spricht hier von der Stromverdrängung aufgrund des Nutquerfeldes. (Müller, Vogt und Ponick, 2008; Köhring, 2009; Kories und Schmidt-Walter, 2010, Vogt und Volk, 2014a, 2014b)

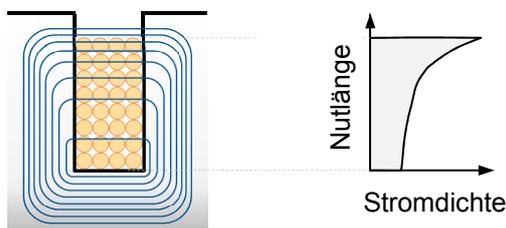


Abbildung 2-25: Schematischer Feldverlauf und Stromdichte bezogen auf die Nutlänge (Vogt und Volk, 2014b)

Die Bestimmung der vielfältigen Verluste, die sich oftmals nicht getrennt betrachten lassen und teils weitreichende Wechselwirkungen besitzen, ist eine große Herausforderung. Wie zum Beispiel die Arbeit zur elektrischen Belastung der Wicklungsisolierung pulsumrichter gespeister Niederspannungsmotoren von Berth (1998) zeigt, werden Leitungsmodelle immer mehr um Wechselwirkungen erweitert. So werden der Spannungsabfall über die Leiterlänge, über induktive und kapazitive Kopplungen sowie über magnetische Streueinflüsse in die analytische Modellierung aufgenommen. Aufgrund des Pulsumrichters kann nicht mehr von einer sinusförmigen Anregung ausgegangen werden, sodass Spannungsspitzen entstehen können, die zu Teilentladungen führen, welche das Isoliersystem schädigen. Aus dieser elektrotechnischen Sicht der Wechselwirkungen lässt sich ableiten, dass bereits geringe fertigungstechnische Anpassungen zu einer gänzlich neuen Ausprägung und Verteilung der Verluste führen können. Die Zuweisung und Quantifizierung der vielfältigen Ursachen der Verluste lässt sich nur in einem begrenzten Umfang darstellen. Auch Leicht et al. (2011) beschreiben ein Modell zur Bestimmung der Stromverteilung in parallelen Wicklungen in Luftspulen und stellen es Versuchen sowie Simulationen gegenüber. Trotz der gewählten einfachen Spulengeometrie stellt sich der Abgleich von Model, Versuch und Simulation als schwierig heraus und ist nur für einen gewissen Bereich unterhalb der Resonanzfrequenz der Spule gültig.

Litzendrähte dienen der Reduzierung der Wirbelstromverluste und können mittels Walzen zu Formlitzten weiterverarbeitet werden. Das Patent von Stöck (2015) beschreibt die Herstellung eines Stators mit Formlitzten. Unter den Gesichtspunkten der Fertigbarkeit und Montierbarkeit wird darin die Herstellung von Formlitzten vorgestellt, die den Anforderungen der Automobilindustrie gerecht werden.

Aufgrund der sich addierenden Verluste, die zudem diverse gegenseitige Wechselwirkungen aufzeigen, lässt sich eine Optimierung, insbesondere über einen stationären Punkt hinaus, nur sehr schwer erarbeiten. So konstatieren auch Bauer, Reuss und Nolle (2014), dass eine exakte Verlusttrennung versuchstechnisch nicht möglich und somit die Verifikation von theoretischen Modellen äußerst schwierig ist.

Es lässt sich also feststellen, dass Wicklungen mit segmentierten Leitern eine breite Verwendung finden und dass damit erfolgreich der Stromverdrängung entgegengewirkt wird. Die modellhafte Abbildung birgt aber viele Schwierigkeiten und Ungenauigkeiten. Der Abgleich mit der Realität ist sehr aufwändig, da hierzu vollständig funktionsfähige Maschinen aufgebaut und auf dem Prüfstand vermessen werden müssen. Die Einflüsse auf die Messdaten lassen sich zudem nur vergleichend zu einem Referenzzustand ermitteln, da der Anteil einzelner physikalischer Effekte nicht messbar ist. Sicherlich ist diese Gegebenheit einer der Hauptgründe dafür, dass die fertigungsbedingten Einflüsse auf das Maschinenverhalten nur sehr punktuell erforscht sind.

Dennoch lassen sich zwei Zusammenhänge aufzeigen, welche maßgeblich durch die Fertigungsverfahren limitiert sind. Zum einen lässt sich der ohmsche Widerstand durch Erhöhung des Nutzfüllgrades reduzieren. Außerdem bewirkt die Verdrillung der Leiter eine Reduzierung der durch das Nutquerfeld bedingten Wirbelstromverluste. Die Erreichung hoher Nutzfüllgrade und die Realisierung von Verdrillungen bringen einen hohen fertigungstechnischen Aufwand mit sich, der wiederum schwer abzuschätzen ist. Der erzielbare Nutzen für die Maschine ist zudem nur schwer quantifizierbar. Hinzu kommt, dass die Verdrillung von Leitern die Packungsdichte der Drahtbündel verringert, was den erreichbaren Nutzfüllgrad verringert, und dass aufwändige Wickelköpfe die Leiterlänge und somit den ohmschen Widerstand erhöhen. Die Grenzen und Potenziale, aber auch der erforderliche fertigungstechnische Aufwand für diese konkurrierenden Ziele sind nicht untersucht.

### **3 Zielsetzung und Herangehensweise**

Der Umbruch in der Automobilindustrie führt zur Bindung hoher Entwicklungskapazitäten im Bereich der Elektromobilität, sodass in diesem Bereich vielfältigste Lösungsansätze zur Effizienzsteigerung bereits vorhanden sind und noch folgen werden. Oft sind diese aus elektrotechnischer Sicht entwickelt und berücksichtigen die Fertigbarkeit und vor allem die Beeinflussung der Eigenschaften durch die Fertigungsprozesse nur unzureichend. Schoppa (2001) zeigt den großen Einfluss der Verarbeitungsschritte auf das Magnetisierungs- und Verlustverhalten von Stanzpaketen in Elektromaschinen auf. Hinsichtlich der Herstellung von Wicklungen bietet sich noch viel mehr konstruktiver Gestaltungsspielraum, was unweigerlich zu komplexeren Wirkmechanismen und Wechselwirkungen führt. Die messtechnische Bestimmung der Verluste erfolgt deswegen nur summenhaft (Bauer, Reuss und Nolle, 2014). Aus fertigungstechnischer Sicht lassen sich damit keine Wirkzusammenhänge herleiten, die durch Anpassung der Prozesse zu einer Wirkungsgradsteigerung beitragen können.

Ziel ist es demnach, ein Verfahren zu entwickeln, welches das Verpressen der Spulen ermöglicht, um sehr hohe Nutzfüllgrade und verschiedene Verdrillungen bei sonst möglichst unveränderten Randbedingungen herzustellen und gegeneinander zu bewerten. Damit sollen Wirkzusammenhänge für definierte Parametervariationen hergestellt werden, die zur Herstellung effizienterer E-Traktionsantriebe beitragen. Zudem soll ein Weg aufgezeigt werden, der eine systematische Analyse der Einflüsse durch Fertigungstechniker ermöglicht. Schlussendlich sollen die Potenziale und Grenzen der betrachteten Einflüsse dargestellt werden.

Das systematische Vorgehen zur Erreichung der Ziele sieht vor, dass zunächst die Machbarkeit anhand von Vorversuchen unter Beweis gestellt wird. Die simulative Abbildung des Vorversuches vertieft dabei das Prozessverständnis bereits in einer sehr frühen Phase, sodass aus den Erkenntnissen eine Prozesskette zur Herstellung und Bewertung der Wicklungen abgeleitet werden kann. Bereits beim Wickeln der Spulen werden die Versuchsparameter Drahtanzahl und Verdrillungsart festgelegt. Beim anschließenden Verpressen, wofür ein Werkzeug entwickelt werden muss, ist sicherzustellen, dass alle zu untersuchenden Spulen derart reproduzierbar umgeformt werden, dass eine anschließende Montage möglich ist. Zur Bewertung des Einflusses von Drahtanzahl und Verdrillungsart sind Messmethoden zu befähigen und eine geeignete Auswertmethodik zu erarbeiten. Damit wird die Grenze ermittelt, bis zu der eine Wirkungsgradsteigerung durch Erhöhung des Nutzfüllgrades mittels Verpressen möglich ist. Die Auswertung erfolgt zunächst eigenständig für jede Messmethode. Schließlich werden die Ergebnisse zusammengefasst, die Aussagen einander gegenübergestellt und Handlungsempfehlungen für weitere Untersuchungen gegeben.

In Abbildung 3-1 ist die Struktur der Arbeit zusammenfassend abgebildet. Sie gibt einen Überblick über die vielfältigen Aufgabenfelder und zeigt ausgewählte Arbeitspakete auf.

Motivation: Erhöhung des Wirkungsgrades durch umformtechnisch hergestellte Spulen

#### Nachweis der Machbarkeit (Kapitel 4)

- Analyse der Randbedingungen aufgrund der Referenzmaschine
- Vorversuche zur Klärung der praktischen Machbarkeit
- Simulative Abbildung der Vorversuche
- Auswahl geeigneter Messmethoden

#### Entwicklung der Fertigungskette (Kapitel 5)

##### Wickeln (Kapitel 5.1)

- Wickelvorrichtung entwickeln
- Variationen definieren
- Drahtauswahl

##### Umformen (Kapitel 5.2/5.3)

- Versuchswerkzeug mit Heizvorrichtung entwickeln
- Prozessfenster definieren

##### Montieren (Kapitel 5.4)

- Anpassungen für die Montage im gezahnten Stator
- Vorbiegen und Montieren der Spulen

#### Auswahl der Messtechnik und Auswertesystematik (Kapitel 5.5)

##### LCR-Messung (Kapitel 5.5.1)

- Auswahl geeigneter Messtechnik
- Auswahl geeigneter Messgrößen
- Auswertung und Darstellung der Ergebnisse

##### Stromzangenmessung (Kapitel 5.5.2)

- Auswahl geeigneter Messtechnik
- Auswahl geeigneter Messgrößen
- Auswertung und Darstellung der Ergebnisse

Ziel: Auswahl des geeignetsten Spulentyps bei den gegebenen Randbedingungen und Erarbeitung von Handlungsempfehlungen für die Fertigung effizienterer E-Traktionsantriebe

Abbildung 3-1: Struktur der Arbeit

## **4 Nachweis der Machbarkeit**

Um die Potenziale aber auch die Grenzen des Verpressens von Spulen aufzuzeigen, wurde zunächst mit Hilfe einer vereinfachten Geometrie ein Versuchsaufbau entworfen, mit dem es möglich ist, Leiterbündel umzuformen. Für ein besseres Prozessverständnis wurde der Vorversuch in einem FEM-Modell abgebildet, das einen Einblick in die Drahtbündel während des Umformens ermöglicht. Weiterhin sollen die Formstabilität der umgeformten Drahtbündel qualitativ untersucht sowie praktische Erfahrungen für den Prozess mit der realen Nutgeometrie gesammelt werden.

### **4.1 Werkzeugentwurf**

Beim Entwurf des Werkzeugs wurde darauf geachtet, dass es kostengünstig zu fertigen ist und die Handhabung dennoch einfach bleibt. Für den Betrieb des Werkzeugs wurde eine Universalprüfmaschine vom Typ 1484/DUPS-M, Zwick GmbH & Co. KG, Ulm, mit einer Maximalkraft von 200 kN vorgesehen. Damit sind eine präzise Kraft- und Wegmessung, sowie eine variable Regelung des Pressvorgangs möglich. Mit dem Werkzeug sollen zunächst Versuche an Einzeldrähten durchgeführt und anschließend unterschiedliche Drahtbündel mit variabler Drahtanzahl und Verdrillungsart hergestellt werden.

Die Nutgeometrie wurde mit einem gegenüber der gegebenen Trapezform etwa flächengleichen Rechteck angenähert. Die Breite ergibt sich aus dem Mittelwert der Nutgrundbreite (5,33 mm) und der Breite, die sich durch die Verlängerung der Zahnflanken bis zum Zahnkopf ergibt (3,45 mm). Somit erhält man rechnerisch eine Breite von 4,39 mm. Da am Lehrstuhl für Hochspannungs- und Anlagentechnik ein Modell mit 4,3 mm breiten Nuten vorlag, wurde aus Gründen der Konsistenz der abgerundete Wert übernommen (Abbildung 4-1).

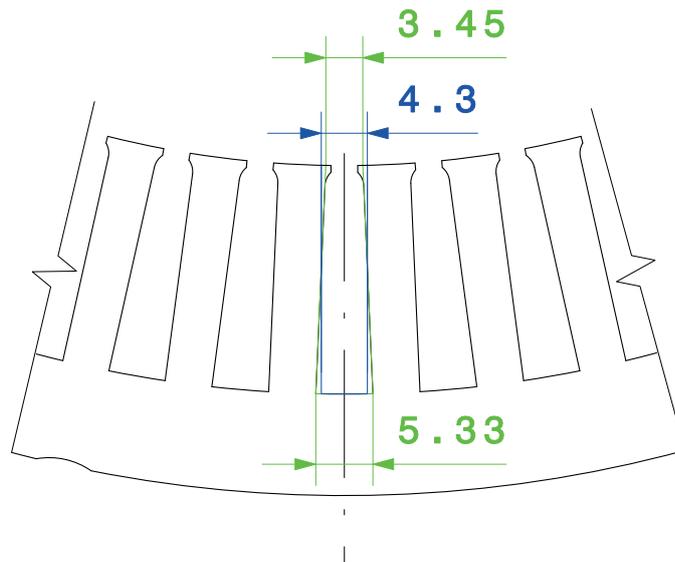


Abbildung 4-1: CAD-Modell der realen und der angenäherten Nutgeometrie

Im Gegensatz zur Trapezgeometrie kann ein Presswerkzeug für die Rechteckgeometrie mit einer einfach zu fertigenden Matrizen- und Stempelgeometrie hergestellt werden. Zur Fixierung der Drähte und um eine definierte Verdrillung sicherzustellen, wird ein Spanrahmen verwendet. Der Draht kann somit über die beidseitig verschiebbaren Pins gewickelt und gegebenenfalls um Vielfache von  $180^\circ$  verdrillt werden. Zur Positionierung und Führung vor dem Stempeleingriff werden Passstifte mit einer Presspassung im Stempel und Spielpassung in der Matrize verwendet. (Abbildung 4-2)

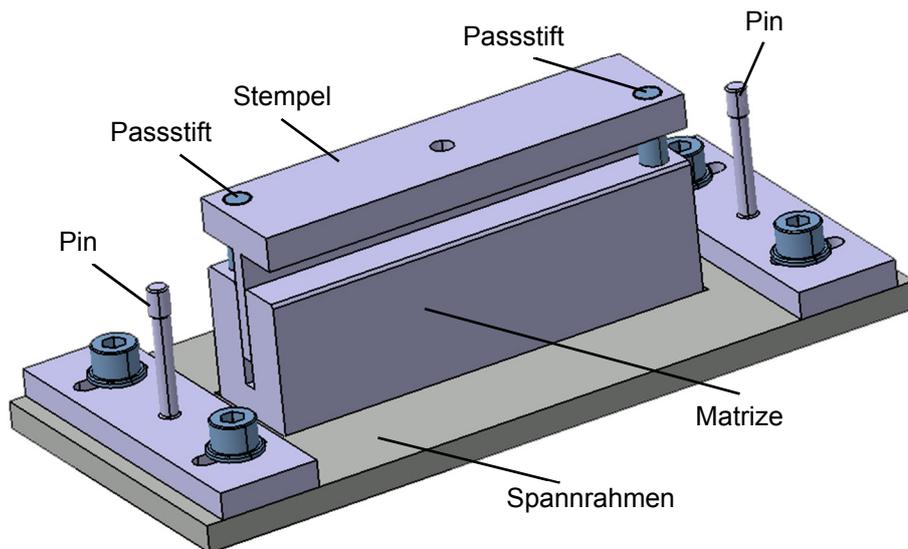


Abbildung 4-2: CAD-Modell des Vorversuchswerkzeugs

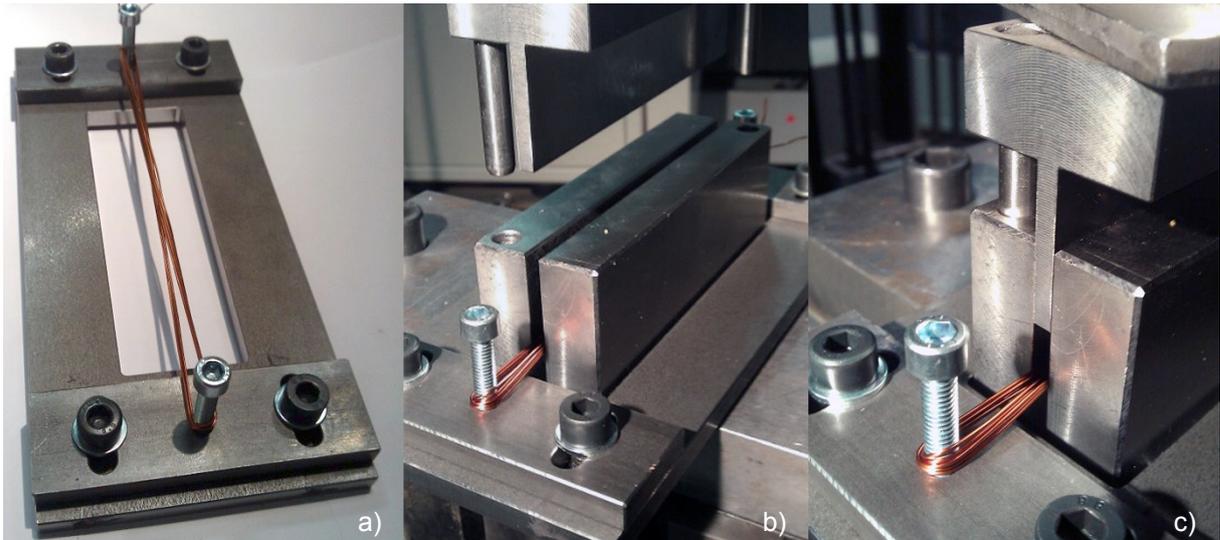


Abbildung 4-3: Spanrahmen a) mit Vorversuchswerkzeug b) und c) (nach Vogt und Volk, 2014a, 2014b)

Wie in Abbildung 4-3 ersichtlich, kann somit der Spanrahmen bewickelt a), in das geöffnete Werkzeug eingefügt b) und letztendlich kraft geregelt verspresst c) werden.

#### 4.2 Durchführung der Vorversuche

Zur Bewertung der Umformbarkeit des verwendeten Lackdrahtes werden zunächst Einzeldrähte untersucht. Diese werden über die gesamte Länge des Vorversuchswerkzeugs (130 mm) eingelegt und kraft geregelt bis zu einer in Abbildung 4-4 dargestellten Maximalkraft von 50 kN belastet.

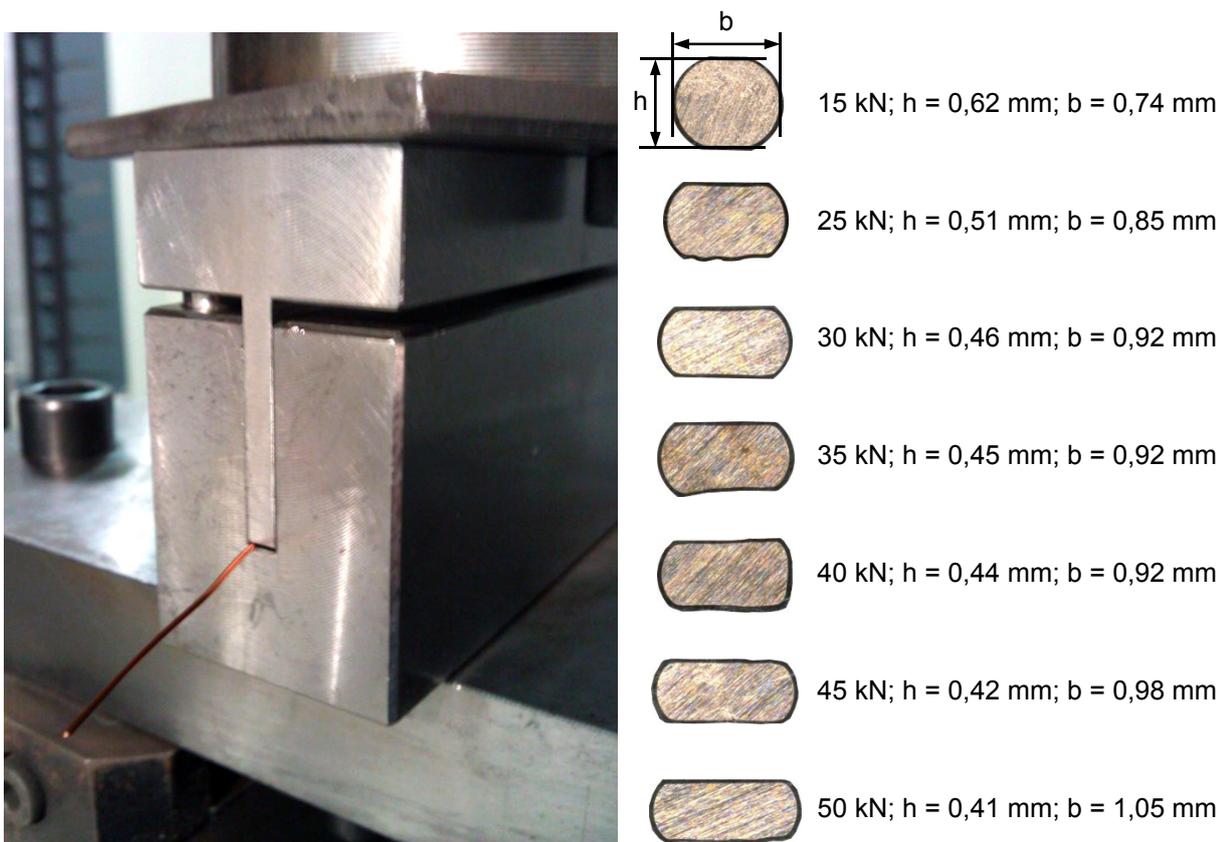


Abbildung 4-4: Versuche mit Einzeldrähten (nach Vogt und Volk, 2014a, 2014b)

Anhand der in Abbildung 4-4 rechts abgebildeten Schlichtbilder wird deutlich, dass der verwendete Lackdraht Magnetemp CA 200 Grad 2 der Firma Essex Germany GmbH (Superior Essex Inc., 2010) mit einem Ausgangsdurchmesser von 0,71 mm sehr gut umformbar ist und dass trotz der beachtlichen Deformation auf eine Höhe von 0,41 mm bei einer Kraft von 50 kN augenscheinlich keine Abplatzungen feststellbar sind. Da die Beschädigung des Lacks bevorzugt an Stellen mit Werkzeugkontakt und kleinen Radien auftritt, ist der Randbereich des Werkzeugs besonders gefährdet. Der dadurch entstehende elektrische Durchgang wird während der Versuche fortlaufend überprüft. Bis zu einer Kraft von 50 kN tritt kein elektrischer Durchgang auf.

Aufgrund der vielversprechenden Einzeldrahtversuche wird die Drahtanzahl erhöht, um eine Windung der Spule abzubilden, was jedoch zu neuen Herausforderungen führt. So bewegen sich die Lackdrähte, obwohl sie über den Spannrahmen fixiert sind, unvorhersehbar zueinander, was zu undefinierten Drahtkreuzungen führt, die wiederum zu einer starken lokalen Deformation des Drahtes führen. Weiterhin können die Drahtbündel zunächst nicht als Ganzes entnommen werden, da die zum Entnehmen der Probe aus dem Werkzeug erforderliche Kraft zum Vereinzeln der Drähte führt. Wie in Abbildung 4-5 ersichtlich, besitzt jeder einzelne Draht

nach der Umformung eine charakteristische Form, sodass sich das Bündel nur sehr schwer wieder in die ursprüngliche Rechteckform bringen lässt.



Abbildung 4-5: *Loses Drahtbündel*

Mit Hilfe des Spannrahmens besteht durch die Verdrillung der Drahtbündel die Möglichkeit, ein hinreichend formstabiles Bündel zu fertigen. Das in Abbildung 4-6 dargestellte Bündel besteht aus 12 parallel geführten Drähten vom Typ Magnetemp CA 200 Grad 2 der Firma Essex Germany GmbH mit 1,0 mm Ausgangsdurchmesser. Zum Verpressen im 130 mm langen Werkzeug ist eine Kraft von 150 kN erforderlich. Das so entstandene Bündel wurde nach der Entnahme aus dem Werkzeug mit gelben Schrumpfschläuchen versehen, um das Vereinzeln der Drähte beim Abtrennen der Enden zu unterbinden. Diese in Abbildung 4-6 c) dargestellte Probe wurde anschließend in Acryl-Kalteinbettmittel eingebettet und gemäß der in Abbildung 4-6 c) dargestellten Trennlinien zerteilt und geschliffen. Der Abstand zwischen den Schliffen 1 und 2 bzw. 3 und 4 entspricht der Schnittbreite. Zur besseren Verständlichkeit sind die Abbildungen für Schliff 1 und 3 gespiegelt dargestellt, was letztendlich den in Abbildung 4-6 c) dargestellten Ansichten entspricht. Für die Draufsicht a), die Seitenansicht b) und die Schliffe d) wurde ein Digitalmikroskop vom Typ VHX-2000 von Keyence verwendet.

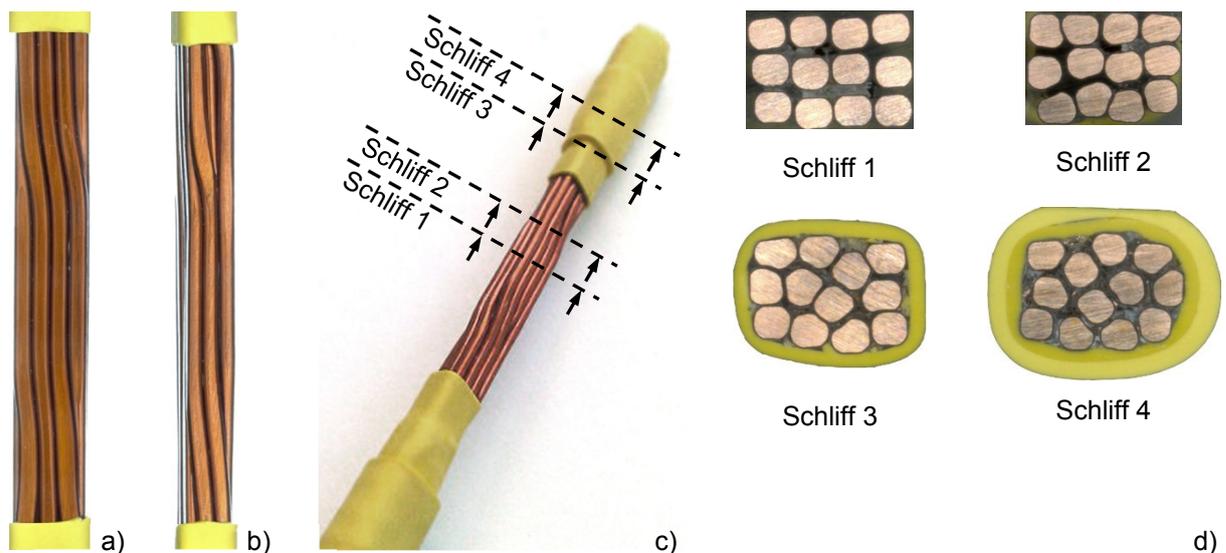


Abbildung 4-6: *a) Draufsicht, b) Seitenansicht, c) Probenentnahme und d) Schliffe eines verdrillten Drahtbündels (nach Vogt und Volk, 2014a, 2014b)*

In Abbildung 4-6 a) und b) lassen sich die an der Oberfläche entstandenen Drahtkreuzungen mit entsprechender Ausdünnung des jeweiligen Drahtes gut erkennen. Die in Abbildung 4-6 d) dargestellten Schliffbilder zeigen teils regelmäßig angeordnete und gleichmäßig umgeformte Drähte wie in Schliff 1, jedoch auch unregelmäßige Abschnitte, in denen die Drähte unterschiedlich stark umgeformt wurden, was auf einen Bereich mit Drahtkreuzungen hindeutet, wie in den Schliffen 3 und 4 zu erkennen ist. Insgesamt lässt sich wie auch in Abbildung 4-5 ein sehr unregelmäßiger Verlauf der Einzeldrähte erkennen, jedoch zeigt sich, dass unter den gegebenen Randbedingungen eine Umformung ohne Drahtbruch und Ablösung der Lackschicht möglich ist.

Dennoch sind kleinere Optimierungen hinsichtlich der Prozessführung erforderlich. Durch die Relativbewegung zwischen Draht und Werkzeug wird häufig die außenliegende Lackschicht des Drahtes beschädigt, was mit der Durchgangsprüfung zwischen Draht und Werkzeug zuverlässig detektiert wird. Aufgrund des längeren Reibweges betrifft dies insbesondere die oben liegenden Drähte. Durch verschiedene Schmierstoffe konnte das Problem gemindert, jedoch nicht behoben werden. Eine Schutzschicht in Form einer Folie löst dieses Problem. Als einfachste Lösung hat sich hierbei die Umwicklung mit gewöhnlichem transparentem Klebeband herausgestellt, das nach dem Verpressen wieder entfernt werden kann. Auf diese Weise wurden auch die in Abbildung 4-6 dargestellten Drahtbündel geschützt.

Prinzipiell wäre es denkbar, auf diese Weise, wie in Abbildung 4-7 dargestellt, zusätzliche Isolierschichten direkt während des Umformprozesses mit einzubringen. Würde man jede Windung zur nächsten isolieren, so müsste der Lackdraht nur noch die sehr geringe Spannung zwischen den Drähten innerhalb einer Windung isolieren, weshalb das Lacksystem entsprechend dünner und kostengünstiger zu gestalten wäre. Versuche mit dem derzeit etablierten Isolierpapier zeigen jedoch, dass dieses keine ausreichende Festigkeit besitzt, um nach dem Umformvorgang noch die erforderlichen elektrischen Eigenschaften gewährleisten zu können. Da für einen anderen Isolierwerkstoff der gesamte Prozess bis zur Serienfreigabe durchlaufen werden müsste, kann diese zusätzliche Variation nicht weiter berücksichtigt werden. Insbesondere die Verträglichkeit mit nachgelagerten Prozessen, wie zum Beispiel dem Imprägnieren, spielt hierbei eine große Rolle.

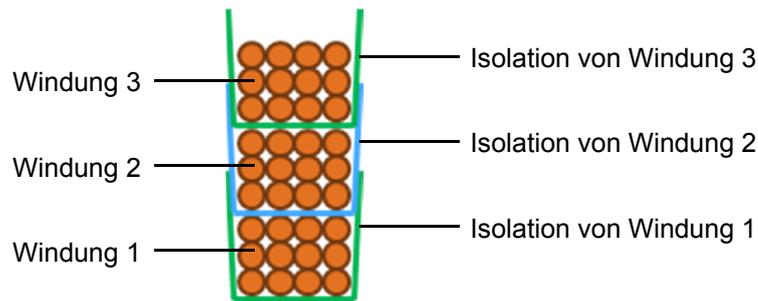


Abbildung 4-7: Prinzipdarstellung einer integrierten Windungsisolierung

Mit den vorliegenden Vorversuchen kann gezeigt werden, dass es prinzipiell möglich ist, konventionelle Runddrahtbündel umzuformen und somit formstabile Wicklungen mit hoher Kupferdichte herzustellen. Zudem kann damit der erforderliche Kraftaufwand abgeschätzt werden, was wiederum in die Auslegung und Konstruktion des Versuchswerkzeugs einfließt.

Weiterhin erschließt sich, dass für eine erfolgreiche Herstellung von formstabilen Wicklungen eine Fixierung beispielsweise durch Klebstoff erforderlich ist. Neben verschiedenen Möglichkeiten, zusätzlichen Klebstoff einzubringen, hat sich die Verwendung von Backlackdraht als die beste Lösung herausgestellt. Ähnlich wie beim backlackbeschichteten Blech wird auf den Lackdraht zuletzt eine thermisch aktivierbare, dünne Klebstoffschicht aufgetragen. Damit ist eine gleichmäßige Verteilung des Klebstoffes innerhalb des Bündels sichergestellt, die bis zur Aktivierung praktisch keinen Einfluss auf die Verarbeitung des Lackdrahtes hat. Da Backlackdraht in speziellen industriellen Anwendungen bereits eingesetzt wird, um beispielsweise Klebebänder und Vergussmasse einzusparen, ist nahezu jede Lackdrahtart auch als Ausführung mit einer zusätzlichen Backlackschicht erhältlich (Elektrisola Dr. Gerd Schildbach GmbH&Co. KG, 2017).

Wie die Untersuchungen gezeigt haben, entstehen während des Umformprozesses komplexe Drahtgeometrien, die anhand realer Versuche nur schwer zu analysieren sind. Insbesondere die Betrachtung der Deformationen innerhalb des Drahtbündels und des zeitlichen Ablaufs des Umformprozesses können aber durch eine 3D-FEM-Umformsimulation ermöglicht werden.

### 4.3 Simulative Abbildung des Vorversuchs

Aufgrund des unregelmäßigen Verhaltens und der komplexen Geometrie der umgeformten Drahtbündel wurde zur Erlangung eines besseren Prozessverständnisses ein FEM-Simulationsmodell aufgebaut. Mit der Simulation werden reproduzierbare Randbedingungen geschaffen, die eine gezielte unabhängige Einstellung einzelner Parameter zulassen und die Betrachtung der Vorgänge innerhalb des Drahtbündels ermöglichen.

Bereits für das Verdrillen der Leiterbündel wird die FEM-Simulation herangezogen, da die komplexe Geometrie nicht mittels CAD-Software konstruiert werden kann und zudem bereits plastische Verformungen eingebracht werden. Die innen liegenden Drähte bleiben bis auf eine Torsion um ihre Längsachse weitestgehend unverändert. Die außen liegenden Drähte hingegen begeben sich annähernd in eine Helixform. Zudem ändert sich die Geometrie in Abhängigkeit von der Drahtanzahl. Aus diesem Grund wurde zunächst gemäß Abbildung 4-8 ein Simulationsmodell zur Verdrillung der Drähte aufgebaut, um anschließend mit einem weiteren Schritt die Verpressung vornehmen zu können. Diese Zweiteilung ermöglicht eine unabhängige Betrachtung und Modelloptimierung für die beiden Prozessschritte und erspart bei Variationen der Verpressung die Neuberechnung der Verdrillung.

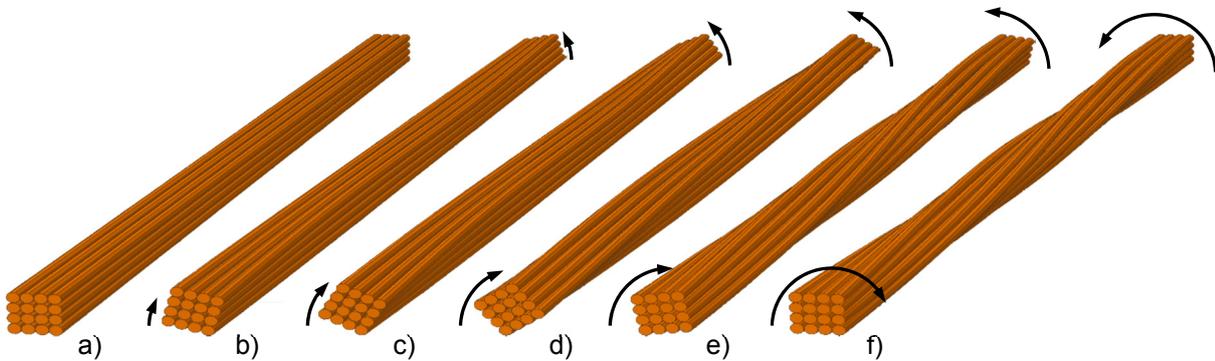


Abbildung 4-8: Verdrillung in der Simulation

Mit dem universellen Simulationstool Abaqus Explicit 6.12-3 von Dassault Systèmes wurde aufgrund der hohen Kontaktzahl ein expliziter Solver verwendet. Für die Kontaktdefinition eignet sich ein „penalty contact“ mit „finite sliding“ und coulombscher Reibung, die wegen des Gleitmittels auf den Drähten mit einem Reibbeiwert  $\mu_R$  von 0,1 für den Kontakt zwischen den Drähten und 0,2 für den Kontakt zwischen den Drähten und dem Werkzeug angenommen wurde. Die erforderliche Drahtanzahl wurde direkt in Abaqus konstruiert, vernetzt und mit Kontaktbedingungen versehen. Mit Hilfe von „coupling constraints“ wurden die Knoten an den Drahtenden verknüpft, sodass diese, wie in Abbildung 4-8 dargestellt, um je 90° in entgegengesetzter Richtung verdreht werden können und somit eine Verdrillung um 180° erreicht wird. Dadurch wurde eine gleichmäßige Verdrillung auch bei hoher Massenskalierung erreicht, was wiederum zu akzeptablen Rechenzeiten führt. Zum Verpressen wurden für das Werkzeug Flächen vom Typ „analytical rigid“ verwendet, deren Anordnung in Abbildung 4-9 a) dargestellt ist. Abbildung 4-9 b) zeigt ein Drahtbündel nach dem Verdrillen und Verpressen, wobei die Farbdarstellung die äquivalente plastische Dehnung bei noch geschlossenem Werkzeug zeigt.

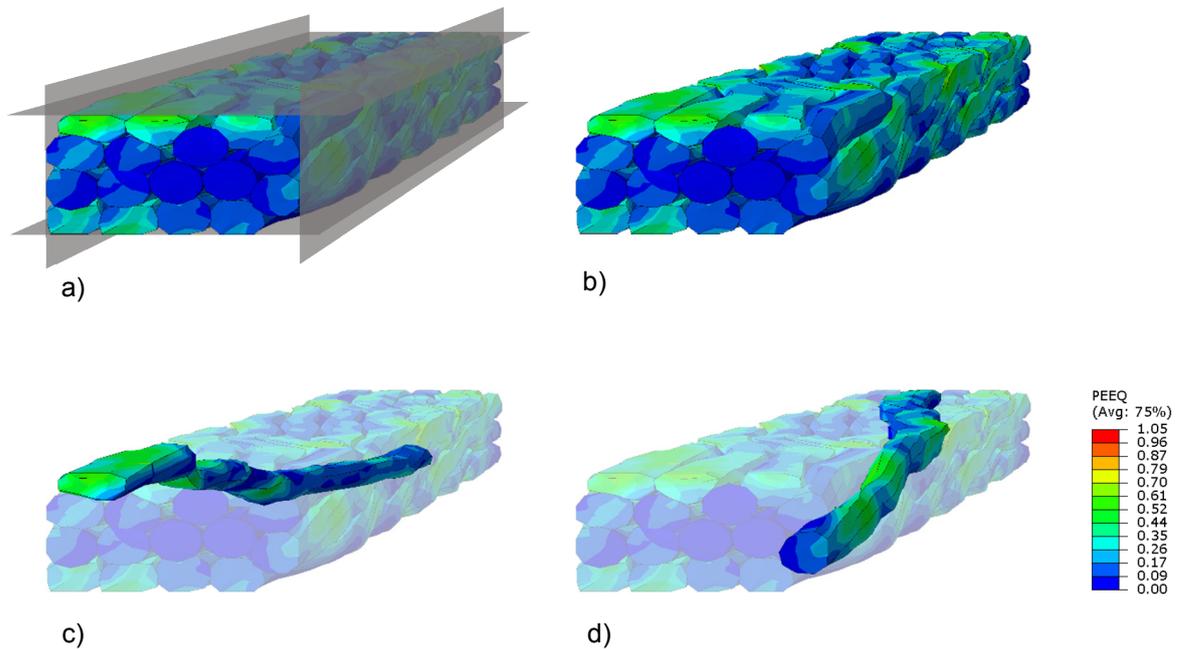


Abbildung 4-9: Verpressung in der Simulation

Eine besondere Herausforderung bei diesem Modell sind die Kontaktbedingungen. Dies ist insbesondere dadurch begründet, dass aufgrund der Verdrillung nahezu jedes Konstruktionselement während des Simulationsverlaufs mit jedem anderen in Kontakt tritt und somit fortwährend neue Flächenkontakte geschlossen werden müssen, die zu Instabilitäten bei der Simulation führen können. Dazu sind je nach Drahtanzahl etwa 100 Kontaktdefinitionen bei der Modellerstellung notwendig. Weil das Drahtbündel durch die Verdrillung die Breite der vorgesehenen Nut übersteigen kann, wurden in der Simulation zunächst die seitlichen Flächenelemente und anschließend das obere Flächenelement weggesteuert positioniert, sodass alle Flächen mit dem Drahtbündel in Kontakt treten. Danach wurde die gewählte Kraft oder der vorgegebene Weg auf das oberliegende Flächenelement aufgebracht, wobei für alle anderen Flächenelemente alle Freiheitsgrade gesperrt bleiben. Bei der in Abbildung 4-9 dargestellten Simulation wurde eine dem realen Versuch entsprechende Kraft von 150 kN mit linearem Anstieg aufgebracht. Für die Modellierung des Werkstoffes wurde von der Firma Essex Germany GmbH eine Fließkurve bereitgestellt, die mit Hilfe von Zugversuchen am verwendeten Draht erzeugt wurde. Das Elastizitätsmodul wurde auf  $E = 120$  GPa festgelegt, und die Extrapolation der Fließkurve erfolgte linear. Die verwendeten Herstellerangaben decken sich mit den Tabellenwerten von hochreinem, weichgeglühtem Kupfer (Deutsches Kupferinstitut Berufsverband e.V., 2005; Rau und Ströbel, 2004). Aufgrund mangelnder Kenntnis des Einflusses der Lackschichten auf die mechanischen Eigenschaften und

insbesondere auf die Tribologie, kann das Modell die Vorversuche lediglich qualitativ abbilden, bestätigt aber die Beobachtungen aus den Versuchen.

Wie die exemplarische Darstellung einer Simulation mit 16 parallelen Drähten in Abbildung 4-9 zeigt, entstehen an der Oberfläche vergleichbare Muster wie bei den Vorversuchen in Abbildung 4-6. Mit der Simulation kann gezeigt werden, dass diese systematisch bedingt sind, da die Lage der Drahtkreuzungen durch den Erstkontakt des Stempels mit einem Draht definiert wird. Die Anzahl und Lage der Kreuzungspunkte an der Oberfläche werden durch den Grad der Verdrillung und die Anzahl der parallelen Drähte innerhalb des umgeformten Bereiches bestimmt. Abbildung 4-9 c) und d) verdeutlichen nochmals die individuelle und komplexe geometrische Form, die jeder Draht annimmt, was nun mithilfe der Simulation visualisiert werden kann.

Zusammenfassend zeigt die Modellierung und Analyse des FEM-Modells, dass

- die Breitenzunahme aufgrund der Verdrillung berücksichtigt werden muss,
- die unregelmäßige Oberflächenstruktur nicht zufällig auftritt, sondern auf den ersten Werkzeugkontakt des Bündels zurückzuführen ist,
- bei starker Umformung mit stark variierenden Drahtausdünnungen zu rechnen ist,
- die Simulation wesentlich zum Prozessverständnis beiträgt und
- wichtige Anregungen für die Konstruktion des Versuchswerkzeugs gibt.

#### **4.4 Folgerungen aus den Vorversuchen**

Zum Abschluss der Vorversuche und deren simulativer Abbildung werden an dieser Stelle nochmals die Erkenntnisse und Randbedingungen zusammengefasst, die in die Prozessentwicklung eingehen. Die prinzipielle Machbarkeit der Vorgehensweise ist nachgewiesen, sodass im Folgenden die Erkenntnisse anhand der erforderlichen Prozessschritte aufgezeigt werden können. Diese daraus gefolgerte Prozesskette wird in Kapitel 5 anhand der dafür vorgesehenen Versuchs- und Messeinrichtungen detailliert beschrieben.

Nachdem sich die Ströme bei der betrachteten Stromverdrängung durch das Nutquerfeld ungleichmäßig verteilen, dürfen die parallelen Einzeldrähte nicht nach jeder Windung verbunden werden, wie es beispielsweise durch die Fügestellen bei Formstäben in Abbildung 2-16 der Fall ist. Das erneute Kontaktieren der Drahtbündel würde aufgrund der Stromverdrängung zum Abbau des elektrischen Potenzials führen, was zu Verlusten durch Blindströme führen würde. Ziel ist es demnach, gemäß des eigentlichen Sinns parallel geführter Drähte, diese innerhalb der Spulen nicht zu unterbrechen und die Stromverdrängung durch eine geschickte Anordnung der Drähte zu reduzieren. Um hierfür geeignete Arten der Verdrillung untersuchen zu können, ist eine flexible manuelle Wickelvorrichtung erforderlich, wie sie in

Kapitel 5.1 dargestellt wird. Der Spannrahmen aus den Vorversuchen gab hierfür wesentliche Anregungen.

Nachdem sich die Nut des Referenzstators nach oben hin verjüngt (siehe Abbildung 4-1), ist das Fügen und Verpressen bereits in den Stator montierter Spulen ausgeschlossen. Somit erfolgt nach dem Wickeln zunächst das Verpressen der Spulen. Abbildung 4-10 verdeutlicht die Herangehensweise zur Annäherung der Nutgeometrie. Für den Vorversuch wurde die einfach herzustellende angenäherte Rechteckform (Abbildung 4-10 links) gewählt. Hierbei konnte festgestellt werden, dass durch den großen Reibweg, somit insbesondere bei den obenliegenden Drähten eine Beschädigung des Lackdrahtes auftreten kann. In Abbildung 4-10 sind exemplarisch rote Pfeile für Bereiche mit großem Reibweg bei der parallelen und der trapezförmigen Nut eingezeichnet. Hinsichtlich der Trapeznut ergibt sich das noch schwerwiegendere Problem, dass der Stempel während des Umformvorgangs seine Breite ändern müsste. Der letztendlich verfolgte Ansatz (Abbildung 4-10 rechts) berücksichtigt diese Herausforderungen und entgegnet mit der Drehung der Umformrichtung um  $90^\circ$ . Aufgrund des Seitenverhältnisses der Nut reduziert sich der Reibweg auf ein Minimum. Die gestrichelt dargestellten Linien stellen schematisch und stark überzeichnet die Krümmung dar, die sich aus dem Durchmesser des Stators ergibt. Da für das Umformen ohne Schieber parallele Seitenflächen erforderlich sind, kann an dieser Stelle die Nut nicht vollständig mit der verpressten Spule ausgefüllt werden. Da das Kreissegment, welches durch die Seitenflächen und die idealisierten Kreise beschrieben wird, lediglich eine Segmenthöhe von wenigen Zehntelmillimetern beträgt, kann der dadurch verringerte maximale Nutfüllgrat in Kauf genommen werden.

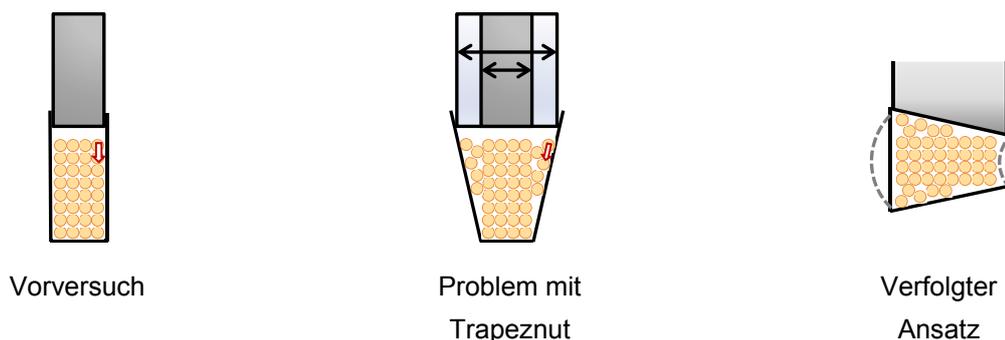


Abbildung 4-10: Schematische Abbildung der Nutgeometrie im Werkzeug

Für die Entnahme und die spätere Montage der Spulen im Motor ist eine Fixierung der Drähte erforderlich. Die Vorversuche haben gezeigt, dass es nahezu unmöglich ist, ein umgeformtes Drahtbündel wieder in Form zu bringen, nachdem es bei der Entnahme aus dem Werkzeug beschädigt wurde. Diese Erkenntnis wurde durch die Simulation nochmals bekräftigt, da hierbei

die Individualität und Komplexität jedes einzelnen umgeformten Drahtes ersichtlich wird. Wie bereits in Kapitel 4.2 erläutert, bietet sich der Einsatz von backlackbeschichtetem Draht an. Somit ist für das Versuchswerkzeug zu berücksichtigen, dass die Spulen während des Umformvorgangs auf etwa 160°C erhitzt werden müssen, um den Backlack zu aktivieren.

Für das Fügen der Spulen in den Stator muss aber berücksichtigt werden, dass die Spulen ähnliche Eigenschaften wie ein massiver Formstab aufweisen. Weder das Einziehen durch die Nut noch das Einträufeln durch den Nutschlitz sind damit möglich. Beim gegebenen Stator bliebe somit lediglich die Möglichkeit, einen Wickelkopf so zu gestalten, dass dieser zur Innenseite des Stators zeigt, und dass seine Breite so gewählt wird, dass dieser durch den Nutschlitz geschoben werden kann (Abbildung 4-11).

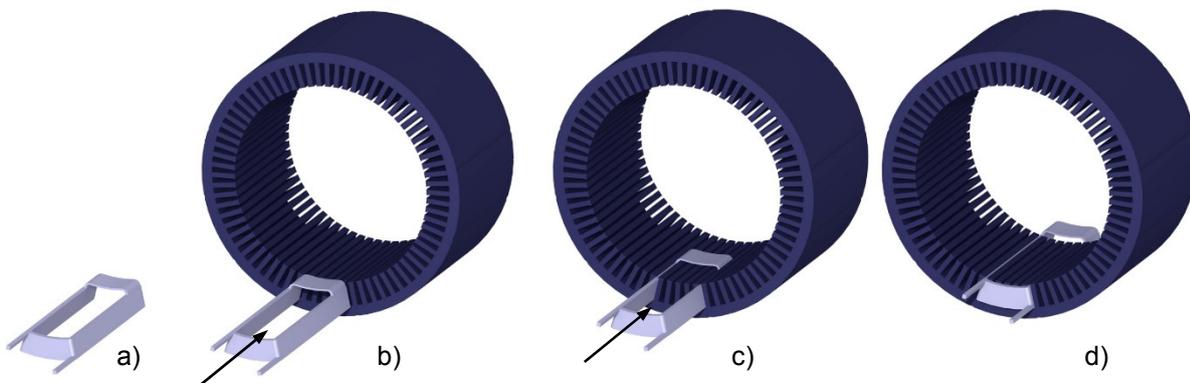


Abbildung 4-11: Montage einer gebogenen Spule

Möglich ist dies nur, sofern der Rotor von der gleichen Seite wie die Spulen in den Stator montiert wird und axial keine überstehenden Elemente besitzt, die mit den nach innen ragenden Wickelköpfen in Kontakt kommen können. Zudem erhöht sich die Komplexität der Spulen gegenüber der in Abbildung 4-11 schematisch dargestellten Spule noch deutlich dadurch, dass die Wickelköpfe der zweiten Spulenlage nicht mit den bereits eingeschobenen Wickelköpfen kollidieren dürfen. Diese Randbedingungen erfordern eine aufwändige Gestaltung des Wickelkopfes und dessen Vergrößerung, was wiederum die Leitfähigkeit der Spule vermindert und somit die Vorteile des erhöhten Nutfüllgrades teilweise zunichtemacht. Zudem ist der Bauraum wegen des gegebenen Gehäuses der Referenzmaschine begrenzt. Die resultierende Höhe des gebogenen Wickelkopfes übersteigt diesen bereits, wenn man lediglich die Drahtquerschnittsfläche einem flächengleichen Rechteck mit der Breite der gegebenen Nutschlitz gegenüberstellt. Dies wurde nochmals anhand einer geschlitzten Schablone im praktischen Versuch ersichtlich (Abbildung 4-12).

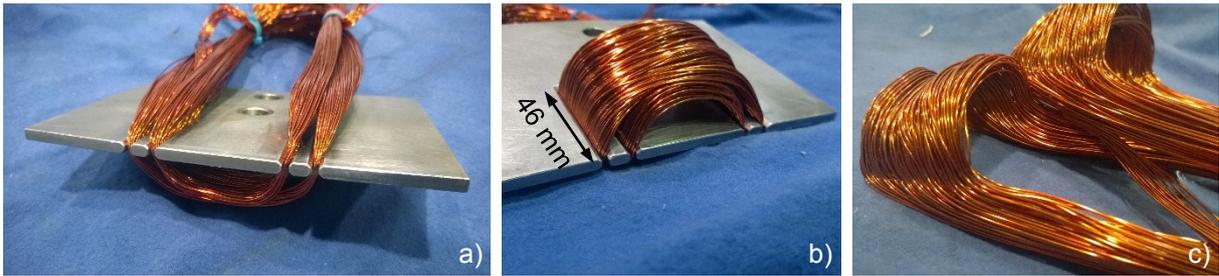


Abbildung 4-12: Praktischer Versuch mit gebogenem Wickelkopf

Somit besteht keine Möglichkeit, formstabile Spulen, die zum angestrebten Nutfüllgrad führen, in den Stator der Referenzmaschine einzubringen. Folglich ist es erforderlich, das Statorblechpaket zu segmentieren. Die projektübergreifende Festlegung auf eine gemeinsame Referenzmaschine ermöglicht es, auf ein Konzept mit steckbaren Statorzähnen der Firma risomat Otto Rist GmbH & Co.KG zurückzugreifen. Dieses wird ausführlich in Kapitel 5.4 im Rahmen der Statormontage erläutert.

In Tabelle 4-1 sind die Herausforderungen, welche die Vorversuche hervorgebracht haben, und entsprechende Lösungsansätze nochmals zusammengefasst. Die gewählten Lösungsansätze erfordern Anpassungen der Fertigungskette zur Herstellung der Statoren. Diese angepasste Fertigungskette wird anhand der verwendeten Versuchs- und Messeinrichtung im folgenden Kapitel beschrieben.

Tabelle 4-1: Herausforderungen und Lösungsansätze

Herausforderung	Lösungsansatz
Aufgrund der Stromverdrängung durch das Nutquerfeld dürfen die Spulen nicht nach jeder Windung gefügt werden.	Das Verpressen fertig gewickelter und verdrehter Spulen ist vorzusehen.
Wickeln und Verdrehen müssen angepasst werden können.	Eine eigene flexible Wickelvorrichtung ist erforderlich.
Spulen für trapezförmige Nuten können nicht in radialer Richtung umgeformt werden.	Die Spulen werden in Umfangsrichtung, unter Vernachlässigung des Radius des Stators, verpresst.
Die Reibung an der Werkzeugoberfläche führt zu Beschädigungen des Lackdrahtes.	Die Reibwege werden durch das Verpressen in Umfangsrichtung minimiert und die Einlage einer temporären Schutzfolie wird vorgesehen.
Die Formstabilität ist nicht immer gegeben.	Mit Hilfe von Backlack, der im geschlossenen Werkzeug ausgehärtet wird, können die Spulen fixiert werden.
Formstabile Spulen können nicht in den Stator eingezogen werden.	Ein gezahnter Stator ist zu verwenden.



## 5 Versuchs- und Messeinrichtungen

Mit den Erfahrungen aus den Vorversuchen muss eine Prozesskette entwickelt werden, mit der, ausgehend vom Runddraht, bewickelte Statoren hergestellt und mit Hilfe geeigneter Prüfmethode verglichen werden können. Anhand dieser Prozesskette werden in den folgenden Unterkapiteln die erforderlichen Versuchs- und Messeinrichtungen vorgestellt und die Wechselwirkungen der einzelnen Prozessschritte erläutert.

### 5.1 Wickelvorrichtung

Nachdem, wie in Kapitel 4.4 erklärt, Spulenpaare ohne Fügstellen zwischen den Windungen hergestellt werden müssen, ist eine Wickelvorrichtung notwendig. Eine manuell bedienbare Vorrichtung eignet sich am besten, da gemäß der geplanten Herangehensweise in Kapitel 3 zahlreiche Variationen hinsichtlich Drahtanzahl sowie Art und Lage von Verdrillungen bei sehr kleinen Losgrößen herzustellen sind. Da bis zu 16 parallele Drähte gewickelt werden müssen, wurde der gelieferte Backlackdraht auf kleine Spulen mit den Außenmaßen 150 mm x 150 mm umgespult. Für die große Spulenanzahl und die manuelle Bedienung eignet sich am besten die in Kapitel 2.2.2 erläuterte Linearwickeltechnik. Dabei bewegt sich nur der Spulenkörper und die Vorratsrollen stehen, abgesehen von der rotatorischen Abrollbewegung, still. Zur Herstellung der erforderlichen Spulenarten sind eine rotatorische Achse zur Herstellung der Windungen und zudem eine weitere rotatorische Achse zum Verdrillen notwendig. Zur Umsetzung der Anforderungen wird gemäß der schematischen Darstellung in Abbildung 5-1 die Wickelschablone mit einer Drehachse versehen, die wiederum linear verschiebbar auf der Verdrillachse montiert ist. Diese Linearachse dient dazu, die Lage der Wickelschablone bei der Verdrillung in der Achse der Drahtführung justieren zu können.

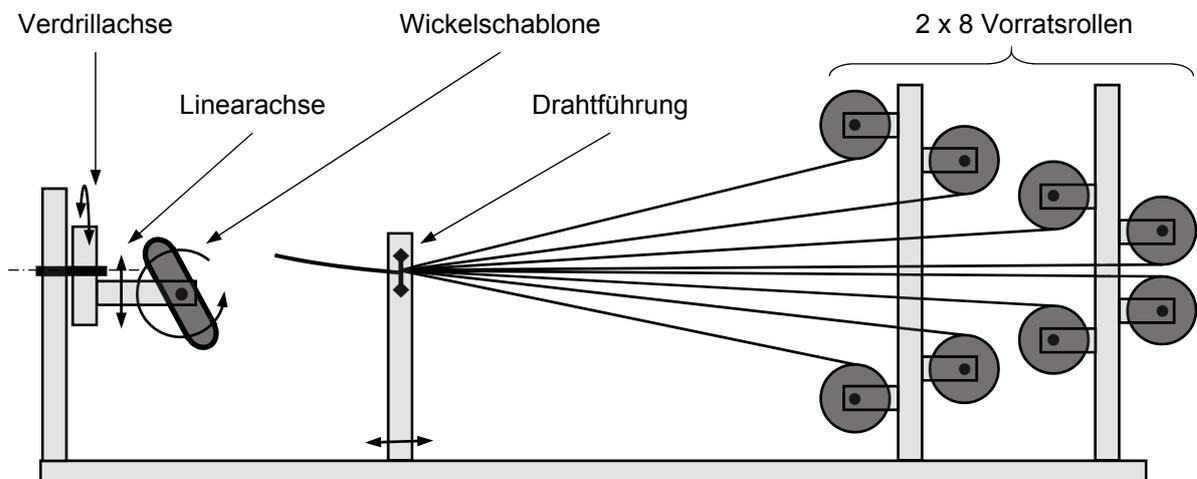
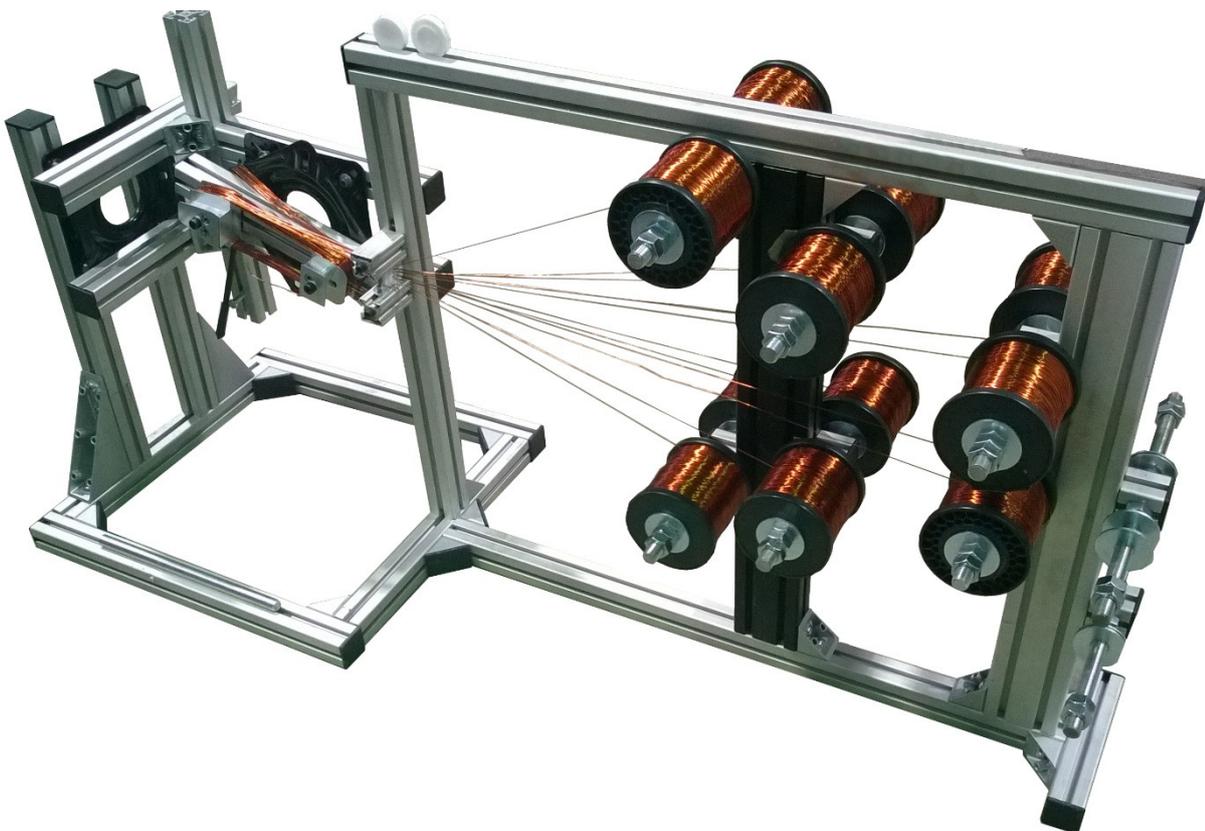


Abbildung 5-1: Schematische Darstellung der Wickelvorrichtung (nach Kraller, 2015)

Die bis zu 16 parallel geführten Drähte werden von v-förmig angeordneten Spulen abgewickelt und durch eine Drahtführung geführt. Diese besitzt 16 kleine Löcher, sodass die zuverlässige Zuführung der Drähte auch bei einer Verdrillung innerhalb der Spule sichergestellt werden kann. Durch die horizontale Einstellbarkeit der Position der Drahtführung kann der Abstand zwischen Wickelschablone und Drahtführung auf ein Minimum eingestellt werden, sodass die zu erzielende Verdrillung ausschließlich im jeweils geforderten Bereich auf der Wickelschablone zu liegen kommt. Abbildung 5-2 zeigt diese Vorrichtung beim Wickeln einer Spule mit 12 parallelen Drähten.



*Abbildung 5-2: Wickelvorrichtung mit 12 parallelen Drähten*

Wie in Abbildung 5-3 detaillierter dargestellt, besitzt die Wickelschablone zwei Etagen, um die erforderlichen ineinander liegenden Spulenpaare herzustellen. Zur Entnahme der Spulen werden die beiden Schablonenteile zueinander verschoben. Der Abstand und die Geometrie wurden iterativ angepasst, bis eine zuverlässige Einbringung in das Versuchswerkzeug (Kapitel 5.2) und die Montage in den Stator (Kapitel 5.4) bei zugleich minimaler Spulenlänge möglich waren.



Abbildung 5-3: *Wickelschablone und Drahtführung (nach Kraller, 2015)*

Mit dieser flexiblen manuellen Wickelvorrichtung können die Variationen der zu untersuchenden Wicklungsarten hergestellt werden. Die genaue Ausprägung der Wicklungsarten ist im Rahmen der Versuchsplanung in Kapitel 6.3 beschrieben.

## 5.2 Versuchswerkzeug

Für die Auslegung des Versuchswerkzeugs sind die in Kapitel 4.4 dargestellten Erkenntnisse aus dem Vorversuch von besonderer Bedeutung. In Abbildung 4-10 ist bereits der Lösungsansatz für das Umformen der trapezförmigen Nut beschrieben. Betrachtet man aber die gesamte Spule mit ihren vier Strängen, so muss man feststellen, dass diese auf einer Kreisbahn angeordnet sind. Da die gleichzeitige Umformung aller vier Nuten auf einer Kreisbahn in einem Versuchswerkzeug nicht darstellbar ist, wird die Abwicklung der Kreisbahn gemäß Abbildung 5-4 angenommen.

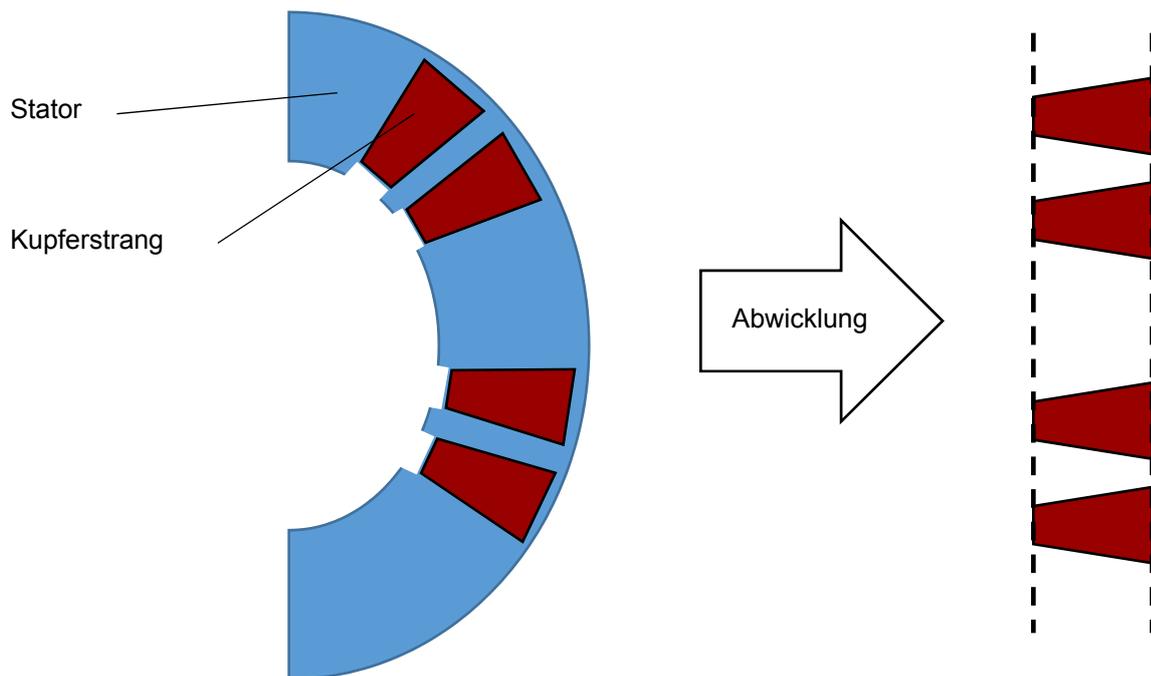


Abbildung 5-4: Abwicklung des Statorsegments einer Spule (nach Betz, 2014)

Da der Abstand der vier Nuten, insbesondere zwischen der inneren und äußeren Spule, sehr klein und zudem die zu erwartenden Prozesskräfte sehr hoch sind, ist es erforderlich alle vier Nuten im Kraftfluss so zu positionieren, dass die gesamte Spule in einem Schritt umgeformt werden kann. Ansonsten müssten abstützende Werkzeugelemente aufgrund geometrischer Einschränkungen so klein dimensioniert werden, dass sie voraussichtlich den Prozesskräften nicht standhalten würden. Des Weiteren kann das Spulenpaar beim nachfolgenden Aushärten des Backlacks nur als Ganzes aufgeheizt werden.

Im Wesentlichen werden drei mögliche Werkzeugkonzepte auf ihre Eignung detaillierter betrachtet. Grundlegend wird zwischen einer vertikalen und einer horizontalen Umformrichtung unterschieden. Das Konzept mit vertikaler Umformrichtung (Abbildung 5-5) ähnelt dem Aufbau eines Umform- oder Schneidwerkzeugs, benötigt aber fünf zueinander bewegliche Werkzeugplatten, die geführt werden müssen.

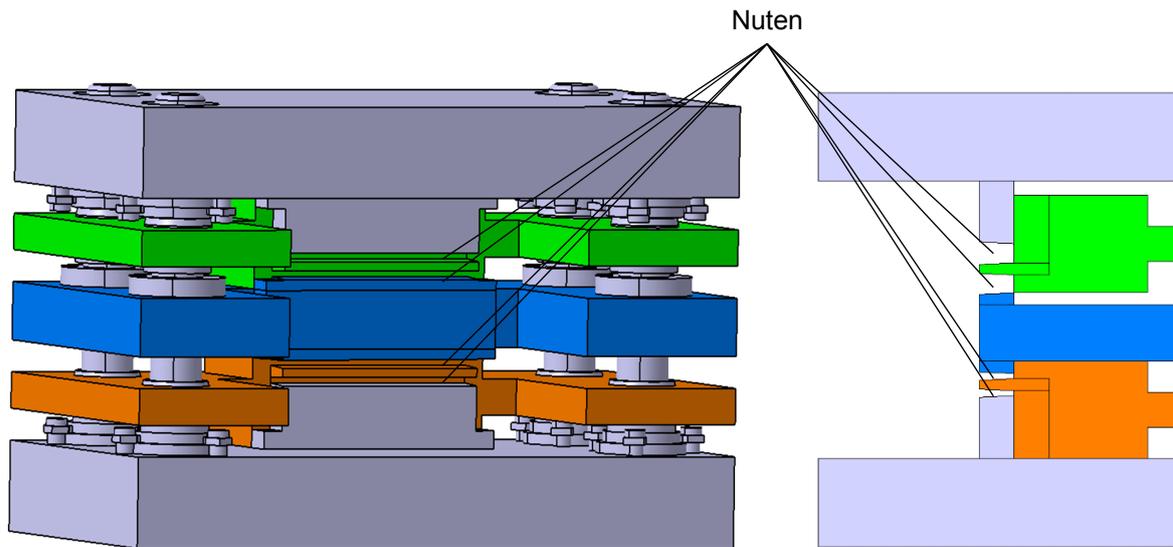


Abbildung 5-5: Entwurf mit vertikaler Umformrichtung (nach Betz, 2014)

Da die vertikale Montage der Spulen als sehr aufwändig eingeschätzt wird und die vielen Führungsbuchsen kaum Platz finden, wurde eine horizontale Anordnung gemäß Abbildung 5-6 in Betracht gezogen.

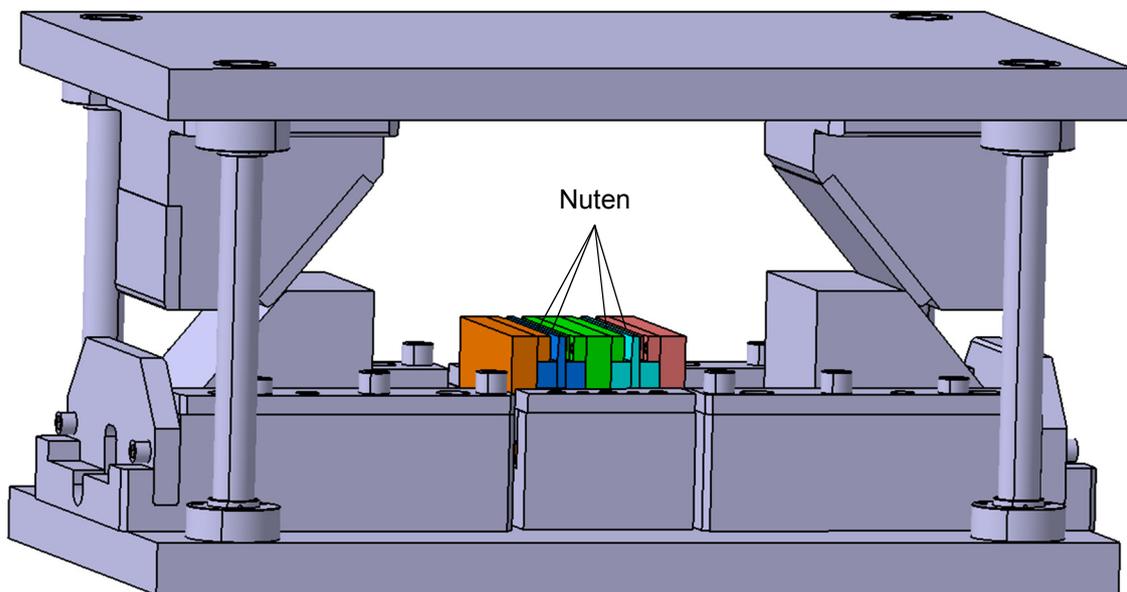


Abbildung 5-6: Entwurf mit horizontaler Umformrichtung und Schiebern (nach Betz, 2014)

Diese Konstruktionsweise ermöglicht zwar eine sehr kompakte Bauweise hinsichtlich der in Abbildung 5-6 farblich gekennzeichneten Aktivelemente, jedoch wird eine aufwändige Schieberkonstruktion zur Umleitung der Pressenkraft in die horizontale Umformrichtung benötigt. Um dieser Problematik zu entgehen, wird eine weitere Alternative betrachtet, bei der

die Krafteinleitung mittels direkt an den Aktivelementen anliegenden Keilen erfolgt (Abbildung 5-7).

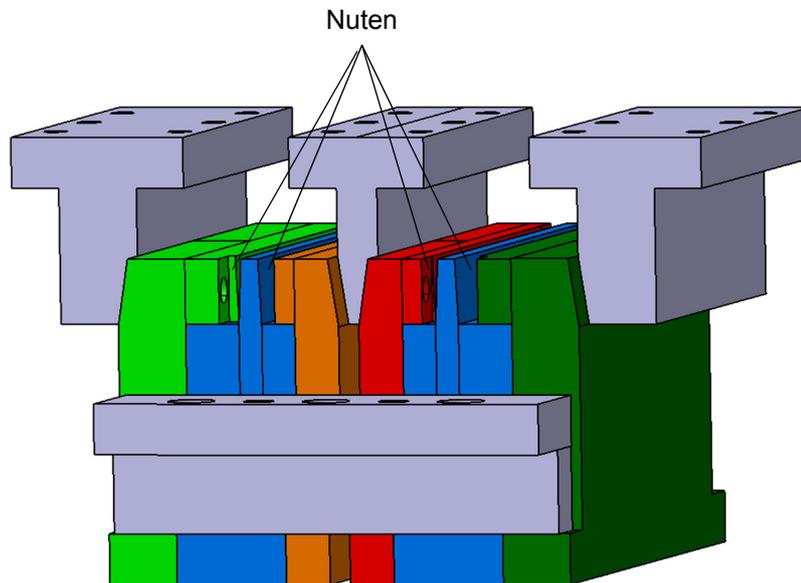


Abbildung 5-7: Entwurf mit horizontaler Umformrichtung und Keilen (nach Betz, 2014)

Die Problematik besteht hierbei aber darin, dass der mittlere Keil bei ungleichmäßiger Umformung der Drahtbündel in den jeweiligen Nuten ein durch die entstehende Querkraft bedingtes Moment aufnehmen müsste.

Für eine objektive Bewertung der Lösungsansätze wurde eine gewichtete Entscheidungsmatrix (Tabelle 5-1) erstellt. Mit den an der Konzeption des Werkzeugs beteiligten Personen wurden hierzu zunächst relevante Kriterien festgelegt, die anschließend nach Wichtigkeit sortiert und mit einer Gewichtung von 1 bis 3 hinterlegt wurden. Für die Bewertung der Konzepte wurden die Punkte 0 = Kriterium nicht erfüllt, 1 = Kriterium erfüllbar und 2 = Kriterium sehr gut erfüllt vergeben.

Tabelle 5-1: Entscheidungsmatrix für das Werkzeugkonzept (nach Betz, 2014)

Kriterium	Gewichtung	Vertikal		Horizontal 1		Horizontal 2	
		unge- wichtet	ge- wichtet	unge- wichtet	ge- wichtet	unge- wichtet	ge- wichtet
<b>Robustheit</b>	3	2	6	2	6	0	0
<b>Selbstzentrierung</b>	3	2	6	2	6	0	0
<b>Krafteinleitung</b>	3	2	6	1	3	1	3
<b>Maße</b>	2	1	2	0	0	2	4
<b>Kraftfluss</b>	2	2	4	1	2	1	2
<b>Isolierungsmöglichkeit</b>	2	1	2	2	4	1	2
<b>Aushärtung</b>	1	1	1	1	1	2	2
<b>Komplexität</b>	1	0	0	1	1	1	1
<b>Summe</b>		11	<b>27</b>	10	<b>23</b>	8	<b>14</b>

Der vertikale Aufbau wurde dabei als klarer Favorit herausgearbeitet. Trotz des engen Bauraums kann hierbei auf viele Normteile, insbesondere robuste, spielfreie Führungselemente, zurückgegriffen werden. Zudem kann der Kraftfluss auf kurzen Wegen in Pressenrichtung geführt werden.

Die Sollgeometrie der Spulen ist durch die Nutgeometrie bestimmt. Wie in Abbildung 5-8 dargestellt, wird das Isolationspapier mit 0,25 mm berücksichtigt und zudem ein Fügespalt von 0,1 mm vorgehalten. Dieser berücksichtigt eine mögliche Rückfederung beziehungsweise den Verzug nach dem Öffnen des Werkzeugs. Durch die Länge von 130 mm besteht ansonsten die Gefahr, dass bei kleinsten Abweichungen die Montage nicht mehr möglich ist.

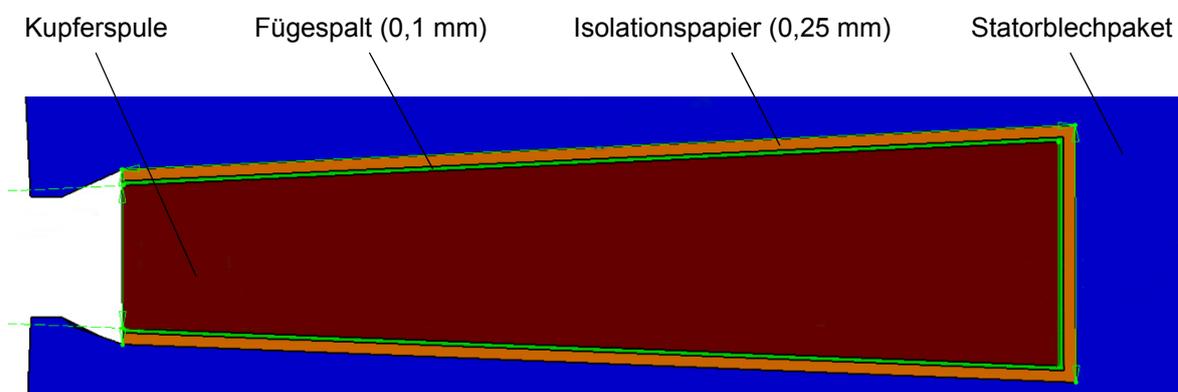
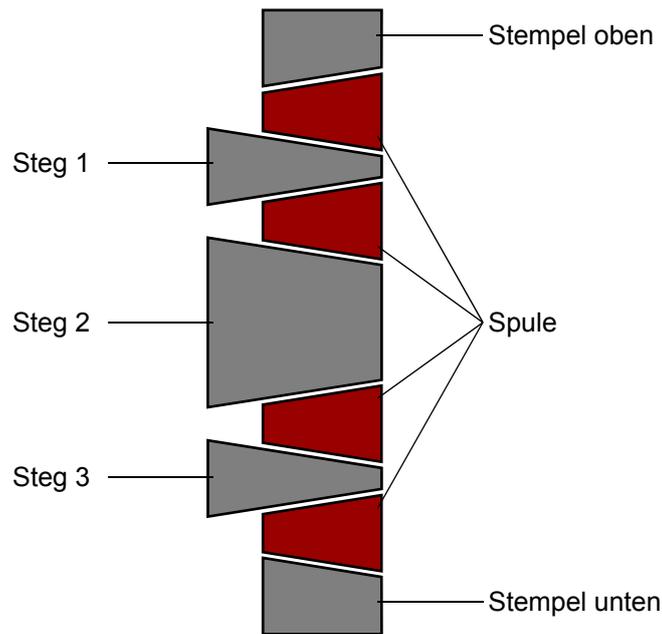


Abbildung 5-8: Definition der Nutgeometrie für das Werkzeug (nach Betz, 2014)

Das Volumen des in Abbildung 5-8 links befindlichen Nutschlitzes kann nicht ausgenutzt werden, da aufgrund der Luft- und Kriechstrecken das Isolationspapier dort überstehen oder die Spule umfassen muss. Somit wäre eine deutlich komplexere Spulengeometrie notwendig, um nur wenig mehr Volumen ausfüllen zu können, die wiederum im Versuchswerkzeug nicht abbildbar ist. Weiterhin sind trotz der Backlackbeschichtung ein Nutschließkeil und eine Imprägnierung notwendig, welche das vorhandene Volumen weitestgehend ausfüllen. Deshalb wird eine trapezförmige Werkzeuggeometrie verwendet, wobei die beiden abgeschrägten Seiten die beweglichen Stempel darstellen und die kurzen Seiten, gemäß der Annäherung in Abbildung 4-10, parallel zueinander verlaufen. Mit diesem Konzept wird die Spule unabhängig von den anderen Randbedingungen wie Drahtanzahl und Verdrillung immer auf das gleiche Maß verpresst. Demnach ergeben sich unterschiedliche Nutfüllgrade lediglich aufgrund der gewählten Drahtanzahl. Der Grad der Verpressung variiert zusätzlich durch die Anordnung der Drähte. Je ungeordneter die Drähte der wilden Wicklungen sind, bis hin zu geplant eingebrachten Verdrillungen innerhalb der Nut, desto höher wird zudem der Verpressgrad. Wie bereits die Simulation in Kapitel 4.3 zeigt, ist jedoch die Analyse der Umformgrade nicht zielführend, da diese örtlich stark variieren und statistisch verteilt sind. Auch wenn sich nur wenige Drähte in der Nut befinden und der resultierende Nutfüllgrad deutlich unterhalb der rechnerisch möglichen dichtesten Packung liegt, können ungünstig gelegene Drahtkreuzungen zu lokal sehr hohen Umformgraden führen.

Da die Spule in einem Umformschritt verpresst werden muss, wird die in Abbildung 5-9 schematisch dargestellte Anordnung der Werkzeugaktivelemente verwendet. Die drei abgebildeten Stege sind hierbei fliegend gelagert, sodass während des Umformprozesses an jedem der vier Spulenstränge die gleiche Kraft anliegt. Dies ist erforderlich, um das gleichmäßige Verpressen zu gewährleisten. Zudem reduziert sich dadurch die erforderliche Presskraft und somit die Werkzeugbelastung.



*Abbildung 5-9: Schematische Anordnung der Werkzeugaktivelemente für die vertikale Anordnung*

Aufgrund der fliegenden Lagerung der Stege ist für jeden Spulenstrang ein eigener Endanschlag vorzusehen, damit die Sollgeometrie prozesssicher eingestellt werden kann. Weiterhin sind durch die Keilwirkung an den Stegen Querkräfte zu erwarten, die es abzustützen gilt. Aufgrund der Symmetrie der Spule wird die Konstruktion beginnend bei Steg 2 entwickelt. Ebenso verhält es sich damit beim Montagekonzept des Werkzeugs. Wegen der Keilform der Stege ergibt sich die Entnahmerichtung der Spule auf der rechten Seite des in Abbildung 5-9 dargestellten Schemas. Auf dieser Seite begrenzt eine an Steg 2 befestigte Platte die Kavität für die Spulen. Durch die Anordnung um Steg 2 wird somit auch der Reibweg zwischen dem Werkzeug und den Drähten auf ein Minimum begrenzt. Weiterhin kann das Werkzeug weitestgehend symmetrisch aufgebaut und einige Gleichteile vorgesehen werden. Wie in Abbildung 5-10 dargestellt, wird auf ein viersäuliges Normwerkzeuggestell zurückgegriffen, bei dem die Führungssäulen an der mittleren Platte befestigt sind. Die blau dargestellten Flächen sind geschliffen, da sie zur Ausrichtung anderer Werkzeugteile oder als Endanschlagfläche erforderlich sind. Grün eingefärbte Flächen haben Kontakt zur umzuformenden Spule.

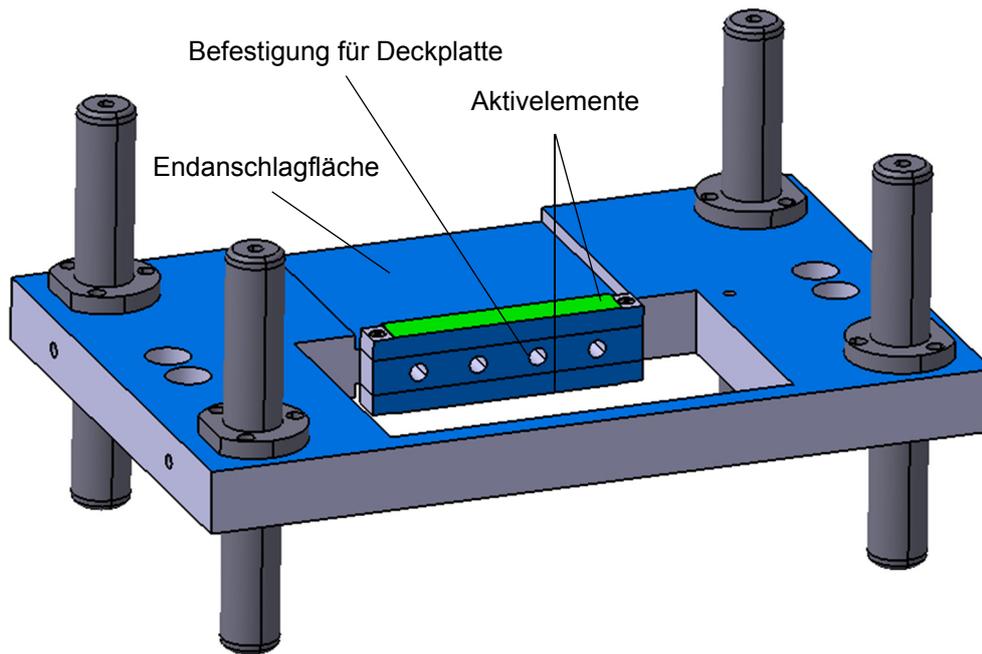


Abbildung 5-10: CAD-Zeichnung von Steg 2 (nach Betz, 2014)

Zur Schließung der Werkzeugkavität auf der linken Seite des in Abbildung 5-9 dargestellten Schemas sind Überlappungen im Werkzeug vorzusehen, die jedoch den Umformvorgang nicht behindern dürfen. Gemäß Abbildung 5-11 wird dies dadurch erreicht, dass die Platte des Werkzeuggestells mit weiteren geschliffenen Platten erhöht wird. Diese quaderförmigen Platten sind kostengünstig in hoher Präzision und Oberflächenqualität herstellbar. Sie dienen gleichermaßen als Kavität und als Endanschlag für den jeweilig umzuformenden Spulenstrang.

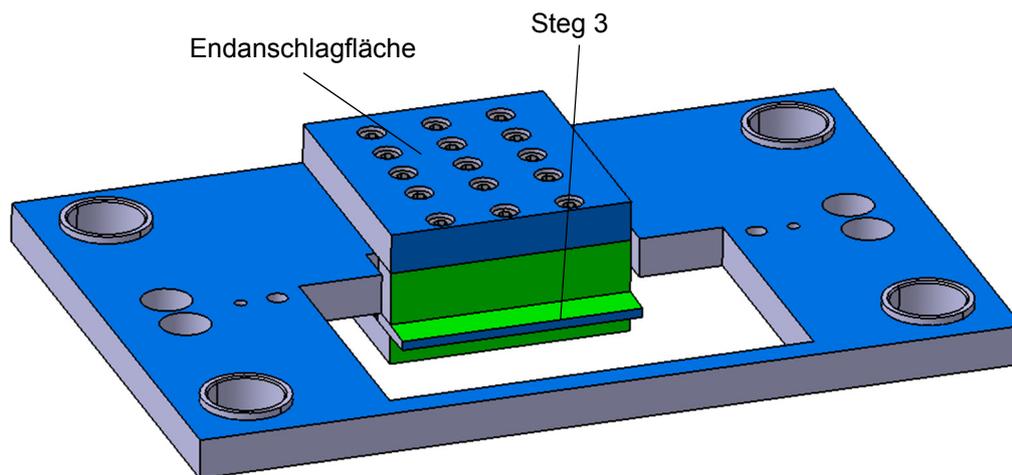


Abbildung 5-11: CAD-Zeichnung von Steg 3 (nach Betz, 2014)

Zur möglichst genauen Ausrichtung der Aktivelemente zueinander wird bei der Montage die mittlere Platte, in der die Säulen befestigt sind, auf einer ebenen Unterlage mit der Deckplatte nach unten aufgelegt und alle weiteren Platten auf die Führungssäulen seitlich aufgeschoben.

Nacheinander werden die Aktivelemente auf der geschliffenen Deckplatte ausgerichtet und schließlich angeschraubt. In Abbildung 5-12 ist der Montagezustand dargestellt, bei dem die beiden fliegend gelagerten schmalen Stege 1 und 2 mit den zugehörigen Führungsplatten bereits montiert sind. Da die beiden Stempel ebenso an der Deckplatte ausgerichtet werden, bevor die Kopf- und Bodenplatte montiert wird, ist einer der Stempel bereits in der Zeichnung mit dargestellt.

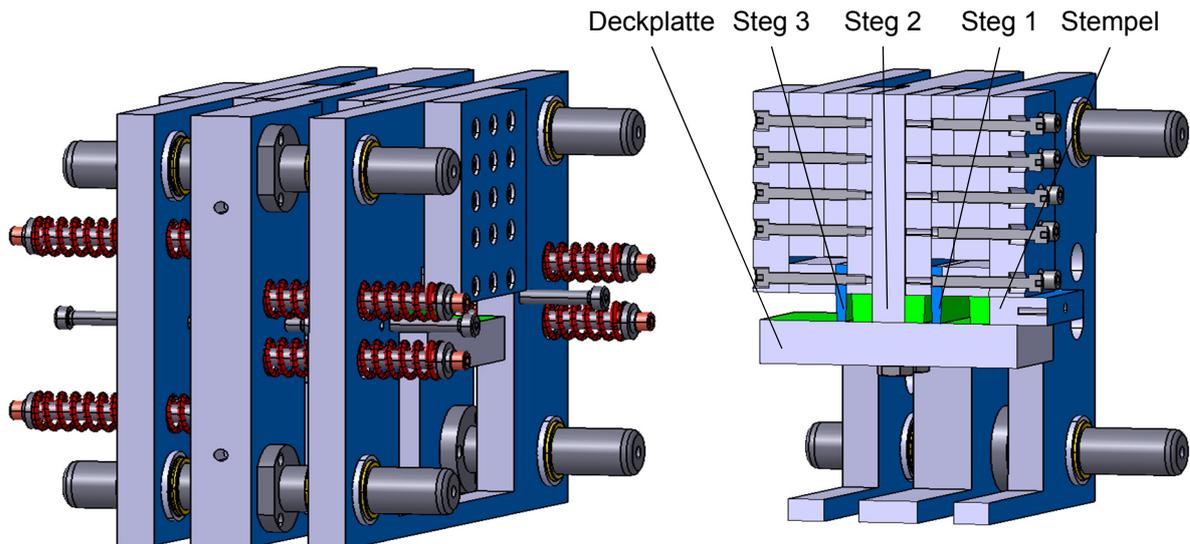


Abbildung 5-12: CAD-Zeichnung und Schnitt des Werkzeugzusammenbaus (nach Betz, 2014)

Wie in den vorangegangenen Zeichnungen bereits dargestellt, verläuft der Kraftfluss mittig durch das Werkzeug. Die Keilwirkung durch die Stege führt zu Querkraften, die im Werkzeug über die Platten und Führungen abgestützt werden. Auf Kosten der Zugänglichkeit beim Spulenwechsel befindet sich ein Steg an der Werkzeugvorderseite, der in Abbildung 5-12 unten liegt, da dadurch die Werkzeugsteifigkeit maßgeblich gesteigert wird und somit die Querkraften besser aufgenommen werden können. Damit die Spulen nicht bereits durch das Eigengewicht des Werkzeugs geklemmt und eventuell sogar beschädigt werden können, werden Öffnungsfedern eingesetzt. Die geforderte Kombination aus Kraft und Federweg bedingt eine Federlänge, die größer als der Plattenabstand ist. Somit sind Durchbrüche sowie eine Verkettung der Federn und Rückholschrauben notwendig. Wie in Abbildung 5-13 links dargestellt, stützen sich die Federn zwischen der mittleren Platte und der oberen beziehungsweise unteren Platte ab. Die rechts dargestellten Rückholschrauben verhindern, dass sich die Kopf- und Bodenplatten lösen, und heben die beiden Platten an, die nicht durch die Federn getragen werden. Da das Werkzeug annähernd symmetrisch aufgebaut ist, ist in Abbildung 5-13 die untere Werkzeughälfte im geschlossenen und die obere Werkzeughälfte im geöffneten Zustand abgebildet.

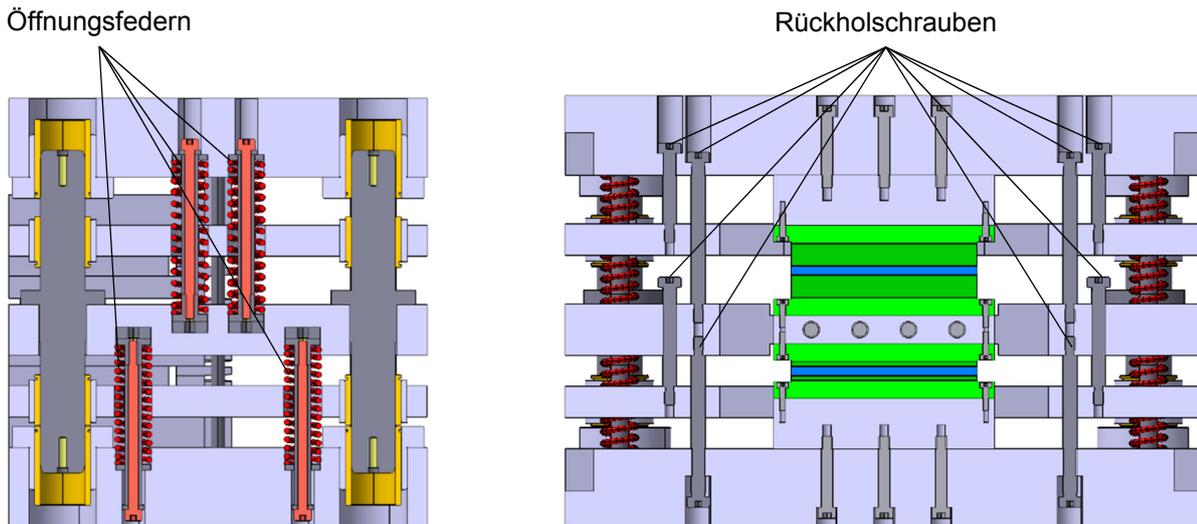


Abbildung 5-13: Schnittdarstellung des Werkzeugs (nach Betz, 2014)

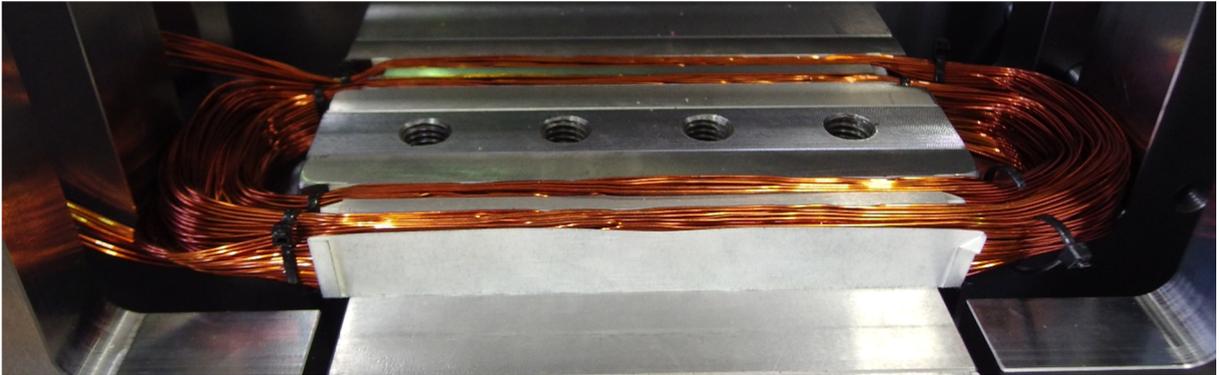
Auf Basis der vorliegenden Konstruktion wurden Fertigungszeichnungen abgeleitet, anhand derer das Werkzeug gefertigt, zusammen mit den Normteilen montiert und schließlich eingearbeitet wurde (Abbildung 5-14).



Abbildung 5-14: Montiertes Versuchswerkzeug mit Spule

Bereits die ersten Spulen konnten mit dem vorliegenden Werkzeug problemlos umgeformt werden. Lediglich die Spulenlänge ist geringfügig anzupassen, damit die Spulen in das Werkzeug eingeführt werden können. Dies ist aber aufgrund der in Kapitel 5.1 beschriebenen manuellen Wickelvorrichtung sehr einfach umzusetzen. Lediglich am Übergang zum Wickelkopf führt die scharfe Werkzeugkante am Ende der Nut teils zu Beschädigungen am Lackdraht. Durch eine manuell angebrachte Rundung wird dieses Problem bereits gemindert. Die zusätzliche Verwendung von Isolationspapier zwischen Spule und Werkzeug löst dieses Problem letztendlich. Der zu Anfang dieses Kapitels beschriebene Fügespalt von 0,1 mm wurde bewusst klein gewählt, da durch Abschleifen der Endanschlüsse der Querschnitt der Spulen jederzeit verringert werden könnte. Durch das Einlegen von Nutisolationpapier

(Abbildung 5-15) erhöht sich der zur Verfügung stehende Fügespalt ebenso, was noch weitere Vorteile mit sich bringt.



*Abbildung 5-15: Spule mit Isolationspapier im Versuchswerkzeug*

Für das im nachfolgenden Kapitel beschriebene Aushärten des Backlacks wird durch das Isolationspapier die Wärmeleitung in das Werkzeug behindert, was zum schnelleren und gleichmäßigeren Aufheizen führt. Zudem kann der Backlack somit das Versuchswerkzeug nicht mehr verkleben. Hinsichtlich des Umformprozesses werden durch das Isolationspapier Spannungsspitzen geglättet, weshalb der Isolationslack auch bei hohen Umformgraden vor Beschädigungen geschützt wird. Das zur Nutgrundisolation verwendete Aramidpapier besitzt eine ausreichende mechanische Festigkeit und ist bereits für die Verwendung in der Referenzmaschine zugelassen, sodass keine Stoffe auf die Spulen übertragen werden können, die später zu Problemen führen könnten, wie beispielsweise eine unzureichende Benetzung bei der Imprägnierung.

### **5.3 Heizvorrichtung**

Die in Kapitel 4 dargestellten Vorversuche haben bereits gezeigt, dass die umgeformten Spulen zur Entnahme aus dem Werkzeug eine ausreichende Formstabilität aufweisen müssen, die allein durch die resultierenden Hinterschneidungen aufgrund des Umformprozesses nicht zuverlässig erreicht werden kann. Da die Backlackbeschichtung im Elektromaschinenbau einschließlich aller Folgeprozesse bereits etabliert ist und kostengünstig aufgebracht werden kann, liegen die Vorteile gegenüber unerprobten Klebstoffsystemen auf der Hand. Für die Untersuchungen wurde der Lackdraht Magnetemp CA 200 Grad 2 von der Firma Essex Germany GmbH (Superior Essex Inc., 2010) zur Verfügung gestellt. Für den verwendeten Lackdraht ist eine backlackbeschichtete Variante in der Regel sogar vorrätig. Somit ist es notwendig, die umgeformte Spule bei geschlossenem Werkzeug auf etwa 160°C zu erhitzen und anschließend auf unter 50°C abzukühlen. Wegen der großen Masse und somit großen Wärmekapazität ist es nicht möglich, das ganze Werkzeug diesem Temperaturgang zu unterziehen, insbesondere weil der Aufheiz- und Abkühlvorgang idealerweise bei anliegender

Presskraft erfolgen sollte. Da zudem der Bauraum und die Zugänglichkeit für leistungsstarke Heizelemente, die das Werkzeug und die Spule nur lokal erhitzen, nicht ausreichen, bleibt schlussendlich die Eigenerwärmung der Spule als einzig sinnvolle Alternative.

Gemäß des ersten Joulschen Gesetzes ist die Wärmeenergie  $Q_W$ , die ein stromdurchflossener Leiter abgibt, folgendermaßen definiert:

$$Q_W = P * t$$

*Formel 5-1*

Die elektrische Leistung  $P$  wiederum berechnet sich aus dem Produkt der Spannung  $U$  und dem Strom  $I$ . Setzt man nach dem ohmschen Gesetz für  $U$  das Produkt aus Widerstand  $R_{Ohm}$  und Strom  $I$  ein, so ergibt sich:

$$Q_W = I^2 * R_{Ohm} * t$$

*Formel 5-2*

Demnach ist die abgegebene Wärmeleistung beziehungsweise Wärmeenergie bei gleichbleibendem Widerstand quadratisch vom den Leiter durchfließenden Strom abhängig. Für diese Aufgabenstellung stehen mehrere programmierbare Gleichstromquellen vom Typ GEN8-400 der Firma TDK-Lambda zur Verfügung. Diese stellen jeweils bis zu 8 V Ausgangsspannung und maximal 400 A Gleichstrom zur Verfügung (TDK-Lambda, 2017a). Über die serienmäßige RS-232/RS-485-Schnittstelle können die Stromquellen mit Hilfe eines LabVIEW-Programms angesteuert werden, sodass Stromstärke, Spannung und die Heizdauer präzise eingestellt wie auch protokolliert werden können. Für die Ansteuerung wird der Standard RS-232 verwendet, wofür ein Adapterkabel von einem zweireihigen, 9-poligen D-Sub-Stecker auf einen RJ45-Steckkontakt erforderlich ist, das jedoch eine außergewöhnliche Pinbelegung aufweist, die aber in TDK-Lambda (2017b) dokumentiert ist. Zur Kontaktierung der Spulen wird jeder einzelne Lackdraht abisoliert (Abbildung 5-16 links). Anschließend kann das blanke Drahtbündel mit Rohrkabelschuhen versehen werden, sodass der Kontaktwiderstand deutlich unterhalb des Spulenwiderstandes liegt. Hierzu wird eine Presszange Typ K 05 der Firma Klauke mit an den resultierenden Drahtquerschnitt angepassten Rohrkabelschuhen verwendet (Abbildung 5-16 rechts).



Abbildung 5-16: Abisolierpinzette und Presszange mit Rohrkabelschuhen

Die auf diese Weise vorbereiteten Spulen können, wie bereits in Kapitel 5.2 erläutert, in das Versuchswerkzeug montiert werden. Für die ersten Versuche mit Heizvorrichtung wird das Werkzeug in einer Universalprüfmaschine vom Typ Z150 TL Allround-Line der Firma Zwick GmbH & Co. KG mit 150 kN Maximalkraft betrieben (Abbildung 5-17).



Abbildung 5-17: Versuchsaufbau mit Heizvorrichtung und Universalprüfmaschine

Die Universalprüfmaschine ermöglicht es, die maximale Prüfkraft geregelt aufzubringen und diese sehr lange zu halten. So kann festgestellt werden, dass die maximale Kraft von 15 kN zunächst nicht ausreicht, um das Werkzeug vollständig zu schließen. Wird jedoch die Spule beheizt, so schließt sich das Werkzeug, da die Universalprüfmaschine kraftgeregelt betrieben werden kann und somit den Weg regelt. Zudem kann durch die Aufzeichnung der Strom- und Spannungswerte im verwendeten LabVIEW-Programm gezeigt werden, dass, wie in Abbildung 5-18 dargestellt, der Strom zunächst schnell ansteigt, jedoch nach etwa fünf Sekunden gleichmäßig wieder fällt. Die Spannung hingegen steigt kontinuierlich innerhalb der

ersten fünf Sekunden und bleibt dann konstant bei 8,4 V, was dem maximal einstellbaren Wert der Stromquelle entspricht und bereits um 0,4 V über dem nominellen Wert liegt.

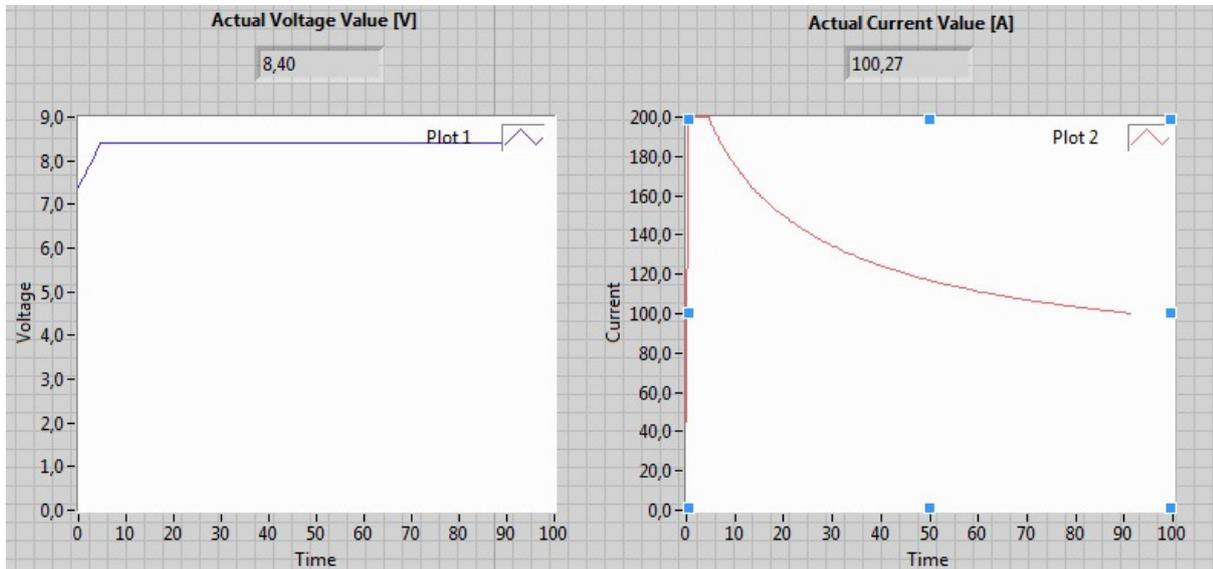


Abbildung 5-18: Strom- und Spannungsverlauf der Gleichstromquelle

Bei der gewählten Stromstärke von 200 A stellt sich zunächst eine Spannung von etwa 7,5 V ein. Der ohmsche Widerstand des Gleichstromkreises berechnet sich somit zu:

$$R_{Ohm} = \frac{U}{I} = \frac{7,5 \text{ V}}{200 \text{ A}} = 37,5 \text{ m}\Omega$$

Formel 5-3

Somit liegt der auf diese Weise bestimmte Widerstand geringfügig über dem in Kapitel 7.1.1 bestimmten Mittelwert für Spulen mit 14 parallelen Drähten (33,11 mΩ). Der geringfügig höhere Widerstand ist der Zuleitung zuzuschreiben. Setzt man hingegen die nach 90 Sekunden gemessenen Werte aus Abbildung 5-18 in Formel 5-3 ein, so erhält man mit 8,40 V und 100,27 A einen Widerstand von 83,80 mΩ. Dieser beachtliche Anstieg und die Spannungsbegrenzung der Stromquelle führen dazu, dass deutlich weniger Wärmeleistung als zunächst angenommen in die Spule eingebracht werden kann. Bei zu langsamer Erhitzung macht sich die Wärmeleitung in Richtung Werkzeug bemerkbar, sodass die Spule im Inneren überhitzt und der Backlack an der Außenseite noch nicht ausreichend aktiviert wird.

Die verwendeten Stromquellen ermöglichen eine Reihenschaltung von zwei Stromquellen, sodass eine Maximalspannung von 16 V und ein maximaler Strom von 400 A möglich sind. Dies entspricht einer Wärmeleistung von 6400 Watt. Da die beiden vorliegenden Stromquellen in der Master/Slave-Konfiguration nicht als ein Gerät über das LabVIEW-Programm ansteuerbar sind, werden beide Stromquellen innerhalb des Programms über jeweils eine eigene

RS-232-Verbindung angesteuert. Hierzu muss die Schnittstellenkonfiguration gemäß der Dokumentation der Stromquellen (TDK-Lambda, 2017b) angepasst werden, da ansonsten aufgrund von Adresskonflikten die Kommunikation mit den Stromquellen nicht zuverlässig funktioniert. Die sehr kleinen Latenzzeiten zwischen den Schaltvorgängen der beiden Stromquellen wie auch eine ungewollte Abschaltung einer der beiden Stromquellen stellen keine Gefahr dar, da jede Stromquelle bei Abschaltung des Ausgangs diesen kurzschließt. Somit könnte die Reihenschaltung mit nur einer Stromquelle betrieben werden. Bei Abschaltung beider Stromquellen ist somit zudem gewährleistet, dass der Aufbau sehr schnell spannungsfrei ist.

Wie beispielsweise in Busch (2011) und Hering, Bressler und Gutekunst (2017) dargelegt, ist die Änderung des Gleichstromwiderstandes  $\Delta R_{Ohm}$  gemäß der folgenden Gleichung proportional von der Temperaturänderung  $\Delta \vartheta$  abhängig:

$$\Delta R_{Ohm} = \alpha_T * R_{Ohm,0} * \Delta \vartheta$$

*Formel 5-4*

Der Temperaturkoeffizient  $\alpha_T$  wird hierbei näherungsweise als konstant angenommen. Die in Tabelle 5-2 dargestellten Temperaturkoeffizienten zeigen, wie unterschiedlich ausgeprägt der Temperatureinfluss bei den ausgewählten Werkstoffen ist. So ist dieser bei Graphit sogar negativ, was bedeutet, dass die Leitfähigkeit mit Erhöhung der Temperatur noch zunimmt.

*Tabelle 5-2: Ausgewählte Temperaturkoeffizienten bei 0°C (nach Hering, Bressler und Gutekunst, 2017)*

<b>Werkstoff</b>	<b>Temperaturkoeffizient <math>\alpha_T</math> [<math>10^{-4} \text{ K}^{-1}</math>]</b>
Aluminium	42,9
Eisen	65
Gold	40
Graphit	-2
Konstantan	0,1
Kupfer	43
Magnesium	38
Silber	41

Löst man Formel 5-4 nach der Temperaturänderung  $\Delta\vartheta$  auf und setzt die mit Formel 5-3 berechneten Widerstände zusammen mit dem Temperaturkoeffizienten von Kupfer aus Tabelle 5-2 ein, so ergibt sich:

$$\Delta\vartheta = \frac{\Delta R_{Ohm}}{\alpha_T * R_{Ohm,0}} = \frac{83,80 \text{ m}\Omega - 37,50 \text{ m}\Omega}{43 * 10^{-4} \text{ K}^{-1} * 37,50 \text{ m}\Omega} = 287 \text{ K}$$

*Formel 5-5*

Die errechnete Temperaturerhöhung von 287 K erscheint zwar ziemlich hoch, jedoch wurde für die in Abbildung 5-18 dargestellten Graphen eine sehr lange Heizdauer gewählt, sodass danach die Spulen bereits stark verfärbt waren. Zur Verifikation wurden Spulen ohne Backlackbeschichtung hergestellt und deren Temperatur zusätzlich mit einem Thermoelement gemessen. Dies lieferte durchwegs plausible Werte. Da aber ohnehin nur ein über die gesamte Spule gemittelter Wert bestimmt werden kann, ist die Berechnung der Temperatur gemäß Formel 5-5 völlig ausreichend.

Das Steuer- und Auswerteprogramm für die Beheizung der Spulen steuert die beiden Stromquellen und liest dort die aktuellen Strom- und Spannungswerte aus. So kann anhand der ersten gemessenen Werte mit Hilfe des ohmschen Gesetzes der Gleichstromwiderstand der jeweiligen Spule bei Raumtemperatur bestimmt werden. Durch Addition der mit Formel 5-5 berechneten Temperaturänderung lässt sich die aktuelle Temperatur der Spule bestimmen (Abbildung 5-19 unten links). Neben der Anzeige des Strom- und Spannungsverlaufs (Abbildung 5-19 unten mitte) lässt sich aus dem Produkt von Strom und Spannung, integriert über die Zeit, die in die Spulen eingebrachte Energiemenge berechnen (Abbildung 5-19 Mitte links). Diese Messgrößen ermöglichen eine rasche und zielgerichtete Anpassung der Versuchsparameter.

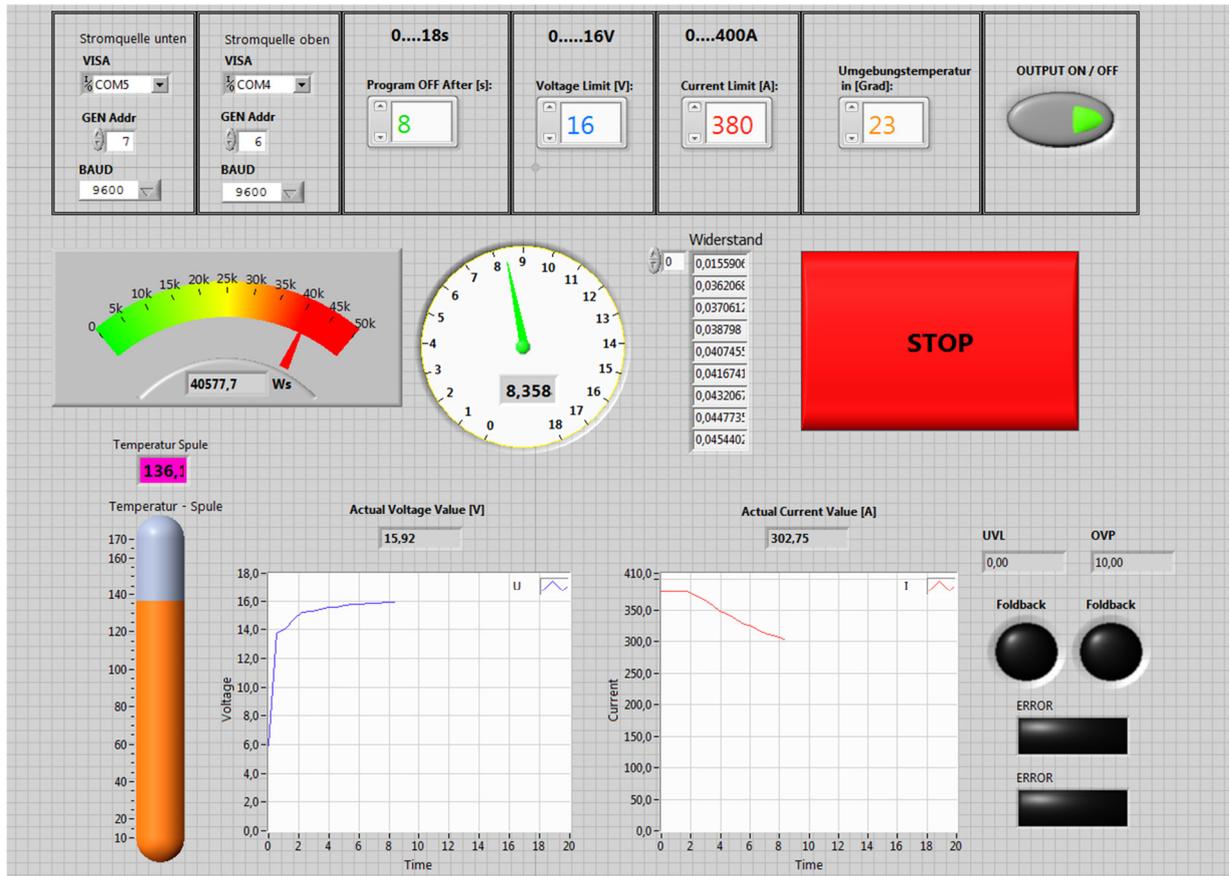


Abbildung 5-19: Screenshot des LabVIEW-Programms zu Steuerung der Heizvorrichtung (nach Serkyov, 2015)

Für das Beheizen der Spulen muss die richtige Kombination aus Maximalspannung, Maximalstrom und Heizdauer ausgewählt werden (Abbildung 5-19 oben). Hierbei ist darauf zu achten, dass die Spulen möglichst schnell die Zieltemperatur erreichen, damit nur wenig Wärmeenergie von den äußeren Drähten an das Werkzeug abgegeben wird und dennoch die Spule an keiner Stelle so heiß wird, dass der Lackdraht thermisch geschädigt wird. Bei zu geringer Heizleistung erwärmen sich die Zuleitungen der Spule so stark, dass dort der Lackdraht thermisch beschädigt wird. Bei ausreichend hoher Heizleistung und entsprechend kürzerer Heizdauer wird der Backlack der äußeren Drahtschichten noch nicht aktiviert. Deshalb hat sich eine maximale Stromstärke von 380 A bei der durch die Stromquellen gegebenen maximalen Spannung von 16 V und einer Heizdauer von 8 s bewährt. Wird noch mehr Wärme, zum Beispiel durch einen höheren Maximalstrom, eingebracht, so verkleben auch die Wickelköpfe sehr stark. Dies erschwert die spätere Montage der Spulen im Stator. Die berechnete Temperatur liegt zwar etwas unterhalb der Mindesttemperatur von etwa 160°C, die für die Aktivierung des Backlacks erforderlich ist, jedoch wird für die Berechnung über die gesamte Spule inklusive Zuleitung und Wickelkopf gemittelt. Durch das Auffächern der Drähte herrschen dort geringere Temperaturen als innerhalb der verpressten Nut.



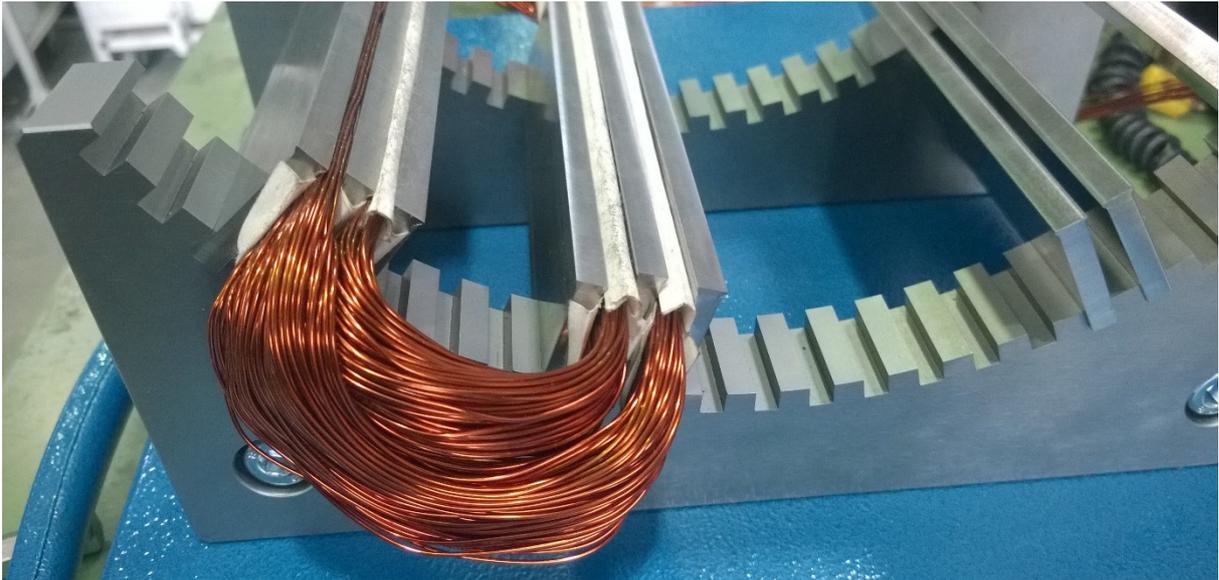
Abbildung 5-20: Verbackene Spule (nach Serkyov, 2015)

Mit Hilfe der dargestellten Heizvorrichtung kann der Backlackdraht im geschlossenen Versuchswerkzeug sehr schnell und gut reproduzierbar ausgehärtet werden. Durch die Bestimmung der aktuellen Temperatur ist zudem eine schnelle und zielgerichtete Anpassung der Versuchsparameter möglich.

#### 5.4 Statormontage

Wie bereits in Kapitel 4.4 erwähnt, ergeben sich bedingt durch die Nutgeometrie in Verbindung mit den formstabilen Spulen besondere Herausforderungen bei der Statormontage. Demnach ist eine Teilung des Statorblechpakets unerlässlich. Aufgrund der teilprojektübergreifenden Referenzmaschine ist es aber möglich, auf ein Konzept mit steckbaren Statorzähnen der Firma risomat Otto Rist GmbH & Co.KG zurückzugreifen, welches im Folgenden genauer erläutert wird.

Aufgrund der langen Lieferzeit und der hohen Kosten für die Blechpakete wird zunächst ein Statorsegment mit vereinfachtem Steckmechanismus aus Stahl gefertigt (Abbildung 5-21). Das erodierte Segment kann somit für erste Montageversuche genutzt werden.



*Abbildung 5-21: Vorrichtung zum Biegen und Testen der Montage*

Nachdem im Versuchswerkzeug gemäß Abbildung 5-4 lediglich eine Abwicklung der Kreisbahn, auf der sich die Spulen im Stator befinden, realisierbar ist, passen die Spulen zunächst nicht in die Vorrichtung. Durch das einseitige Einbringen in die Vorrichtung können die Wickelköpfe der Spulenpaare manuell so weit gebogen werden, dass eine spannungsfreie Montage im Stator möglich ist. Durch die in Kapitel 5.3 beschriebene hohe Heizleistung wird erreicht, dass lediglich die Drähte innerhalb der Nut fest miteinander verbunden sind und somit der Wickelkopf eine ausreichende Nachgiebigkeit für das Biegen der Spulen behält. Bei zu geringer Heizleistung erwärmt sich der Wickelkopf so stark, dass der Backlack dort ebenso aushärtet und somit zu einer hohen Festigkeit des Wickelkopfes führt. Folglich ist dadurch für das manuelle Biegen der Spulen in die Kreisform (Abbildung 5-21) ein erhöhter Kraftaufwand notwendig, weshalb die Spulen häufig beschädigt werden. Zuletzt müssen die Wickelköpfe der ersten Spulenlage, wie in Abbildung 5-24 links ersichtlich, nach außen gebogen werden, damit die Spulen der inneren Lage montiert werden können. Mit der in Abbildung 5-21 dargestellten Vorrichtung können somit die Spulen für die Montage vorbereitet und deren Passgenauigkeit im Vorfeld überprüft werden.

Die verwendete Steckverbindung besteht aus einem lasergeschnittenen Jochring und Zähnen, für die aufgrund der hohen benötigten Stückzahl ein Scherschneidwerkzeug angefertigt wurde. Die parallelfankigen Zähne werden nach dem Einbringen der Spulen in den Jochring eingepresst, wo sie aufgrund der in Abbildung 5-22 dargestellten Geometrie der Verbindung mechanisch einrasten. Abbildung 5-22 zeigt links die schematische Darstellung der im Jochring montierten Zähne und rechts ein Funktionsmuster mit in Tiefenrichtung verschobener Verbindung, um die Zahngeometrie darzustellen. Das abgebildete Funktionsmuster dient der Ermittlung der zu erwartenden Füge- und Auszugskräfte.

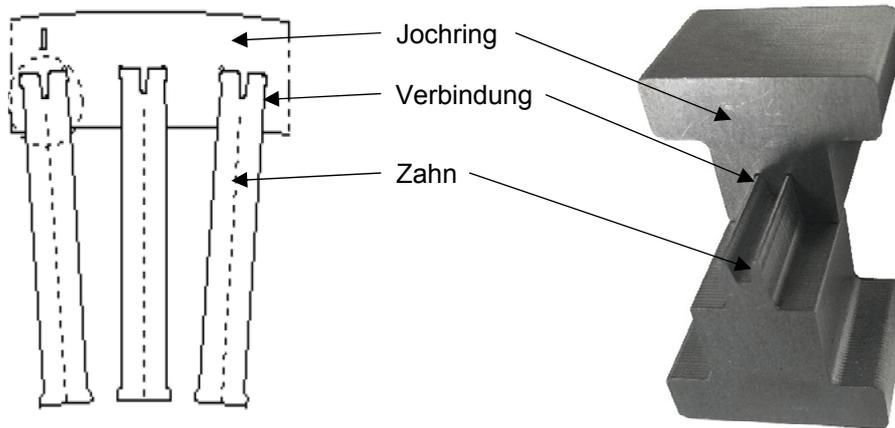


Abbildung 5-22: Schematische Darstellung und Funktionsmuster der Zahnverbindung

Mit der von der Firma risomat Otto Rist GmbH & Co.KG zur Verfügung gestellten Montagevorrichtung können die Zahnsegmente in den Jochring eingepresst werden. Dazu wird mit einer getriebeübersetzten Handkurbel der Stempel, der in den Jochring hineinragt, vertikal bewegt. Durch Drehung des in einer Aufnahme befindlichen Jochrings kann jede Zahnposition eingestellt werden. Dazu rastet die mechanische Verdrehsicherung an der entsprechenden Position ein. (Abbildung 5-23)

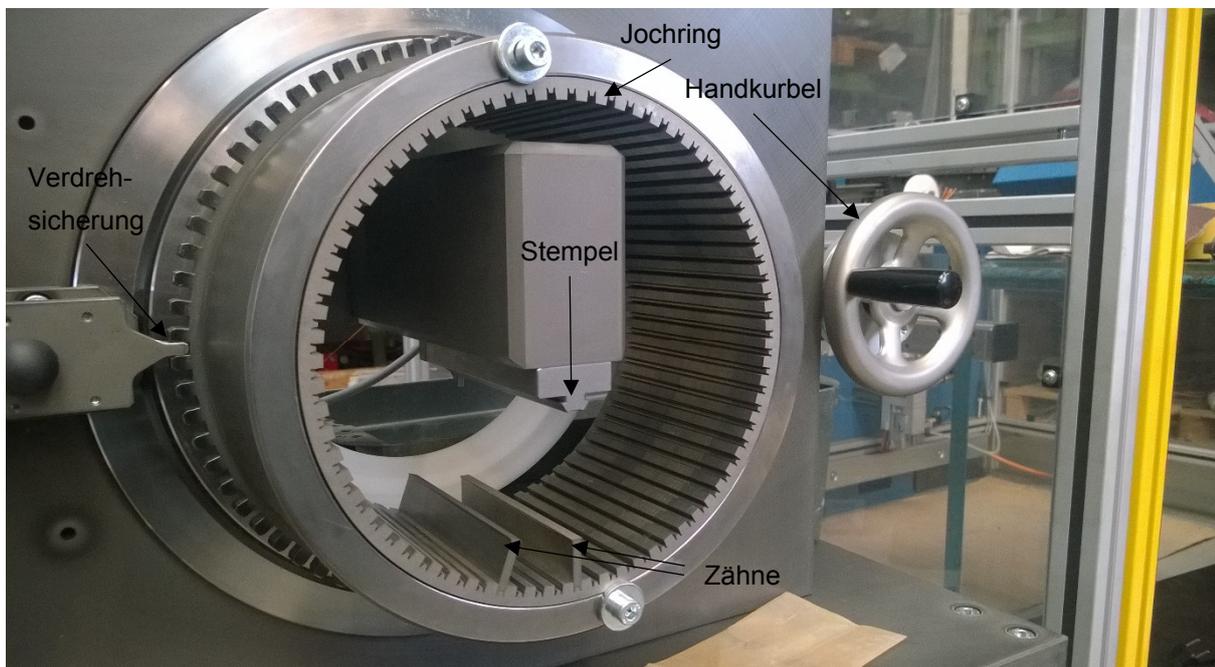
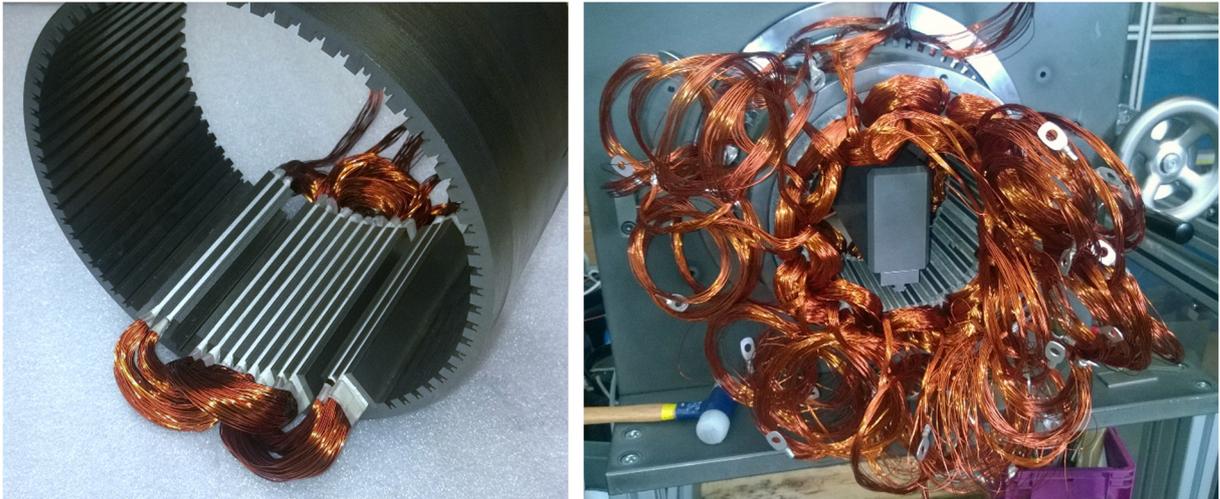


Abbildung 5-23: Montagevorrichtung zum Fügen der Zähne

Da das Nutisolationpapier für eingezogene Wicklungen zur Nut hin offen ist, geschieht es beim Einstecken der Zähne häufig, dass dieses verrutscht und beschädigt wird. Deshalb wird auf ein Isolationpapier der Firma risomat Otto Rist GmbH & Co.KG zurückgegriffen, bei dem die beiden Enden am Nutgrund zum Liegen kommen und sich dort über die gesamte Länge des Nutgrundes überlappen. Somit können die Spulen komplett in das Isolationpapier eingewickelt

werden, und die geforderten Luft- und Kriechstrecken sind damit eingehalten. Zur Fixierung des Isolationspapiers eignet sich das Scotch®-Glasfasergewebeband Nummer 69, welches für die Verwendung in Elektromaschinen bis zur Temperaturklasse H freigegeben ist. Wie bereits beschrieben, müssen die äußeren Wickelköpfe nach außen und die Wickelköpfe der inneren Lage nach innen gebogen werden (Abbildung 5-24 links). Nach erfolgter Montage und dem Einbringen der Phasenisolation können die Wickelköpfe geformt werden, sodass der Stator in das Gehäuse und der Rotor in den Stator eingebracht werden können.



*Abbildung 5-24: Montage des gezahnten Stators*

Mit dem dargestellten Vorgehen und entsprechenden Hilfsmitteln konnten letztendlich die Spulen in den Messstator gefügt, sowie ein komplett mit Spulen bestückter Demonstrator (Abbildung 5-24 rechts) hergestellt werden. Im Falle des Messstators konnte dieser mehrfach bestückt werden, da die Zähne mit Hilfe der Vorrichtung auch wieder gezogen und erneut gefügt werden konnten.

## **5.5 Messtechnik**

Mit dem Wissen über mögliche Verluste muss nun eine Methode gefunden werden, diese Verluste messtechnisch zu bestimmen, um sie durch fertigungstechnische Maßnahmen minimieren zu können. Die Vermessung kompletter Motoren auf Prüfständen ist teuer und zeitaufwändig. Ein sehr großer Teil des Aufwandes liegt bereits bei der Herstellung der zu untersuchenden Maschine. So wäre es aus fertigungstechnischer Sicht wünschenswert, bereits anhand einer Spule eine Aussage treffen zu können. Zudem sollte die verwendete Messspannung unterhalb der Grenze für Kleinspannung liegen, um die Gefahren zu minimieren. Nach DIN VDE 0100 liegt diese bei 120 V Gleichspannung beziehungsweise bei 50 V Wechselspannung. Für Leitungen ohne Berührungsschutz wie zum Beispiel bei Kinderspielzeugen liegt die Grenze bei 60 V Gleichspannung beziehungsweise bei 25 V, falls eine Wechselspannung anliegt. Diese Einschränkungen sind notwendig, um an die

Problemstellungen vorwiegend aus fertigungstechnischer Sicht herangehen zu können, sodass sich die Lücke zwischen fertigungstechnischen Anpassungen und deren Auswirkungen auf das Betriebsverhalten des Motors schließen lässt. Erst durch die Bewertung der Verluste bietet sich die Möglichkeit, den fertigungstechnischen Aufwand einem Nutzen gegenüberzustellen. Aufgrund der genannten Einschränkungen ist nur eine qualitativ vergleichende Aussage zu erwarten. Jedoch kann diese bereits in einer sehr frühen Phase zu einer Entscheidung über die genauere Analyse von neuen Fertigungskonzepten beitragen und somit massiv den Versuchsaufwand reduzieren. Bereits in Kapitel 2.1 wurden die Grundlagen zweier Messprinzipien dargestellt, die sich dafür eignen. Im Folgenden werden die verwendete Messtechnik, der Versuchsablauf und die Auswertung der Daten für diese beiden Messprinzipien erläutert.

### 5.5.1 LCR-Messung

Eine ausführliche Bewertung kommerzieller LCR-Messgeräte durch Kraller (2015) zeigte, dass zum einen der geringe Gleichstromwiderstand der zu untersuchenden Spulen (ca. 30 mOhm) und andererseits der relevante Frequenzbereich (ca. 0-4 kHz) bereits die Mehrheit der Geräte ausschließen. Die Messfrequenz ist in der Regel in Stufen wählbar. So bietet beispielsweise eines der betrachteten Geräte 69 Stufen für einen Frequenzbereich von 20 Hz bis 200 kHz an. Im Bereich bis 4 kHz liegen immerhin 40 der wählbaren Frequenzen. Diese sind aber ungleichmäßig verteilt. Zudem bietet keines der Geräte die Möglichkeit, Messwerte in Abhängigkeit der Messfrequenz auszugeben. Es muss grundsätzlich die Messfrequenz vorgewählt werden, bevor eine Messaufgabe gestartet werden kann. Deshalb ist eine Schnittstelle zur rechnergestützten Versuchsdurchführung, vorzugsweise mit LabVIEW, erforderlich.

Die Bewertung ergab, dass das LCR-Meter EA4980AL-030 der Firma Keysight Technologies (Keysight Technologies Inc., 2014c) die Möglichkeit besitzt, die Messfrequenz in 1 Hz Inkrementen beliebig auszuwählen, und zudem komfortabel programmierbar ist. Wie bereits in den Grundlagen zur LCR-Messung in Kapitel 2.1.1 erläutert, gibt es zahlreiche Ausführungen der zugrundeliegenden Messbrücke, weshalb an dieser Stelle das Funktionsprinzip des verwendeten Messgerätes dargestellt wird. Für das gewählte Messgerät wird bei verhältnismäßig niedrigen Frequenzen unterhalb 100 kHz die Methode des automatischen Brückenabgleichs (engl. auto-balancing-bridge) empfohlen, welche in Abbildung 5-25 vereinfacht dargestellt ist (Keysight Technologies Inc., 2016).

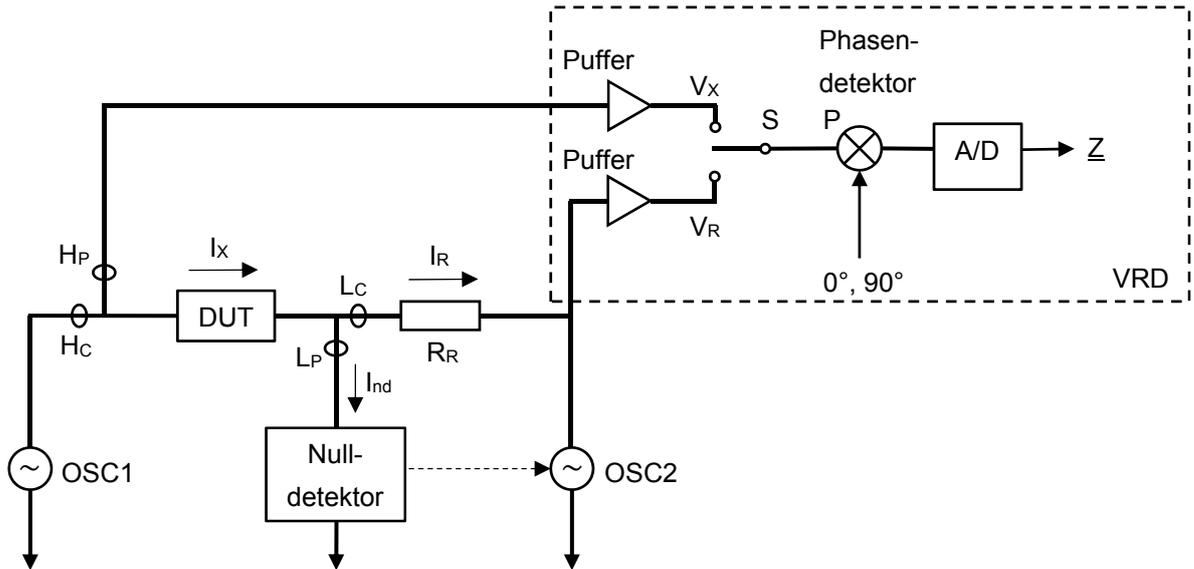


Abbildung 5-25: Vereinfachte Darstellung des automatischen Brückenabgleichs (nach Keysight Technologies Inc., 2016)

Der Oszillator *OSC1* stellt die Wechselspannungsquelle dar, und der Nulldetektor gleicht den Strom zwischen dem Testobjekt (engl. Device Under Test, *DUT*) und dem Messbereichswiderstand  $R_R$  aus. Hierzu passt der Nullpunktdetektor sowohl Amplitude als auch Phasenwinkel des zweiten Oszillators *OSC2* so an, dass  $I_X$  und  $I_R$  gleich sind und die Brückenspannung somit null wird. Zur Bestimmung der Impedanz  $\underline{Z}$  wird ein Modul mit der Bezeichnung Vector Ratio Detector (*VRD*) verwendet. Es besteht aus einem Wahlschalter für den Eingang  $S$ , einem Phasendetektor  $P$  und einem Analog-Digital-Wandler  $A/D$ . Die gemessenen Spannungen am Testobjekt  $V_X$  und am Messbereichswiderstand  $V_R$  werden mit denselben Bauelementen gemessen, um Abweichungen zwischen zwei Modulen auszuschließen. Hierzu wechselt der Schalter  $S$  zwischen den beiden Eingängen  $V_X$  und  $V_R$ . Der zusätzliche Phasendetektor  $P$  ermöglicht die Aufzeichnung der Spannungen in Form von Vektoren, sodass die Real- und Imaginärteile  $a$  bis  $d$  in Formel 5-6 bestimmt werden können. Deren Berechnung erfolgt gemäß folgender Gleichung:

$$\underline{Z}_X = R_X + jX_X = R_R \frac{V_X}{V_R} = R_R \left[ \frac{a+jb}{c+jd} \right] = R_R \left[ \frac{ac+bd}{c^2+d^2} + j \frac{bc+ad}{c^2+d^2} \right]$$

Formel 5-6

Somit berechnen sich die Resistanz  $R_X$  und die Reaktanz  $X_X$  des Testobjektes folgendermaßen:

$$R_X = R_R \left[ \frac{ac+bd}{c^2+d^2} \right], \quad X_X = R_R \left[ \frac{bc+ad}{c^2+d^2} \right]$$

Formel 5-7

Da für die Untersuchungen das Verhalten der Impedanz in Abhängigkeit der Frequenz von Interesse ist, ist es nötig, jede erforderliche Anregungsfrequenz am Oszillator *OSZI* vorzugeben, die Messbrücke abzustimmen und dann die komplexe Impedanz zu bestimmen. Hierzu wurde ein LabVIEW-Programm entwickelt, welches nach Eingabe der Start- und Endfrequenz in definierten Frequenzschritten wiederholt die LCR-Messungen durchführt und währenddessen relevante Größen graphisch darstellt.

Die kleinste einstellbare Frequenz liegt bei 20 Hz, was mit sehr guter Näherung den Gleichstromwiderstand  $R_{DC}$  ermitteln lässt. Vergleicht man den Wert mit 4-Punkt Gleichspannungsmessungen, welche das verwendete LCR-Meter ebenfalls durchführen kann, so liegt der Betrag der Impedanz  $Z_{20Hz}$  reproduzierbar um 10 mOhm höher als  $R_{DC}$ , was in Anbetracht der unterschiedlichen Messmethoden und bei Extrapolation der Messwerte durchaus plausibel ist. Da vergleichende Messungen vorgenommen werden sollen, wird vom Wechsel des Messprinzips abgesehen und die Impedanz bei 20 Hz dem Gleichstromwiderstand gleichgesetzt. Für die Messung der Impedanz bietet das Gerät die  $|Z|$ - $\theta$  Funktion, was zunächst einer Ausgabe in Polarform entspricht, jedoch können auch direkt Resistanz und Reaktanz ausgegeben werden. Um den Wechsel des Messbereichswiderstandes  $R_R$  zu verhindern, kann die erwartete maximale Impedanz eingestellt werden. Die auf Medium eingestellte Messzeit erzielt eine ausreichende Genauigkeit und Wiederholbarkeit bei allen Messungen. Zudem wird eine Prüfspannung von 1 V ohne Mittelung der Messwerte (Averaging Factor 1) gewählt.

Neben dem Betrag der Impedanz  $|Z|$  und dem Phasenwinkel  $\theta$  wertet das LabVIEW-Programm die Widerstandserhöhung  $k$  mit aus. Diese stellt den Faktor bei der jeweiligen Frequenz  $i$  dar, um den sich der Wechselstromwiderstand gegenüber dem Gleichstromwiderstand, der mit der Impedanz bei 20 Hz angenähert wird, erhöht.

$$k_i = \frac{|Z_i|}{|Z_{20Hz}|}$$

*Formel 5-8*

Die unterschiedlich hergestellten Spulen lassen sich aber anhand der Beträge nicht unterscheiden. Dazu ist eine genauere Betrachtung der Impedanz von Spulen erforderlich. Von induktivem Verhalten spricht man, wenn der Phasenwinkel  $\theta$  zwischen 0 und  $\pi/2$  liegt, was wiederum gleichbedeutend einem Phasenwinkel  $\varphi$  zwischen  $0^\circ$  und  $90^\circ$  im Gradmaß ist. Wendet man die Eulersche Formel auf die Polarform der Impedanz aus Formel 2-8 an, so ergibt sich:

$$\underline{Z} = |Z|e^{j\varphi} = |Z|(\cos \varphi + i \sin \varphi) = |Z| \cos \varphi + i |Z| \sin \varphi$$

*Formel 5-9*

Bei einer idealen Spule nähert sich der Phasenwinkel  $\varphi$  an  $90^\circ$ . Für die Real- und Imaginärteile von Formel 5-9 folgt somit:

$$\text{für } \varphi \rightarrow 90^\circ : R = (|\underline{Z}| \cos \varphi) \rightarrow 0 \text{ und } X = (|\underline{Z}| \sin \varphi) \rightarrow |\underline{Z}|$$

*Formel 5-10*

Womit die gemessene Impedanz maßgeblich durch die Reaktanz  $X$ , also dem Blindwiderstand der Spule, geprägt ist. Dieser ist für eine Spule definiert zu:

$$X = 2\pi fL = \omega L$$

*Formel 5-11*

Somit ist bei gleicher Induktivität  $L$  die Reaktanz  $X$  direkt proportional von der Frequenz  $f$  abhängig. Mit der Folgerung aus Formel 5-10 ist somit auch der gemessene Betrag der Impedanz vorwiegend linear von der Frequenz abhängig. Da aufgrund der gleichen Windungszahl die Induktivität der zu vergleichenden Spulen nahezu gleich ist, lassen sich somit anhand dieser Messgröße die Unterschiede nicht bestimmen.

Der verhältnismäßig geringe Realteil der gemessenen Impedanz jedoch, der als Resistanz  $R$  bezeichnet wird, ist für den Teil der elektrischen Energie verantwortlich, der irreversibel in eine andere Energieform umgewandelt wird, was letztendlich die Verluste, welche in thermische Energie gewandelt werden, beinhaltet. Für den Vergleich der unterschiedlich hergestellten Spulen hinsichtlich der durch die Fertigung beeinflussbaren, frequenzabhängigen Verluste wird deshalb die Resistanz  $R$  herangezogen. Auch wenn aufgrund der vorliegenden Messbedingungen die Resistanz im Verhältnis zur Reaktanz sehr klein ist, lassen sich damit die Einflüsse der gewählten Variationen bei der Herstellung der Spulen sehr gut darstellen. Da die Impedanz auch spannungs- und stromabhängig ist, liegt es nahe, dass die Resistanz im realen Betrieb einen bedeutenden Einfluss hat. Zudem ist sie offensichtlich, im Gegensatz zum vorwiegend frequenzabhängigen Imaginärteil, durch die Wahl des Herstellungsverfahrens positiv beeinflussbar. Zusätzlich kann mit dem gemessenen Phasenwinkel beurteilt werden, ab welcher Anregungsfrequenz ein vorwiegend induktives Verhalten vorliegt.

Zur Validierung der Annahmen werden drei exemplarische Spulenarten verglichen. In den folgenden Betrachtungen besitzt Typ 1 keine Verdrillung der 10 parallelen Drähte, Typ 2 eine Verdrillung um  $180^\circ$  zwischen den beiden Wicklungen des Spulenpaares und Typ 3 eine Verdrillung um  $180^\circ$  nach jeder Windung. Da die Verdrillung der Einzelleiter die Stromverdrängung mindern sollte, ist zu erwarten, dass die Widerstandsüberhöhung von Typ 1 nach Typ 3 abnimmt. Die Betrachtung des  $k$ -Wertes in Abbildung 5-26, welcher den Betrag der Impedanz normiert auf den Gleichstromwiderstand darstellt, ist keine geeignete

Bewertungsgrundlage. Die Unterschiede sind nur sehr gering, der Einfluss ist annähernd linear, und die Spule vom Typ 1 erfährt die geringste Widerstandserhöhung.

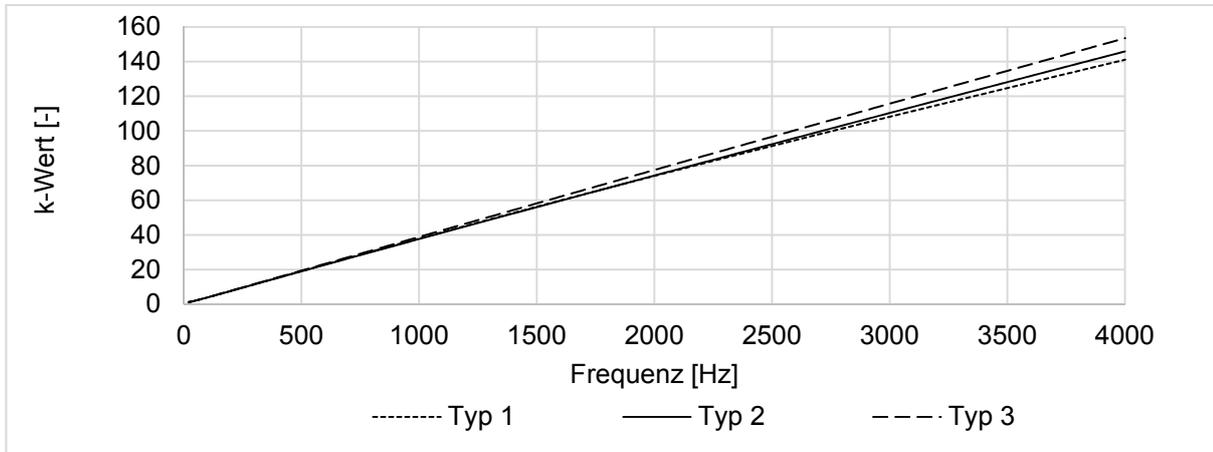


Abbildung 5-26: *k*-Wert über der Frequenz (nach Vogt, Kraller und Volk, 2015)

Zieht man die Auswertung des Phasenwinkels in Abbildung 5-27 mit hinzu, so lässt sich erkennen, dass dieser bereits unter 500 Hz sehr nahe  $90^\circ$  liegt, weshalb gemäß Formel 5-10 der Betrag der Impedanz maßgeblich von der Reaktanz und somit annähernd linear von der Frequenz abhängt.

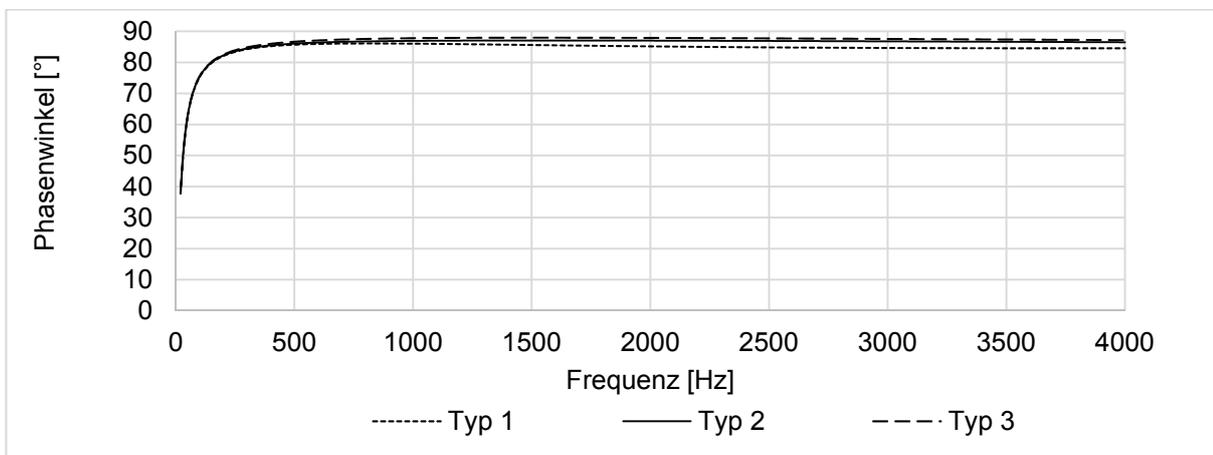


Abbildung 5-27: Phasenwinkel über der Frequenz (nach Vogt, Kraller und Volk, 2015)

Dementsprechend ist es nachvollziehbar, dass die Auswertung der Reaktanz in Abbildung 5-28, abgesehen von der Normierung, nahezu identische Verläufe wie der *k*-Wert in Abbildung 5-26 liefert, was die obigen Grenzwertbetrachtungen zur Berechnung der Impedanz bestätigt.

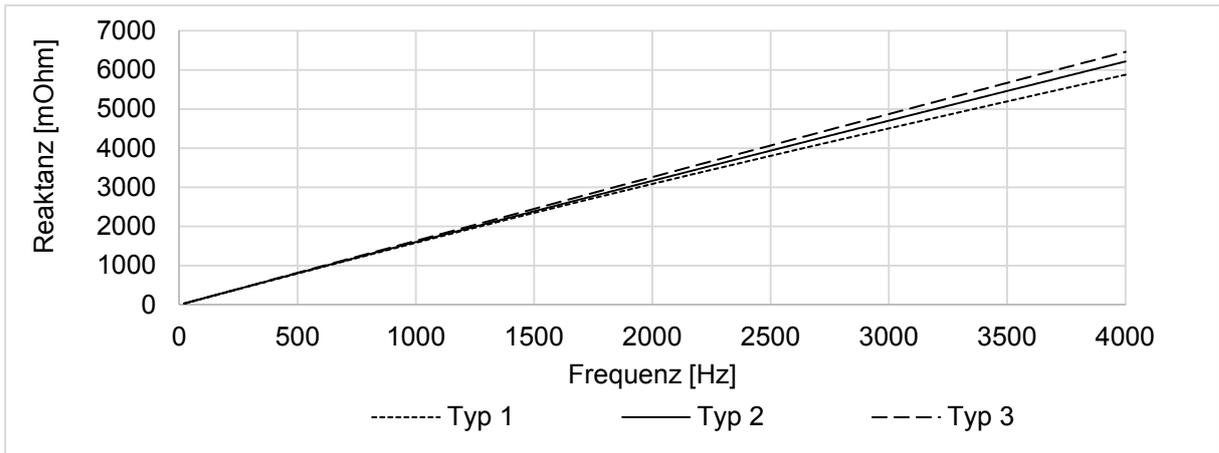


Abbildung 5-28: Reaktanz über der Frequenz (nach Vogt, Kraller und Volk, 2015)

Betrachtet man hingegen die Resistanz (Abbildung 5-29), so lässt sich zeigen, dass sie ab etwa 500 Hz bei der Spule vom Typ 1 bedeutend mehr ansteigt, als bei den beiden Vergleichsspulen.

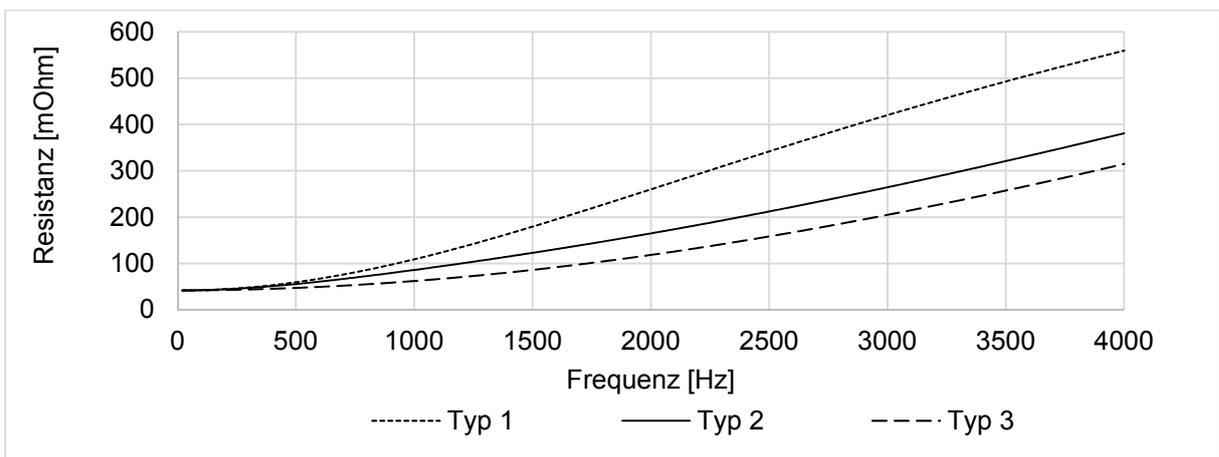


Abbildung 5-29: Resistanz über der Frequenz (nach Vogt, Kraller und Volk, 2015)

Erwartungsgemäß ist die Überhöhung bei Typ 1 am höchsten, da ohne Verdrillung die Stromverdrängung aufgrund des Nutquerfeldes bei jeder Windung die gleichen Drähte am stärksten betrifft. Schichtet man durch eine Verdrillung zwischen den beiden Wicklungen des Spulenpaares die Lage der Drähte um (Typ 2), so reduziert sich dieser Effekt massiv. Durch weitere Umschichtungen bei Typ 3 lässt sich nochmals eine Verbesserung erzielen, die aber deutlich geringer ausfällt.

Da die Resistanz bei den vorliegenden Messbedingungen nur etwa ein Zehntel der Reaktanz beträgt und bei der Bildung des Betrages der Impedanz aufgrund des Phasenwinkels nahe  $90^\circ$  zusätzlich an Einfluss verliert, ist ihre Wichtigkeit zunächst nicht offensichtlich. Die genauere Betrachtung basierend auf den theoretischen Überlegungen zum verwendeten Messprinzip in Kombination mit den exemplarischen Auswertungen zeigt aber, dass die dargestellte Vorgehensweise zur Bewertung unterschiedlicher Herstellungsverfahren geeignet ist. Demnach

wird die Resistanz in Abhängigkeit der Frequenz als vergleichendes Bewertungskriterium herangezogen. Der Phasenwinkel kann zudem zur Plausibilitätsprüfung verwendet werden.

### 5.5.2 Stromzangenmessung

Als zweite Bewertungsgrundlage wird die Stromzangenmessung verwendet, wozu die Grundlagen bereits in Kapitel 2.1.1 gelegt wurden. Das folgende Kapitel beschreibt die Auswahl und den Einsatz der verwendeten Messtechnik, leitet die verfolgte Auswertemethodik her und definiert erforderliche Messgrößen. Die angewandte Methodik und die Plausibilität werden anhand ausgewählter exemplarischer Messungen dargestellt.

Der in Abbildung 5-30 dargestellte Aufbau zur Messung der Ströme in den Einzeldrähten der Zuleitungen eines Stators unter realer Last ist in der Elektromotorenfertigung durchaus üblich. Nachdem bei der betrachteten Referenzmaschine ein Ende jeder Spule zu einem der Phasenanschlüsse geführt wird, kann die Ungleichmäßigkeit der Stromverteilung für die gesamte Maschine bewertet werden. Auf die Stromverteilung innerhalb einzelner Spulen lässt sich aber nicht schließen, da die Rückverfolgung der Einzeldrähte bis zur jeweiligen Spule im vergossenen Zustand nicht mehr möglich ist. Für die vorliegende Problemstellung wird die Stromzangenmessung angepasst, sodass die Stromverteilung innerhalb einzelner Spulen bestimmt werden kann.

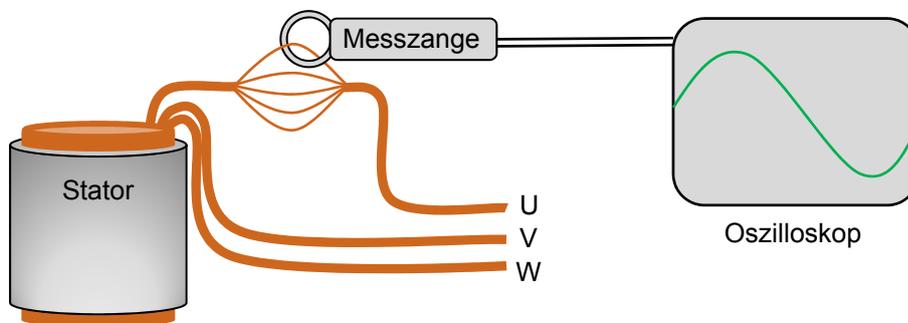


Abbildung 5-30: Stromzangenmessung (nach Vogt und Volk, 2014b, 2014a)

Für die Untersuchungen steht ein Funktionsgenerator vom Typ 33521A der Firma Agilent zur Verfügung (Keysight Technologies Inc., 2014b). Da dieser nur einen Maximalstrom von etwa 300 mA zur Verfügung stellen kann, ist eine entsprechend empfindliche Strommessung erforderlich. Dies ist mit der AC/DC-Strommesszange Model K2 von Chauvin Arnoux realisierbar (Chauvin Arnoux, 2017, 2003). Sie misst mit einem Hall-Sensor nach dem Prinzip der in Kapitel 2.1.1 abgebildeten Allstromzange. Mit einer Auflösung von 100  $\mu$ A, einem Messbereich bis 300 mA und einer Verstärkung von 10 mV/mA ist diese Strommesszange bestens für die Messung von Strömen geeignet, die durch den genannten Funktionsgenerator erzeugt werden. Zur Ergebnisdarstellung steht ein Zweikanaloszilloskop HM1008-2 der Firma Hameg Instruments GmbH zur Verfügung (Hameg Instruments GmbH, 2011).

Elektromagnetische Wechselwirkungen, wie beispielsweise auch die Stromverdrängung, führen zu Phasenverschiebungen des Stroms innerhalb der Einzelleiter. Bestimmt man nun die Ströme der Einzeldrähte und den Gesamtstrom der Zuleitung mit der Stromzange, so erhält man dafür unterschiedliche Werte. Dieser Unterschied wächst bei zunehmender Frequenz. Dank des Zweikanaloszilloskops können jeweils zwei Stromsignale miteinander verglichen werden. Somit kann beispielsweise die Strommessung eines Drahtes mit dem Spannungssignal des Signalgenerators verglichen werden (Abbildung 5-31).

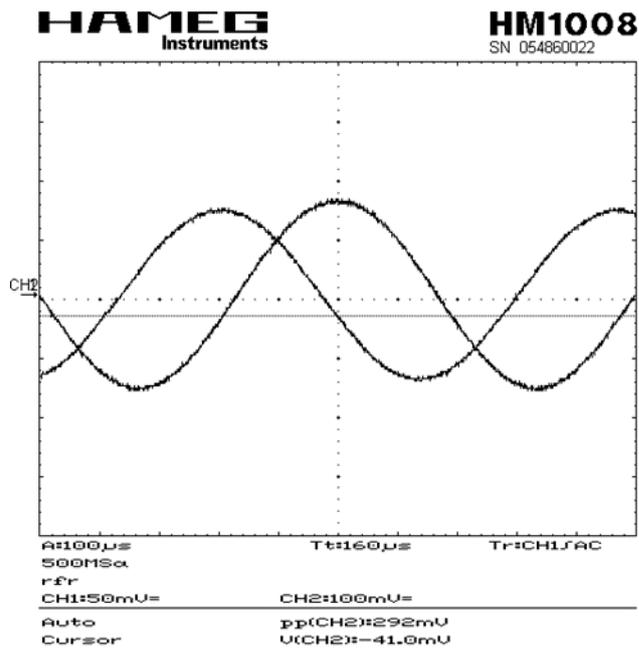


Abbildung 5-31: Oszillographische Abbildung von Eingangsspannung und Stromstärke

Zur Darstellung dieses Effekts wurden die Verläufe exemplarisch für eine Frequenz stets zusammen mit dem Eingangssignal aufgezeichnet. Somit können alle Stromverläufe zeitaufgelöst miteinander verglichen werden. In Abbildung 5-32 sind die Verläufe einer Spule mit 12 parallelen Drähten dargestellt. Die Aufteilung in 3 Diagramme dient der Übersichtlichkeit.

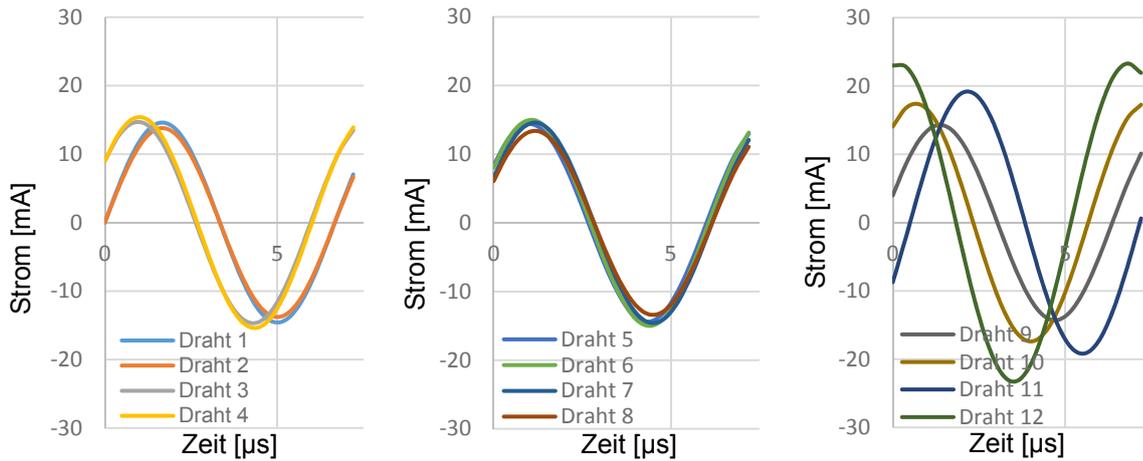


Abbildung 5-32: Stromverläufe für 12 parallele Drähte

Summiert man nun die Verläufe und vergleicht diese mit dem an der Zuleitung gemessenen Verlauf, so lässt sich in Abbildung 5-33 erkennen, dass die Amplituden und Verläufe der Summe der Einzelströme (rot) und des Gesamtstroms (schwarz) gut übereinstimmen. Die Phasenverschiebung dient der besseren Lesbarkeit, da sonst beide Kurven übereinander liegen würden.



Abbildung 5-33: Summe der Einzelströme (rot) und gemessener Gesamtstrom (schwarz)

Zwar ist die graphische Auswertung der Stromverläufe sehr hilfreich, jedoch ist die Genauigkeit des A/D-Wandlers im verwendeten Oszilloskop sehr begrenzt. Nachdem nachgewiesen ist, dass von einem sinusförmigen Verlauf ausgegangen werden kann und die Phasenlage für die vergleichenden Untersuchungen nicht erforderlich ist, genügt die Bestimmung des Effektivwertes der Spannung und somit des Stroms. Aus diesem Grund wird für die Auswertung ein Digitalmultimeter vom Typ 34450A der Firma Keysight Technologies eingesetzt, welches sehr genaue Effektivspannungsmessungen bis zu 100 kHz ermöglicht (Keysight Technologies Inc., 2014a). Außerdem ist es, wie auch der verwendete Signalgenerator, mittels LabVIEW programmierbar. Demnach beziehen sich die weiteren Angaben für Spannung und Strom auf ihre Effektivwerte. Das Oszilloskop dient weiterhin der

Sicherstellung, dass der Signalgenerator eine sinusförmige Anregung erzeugt. Der dazu notwendige Messplatz ist in Abbildung 5-34 dargestellt.

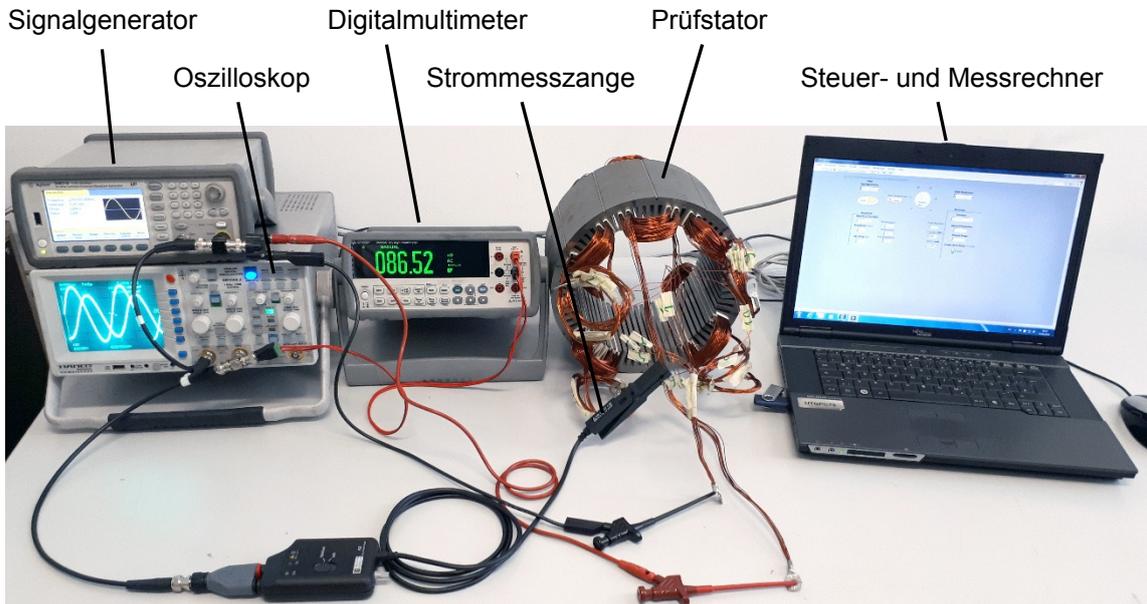


Abbildung 5-34: Messplatz für die Stromzangenmessung

Durch die automatische Ansteuerung der Geräte ist es möglich, den Prüfablauf mit wenig manuellem Eingreifen zu gestalten, sodass die Fehleranfälligkeit bei der Aufnahme der Messwerte minimiert wird. Zunächst wird die Strommesszange am ersten Draht angebracht und das Messprogramm gestartet. Das Programm stellt den Signalgenerator auf die Startfrequenz ein und ermittelt mit dem Digitalmultimeter den Effektivwert der von der Strommesszange ausgegebenen Spannung. Dieser wird in die entsprechende Stromstärke umgerechnet und zusammen mit der Anregungsfrequenz in einer Liste abgespeichert. Gemäß der vorgewählten Frequenzschritte wird der Signalgenerator bis zum Erreichen der Endfrequenz wiederholt neu eingestellt und anschließend eine Strommessung mit dem Multimeter durchgeführt sowie das Wertepaar gespeichert. Ist die Endfrequenz erreicht, so fordert das Programm den Bediener auf, die Strommesszange am zweiten Draht anzubringen, und der Messzyklus startet erneut. Sobald die voreingestellte Anzahl der Drähte erreicht ist, erfolgt ein abschließender Messzyklus an der Zuleitung, um den Summenstrom nach dem gleichen Schema zu erfassen. Die Bedienoberfläche mit den genannten Einstellmöglichkeiten ist in Abbildung 5-35 gezeigt.

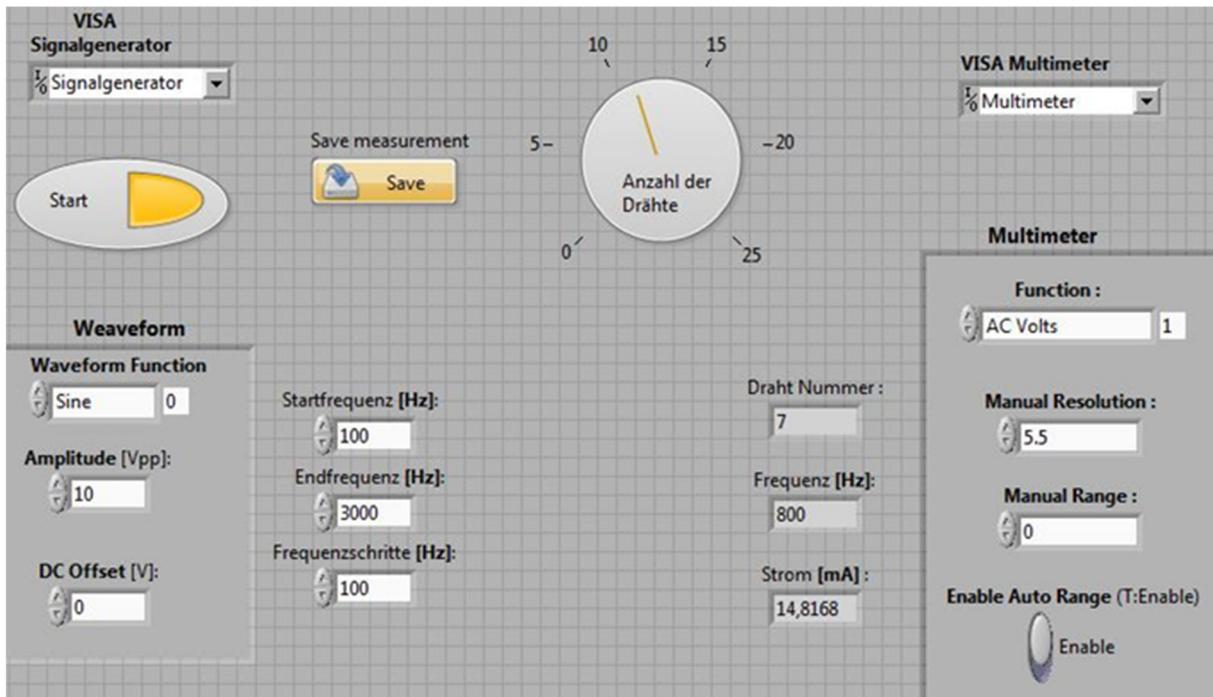


Abbildung 5-35: LabVIEW-Programm zur Stromzangenmessung (nach Serkyov, 2015)

Trägt man, wie in Abbildung 5-36 exemplarisch dargestellt, die gewonnenen Daten in einem Diagramm auf, so erhält man für jeden gemessenen Draht eine Kurve, die die Stromstärke in Abhängigkeit der Frequenz darstellt, und zusätzlich eine Kurve für den an der Zuleitung gemessenen Summenstrom (gestrichelt).

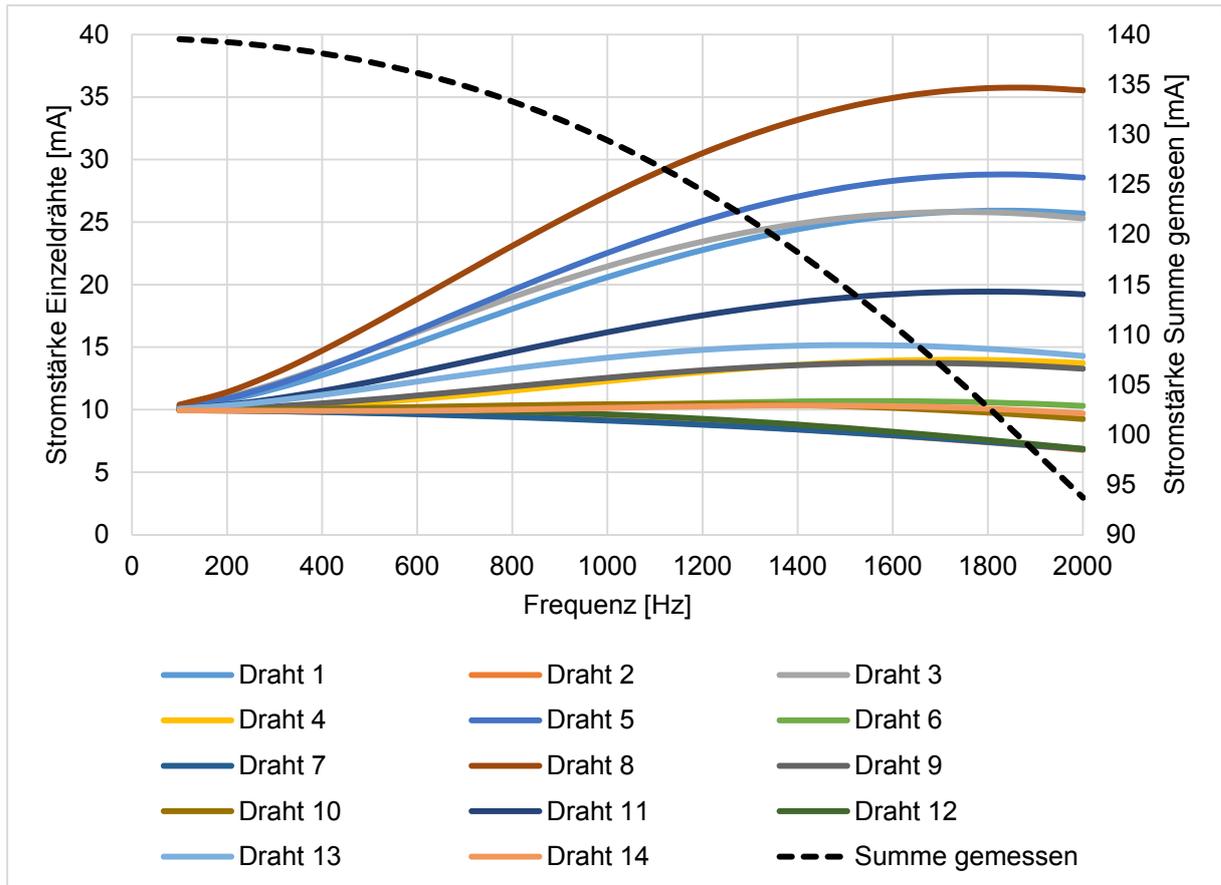


Abbildung 5-36: Stromstärken in den Einzeldrähten über der Frequenz

Stellt man nun dem gemessenen Summenstrom (gestrichelt) die Summe der Ströme der Einzeldrähte für jede Messfrequenz gegenüber, so zeigt sich der anfangs beschriebene Effekt, dass die Ströme in den Drähten Phasenverschiebungen aufweisen, die zu Blindströmen in Höhe der Differenz des berechneten und gemessenen Summenstroms führen (Abbildung 5-37). Die berechnete Summe (gelb) ergibt sich aus der Summe der gemessenen Effektivwerte der Einzeldrähte für jede gemessene Frequenz. Ebenso berechnet sich die Differenz (blau) aus der Subtraktion der Werte für die berechnete und gemessene Spannung bei jeder Frequenz.

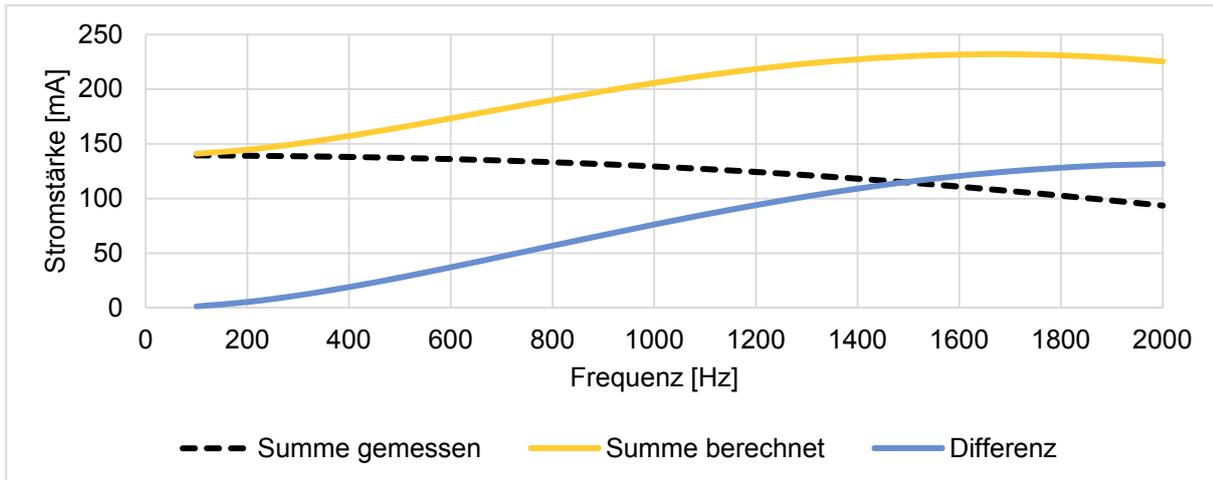


Abbildung 5-37: Gemessene und berechnete Summenströme

Für die Bewertung der Stromverdrängung ist eine Auswertung erforderlich, welche die ungleichmäßige Belastung der Drähte darstellt und den Vergleich unterschiedlicher Spulen bei variablen absoluten Strömen zulässt. Dies ist erforderlich, da die resultierende Stromstärke im Schwingkreis, bestehend aus Spule und Signalgenerator, maßgeblich von der Impedanz der zu prüfenden Spule abhängt, die wiederum stark von der Art der Fertigung abhängt. Aus diesem Grund wird die prozentuale Stromabweichung vom Mittelwert definiert. Dazu wird von jedem Punkt aus Abbildung 5-36 der Mittelwert der Einzelströme bei der jeweiligen Frequenz subtrahiert, das Ergebnis durch den Mittelwert dividiert und der Wert in Prozent angegeben. Der gemessene Summenstrom ist dazu nicht notwendig.

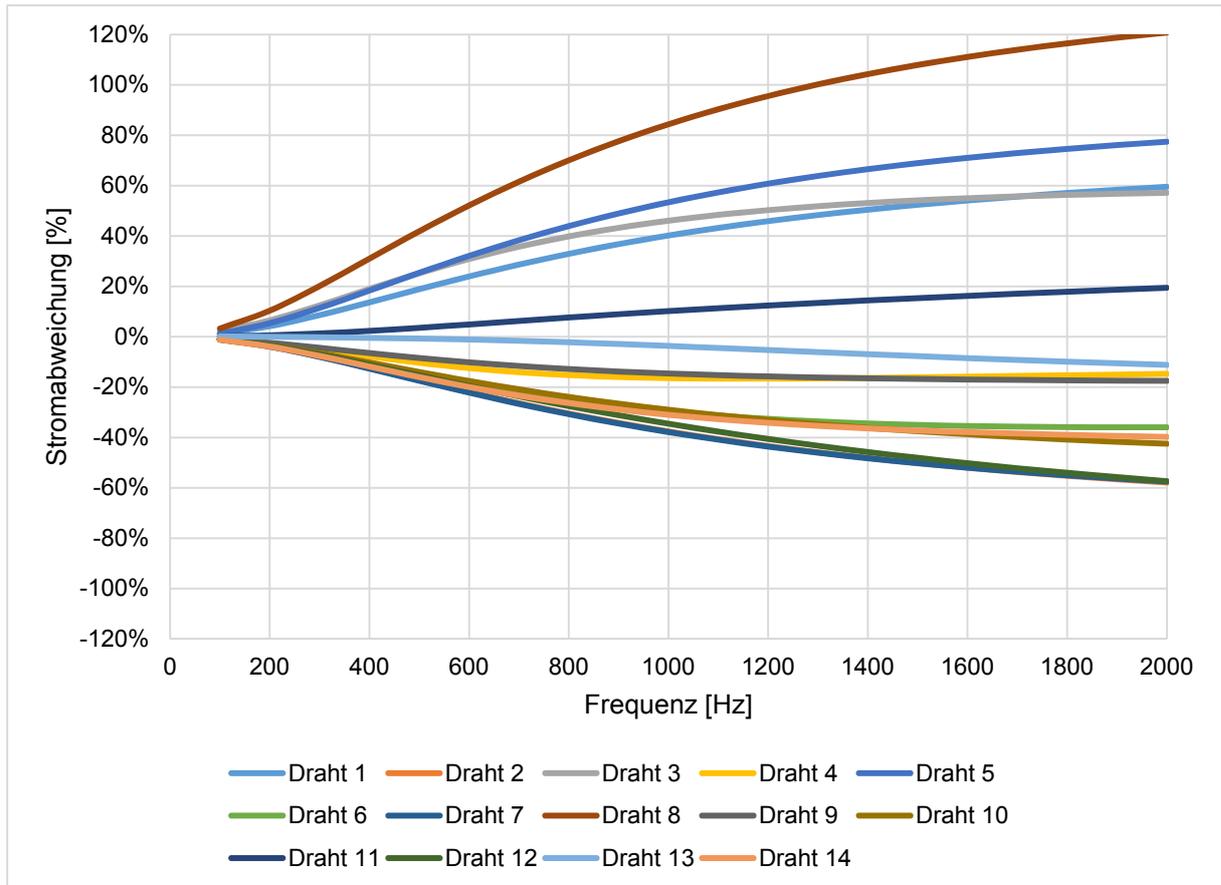


Abbildung 5-38: Prozentuale Stromabweichung vom Mittelwert

Wie in Abbildung 5-38 aufgezeigt, lässt sich mit dieser Darstellungsweise erkennen, in welchem Maß einzelne Drähte in Abhängigkeit der Frequenz mehr oder weniger Strom führen als der Mittelwert. Somit kann gezeigt werden, ob lediglich einzelne Drähte ungleichmäßig beansprucht werden, wie groß die Bandbreite der Ungleichmäßigkeit ist und ab welcher Frequenz eine zu definierende maximale Stromabweichung zu erwarten ist. Vergleicht man nun Spulen anhand der Stromabweichung, so lässt die Spreizung der Kurven einen Rückschluss auf das Ausmaß der Stromverdrängung und die damit verbundenen Verluste zu. Zur Vereinfachung dieses Vergleichs wird die mittlere Stromabweichung definiert. Dazu wird für jede Frequenz der Mittelwert aus den Beträgen der prozentualen Stromabweichung aller Drähte gebildet (Abbildung 5-39).

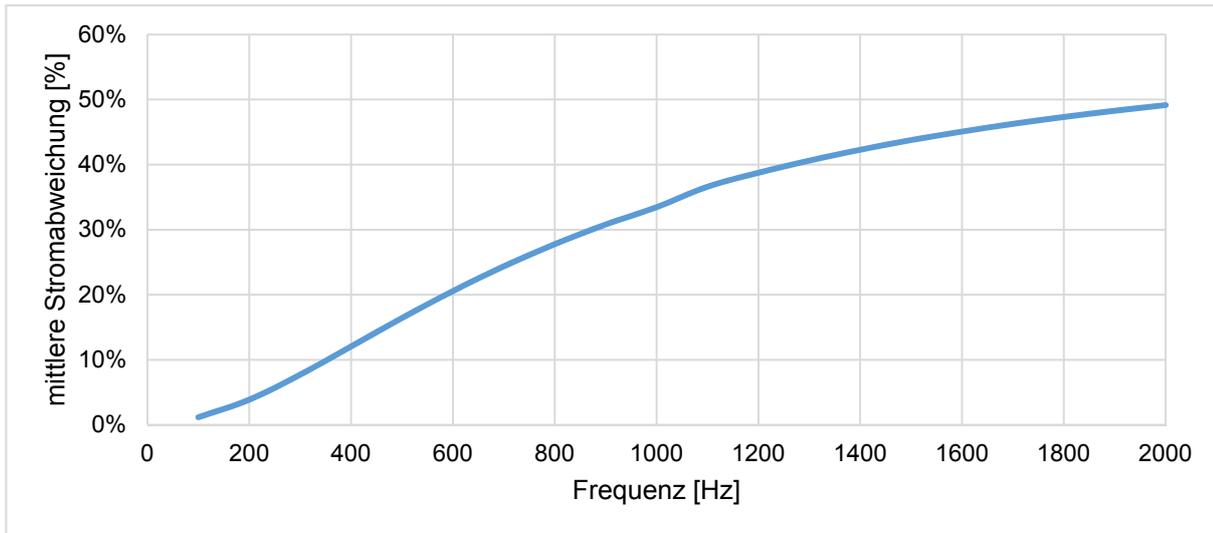


Abbildung 5-39: Mittlere Stromabweichung einer Spule

Zusammenfassend lassen sich mit dieser Messmethode sehr detaillierte und anschauliche Werte für die Stromverteilung innerhalb einer Spule mit parallelen Drähten generieren. Mit der prozentualen und der mittleren Stromverteilung werden zwei Darstellungen definiert, die eine relative Bewertung der zu erwartenden Stromverdrängung verschiedener Spulen zulassen. In Kapitel 7.2 werden schließlich die Ergebnisse dieser Mess- und Auswertemethode dargestellt und bewertet.

## 6 Planung der praktischen Versuche

Die Beschreibung der Vorgehensweise bei der Durchführung der praktischen Versuche erfolgte bereits im Rahmen der Darstellung der Versuchs- und Messeinrichtungen in Kapitel 5. Für die Planung der Versuche werden im Folgenden eine Nomenklatur sowie ein Farbschema eingeführt und die zur Verfügung stehenden Statoren beschrieben. Der Versuchsplan gibt eine Übersicht über die Spulen, die hergestellt und ausgewertet werden müssen.

### 6.1 Nomenklatur und Farbschema

Zur eindeutigen Einordnung der Versuche und Vereinfachung der Benennung werden eine Nomenklatur sowie ein Farbschema eingeführt. Wie bereits erläutert, ist davon auszugehen, dass eine Verdrillung des parallel geschalteten Drahtbündels zur Reduzierung der Stromverdrängung beiträgt. Jede Verdrillung erzeugt aber Drahtkreuzungen, die wiederum den Nutfüllgrad reduzieren beziehungsweise im vorliegenden Fall zu starken lokalen Deformationen führen, die wiederum zu erhöhten Verlusten beitragen können. Da im Gegensatz zu Litzendrähten die Verdrillung an nahezu beliebigen Stellen eingebracht werden kann, ist die Variation der Position ein wichtiger Einflussparameter für die Untersuchungen in dieser Arbeit. Abbildung 6-1 zeigt die schematische Darstellung eines Spulenpaares und bezeichnet die Positionen, an denen eine Verdrillung vorgenommen werden kann.

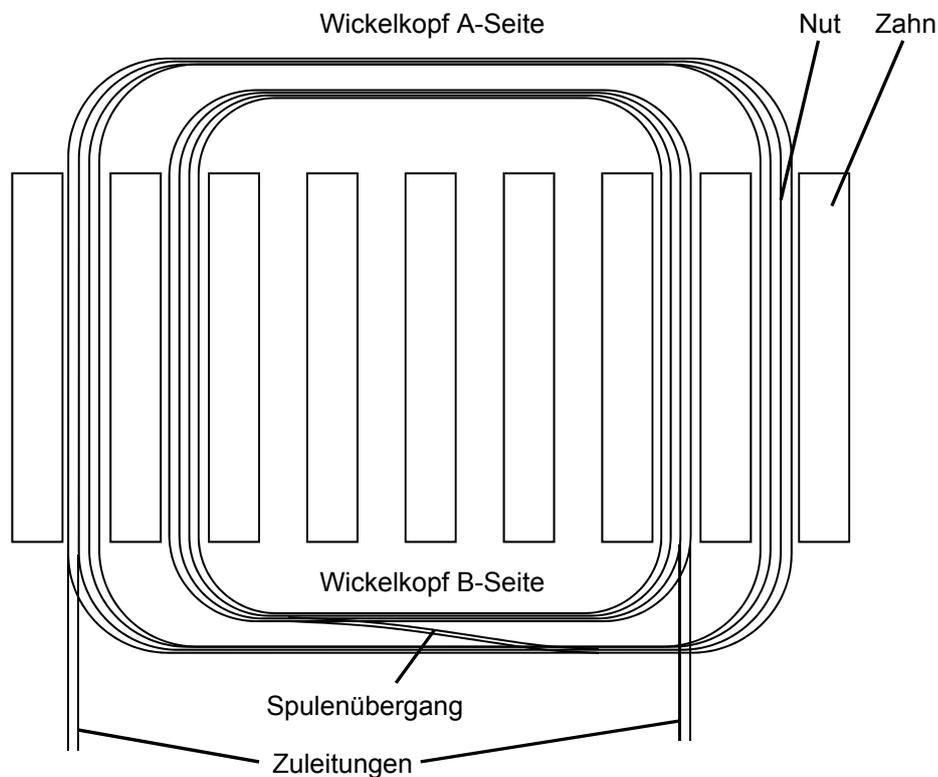


Abbildung 6-1: Schematische Darstellung eines Spulenpaares (nach Vogt, Kraller und Volk, 2015)

Eine Verdrillung bedeutet, dass die parallel geführten Drähte um  $180^\circ$  gedreht werden, sodass eine Umschichtung der Einzeldrähte erfolgt. Folgende Auflistung legt die Nomenklatur für die untersuchten Spulentypen fest:

- **Typ 1:** keine Verdrillung
- **Typ 2:** Verdrillung beim Spulenübergang
- **Typ 3:** Verdrillung nach jedem Nutdurchgang auf der B-Seite des Wickelkopfes
- **Typ 4:** Verdrillung nach jedem Nutdurchgang auf der A-Seite und der B-Seite des Wickelkopfes
- **Typ 5:** Verdrillung innerhalb der Nut

Für die graphische Darstellung der Anzahl parallel geführter Drähte und des jeweiligen Spulentyps wird ein Farb- und Linienschema gemäß Tabelle 6-1 eingeführt. So ergibt sich aus der Farbe kombiniert mit dem Linientyp eine eindeutige Zuordnung der betrachteten Spulen.

Tabelle 6-1: Schema für Farben und Linien

Beschreibung	Nomenklatur	Beispiel
10 parallele Drähte	Linienfarbe schwarz	
12 parallele Drähte	Linienfarbe rot	
14 parallele Drähte	Linienfarbe grün	
16 parallele Drähte	Linienfarbe blau	
Verdrillung Typ 1	langer Strichpunkt-Punkt	
Verdrillung Typ 2	durchgezogen	
Verdrillung Typ 3	gepunktet	
Verdrillung Typ 4	Strichpunkt	
Verdrillung Typ 5	gestrichelt	

Zusätzlich sind in den Legenden eindeutige Bezeichnungen für die in Tabelle 6-1 festgelegten Farben und Linien mit angegeben. Die erste Zahl bezieht sich dabei auf die Anzahl der Drähte, die zweite auf den Spulentyp. Werden gleichartige Spulen verglichen, so werden diese anhand angehängter Kleinbuchstaben unterschieden. Die Benennung 16/2a kennzeichnet demnach die erste mehrerer Spulen mit 16 parallelen Drähten vom Typ 2, also einer Verdrillung am Spulenübergang. Gemäß Tabelle 6-1 ist sie mit einer durchgezogenen blauen Linie dargestellt.

## 6.2 Statoren

Für die durchzuführenden Messungen stehen drei Statoren zur Verfügung. Der von der BMW AG bereitgestellte Referenzstator wurde mit industriellen Methoden gefertigt, besitzt aber Windungsanzapfungen, die eine Messung an den Spulen ermöglichen. Der Referenzstator besitzt 18 Spulen mit 12 parallelen Drähten und eine Verdrillung vom Typ 2. Um zeigen zu können, dass mit der gewählten Fertigungskette komplette Statoren gefertigt werden können, wurde ein Demonstrator hergestellt, wie er bereits in Kapitel 5.4 zur Beschreibung der Statormontage erwähnt ist. Da eine Erhöhung des Nutzfüllgrades die offensichtlichste Methode ist, um den Wirkungsgrad zu steigern, werden Spulen mit 14 parallelen Drähten vom Typ 2 verwendet. Aufgrund des gezahnten Stators und der manuell hergestellten Spulen ist aber noch mit zusätzlichen Verlusten zu rechnen. Die gewählte Spulenart bietet zwar nur ein relativ geringes Verbesserungspotenzial, jedoch würde eine weitere Erhöhung des Nutzfüllgrades zusammen mit komplexeren Verdrillungen die Montage der Spulen unnötig erschweren. Für das Aufzeigen der Potenziale und für Grenzwertbetrachtungen steht ein weiterer Stator zur Verfügung. Der Messstator besitzt das gleiche Blechpaket wie der Demonstrator. Wie bereits in Kapitel 5.4 dargestellt, können die Statorzähne wieder gezogen werden, sodass dieser mehrfach mit Spulen bestückt werden kann. Damit die Wickelköpfe nicht umgeformt werden müssen, wodurch zusätzliche Einflüsse entstehen können, wird dieser Stator jeweils nur mit 9 Spulen bestückt, die sich nicht überlappen.

Mit diesen drei Statoren ist es möglich, eine verhältnismäßig große Anzahl an montierten Spulen einander gegenüberzustellen. Es können jeweils 18 gleichartige Spulen des Referenzstators sowie des Demonstrators verglichen werden. Zudem bietet sich die Möglichkeit, Aussagen über einzelne Spulen im Messstator zu treffen.

## 6.3 Versuchsplan

Der Referenzstator und der Demonstrator liefern jeweils Informationen über einen Spulentyp. Ein Ziel dieser Arbeit ist jedoch, dass zur Bestimmung der Einflüsse kein kompletter Stator hergestellt werden muss. Durch die mehrfache Bestückung des Messstators mit unterschiedlichen Spulentypen soll dies bewerkstelligt werden. Da die Ausschussquote bei der Herstellung einiger Spulentypen sehr hoch und die Montage der Spulen zeitaufwändig ist, müssen die zu untersuchenden Variationen geplant werden. Ein vollfaktorieller Versuchsplan ist demnach nicht umsetzbar. So wurden zunächst Grenzwertbetrachtungen vorgenommen und dann der Versuchsplan um Variationen für die Abbildung der Wirkzusammenhänge ergänzt. Durch die Aufnahme der Auswertungen des Referenzstators und des Demonstrators in die Versuchsplanung konnten punktuell statistische Auswertungen erfolgen.

Bereits vor Lieferung des gezahnten Stators konnten Messungen durchgeführt werden, anhand derer die Messverfahren qualifiziert werden konnten. Wie in Vogt, Kraller und Volk (2015) bereits veröffentlicht, konnten Spulen mit 10 parallelen Drähten und verschiedenen Verdrillungen in ein Serienblechpaket eingeträufelt werden. Dabei stellte sich heraus, dass Typ 4 keine Verbesserung gegenüber Typ 3 erzielte. Durch die zweifache Verdrillung um  $180^\circ$  kommen die Drähte in der Nut wieder ähnlich zu liegen, wie wenn keine Verdrillung vorliegen würde. Somit fällt dieser Wicklungstyp für die weiteren Untersuchungen weg. In der Nut verdrillte Wicklungen vom Typ 5 können nicht eingeträufelt werden, weshalb diese Variante für 10 Drähte entfällt. Der vorliegende Referenzstator besitzt 18 Spulen von Typ 2 mit 12 Drähten. Um die Vergleichbarkeit zu den manuell gewickelten Spulen im gezahnten Stator herstellen zu können, werden 2 Spulen dieser Variante im Messstator verbaut. Da der Demonstrator (14 Drähte, Typ 2) auf die gleiche Art wie die Spulen im Messstator hergestellt wird, ist diese Variante mit 18 gleichartigen Spulen ausreichend abgedeckt. Nachdem Typ 1 erwartungsgemäß zu starker Stromverdrängung führt, wird die Betrachtung bei 10 und 16 parallelen Drähten als ausreichend erachtet. Bei 16 Drähten stellt die Einbringung der Spulen in das Versuchswerkzeug bereits eine große Herausforderung dar und die Lackdrahtoberfläche wird häufig beschädigt. Somit haben sich 16 parallele Drähte für die gegebene Geometrie als Grenze bei der Fertigung der Spulen herausgestellt. Im Messstator werden jeweils zwei gleichartige Spulen montiert, damit bei abweichenden Ergebnissen eine genauere Analyse angestoßen werden kann und gegebenenfalls noch weitere Spulen hergestellt werden können.

Tabelle 6-2 listet die hergestellten Wicklungsarten mit entsprechender Anzahl in Form einer Matrix auf und stellt somit den Versuchsplan für die Auswertungen im nächsten Kapitel dar.

*Tabelle 6-2: Versuchsplan*

	<b>Typ 1</b>	<b>Typ 2</b>	<b>Typ 3</b>	<b>Typ 4</b>	<b>Typ 5</b>
<b>10 Drähte</b>	2	2	2	2	-
<b>12 Drähte</b>	-	2+18	2	-	2
<b>14 Drähte</b>	-	18	2	-	2
<b>16 Drähte</b>	2	2	2	-	2

## 7 Ergebnisse

### 7.1 Analyse der Wickelversuche mittels LCR-Messung

Im folgenden Kapitel werden die Messwerte der durchgeführten LCR-Messungen vergleichend bewertet. Dazu wird zunächst der in Kapitel 5.4 dargestellte Demonstrator mit einem seriennahen Referenzstator verglichen. Da beide Statoren komplett mit Spulen bestückt sind, können diese Statoren anhand ihrer Mittelwerte über alle Spulen gegenübergestellt werden. Im darauffolgenden Abschnitt werden zwei Spulen, die der Konfiguration des Demonstrators entsprechen, jedoch im Messstator zusammen mit anderen Konfigurationen montiert sind, zum Vergleich mit der Referenz herangezogen. Dies sichert die Vergleichbarkeit der Ergebnisse von im Messstator montierten Spulen gegenüber denen in vollständig bestückten Statoren ab. Daraufhin folgen Messungen einzelner Spulen mit den in Tabelle 6-2 aufgelisteten Wicklungsarten. Diese Messungen lassen schließlich eine Bewertung der Wicklungsarten und Nutfüllgrade für die vorliegende Referenzmaschine zu.

#### 7.1.1 Vergleich von Referenz und Demonstrator

Zur Gewährleistung der Vergleichbarkeit wurde ein sogenannter Referenzstator bereitgestellt. Dieser Stator entspricht weitestgehend dem Stand der Technik, jedoch besitzt er Windungsanzapfungen, um die erforderlichen Messungen zu ermöglichen.

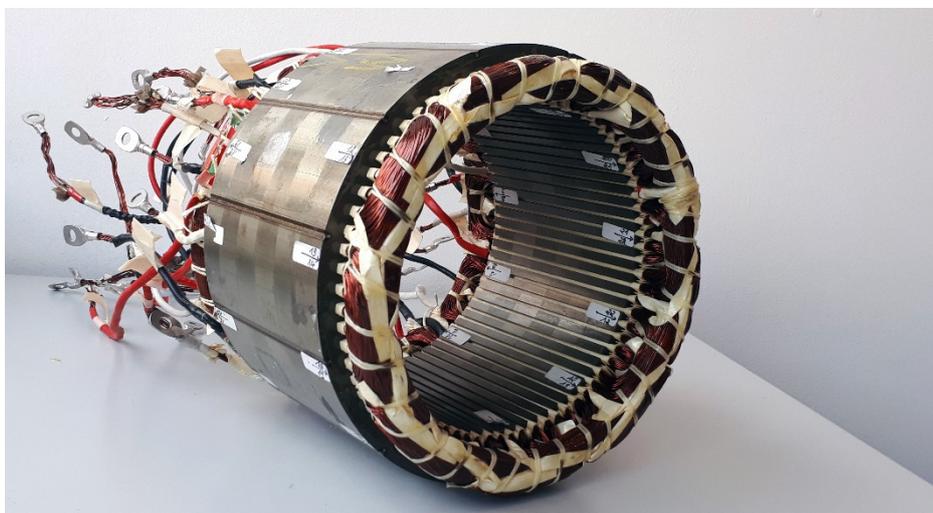


Abbildung 7-1: Referenzstator

Wie bereits erläutert, besitzt der angefertigte Demonstrator im Gegensatz zum Referenzstator ein gezahntes Blechpaket, welches zu schlechteren Eigenschaften führen sollte, allerdings wurde der Nutfüllgrad durch die Verwendung von 14 anstatt 12 parallelen Drähten beim Referenzstator deutlich erhöht. Daraus ergibt sich im Mittel ein ohmscher Widerstand von 38,71 mOhm (Standardabweichung 0,36 mOhm) für die Spulen mit 12 Drähten und 33,11 mOhm (Standardabweichung 0,08 mOhm) für den Demonstrator mit 14 parallelen

Drähten. Vergleicht man die Mittelwerte der Resistanz  $R$  der Spulen in beiden Statorn über der Anregungsfrequenz, so lässt sich erkennen, dass sich bei sehr niedrigen Frequenzen die erhöhte Drahtanzahl in einer etwas kleineren Resistanz bemerkbar macht. Bei 220 Hz kreuzen sich jedoch die beiden Graphen, und die Summe der negativen Einflüsse übersteigt den Gewinn durch die Verringerung des ohmschen Widerstandes infolge der Erhöhung des Nutzfüllgrades.

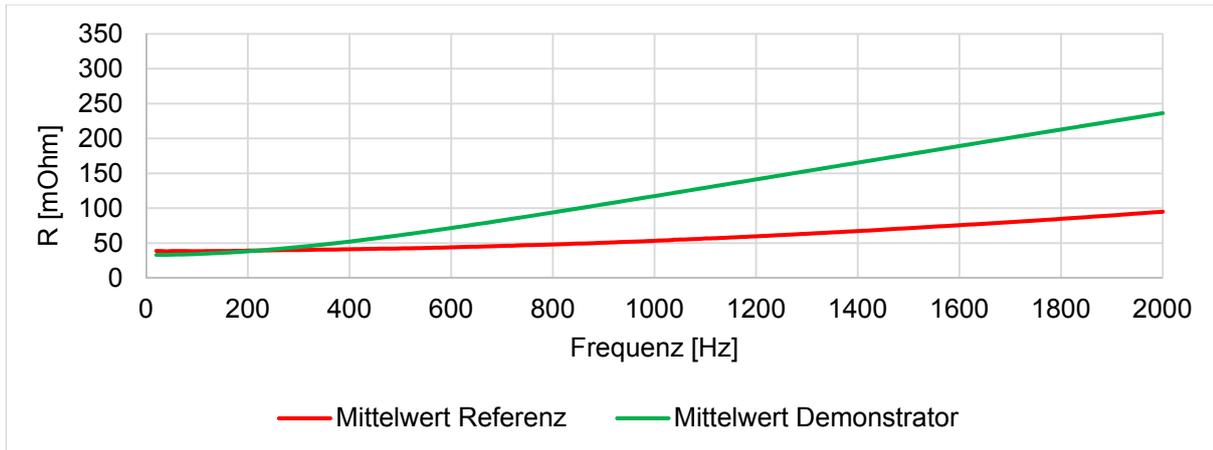


Abbildung 7-2: Resistanz von Referenz und Demonstrator

Mit Hilfe der gemessenen Reaktanz  $R$  und des zugehörigen Phasenwinkels  $\theta$  berechnet das verwendete LCR-Messgerät die Induktivität  $L$  für jede Messfrequenz. Erwartungsgemäß ist auch die Induktivität  $L_s$  der Spulen beim gezahnten Demonstrator durchwegs geringer und nimmt bei höheren Frequenzen sogar weiter ab.

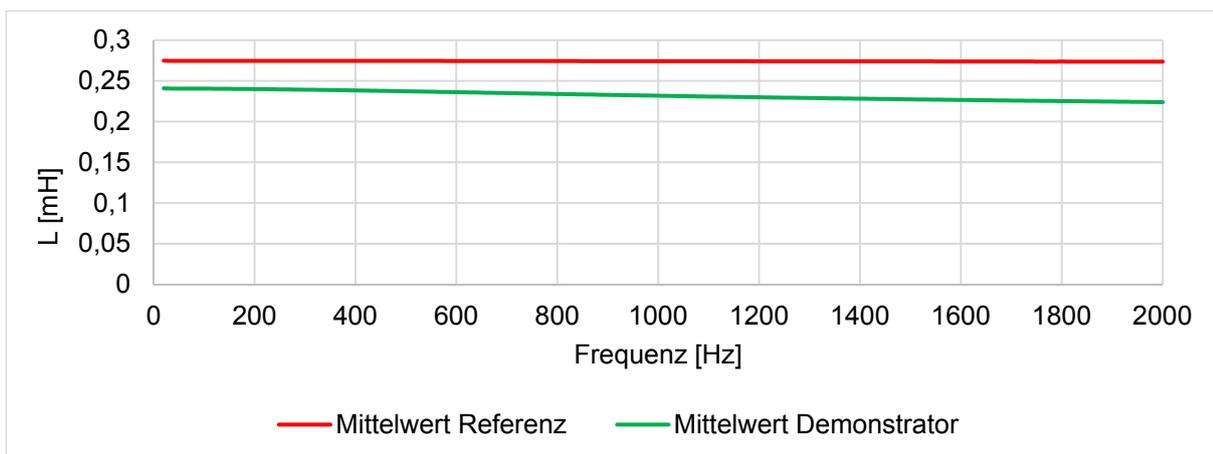


Abbildung 7-3: Induktivität von Referenz und Demonstrator

Hinsichtlich der durch die Stromverdrängung bedingten Verluste lässt sich demnach zeigen, dass die Erhöhung des Nutzfüllgrades allein nicht ausreichend ist. Die Einflüsse durch die Segmentierung des Blechpakets und durch die Gleichmäßigkeit der Wicklungen, die beim maschinell hergestellten Referenzstator deutlich besser gegeben ist, spielen hierfür eine weitaus

größere Rolle. Lediglich beim Anlaufen der Maschine würde sich der um 14,47 % niedrigere Gleichstromwiderstand bemerkbar machen.

### 7.1.2 Vergleich von Referenz und Spulen im gezahnten Stator

Zur Sicherung der Vergleichbarkeit der Ergebnisse werden die beiden Spulen, die der Konfiguration der im Referenzstator verbauten Spulen entsprechen, nochmals den Mittelwerten des Referenzstators und des Demonstrators gegenübergestellt. Aufgrund des gleichen Typs und der gleichen Drahtanzahl der zu vergleichenden Spulen wird bei den beiden im Folgenden betrachteten Spulen 6 und 7 von der Farb- und Linienkonvention gemäß Tabelle 6-1 abgewichen.

Wie in Abbildung 7-4 dargestellt, variiert die Resistanz  $R$  zwischen den beiden Spulen im Messstator (Spule 6 und Spule 7) bei zunehmender Frequenz sehr stark. Die beobachtete Zunahme der Resistanz, insbesondere der Spule 7, liegt nahe der des Mittelwertes des Demonstrators und somit merklich höher als beim Referenzstator. Spule 6 hingegen liegt nahe der Messungen des Referenzstators. Demnach ist die Widerstandserhöhung der beiden betrachteten Spulen grundsätzlich höher, als beim Referenzstator, welcher Spulen des gleichen Typs besitzt, jedoch maschinell gewickelt und eingezogen wurde. Somit liegt nahe, dass die Streuung maßgeblich durch das manuelle Wickeln und Montieren der Spulen 6 und 7 bedingt ist. Eine systematische Abweichung, die auf den Einfluss des gezahnten Stators zurückzuführen wäre, kann anhand der vorliegenden Messungen nicht nachgewiesen werden und wird deshalb als untergeordneter Einfluss gegenüber dem Montageeinfluss eingestuft.

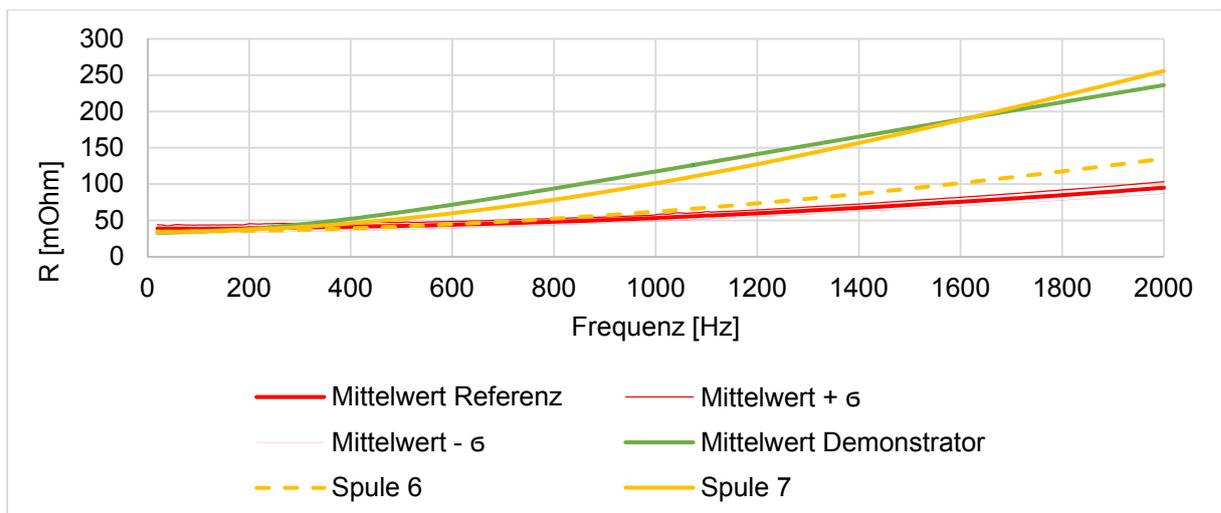


Abbildung 7-4: Resistanz von Referenz und Spulen im gezahnten Stator

Die fertigungsbedingten Abweichungen des maschinell hergestellten Referenzstators sind in Abbildung 7-4 anhand der Standardabweichung  $\sigma$  dargestellt. Hierzu ist der Graph des Mittelwertes mit der Standardabweichung addiert bzw. subtrahiert (*Mittelwert +  $\sigma$* ,

*Mittelwert -  $\sigma$* ) mit dünnen Linien dargestellt. Die gezeigte Bandbreite ist also im Vergleich zu den beiden mittels der neu entwickelten, deutlich komplexeren Fertigungsstrategie und in Handarbeit gefertigten Spulen sehr schmal. Dennoch lassen sich auf diese Weise vergleichende Messungen anhand einzelner Spulen sehr gut abbilden.

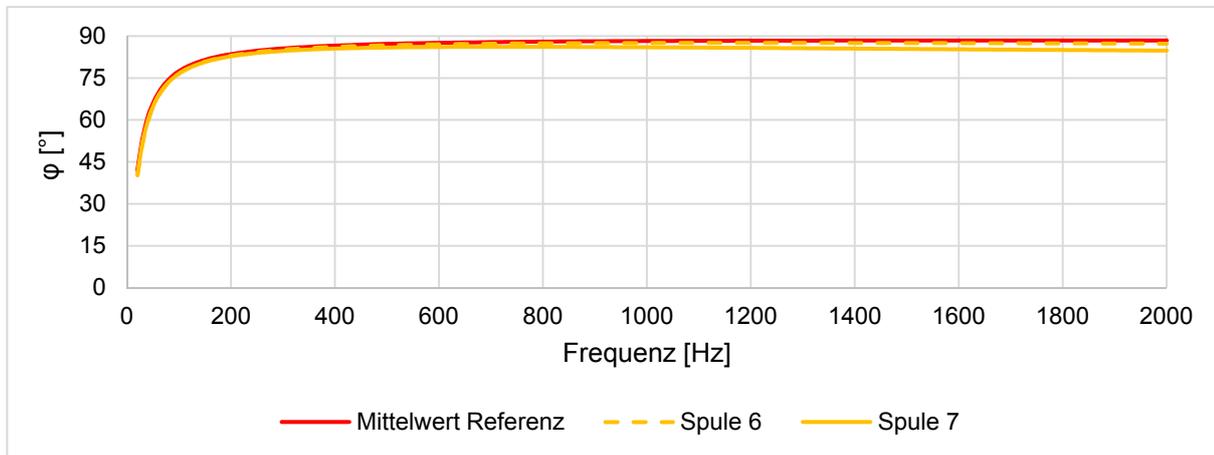


Abbildung 7-5: Phasenwinkel von Referenz und Spulen im gezahnten Stator

Nachdem das angewandte Messverfahren zusätzlich den Verlauf des Phasenwinkels  $\varphi$  der Impedanz liefert, kann daran die Plausibilität der oben dargestellten Diagramme geprüft werden. Ein Phasenwinkel von  $0^\circ$  entspricht einem idealen ohmschen Widerstand, von  $90^\circ$  einer idealen Induktivität und von  $-90^\circ$  einer idealen Kapazität. Gemäß Abbildung 7-5 überwiegt somit bei geringen Anregungsfrequenzen der ohmsche Widerstand. Ab etwa 200 Hz stellt sich aber ein Phasenwinkel nahe  $90^\circ$  ein. Ab dieser Frequenz lässt sich auch in Abbildung 7-4 erkennen, dass sich die Werte der Resistanz spreizen und damit die Wechselstromverluste relevant werden. Somit lässt sich an beiden Abbildungen erkennen, dass ab etwa 200 Hz von einem vorwiegend induktiven Verhalten der Spulen ausgegangen werden kann, unabhängig davon, in welchem der oben genannten Statorblechpakete sie verbaut sind und wie sie hergestellt wurden.

### 7.1.3 Vergleich nach Drahtanzahl und Wicklungstyp

Nach dem Vergleich von Referenz, Demonstrator und Messstator kann nun die gesamte Bandbreite unterschiedlichster Kombinationen aus Drahtanzahl und Wicklungstyp gemäß des Versuchsplans in Kapitel 6.3 untersucht werden. Hierzu sind die Mittelungen der jeweils zwei gleichartigen Spulen in Abbildung 7-6 aufgetragen. Die Farb- und Linienkonvention entspricht Tabelle 6-1. In der zugehörigen Legende entspricht die erste Zahl der Drahtanzahl und die zweite dem Typ der Wicklung.

Zur Interpretation und besseren Lesbarkeit von Abbildung 7-6 werden die markanten Abschnitte, die Drahtanzahl und Windungsart jeweils gesondert in den folgenden Abbildungen analysiert.

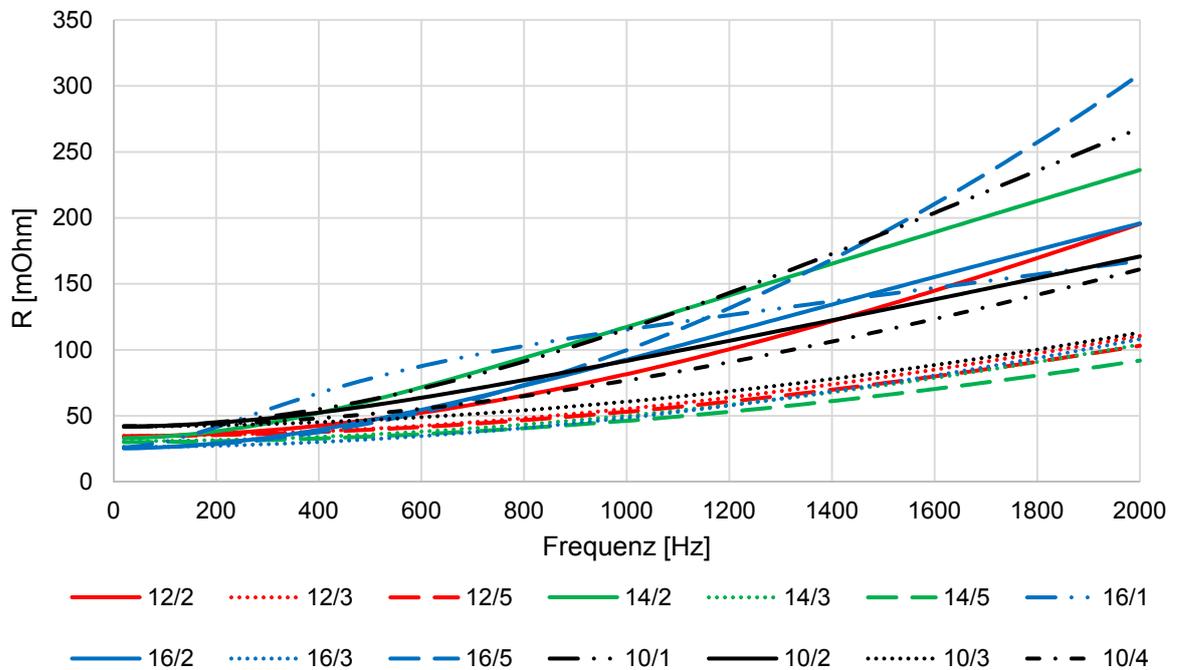


Abbildung 7-6: Mittelwerte der Resistanz der gemessenen Spulenarten

Betrachtet man den Bereich niederfrequenter Anregung, so lässt sich erkennen, dass entsprechend der Ergebnisse der vorangegangenen Kapitel nahezu durchgängig bis etwa 200 Hz lediglich der Gleichstromwiderstand der Spulen zum Tragen kommt (Abbildung 7-7). Somit ordnen sich die Kurven gemäß ihrer Drahtanzahl von 10 Drähten (schwarz, 42 mOhm) bis 16 Drähten (blau, 26 mOhm). Diese Widerstandsreduzierung um 38% führt je nach Auslegung zu deutlich mehr Leistung oder einem verbesserten Wirkungsgrad bei niedrigen Anregungsfrequenzen.

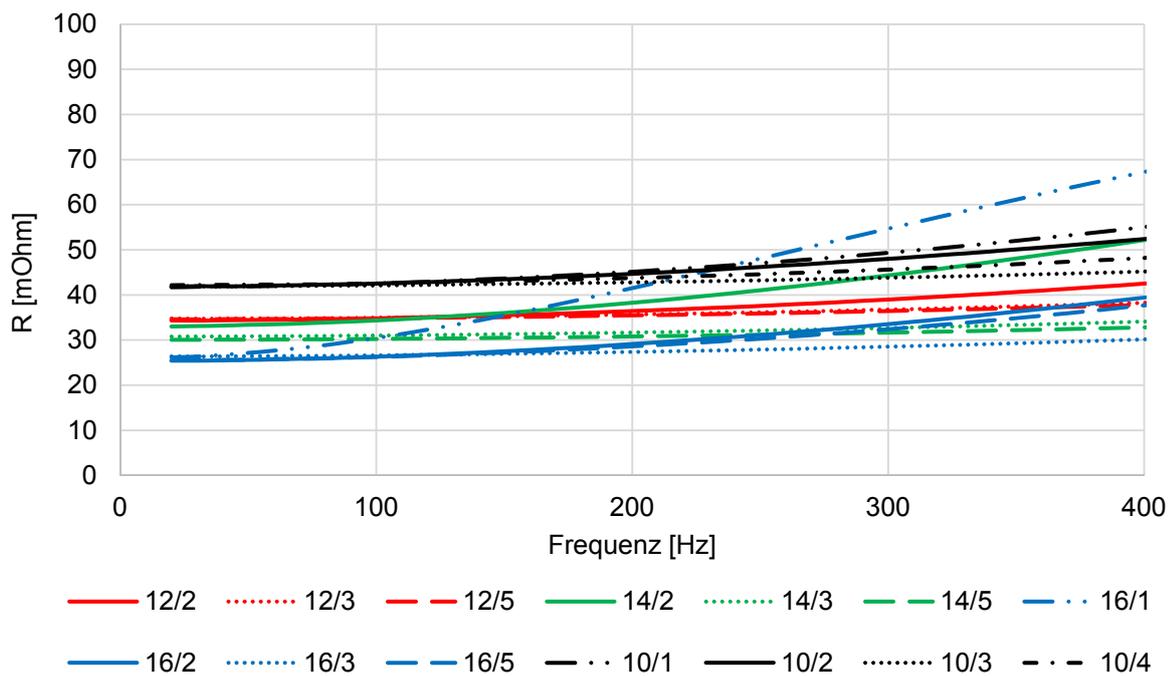


Abbildung 7-7: Ausschnitt 0 Hz bis 400 Hz aus Abbildung 7-6

Wie bereits in Vogt, Kraller und Volk (2015) für 10 Drähte dargestellt, lässt sich auch bei 16 Drähten (Abbildung 7-8) zeigen, dass für gleiche Drahtanzahlen der Wicklungstyp 1 (Strich-Punkt-Linie) die größte Widerstandserhöhung in Abhängigkeit der Frequenz aufweist, was auf eine hohes Maß an Stromverdrängung schließen lässt. Erst ab etwa 1450 Hz kreuzt sich der Graph mit 16 Drähten mit dem der Wicklungen vom Typ 2. Typ 2 und insbesondere Typ 3 (gepunktet) tragen somit nachweislich zur Verbesserung bei.

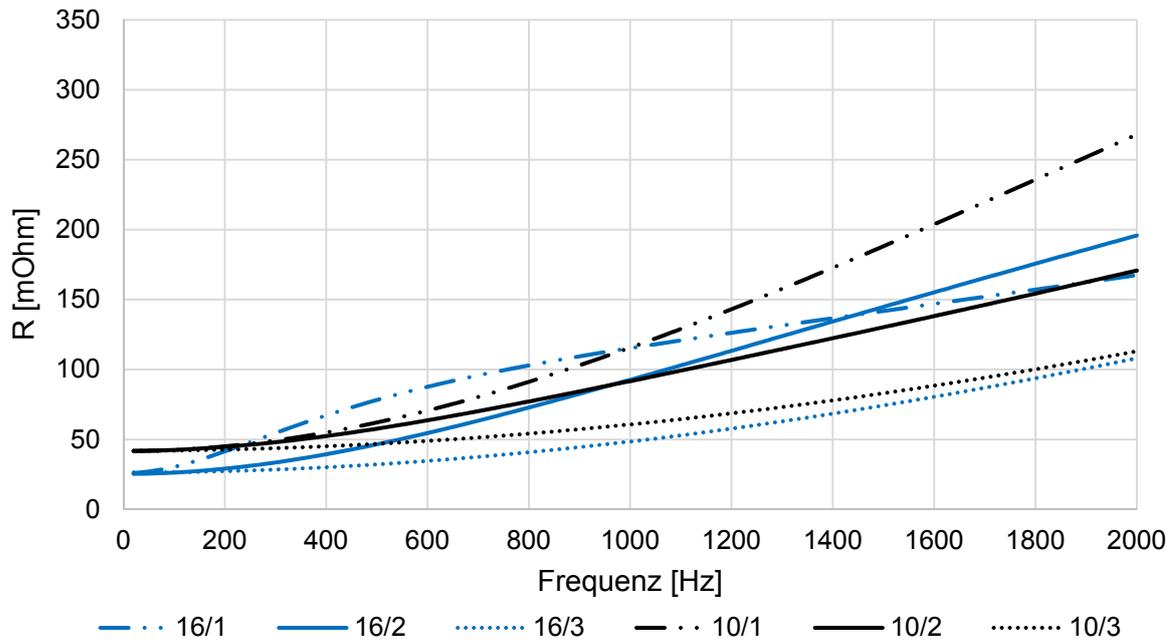


Abbildung 7-8: Ausschnitt 10 und 16 Drähte aus Abbildung 7-6

Betrachtet man die Gesamtheit der Graphen in Abbildung 7-6, so lässt sich erkennen, dass die Wicklungen vom Typ 3 und Typ 5, unabhängig von allen anderen Parametern, durchweg die geringste Zunahme der Resistanz aufweisen. Lediglich die Konfiguration 16/5 weicht davon ab. Jedoch ist bei 16 Drähten und einer Verdrillung der Drähte innerhalb der Nut die Deformation der Drähte so stark, dass diese Art von Spulen nicht mehr prozesssicher hergestellt werden kann, da lokal eine starke Verringerung des Drahtquerschnitts bis hin zum Bruch auftritt. Dies zeigt sich nochmals bei der Auswertung des Phasenwinkels über der Frequenz in Abbildung 7-9.

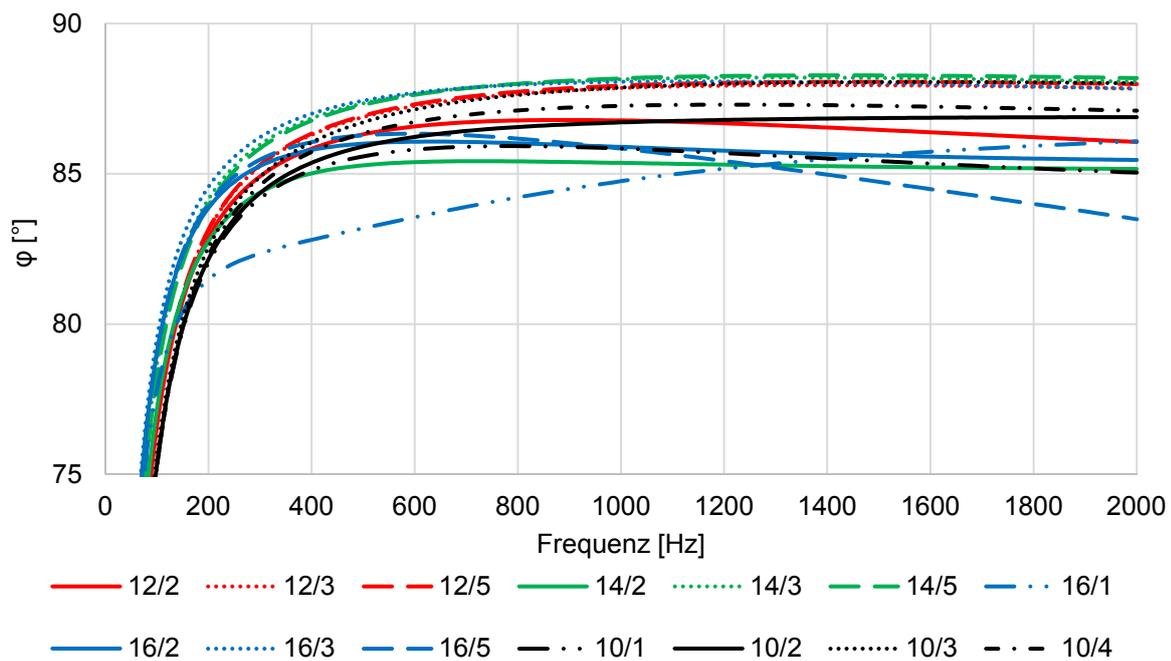


Abbildung 7-9: Phasenwinkel der gemessenen Spulenarten

Die Spulen vom Typ 1 und Typ 5 bei 16 Drähten weisen, wie auch bereits bei der Resistanz, einen unplausiblen Verlauf des Phasenwinkels auf, sodass sich nochmals bestätigt, dass bei der vorliegenden Fertigungsmethode Spulen mit 16 Drähten nicht mehr prozesssicher hergestellt werden können. Entsprechend der Auswertung der Resistenzen zeigt sich beim Phasenwinkel, dass Spulen vom Typ 3 und Typ 5 Phasenwinkel nahe  $90^\circ$  aufweisen, was einer idealen Spule entspräche.

### 7.1.4 Bewertung der Streuung der gemessenen Spulen

Nachdem die gemessenen Spulen, wie in Kapitel 5.1 dargestellt, manuell gewickelt wurden, wird zum Abschluss der Analyse der Wickelversuche mittels LCR-Messung die Streuung dieser Messwerte beurteilt. Die in Abbildung 7-10 dargestellten Unterschiede der jeweils zwei identischen Spulenarten *a* und *b* lassen sich somit auf die Fertigung und Montage zurückführen. Die manuell hergestellten wilden Wicklungen, das Einbringen in das Presswerkzeug und das Verpressen selbst führen zwangsläufig zu kleinen fertigungsbedingten Toleranzen, die sich auf die gemessene Resistanz auswirken. Abbildung 7-10 fasst die Messungen im Überblick zusammen, die zur Verbesserung der Lesbarkeit in den folgenden Abbildungen in Auszügen dargestellt sind.

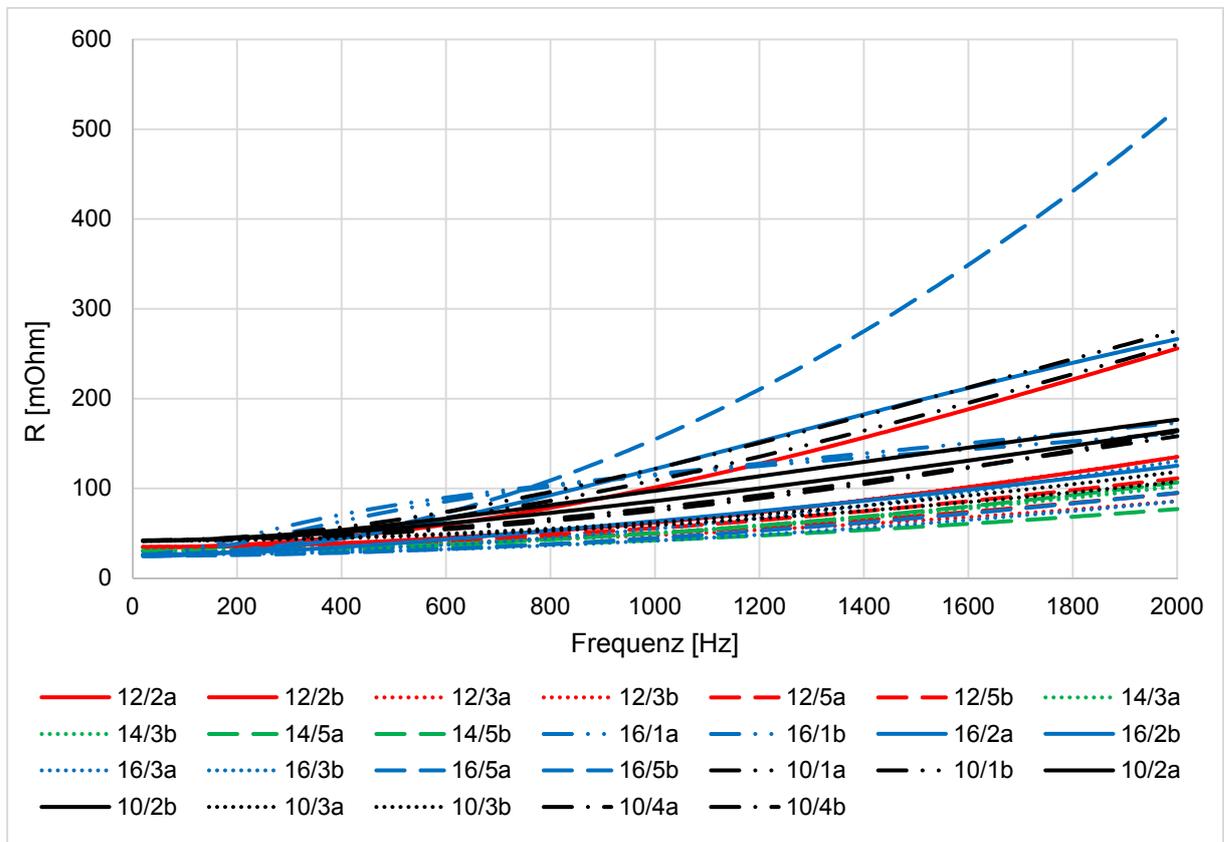


Abbildung 7-10: Einzelmessungen der Resistanz

Exemplarisch wird im Folgenden auf die geringste Drahtanzahl mit 10 parallelen Drähten und auf die Wicklungen mit 14 parallelen Drähten, die gerade noch prozesssicher hergestellt werden können, näher eingegangen (Abbildung 7-11). So lässt sich erkennen, dass bei unverdrillten Spulen vom Typ 1 (10/1a, 10/1b in Abbildung 7-11) eine sehr gute Übereinstimmung der Kurven vorliegt. Bei Spulen mit mehrfachen Verdrillungen vom Typ 4 und 5 (14/5a, 14/5b, 10/4a, 10/4b in Abbildung 7-11) hingegen sinkt die Reproduzierbarkeit, was auf die undefinierte Lage der Einzeldrähte, die sich bei jeder weiteren Verdrillung ergibt, zurückzuführen ist. Dies führt dazu, dass sich die Messungen der Spulen 14/3a und 14/3b, die eine sehr gute Übereinstimmung aufweisen, mit der Streuung der Messungen der Spulen 14/5a und 14/5b überdecken.

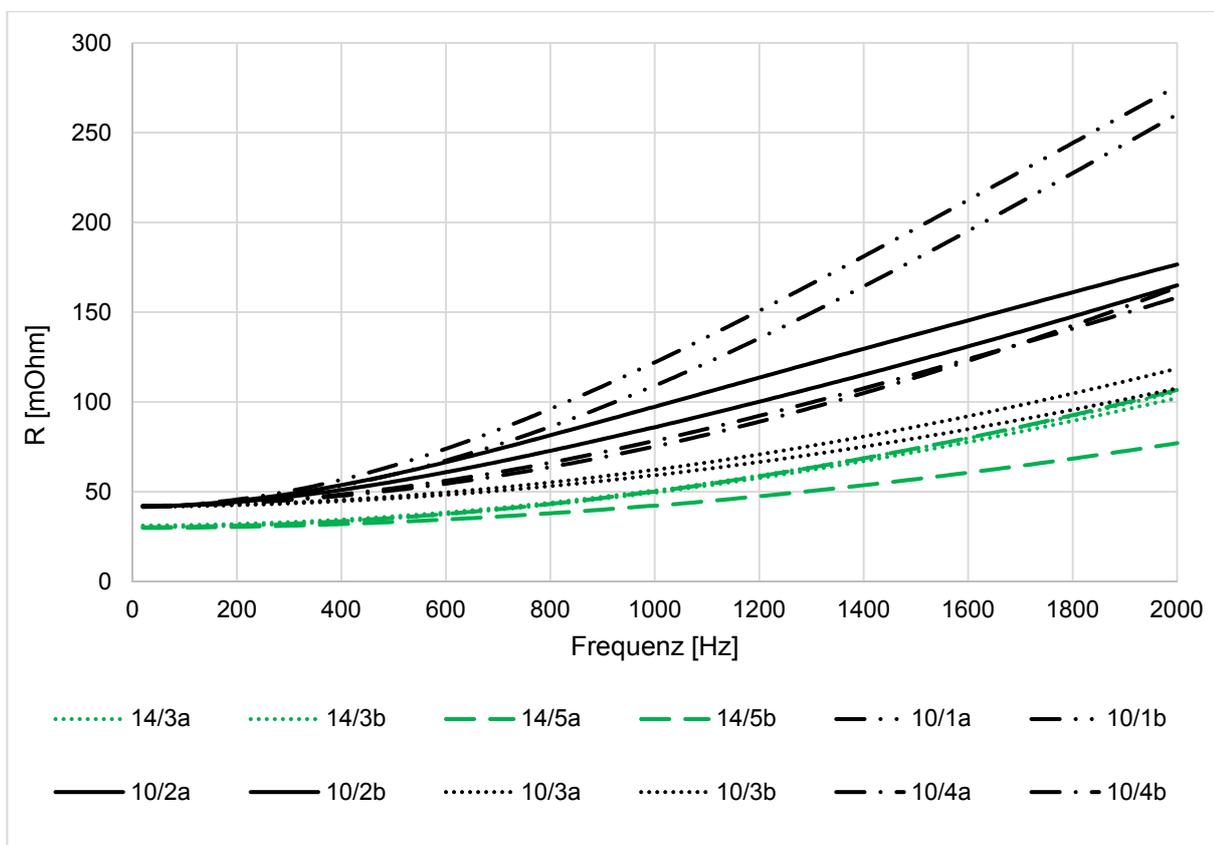


Abbildung 7-11: Auszug 10 und 14 Drähte aus Abbildung 7-10

Betrachtet man die Messungen mit 16 Drähten (Abbildung 7-12), so lässt sich erkennen, dass ohne Verdrillung (16/1a, 16/1b) die Werte der beiden Spulen noch gut übereinstimmen. Allein durch die Verdrillung zwischen der inneren und äußeren Spule ist bereits ein deutlicher Unterschied zwischen den beiden Wicklungen 16/2a und 16/2b zu erkennen. Die Wicklung 16/5a liegt im Bereich der geringsten Zunahme der Resistanz, 16/5b hingegen erzielt bei 2 kHz nahezu die doppelte Resistanz gegenüber allen anderen Messungen. Es lässt sich ableiten, dass durch den hohen Nutfüllgrad in Kombination mit der Verdrillung innerhalb der Nut (Typ 5) mit der vorliegenden Konfiguration das Optimum bereits überschritten ist und eine reproduzierbare Herstellung der Spulen nicht mehr möglich ist. Demnach ist bei der gewählten Fertigungsmethode die Komplexität der Wicklung, insbesondere bei hohen Nutfüllgraden, ein maßgeblicher Einflussfaktor hinsichtlich der Reproduzierbarkeit.

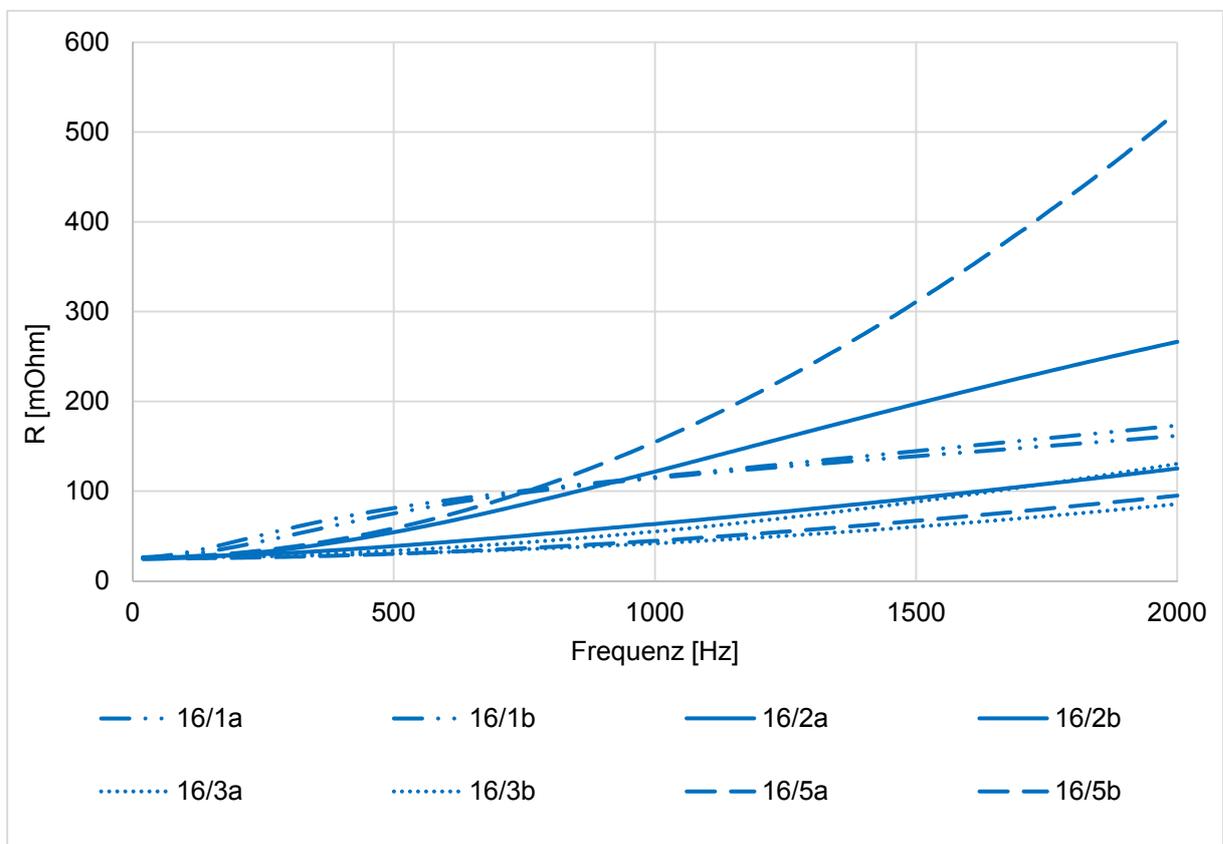


Abbildung 7-12: Auszug 16 Drähte aus Abbildung 7-10

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass im vorliegenden Fall Spulen bis zu 14 Drähten prozesssicher hergestellt werden können und eine Verdrillung vom Typ 3 am zuverlässigsten die geringste Zunahme der Resistanz bei hohen Frequenzen bewirkt.

## 7.2 Analyse der Wickelversuche mittels Stromzangenmessung

Im folgenden Kapitel werden die Messwerte der durchgeführten Stromzangenmessungen vergleichend dargestellt. Analog zu Kapitel 7.1 wird zunächst der Referenzstator mit dem Demonstrator verglichen. Es folgen dann die Messungen von einzelnen Spulen mit den in Tabelle 6-2 aufgelisteten Wicklungsarten.

### 7.2.1 Vergleich von Referenz und Demonstrator

Betrachtet man die in Kapitel 5.5.2 hergeleitete mittlere Stromabweichung für den Referenzstator und den Demonstrator, so kann mit Hilfe der Stromzangenmessung gezeigt werden, dass der Strom beim Demonstrator gegenüber der Referenz ungleichmäßiger verteilt ist (Abbildung 7-13), was sich mit der erhöhten Resistanz der LCR-Messungen in Kapitel 7.1.1 deckt. Je höher der Wert der mittleren Stromabweichung, desto ungleichmäßiger verteilt sich der Strom auf die parallel geschalteten Einzelleiter. Der dargestellte Verlauf beschreibt hierbei die Mittelwerte über alle Spulen des jeweiligen Stators.

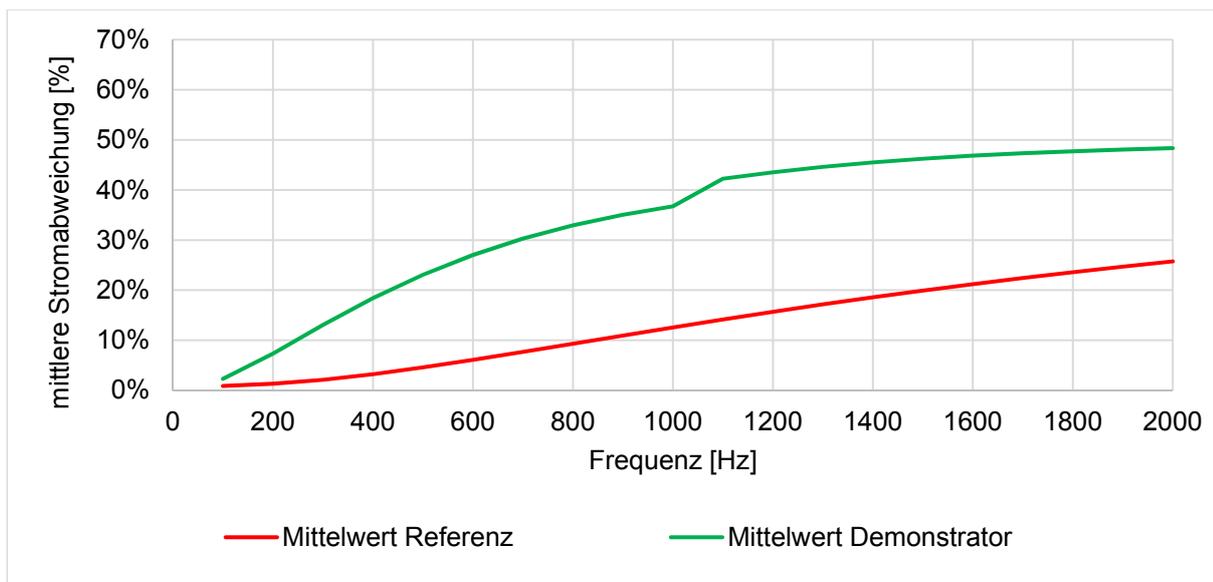


Abbildung 7-13: Mittelwerte der Stromabweichung von Referenz und Demonstrator

Bei der Analyse der Verteilung der mittleren Stromabweichung jeder Spule beim Referenzstator (Abbildung 7-14) und Demonstrator (Abbildung 7-15) lässt sich anhand der Verteilung der sich überlagernden Graphen qualitativ beurteilen, dass sowohl der Betrag als auch die Streuung der mittleren Stromabweichung beim Demonstrator höher sind. Bei einer Frequenz von 2000 Hz liegen beim Referenzstator die Kurven in einem Band von 20% bis 36%, beim Demonstrator von 29% bis 65%.

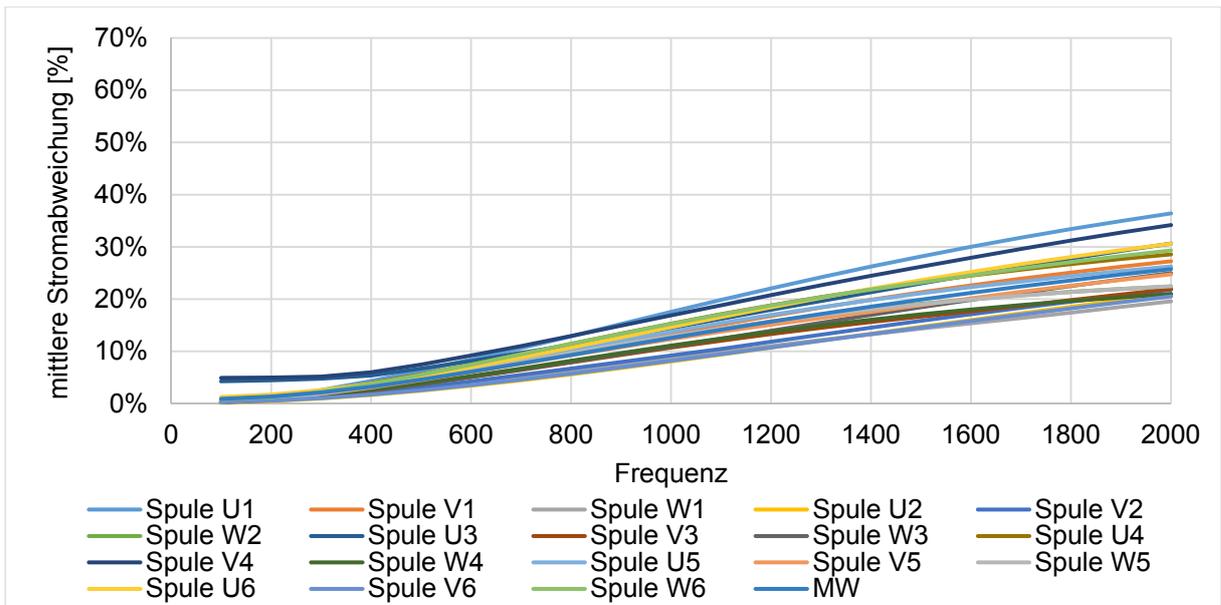


Abbildung 7-14: Mittlere Stromabweichung Referenz

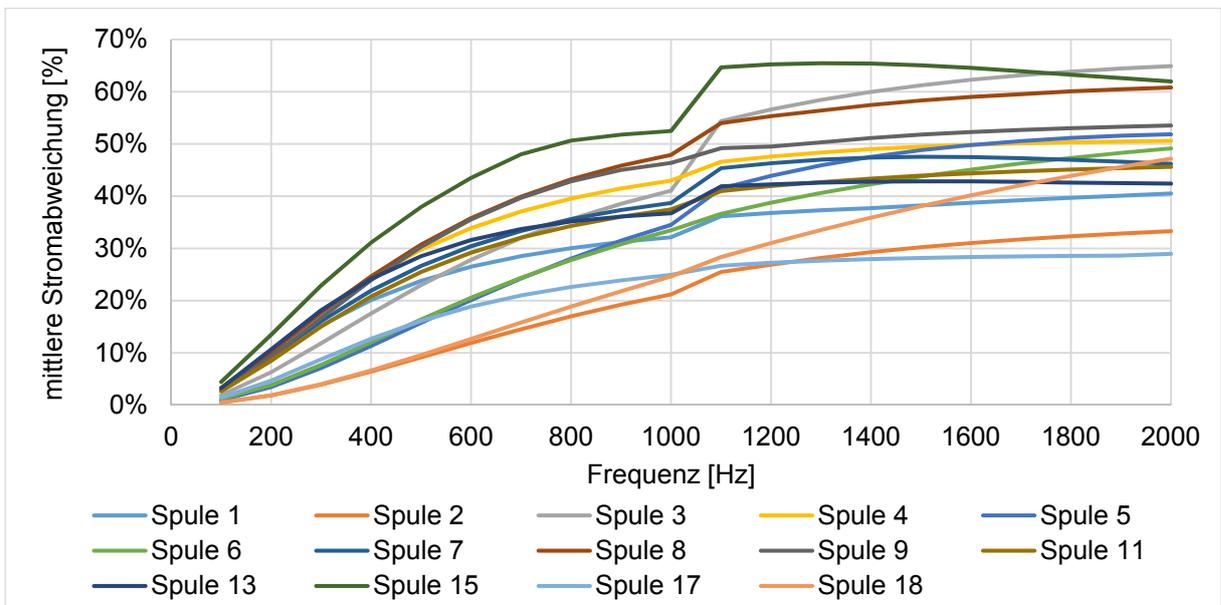


Abbildung 7-15: Mittlere Stromabweichung Demonstrator

Der sprunghafte Anstieg der mittleren Stromabweichung zwischen 1000 Hz und 1100 Hz (Abbildung 7-15) kann beim Großteil der Spulen des Demonstrators beobachtet werden und

schlägt sich somit auch auf den in Abbildung 7-13 dargestellten Mittelwert nieder. Trotz mehrfacher unabhängiger Messungen stellt sich dieses Verhalten reproduzierbar ein. Da die dargestellte mittlere Stromabweichung eine Akkumulation der Messungen der Einzeldrähte ist, wird anhand zweier Beispiele die Ursache für den teils sprunghaften Anstieg erläutert. Betrachtet wird die prozentuale Stromabweichung jedes Drahtes vom Mittelwert, was bis auf die Normierung des gemessenen Stroms auf den Mittelwert aller Drähte bei der jeweiligen Frequenz den Rohdaten der Messung entspricht. Abbildung 7-16 zeigt eine gewöhnliche Verteilung der Ströme am Beispiel von Spule 6, die in Abbildung 7-15 demnach keinen sprunghaften Anstieg der mittleren Stromabweichung aufweist. Die Graphen für jeden Einzeldraht sind erwartungsgemäß streng monoton fallend bzw. steigend.

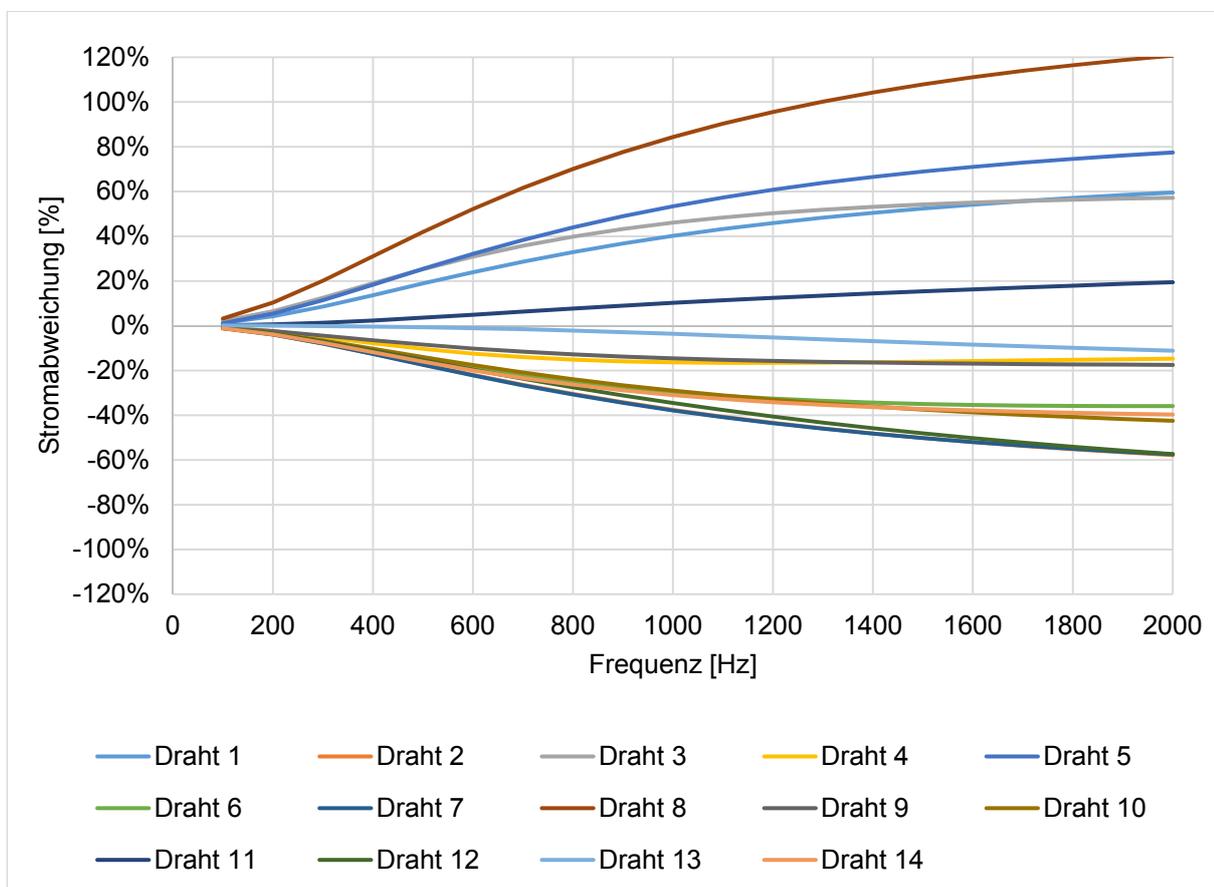


Abbildung 7-16: Stromabweichung Demonstrator Spule 6

Betrachtet man hingegen die Stromabweichung einer Spule mit sprunghaftem Anstieg, wie beispielsweise Spule 9 in Abbildung 7-17, so erkennt man, dass nicht alle Graphen streng monoton sind. Die in Abbildung 7-17 gestrichelt dargestellten Graphen weisen ein Extremum auf, welches zumeist im Bereich nahe 1 kHz liegt. Die Mittelwertbildung für die mittlere Stromverteilung führt dann zu den beobachteten sprunghaften Anstiegen. Innerhalb jeder Spule überlagern sich unterschiedliche Einflüsse und Wechselwirkungen wie zum Beispiel Blindströme, Interferenzen, kapazitive Kopplungen und induktive Kopplungen. Die

Auswirkungen dieser Effekte auf die Spule sind in dieser Form nur am Einzelleiter feststellbar. Somit ist diese ungleiche Beanspruchung der Einzelleiter bei Messverfahren, die an der Spulenklemme kontaktieren, nicht oder nur indirekt bestimmbar.

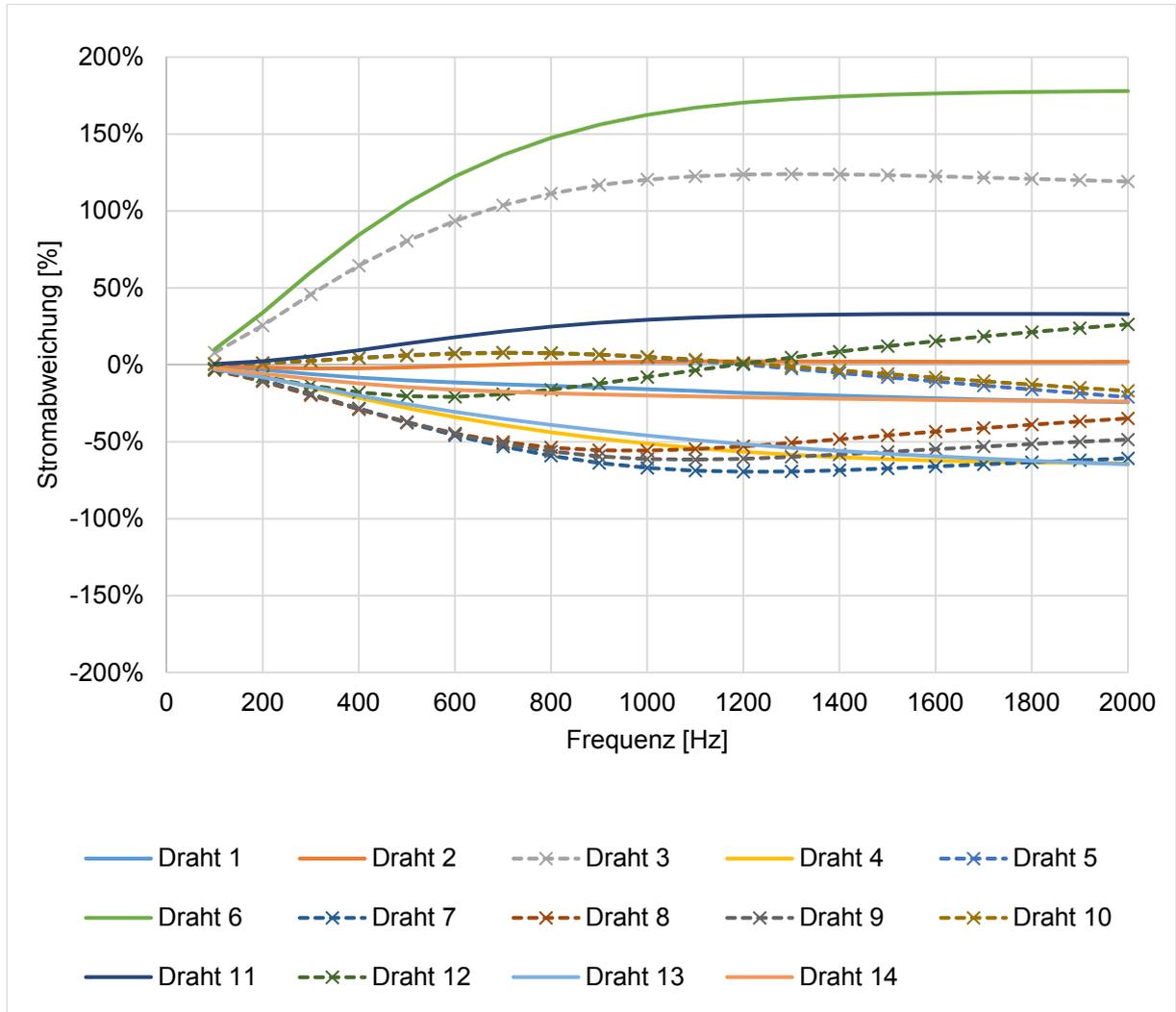


Abbildung 7-17: Stromabweichung Demonstrator Spule 9

Ein weiteres Indiz für Wechselwirkungen, die Auswirkungen auf die Verteilung des Stroms haben, ist, dass der berechnete Gesamtstrom ein Maximum bei 1,5 kHz aufweist (Abbildung 7-18). Der berechnete Gesamtstrom summiert sich aus den Effektivwerten der Ströme der Einzeldrähte, der gemessene Gesamtstrom wird mittels Stromzange am Drahtbündel gemessen und stellt ebenfalls den Effektivwert dar. Der berechnete Wert enthält somit die Blindstromanteile, die sich aus der Phasenverschiebung der Ströme der Drähte ergeben. Das oben genannte Maximum des berechneten Gesamtstroms zeigt, dass im betrachteten Bereich Überlagerungen vorliegen, die die Zunahme des Blindstromanteils bei höheren Frequenzen vermindern.

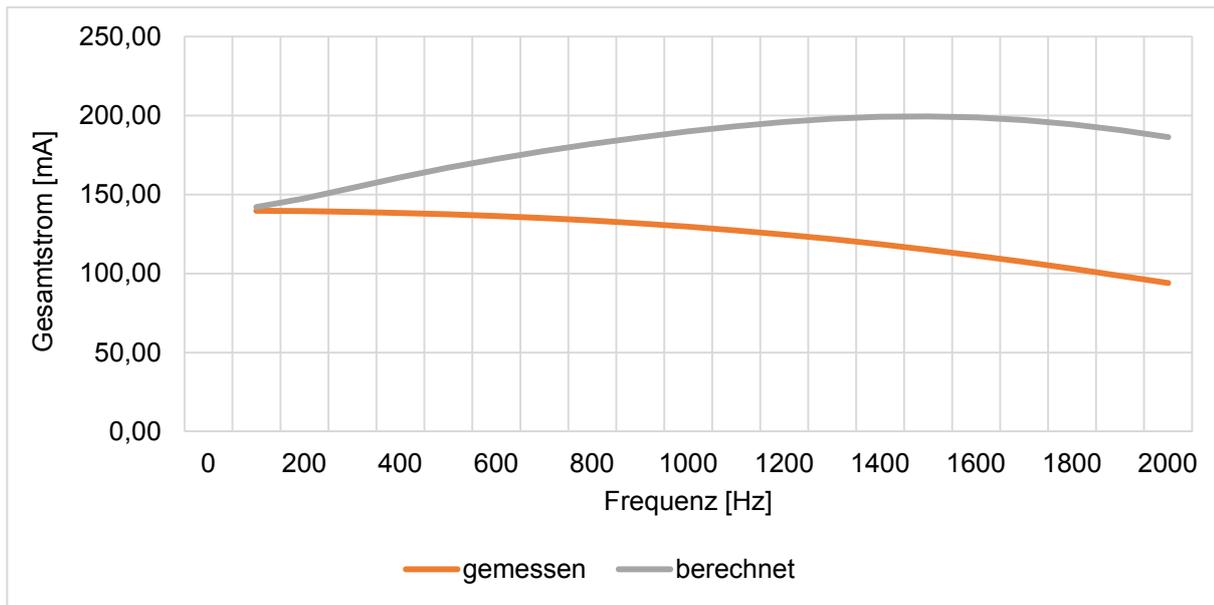


Abbildung 7-18: Gemessener und berechneter Gesamtstrom von Spule 9

Zusammenfassend lässt sich demnach feststellen, dass, wie auch bei der LCR-Messung, der Demonstrator eine etwas ungünstigere Stromverteilung aufweist als der Referenzstator. Die Überlagerungen beim Demonstrator können nicht eindeutig zugeordnet werden, schwächen aber die generelle Aussage nicht, dass der deutlich komplexere Demonstrator schlechtere Werte liefert.

### 7.2.2 Vergleich von Referenz und Spulen im gezahnten Stator

Entsprechend des Vergleichs der Resistanz in Kapitel 7.1.2 werden die Ergebnisse der beiden Spulen im Messstator, die der Konfiguration der im Referenzstator verbauten Spulen entsprechen, nochmals den Mittelwerten des Referenzstators und des Demonstrators gegenübergestellt. Damit lässt sich bei der Stromzangenmessung in Abbildung 7-19 feststellen, dass die mittlere Stromabweichung der Referenz durchweg geringe Werte und somit eine gleichmäßigere Verteilung des Stromflusses auf die Einzeldrähte aufweist. Bei dieser Mess- und Auswertemethodik weisen die Graphen für die beiden Spulen 6 und 7 deutlich geringere relative Abweichungen zueinander auf als bei der LCR-Messung in Kapitel 7.1.2.

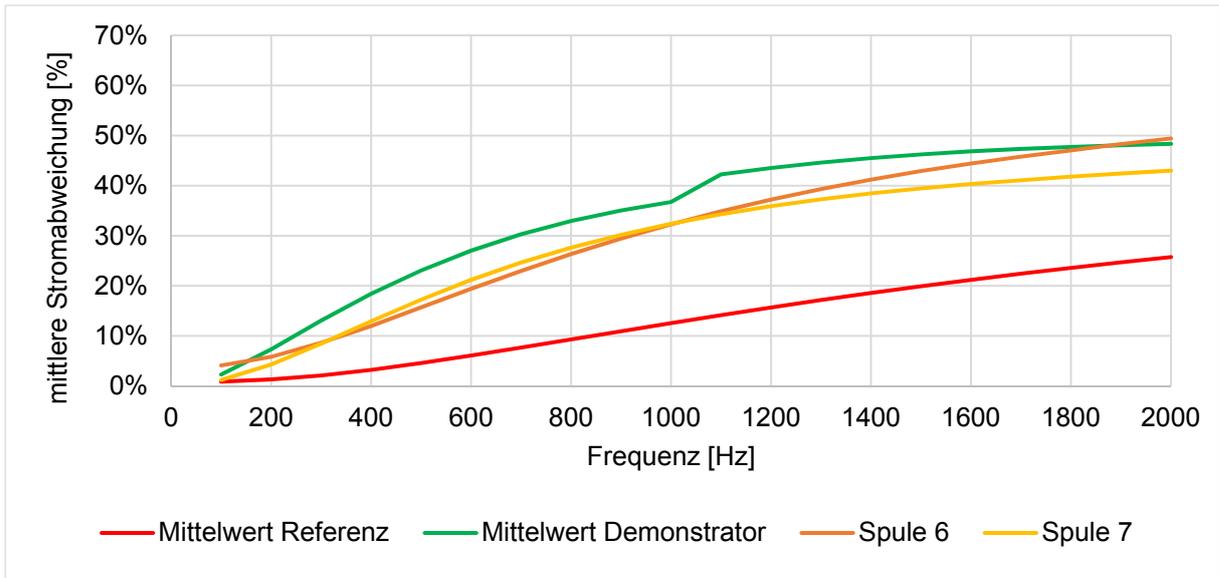


Abbildung 7-19: Mittlere Stromabweichung Referenz und Spulen im gezahnten Stator

Beide Messverfahren lassen aber die gleichen Schlüsse für die relative Bewertung der Spulen zueinander zu. Der maschinell hergestellte Referenzstator weist eine günstigere Stromverteilung auf als die manuell hergestellten Spulen im segmentierten Demonstrator und im Messstator. Die Spulen im Messstator haben eine geringe Abweichung zum Mittelwert des Demonstrators. Die Vergleichbarkeit zwischen einem voll mit Spulen bestückten Stator und dem teilweise bestückten Messstator ist demnach gegeben. Die zusätzlichen Verluste durch die manuelle Fertigung und den gezahnten Stator werden aber durch die Erhöhung des Nutzfüllgrades nicht kompensiert. Durch die bei der Stromzangenmessung gewählte Normierung macht sich der geringere Gleichstromwiderstand aufgrund des gesteigerten Nutzfüllgrades in der Auswertung nicht bemerkbar. Die Senkung der mittleren Stromabweichung kann somit nur über andere Wicklungstypen erreicht werden.

### 7.2.3 Vergleich nach Drahtanzahl und Wicklungstyp

Analog zum Vorgehen in Kapitel 7.1 kann nun die gesamte Bandbreite unterschiedlichster Kombinationen aus Drahtanzahl und Wicklungstyp gemäß des Versuchsplans in Kapitel 6.3 untersucht werden. Hierzu sind wieder die Mittelungen zweier gleichartiger Spulen in Abbildung 7-20 aufgetragen. Die Farb- und Linienkonvention entspricht Tabelle 6-1. Zudem entspricht in der zugehörigen Legende die erste Zahl der Drahtanzahl und die zweite dem Typ der Wicklung.

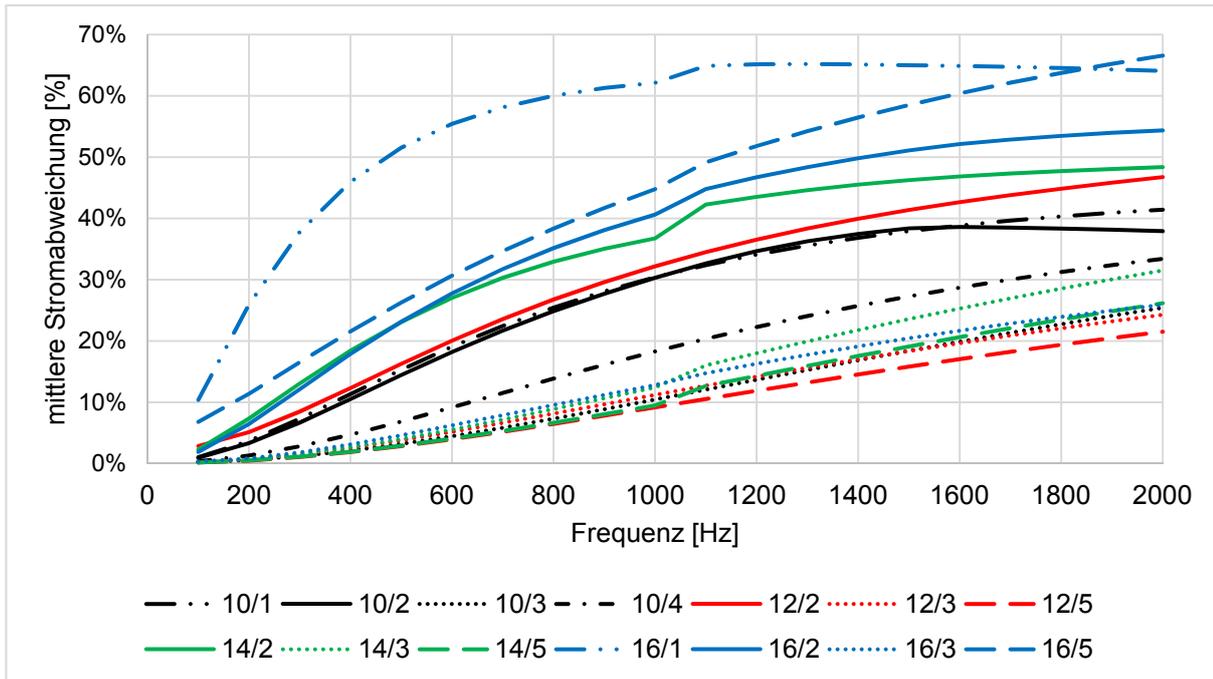


Abbildung 7-20: Mittlere Stromabweichung der gemessenen Spulen

Zur Interpretation der Messungen werden relevante Frequenzbereiche, die Drahtanzahl und die Windungsart jeweils gesondert analysiert. So lässt sich in Abbildung 7-21 bei einigen Graphen ein Knick bei 200 Hz beobachten. Analog zur LCR-Messung steigen ab dieser Frequenz die Wechselstromverluste merklich an. Da die Stromzangenmessung erst bei 100 Hz beginnt und mit einem Intervall von 100 Hz Messwerte aufgezeichnet werden, ist die Abbildung dieses Effekts hier deutlich weniger markant. Dennoch lässt sich damit die Aussage der LCR-Messung stützen, dass eine merkliche Zunahme der Stromverdrängung erst ab etwa 200 Hz zu beobachten ist. Im Gegensatz zur LCR-Messung können bei der mittleren Stromabweichung keine Aussagen zum Gleichstromwiderstand getroffen werden, da er wegen der Normierung bei der Berechnung der Stromabweichung keinen Einfluss hat.

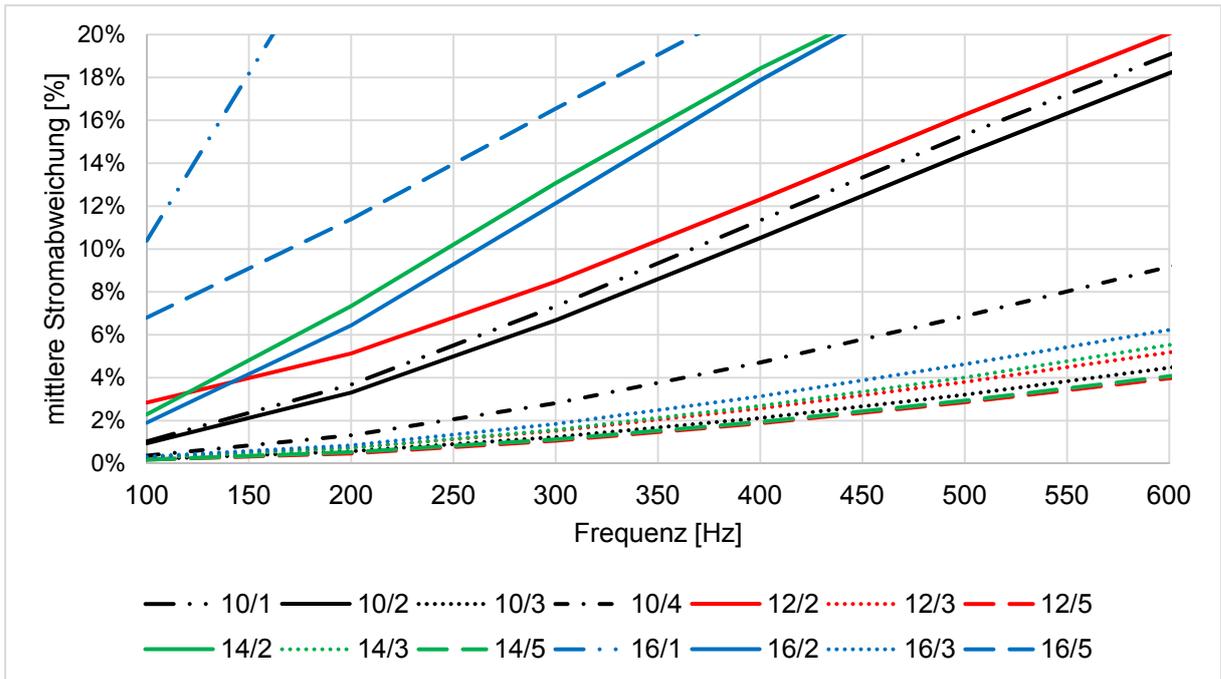


Abbildung 7-21: Ausschnitt 100 Hz bis 600 Hz aus Abbildung 7-20

Wie auch bei der LCR-Messung lässt sich anhand der Spulen mit 10 und 16 Drähten zeigen, dass für gleiche Drahtanzahlen die Wicklungstypen 1 und 2 die größte mittlere Stromabweichung mit zunehmender Frequenz aufweisen. Am markantesten ist aber wiederum, dass die Spulen vom Typ 3 die geringste frequenzabhängige Zunahme bei der mittleren Stromabweichung aufweisen. Da bei der Stromzangenmessung der Gleichstromwiderstand nicht mit in die Graphen einfließt, liegen die Verläufe für 10 und 16 Drähte etwa gleichauf.

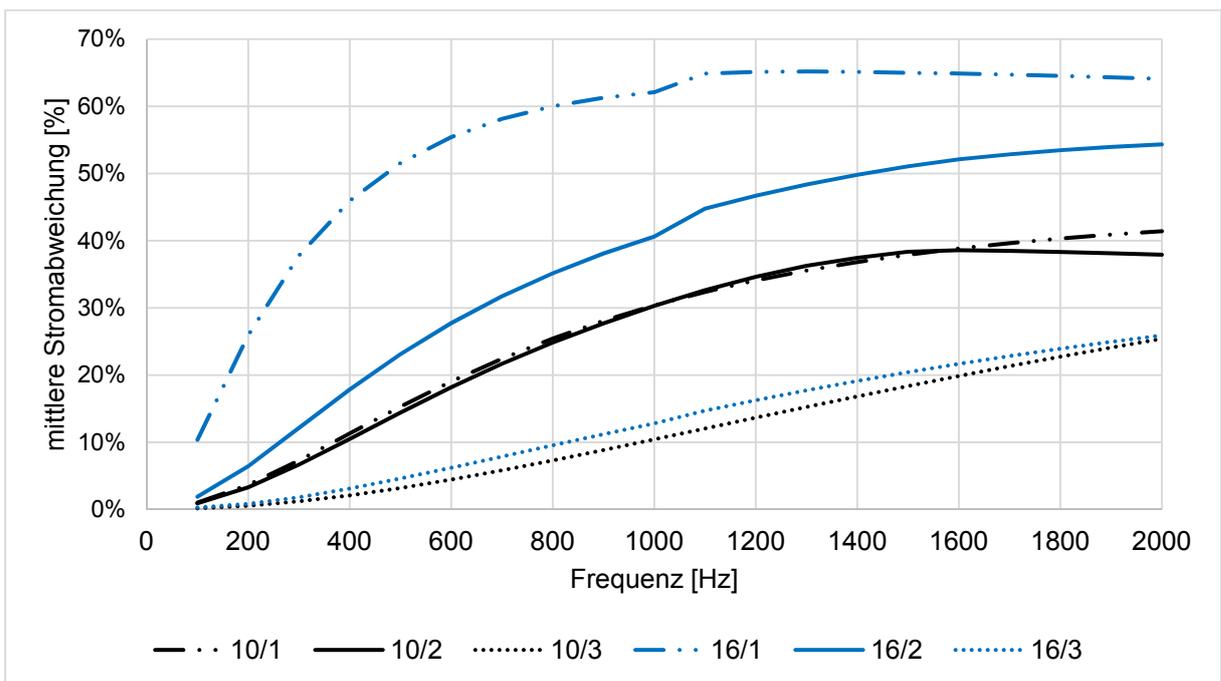


Abbildung 7-22: Ausschnitt 10 und 16 Drähte aus Abbildung 7-20

Betrachtet man abschließend nochmals die Gesamtheit der in Abbildung 7-20 dargestellten Graphen, so lässt sich analog zu den LCR-Messungen feststellen, dass die Wicklungen vom Typ 3 und 5 durchweg die geringste Zunahme der mittleren Stromabweichung aufweisen und auf einem ähnlichen Niveau verlaufen. Lediglich bei 16 parallelen Drähten ist beim Typ 5 eine außergewöhnlich hohe mittlere Stromabweichung zu verzeichnen, die allerdings, wie bereits vorangegangene Messungen gezeigt haben, auf eine Beschädigung der Spulen zurückzuführen ist.

### 7.2.1 Bewertung der Streuung der gemessenen Spulen

Wie bereits bei der LCR-Messung werden die ausgewerteten Spulenpaare nochmals einander gegenübergestellt, um die Reproduzierbarkeit der im Versuchsstator verbauten Spulen zu bewerten. Hierzu sind in Abbildung 7-23 die Graphen für jeweils zwei identisch hergestellte Spulen dargestellt, welche mit *a* und *b* gekennzeichnet sind.

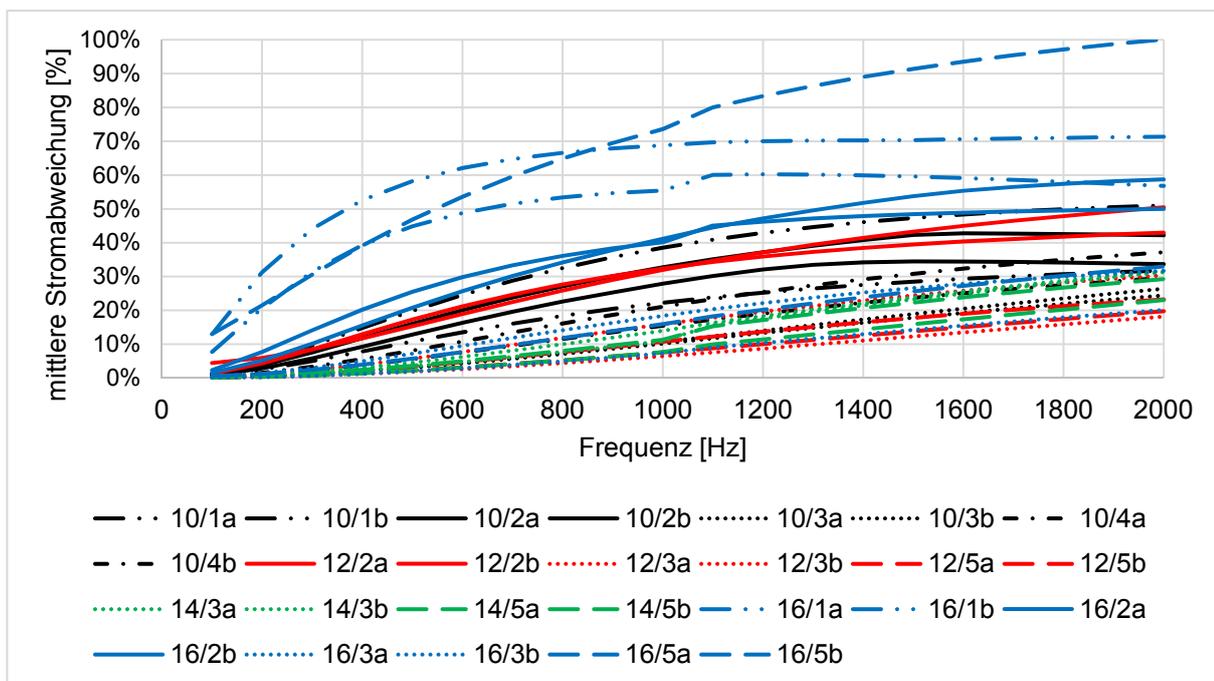


Abbildung 7-23: Einzelmessungen der mittleren Stromabweichung

Nachdem, wie bereits erläutert, mit 16 parallelen Drähten nicht alle Wicklungstypen zuverlässig hergestellt werden können, werden im Folgenden exemplarisch die Spulen mit der minimalen Drahtanzahl 10 und mit der gerade noch zuverlässig herstellbaren Drahtanzahl 14 gegenübergestellt. Entgegen den Feststellungen bei der LCR-Messung zeigt die vorliegende Stromzangenmessung bei den unverdrillten Spulen (10/1a und 10/1b) sowie bei den nur zwischen den Spulenpaaren verdrillten Spulen (10/2a und 10/2b) signifikante Unterschiede im Verlauf der paarweise identisch hergestellten Spulen. Da die abgebildete mittlere Stromabweichung eine Akkumulation der Abweichungen der Einzeldrähte darstellt, ist die

Abweichung darin begründet, dass bei großen Abweichungen vom Mittelwert die Streuung bei der mittleren Stromabweichung größer wird. Wie schon bei der LCR-Messung festgestellt wurde, zeigt die Stromzangenmessung ebenso die beste Reproduzierbarkeit sowie eine sehr geringe Stromverdrängung für alle Spulen des Typs 3. Betrachtet man die Spulenpaare vom Typ 4 und 5 (10/4a, 10/4b, 14/5a und 14/5b), so lässt sich erkennen, dass gegenüber dem Typ 3 die Graphen bereits weiter auseinander liegen. Offensichtlich kommen an dieser Stelle die fertigungsbedingten Abweichungen zum Tragen, die sich durch die komplexere Fertigung der zahlreichen Verdrillungen und damit verbundenen Fertigungstoleranzen hinsichtlich der Lagegenauigkeit der Drähte ergeben.

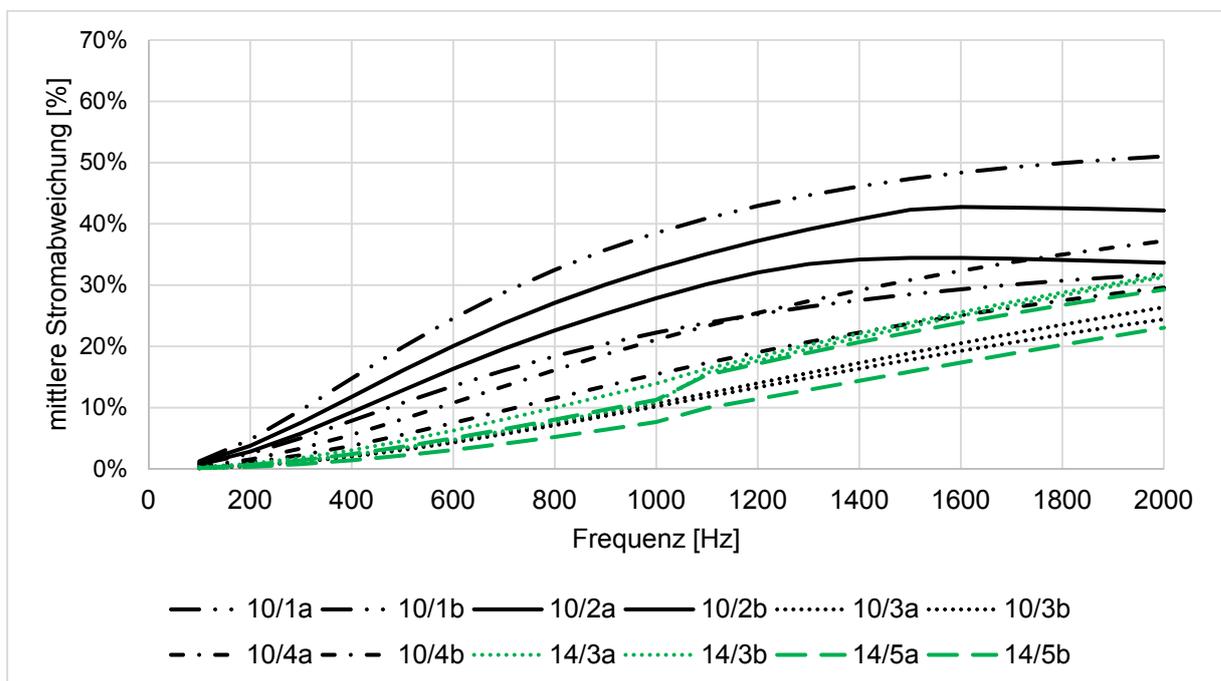


Abbildung 7-24: Auszug 10 und 14 Drähte aus Abbildung 7-23

Beim Vergleich der Messungen mit 16 parallelen Drähten in Abbildung 7-25 zeigt sich, dass die Spule 16/5b sehr stark abweicht, was nochmals auf eine Beschädigung der Spule und somit auf die Grenze der Herstellbarkeit dieses Spulentyps hinweist. Weiterhin stellt sich auch bei 16 Drähten der Typ 3 als am besten geeignet heraus. Die Verbesserung von Typ 1 bis Typ 3 entspricht den Erwartungen.

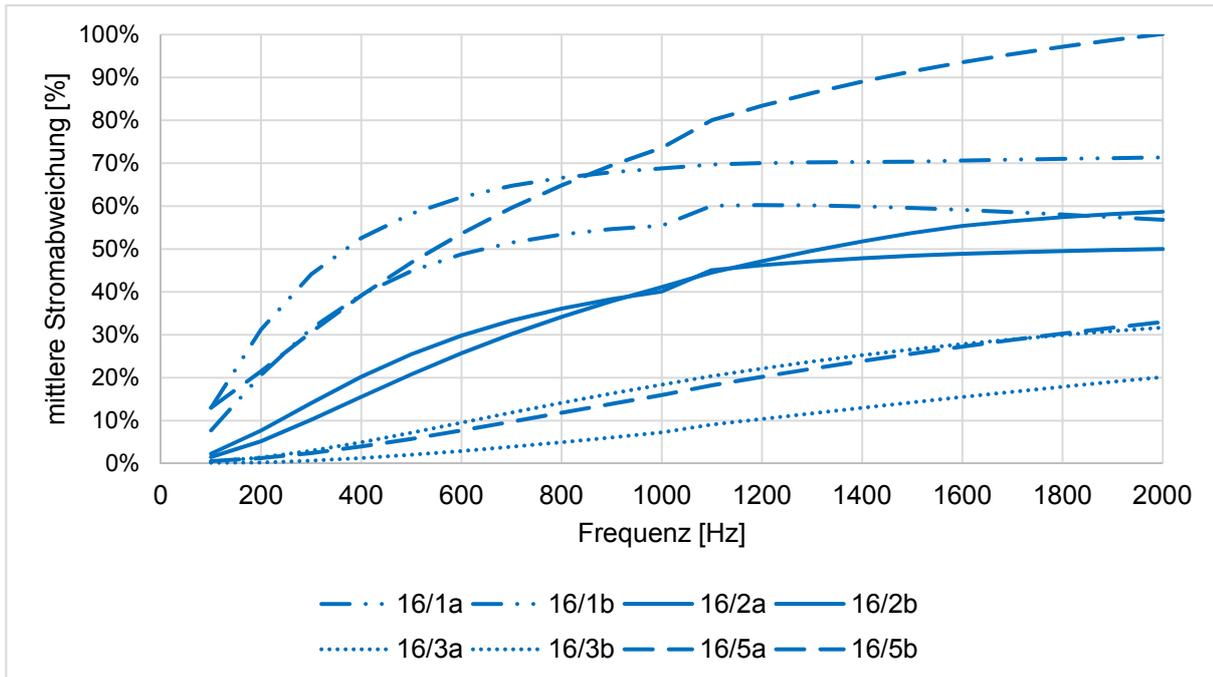


Abbildung 7-25: Auszug 16 Drähte aus Abbildung 7-23

Zusammenfassend lässt sich demnach feststellen, dass mit der gewählten Auswertemethode für die Stromzangenmessung Spulen mit 14 parallelen Drähten vom Typ 3 die geringste Stromverdrängung erwarten lassen. Zudem können für jedes Messprinzip spezifische Effekte herausgearbeitet werden, die grundlegenden Aussagen sind jedoch deckungsgleich.

### 7.3 Fazit zur LCR-Messung und Stromzangenmessung

Betrachtet man die Gesamtheit der Messungen, so lässt sich zeigen, dass die beiden gewählten Messprinzipien zuverlässig zu übereinstimmenden Aussagen führen. Mit den vorgeschlagenen Auswertemethoden ist es somit möglich, einzelne Spulen relativ zueinander zu bewerten.

Der Fokus liegt hierbei auf den Auswirkungen der durch das Nutquerfeld verursachten Stromverdrängung über den gesamten Betriebsbereich des Motors. Je nach gewählter Mess- und Auswertemethode werden hierzu unterschiedliche physikalische Effekte genutzt und ausgewertet, was zu unterschiedlichen Gewichtungen der sich überlagernden und gegenseitig beeinflussenden Effekte führt.

Mit den dargestellten Messverfahren ist es möglich, unterschiedliche Fertigungsverfahren bereits in einer sehr frühen Phase anhand einzelner Spulen relativ zueinander zu vergleichen. Dies ermöglicht die Bewertung von fertigungstechnischen Variationen, für die ansonsten voll funktionsfähige Prototypen aufgebaut sowie zeit- und kostenintensive Prüfstandversuche durchlaufen werden müssten.

Mit Hilfe der vorgestellten Methodik konnte zusammenfassend gezeigt werden, dass:

- lediglich die Erhöhung des Nutfüllgrades (Demonstrator gegenüber Referenzstator) nur bis zu einer Frequenz von etwa 220 Hz zu einer geringfügigen Verbesserung führt und darüber die Verluste durch den gezahnten Stator und die manuelle Einbringung der Spulen überwiegen,
- die gewählte, vorwiegend manuelle Fertigungskette zu größeren Streuungen als der Serienprozess führt,
- ab etwa 400 Hz der Gleichstromwiderstand nur noch eine untergeordnete Rolle spielt und dieser aufgrund der erforderlichen Normierungen bei der Stromzangenmethode nicht direkt auswertbar ist und somit nur bei der LCR-Messung betrachtet werden kann,
- eine zunehmende Verdrillung der parallelen Drähte die Verluste bei hohen Frequenzen deutlich reduzieren kann,
- bei den gegebenen Randbedingungen Spulen mit 16 parallelen Drähten, welche innerhalb der Nut verdrillt sind, nicht mehr zuverlässig herstellbar sind,
- Spulen mit einer Verdrillung nach jedem Nutdurchgang in nur einem der beiden Wickelköpfe (Typ 3) die Verluste so stark reduzieren, dass eine weitere Verdrillung (Typ 4 und Typ 5) keine signifikante Verbesserung erzielt,
- bei der gewählten Fertigungsstrategie Spulen mit 14 parallelen Drähten vom Typ 3 den besten Kompromiss hinsichtlich der Reproduzierbarkeit bei der Herstellung und Verlustminimierung darstellen und
- diese prinzipiell sogar in den Referenzstator eingezogen werden könnten, was sowohl die Verluste als auch die Fertigungskosten reduzieren würde.



## 8 Zusammenfassung und Ausblick

Basierend auf der Idee die Potenziale von segmentierten Formstäben und verdrehten Litzen mit einfachen Runddrahtwicklungen abzubilden, wurde zunächst der Nachweis der Machbarkeit erbracht, anschließend eine entsprechende Fertigungskette entwickelt und aufgebaut sowie zwei Messmethoden inklusive Auswertemethodik qualifiziert, die eine Bewertung der untersuchten Variationen ermöglichen.

Nach Analyse der Randbedingungen, praktischen Vorversuchen, deren Abbildung in einem FEM-Simulationsmodell und der Auswahl geeigneter Messprinzipien wurde eine Fertigungskette mit den Prozessschritten Wickeln, Umformen (inklusive Beheizen) und Montieren für die Herstellung der zu untersuchenden Spulen aufgebaut. Damit konnten in der vorliegenden Arbeit fertigungstechnische Variationen hinsichtlich der Anzahl parallel geführter Drähte und deren Verdrehung untersucht werden.

Die entwickelte Fertigungskette ermöglicht es, unterschiedlichste Spulentypen sehr flexibel zu wickeln, anschließend annähernd beliebig stark umzuformen und mit Backlack zu verkleben. Für die durchgeführten Versuche konnten die Spulen so stark umgeformt werden, dass jede Variante im gleichen Messstator montiert und vermessen werden konnte. Somit konnte nachgewiesen werden, dass es fertigungstechnisch möglich ist, Spulen ausreichend stark umzuformen. Zugleich konnte anhand der gewählten Messverfahren die aus elektrotechnischer Sicht sinnvolle Grenze für die maximale Verdrehung und Verpressung identifiziert werden. Zudem konnten die Auswirkungen der notwendigen konstruktiven Änderungen am Statorblechpaket identifiziert werden. Der aufgebaute Demonstrator bestätigt die Machbarkeit der gewählten Prozesskette. Die untersuchten fertigungstechnischen Variationen im Versuchsstator konnten die zusätzlichen Verluste des gezahnten Messstators gegenüber dem Referenzstator teils überkompensieren.

Zusammenfassend lässt sich demnach zeigen, dass bei den gewählten Randbedingungen Spulen mit 14 parallelen Drähten und einer Verdrehung in einem der beiden Wickelköpfe (Typ 3) die besten Ergebnisse erzielen. Gegenüber eingezogenen Wicklungen ist jedoch bei der untersuchten Fertigungsstrategie ein fertigungstechnischer Mehraufwand erforderlich. Im speziellen Fall der vorgeschlagenen nur einseitig verdrehten Spulen wäre aber ein konventioneller Einziehprozess zur Montage der Spulen denkbar, sofern auf den erhöhten Nutzfüllgrad durch das Verpressen verzichtet werden kann. Sowohl die Fertigungskosten als auch die Verluste wären damit sehr gering.

Da die Maschinendesigns an die eingesetzten Fertigungsverfahren angepasst werden, sind die durch die Referenzmaschine gegebenen Randbedingungen nicht ideal für die betrachteten

verdrillten Formspulen geeignet. So wären Statorbauweisen, die das radiale Fügen begünstigen und einfache Wickelschemata besitzen, die die Prozessintegration von Wickeln, Umformen und Verkleben ermöglichen, deutlich einfacher umsetzbar und somit wirtschaftlicher. Ebenso wäre es möglich, Maschinen zu designen, die hinsichtlich der Potenziale und Randbedingungen verpresster Spulen optimiert sind. Damit könnten neue Konzepte für kompakte Antriebe mit hoher Effizienz über große Drehzahlbereiche entwickelt werden, da durch den hohen Nutfüllgrad ein effizientes Anlaufen ermöglicht wird und durch die Verdrillung geringe Stromverdrängungsverluste bei hohen Drehzahlen auftreten.

Mit der Qualifikation der beiden Messmethoden konnte ein Beitrag geleistet werden, die Auswirkungen fertigungstechnischer Einflüsse auf das Betriebsverhalten elektrischer Maschinen anhand praktischer Versuche und Messungen insbesondere hinsichtlich der Stromverdrängung abbilden zu können und so für das produktionstechnische Umfeld besser abschätzbar zu machen. Hervorzuheben ist hierbei, dass für beide vorgestellte Messverfahren nicht die im Betrieb herrschenden Ströme, Spannungen und Leistungen erforderlich sind. Somit sind verhältnismäßig einfache Versuchsaufbauten ohne Berührschutz mit üblichen Labormessgeräten möglich. Die Skalierung der angewandten Messmethoden auf die realen Betriebsbedingungen des Motors wäre eine mögliche zukünftige Aufgabenstellung für die Elektrotechnik. Mit dieser Kenntnis könnten letztendlich absolute, quantitative Messgrößen abgeleitet werden, die das Verlustverhalten der Maschine beschreiben.

Aufgrund der starken Abhängigkeit des Verlustverhaltens von der Frequenz ist die Auslegung von Elektromaschinen über realistische Frequenzbereiche elementar. Gerade das Anlaufverhalten, welches im innerstädtischen Verkehr häufig vorkommt, ist maßgeblich von den Gleichstromverlusten und somit vom Kupferquerschnitt beeinflusst. Bei höheren Drehzahlen hingegen überwiegen die Wechselstromverluste, denen besser mit geschickt gewählten Verdrillungen zu begegnen ist. Eine Kombination aus Nutfüllgraderhöhung und Verdrillung ist bis zu einem gewissen Grad möglich und sollte unbedingt angestrebt werden. Jedoch, insbesondere wenn Leichtbauansätze beim Maschinendesign zum Tragen kommen, sind zur Steigerung der Leistungsdichte hohe Drehzahlen und Frequenzen erforderlich. Hierbei sind hohe Kupferquerschnitte aufgrund der großen Masse eher hinderlich und nützen nur beim Anlaufen. Bei höheren Anregungsfrequenzen wird demnach der Einfluss der betrachteten Verluste noch zunehmen.

Darüber hinaus müsste der Zusammenhang hergestellt werden, wie sich Fahrzyklen auf die untersuchte Anregungsfrequenz auswirken, sodass die Verluste gewichtet werden können, um die Effizienz des Fahrzeuges im realen Einsatz und nicht nur des Motors in einem Betriebspunkt bereits bei der Herstellung der Spulen optimieren zu können. Insbesondere der Einsatz von

Elektrofahrzeugen im Stadtverkehr widerspricht einer Maschinenauslegung für hohe Drehzahlen. Diesem Dilemma könnte mit Schaltgetrieben begegnet werden, für deren optimale Auslegung aber wiederum der geforderte Zusammenhang zwischen Fahrleistung und Anregungsfrequenz sowie die oben genannte Skalierung der Spannung und des Stroms erforderlich sind. Ohne den Einsatz von Schaltgetrieben könnten verdrillte und verpresste Spulen zu geringen Verlusten über große Drehzahlbereiche beitragen. Für eine wirtschaftliche Umsetzung ist aber das Stator-Design gegenüber eingezogenen Wicklungen anzupassen.

Die gewonnenen Erkenntnisse bezüglich der Auswirkungen von unterschiedlich verdrillten Formspulen und deren Messung an einzelnen Spulen leisten somit einen Beitrag für die Entwicklung zukünftiger E-Antriebe mit hohen Drehzahlen. Da die Modelle für die Auslegung von E-Maschinen maßgebliche fertigungsbedingte Einflüsse derzeit noch nicht ausreichend abbilden können, sind signifikante Effizienzsteigerungen eher im Bereich der Produktionstechnik zu erwarten. Hierfür ist ein fundiertes Wissen über die Prozesse, die elektromagnetischen Zusammenhänge und die Messung der Verluste gleichermaßen erforderlich.



## A Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1: Elektromagnetische Wechselwirkung eines stromdurchflossenen Leiters (nach Kories und Schmidt-Walter, 2010) .....	6
Abbildung 2-2: Ersatzschaltbild realer Spulen (nach Steudler, 2004).....	9
Abbildung 2-3: Prinzipdarstellung einer LCR-Messbrücke .....	10
Abbildung 2-4: Funktionsprinzip von Wechselstrom- und Allstrommesszangen (nach Fischer und Linse, 2009).....	11
Abbildung 2-5: Gleichstrommaschine (nach Kories und Schmidt-Walter, 2010) .....	12
Abbildung 2-6: Synchronmaschine (nach Kories und Schmidt-Walter, 2010).....	14
Abbildung 2-7: Asynchronmaschine (nach Kories und Schmidt-Walter, 2010).....	15
Abbildung 2-8: Leitersystem eines Käfigläufers (nach Fuest und Döring, 2000).....	16
Abbildung 2-9: Elektromechanische Energiewandlung am Beispiel eines Hubmagneten (nach Gloor, 2010; Gerling, 2016).....	17
Abbildung 2-10: Rotorblech einer Synchron-Reluktanzmaschine (nach Gloor, 2010; Gerling, 2016) .....	18
Abbildung 2-11: Rotor einer Hybridsynchronmaschine (nach Merwerth, 2014).....	18
Abbildung 2-12: Fertigungskette eines Stators (nach Risch et al., 2016) .....	19
Abbildung 2-13: Dynamische Hystereseschleife (nach Schoppa, 2001).....	20
Abbildung 2-14: Aufbau eines Leiters für Wickelgüter (nach Hagedorn, Sell-Le Blanc und Fleischer, 2016).....	23
Abbildung 2-15: Schematische Darstellung eines Roebelstabes (nach Müller, Vogt und Ponick, 2008) .....	24
Abbildung 2-16: Montage und Schweißen eines Hairpinstators (Sherman, 2011) .....	24
Abbildung 2-17: Kinematik der Wickelverfahren (nach Hagedorn, Sell-Le Blanc und Fleischer, 2016).....	26
Abbildung 2-18: Vorrichtung zum Linearwickeln .....	27
Abbildung 2-19: Einziehmaschine der Otto Rist GmbH & Co. KG (nach Risch et al., 2016) .....	27
Abbildung 2-20: Phasen des Einziehens von Spulen (nach Tzscheutschler, Olbrisch und Jordan, 1990).....	28
Abbildung 2-21: Einsetzen von Treufelspulen (nach Tzscheutschler, Olbrisch und Jordan, 1990).....	28
Abbildung 2-22: Skin-Effekt (nach Biela, 2012) .....	34
Abbildung 2-23: Proximity-Effekt (nach Biela, 2012).....	35
Abbildung 2-24: Stromdichte aufgrund des Proximity-Effekts (nach Biela, 2012).....	36

Abbildung 2-25: Schematischer Feldverlauf und Stromdichte bezogen auf die Nutlänge (Vogt und Volk, 2014b).....	37
Abbildung 3-1: Struktur der Arbeit.....	40
Abbildung 4-1: CAD-Modell der realen und der angenäherten Nutgeometrie.....	42
Abbildung 4-2: CAD-Modell des Vorversuchswerkzeugs .....	42
Abbildung 4-3: Spannrahmen a) mit Vorversuchswerkzeug b) und c) (nach Vogt und Volk, 2014a, 2014b) .....	43
Abbildung 4-4: Versuche mit Einzeldrähten (nach Vogt und Volk, 2014a, 2014b).....	44
Abbildung 4-5: Loses Drahtbündel.....	45
Abbildung 4-6: a) Draufsicht, b) Seitenansicht, c) Probenentnahme und d) Schlitze eines verdrehten Drahtbündels (nach Vogt und Volk, 2014a, 2014b).....	45
Abbildung 4-7: Prinzipdarstellung einer integrierten Windungsisolation .....	47
Abbildung 4-8: Verdrillung in der Simulation.....	48
Abbildung 4-9: Verpressung in der Simulation .....	49
Abbildung 4-10: Schematische Abbildung der Nutgeometrie im Werkzeug .....	51
Abbildung 4-11: Montage einer gebogenen Spule.....	52
Abbildung 4-12: Praktischer Versuch mit gebogenem Wickelkopf .....	53
Abbildung 5-1: Schematische Darstellung der Wickelvorrichtung (nach Kraller, 2015).....	55
Abbildung 5-2: Wickelvorrichtung mit 12 parallelen Drähten .....	56
Abbildung 5-3: Wickelschablone und Drahtführung (nach Kraller, 2015) .....	57
Abbildung 5-4: Abwicklung des Statorsegments einer Spule (nach Betz, 2014) .....	58
Abbildung 5-5: Entwurf mit vertikaler Umformrichtung (nach Betz, 2014).....	59
Abbildung 5-6: Entwurf mit horizontaler Umformrichtung und Schiebern (nach Betz, 2014).....	59
Abbildung 5-7: Entwurf mit horizontaler Umformrichtung und Keilen (nach Betz, 2014).....	60
Abbildung 5-8: Definition der Nutgeometrie für das Werkzeug (nach Betz, 2014).....	61
Abbildung 5-9: Schematische Anordnung der Werkzeugaktivelemente für die vertikale Anordnung .....	63
Abbildung 5-10: CAD-Zeichnung von Steg 2 (nach Betz, 2014).....	64
Abbildung 5-11: CAD-Zeichnung von Steg 3 (nach Betz, 2014).....	64
Abbildung 5-12: CAD-Zeichnung und Schnitt des Werkzeugzusammenbaus (nach Betz, 2014).....	65
Abbildung 5-13: Schnittdarstellung des Werkzeugs (nach Betz, 2014) .....	66
Abbildung 5-14: Montiertes Versuchswerkzeug mit Spule .....	66
Abbildung 5-15: Spule mit Isolationspapier im Versuchswerkzeug.....	67

Abbildung 5-16: Abisolierpinzette und Presszange mit Rohrkabelschuhen .....	69
Abbildung 5-17: Versuchsaufbau mit Heizvorrichtung und Universalprüfmaschine .....	69
Abbildung 5-18: Strom- und Spannungsverlauf der Gleichstromquelle .....	70
Abbildung 5-19: Screenshot des LabVIEW-Programms zu Steuerung der Heizvorrichtung (nach Serkyov, 2015) .....	73
Abbildung 5-20: Verbackene Spule (nach Serkyov, 2015) .....	74
Abbildung 5-21: Vorrichtung zum Biegen und Testen der Montage .....	75
Abbildung 5-22: Schematische Darstellung und Funktionsmuster der Zahnverbindung.....	76
Abbildung 5-23: Montagevorrichtung zum Fügen der Zähne .....	76
Abbildung 5-24: Montage des gezahnten Stators .....	77
Abbildung 5-25: Vereinfachte Darstellung des automatischen Brückenabgleichs (nach Keysight Technologies Inc., 2016) .....	79
Abbildung 5-26: k-Wert über der Frequenz (nach Vogt, Kraller und Volk, 2015).....	82
Abbildung 5-27: Phasenwinkel über der Frequenz (nach Vogt, Kraller und Volk, 2015).....	82
Abbildung 5-28: Reaktanz über der Frequenz (nach Vogt, Kraller und Volk, 2015) .....	83
Abbildung 5-29: Resistanz über der Frequenz (nach Vogt, Kraller und Volk, 2015).....	83
Abbildung 5-30: Stromzangenmessung (nach Vogt und Volk, 2014b, 2014a).....	84
Abbildung 5-31: Oszillographische Abbildung von Eingangsspannung und Stromstärke ....	85
Abbildung 5-32: Stromverläufe für 12 parallele Drähte.....	86
Abbildung 5-33: Summe der Einzelströme (rot) und gemessener Gesamtstrom (schwarz)....	86
Abbildung 5-34: Messplatz für die Stromzangenmessung .....	87
Abbildung 5-35: LabVIEW-Programm zur Stromzangenmessung (nach Serkyov, 2015) ....	88
Abbildung 5-36: Stromstärken in den Einzeldrähten über der Frequenz .....	89
Abbildung 5-37: Gemessene und berechnete Summenströme .....	90
Abbildung 5-38: Prozentuale Stromabweichung vom Mittelwert.....	91
Abbildung 5-39: Mittlere Stromabweichung einer Spule.....	92
Abbildung 6-1: Schematische Darstellung eines Spulenpaares (nach Vogt, Kraller und Volk, 2015) .....	93
Abbildung 7-1: Referenzstator .....	97
Abbildung 7-2: Resistanz von Referenz und Demonstrator .....	98
Abbildung 7-3: Induktivität von Referenz und Demonstrator.....	98
Abbildung 7-4: Resistanz von Referenz und Spulen im gezahnten Stator.....	99
Abbildung 7-5: Phasenwinkel von Referenz und Spulen im gezahnten Stator .....	100
Abbildung 7-6: Mittelwerte der Resistanz der gemessenen Spulenarten .....	101
Abbildung 7-7: Ausschnitt 0 Hz bis 400 Hz aus Abbildung 7-6.....	102
Abbildung 7-8: Ausschnitt 10 und 16 Drähte aus Abbildung 7-6 .....	103

---

Abbildung 7-9: Phasenwinkel der gemessenen Spulenarten .....	104
Abbildung 7-10: Einzelmessungen der Resistanz.....	105
Abbildung 7-11: Auszug 10 und 14 Drähte aus Abbildung 7-10 .....	106
Abbildung 7-12: Auszug 16 Drähte aus Abbildung 7-10 .....	107
Abbildung 7-13: Mittelwerte der Stromabweichung von Referenz und Demonstrator.....	108
Abbildung 7-14: Mittlere Stromabweichung Referenz.....	109
Abbildung 7-15: Mittlere Stromabweichung Demonstrator .....	109
Abbildung 7-16: Stromabweichung Demonstrator Spule 6 .....	110
Abbildung 7-17: Stromabweichung Demonstrator Spule 9 .....	111
Abbildung 7-18: Gemessener und berechneter Gesamtstrom von Spule 9.....	112
Abbildung 7-19: Mittlere Stromabweichung Referenz und Spulen im gezahnten Stator.....	113
Abbildung 7-20: Mittlere Stromabweichung der gemessenen Spulen.....	114
Abbildung 7-21: Ausschnitt 100 Hz bis 600 Hz aus Abbildung 7-20 .....	115
Abbildung 7-22: Ausschnitt 10 und 16 Drähte aus Abbildung 7-20 .....	115
Abbildung 7-23: Einzelmessungen der mittleren Stromabweichung.....	116
Abbildung 7-24: Auszug 10 und 14 Drähte aus Abbildung 7-23 .....	117
Abbildung 7-25: Auszug 16 Drähte aus Abbildung 7-23 .....	118

## **B Tabellenverzeichnis**

Tabelle 2-1:	Anwendungsbeispiele für die üblichen Schneidverfahren von Elektrobandlamellen (nach Schoppa, 2001) .....	21
Tabelle 2-2:	Anwendungsbeispiele für die üblichen Befestigungsverfahren von Elektrobandlamellen (nach Schoppa, 2001) .....	22
Tabelle 2-3:	Allgemeine Bezeichnungen von am Energieumsatz beteiligten Wicklungen (nach Müller, Vogt und Ponick, 2008) .....	25
Tabelle 2-4:	Isolierstoffklassen (nach DIN EN 60085).....	30
Tabelle 2-5:	Bewertung des Einflusses verschiedener Verarbeitungsschritte auf das Magnetisierungsverhalten des schlussgeglühten, nichtkornorientierten Elektrobandes (nach Schoppa, 2001) .....	32
Tabelle 2-6:	Bewertung des Einflusses verschiedener Verarbeitungsschritte auf das Verlustverhalten des schlussgeglühten, nichtkornorientierten Elektrobandes (nach Schoppa, 2001).....	32
Tabelle 4-1:	Herausforderungen und Lösungsansätze.....	53
Tabelle 5-1:	Entscheidungsmatrix für das Werkzeugkonzept (nach Betz, 2014) .....	61
Tabelle 5-2:	Ausgewählte Temperaturkoeffizienten bei 0°C (nach Hering, Bressler und Gutekunst, 2017) .....	71
Tabelle 6-1:	Schema für Farben und Linien .....	94
Tabelle 6-2:	Versuchsplan .....	96



## C Literaturverzeichnis

DIN EN 60404-6:2004, *Magnetische Werkstoffe - Teil 6: Verfahren zur Messung der magnetischen Eigenschaften weichmagnetischer und pulverförmiger Werkstoffe bei Frequenzen im Bereich 20 Hz bis 200 kHz mit Hilfe von Ringproben*, Beuth Verlag GmbH, Berlin.

DIN VDE 0100:2007, *Errichten von Niederspannungsanlagen*, Beuth Verlag GmbH, Berlin.

DIN EN 60085:2008, *Elektrische Isolierung - Thermische Bewertung und Bezeichnung*, Beuth Verlag GmbH, Berlin.

DIN EN 60404-2:2009, *Verfahren zur Bestimmung der magnetischen Eigenschaften von Elektroblech und -band mit Hilfe des Epsteinrahmens*, Beuth Verlag GmbH, Berlin.

DIN IEC 60404-3:2010, *Magnetische Werkstoffe - Teil 3: Verfahren zur Bestimmung der magnetischen Eigenschaften von Elektroband und -blech mit Hilfe eines Tafelmessgerätes*, Beuth Verlag GmbH, Berlin.

VERORDNUNG (EU) Nr. 168/2013 Art. 19:2013, *Verordnung (EU) Nr. 168/2013 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 15. Januar 2013 über die Genehmigung und Marktüberwachung von zwei- oder dreirädrigen und vierrädrigen Fahrzeugen (Text von Bedeutung für den EWR); Art. 19 – Verbot von Abschaltvorrichtungen*, Amtsblatt der Europäischen Union.

BAUER, D., REUSS, H.-C., NOLLE, E., 2014. *Einfluss von Stromverdrängung bei elektrischen Maschinen für Hybrid- und Elektrofahrzeuge*, Stuttgart, Tag des kooperativen Promotionskolleg Hybrid.

BERTH, M., 1998. *Elektrische Belastung der Wicklungsisolierung pulsumrichter gespeister Niederspannungsmotoren*, Düsseldorf, VDI-Verl. Fortschrittberichte VDI Reihe 21, Elektrotechnik. 247. ISBN 3-18-324721-6.

BERTOTTI, G., 1988. General properties of power losses in soft ferromagnetic materials [online]. *IEEE Transactions on Magnetics*, **24**(1), 621-630. ISSN 00189464. Verfügbar unter: doi:10.1109/20.43994

BETZ, M., 2014. *Konstruktion eines Umformwerkzeugs zum Verpressen von Kupferspulen für elektrische Traktionsantriebe*. Semesterarbeit, Garching bei München, Technische Universität München.

- BIELA, J., 2012. *Wirbelstromverluste in Wicklungen induktiver Bauelemente* [online] [Zugriff am: 27. November 2017]. Verfügbar unter: [https://www.hpe.ee.ethz.ch/uploads/tx\\_ethpublications/Magnetische\\_Bauelemente\\_A4.pdf](https://www.hpe.ee.ethz.ch/uploads/tx_ethpublications/Magnetische_Bauelemente_A4.pdf)
- BUSCH, R., 2011. *Elektrotechnik und Elektronik: für Maschinenbauer und Verfahrenstechniker*, Wiesbaden, Vieweg+Teubner. ISBN 978-3-8348-8170-0.
- CALLEGARO, L., 2016. *Electrical impedance. Principles, measurement and applications*, Boca Raton, CRC Press; Taylor & Francis Group. Series in Sensors. ISBN 978-1-4398-4910-1.
- CHAUVIN ARNOUX, 2003. *Bedienungsanleitung AC/DC Stromsonde* [online] [Zugriff am: 22. Dezember 2017]. Verfügbar unter: [http://www.chauvin-arnoux.com/sites/default/files/D00AZW62\\_26.PDF](http://www.chauvin-arnoux.com/sites/default/files/D00AZW62_26.PDF)
- CHAUVIN ARNOUX, 2017. *Datasheet AC/DC current probes K Series* [online] [Zugriff am: 22. Dezember 2017]. Verfügbar unter: [http://www.chauvin-arnoux.com/sites/default/files/HLHBDATY\\_0.PDF](http://www.chauvin-arnoux.com/sites/default/files/HLHBDATY_0.PDF)
- DEUTSCHES KUPFERINSTITUT BERUFSVERBAND E.V., 2005. *Werkstoff Datenblatt Cu-OFE -CW009A* [online] [Zugriff am: 13. Februar 2018]. Verfügbar unter: [https://www.kupferinstitut.de/fileadmin/user\\_upload/kupferinstitut.de/de/Documents/Shop/Verlag/Downloads/Werkstoffe/Datenblaetter/Kupfer/Cu-OFE.pdf](https://www.kupferinstitut.de/fileadmin/user_upload/kupferinstitut.de/de/Documents/Shop/Verlag/Downloads/Werkstoffe/Datenblaetter/Kupfer/Cu-OFE.pdf)
- DLALA, E., BELAHCEN, A., ARKKIO, A., 2010. On the Importance of Incorporating Iron Losses in the Magnetic Field Solution of Electrical Machines. *IEEE Transactions on Magnetism*, **46**, 3101-3104.
- DOPPELBAUER, M., 2017. *Die Erfindung des Elektromotors 1800-1854* [online] [Zugriff am: 12. Dezember 2017]. Verfügbar unter: <https://www.eti.kit.edu/1376.php>
- ELEKTRISOLA DR. GERD SCHILDBACH GMBH&CO. KG, 2017. *Backlackdraht* [online] [Zugriff am: 20. Januar 2017]. Verfügbar unter: <http://www.elektrisola.com/de/backlackdraht.html>
- FISCHER, R., LINSE, H., 2009. *Elektrotechnik für Maschinenbauer. Mit Elektronik, elektrischer Messtechnik, elektrischen Antrieben und Steuerungstechnik*. 13., überarb. und erw. Aufl, Wiesbaden, Vieweg + Teubner. Vieweg + Teubner Studium. ISBN 9783834807991.

FUEST, K., DÖRING, P., 2000. *Elektrische Maschinen und Antriebe*. 5. Auflage, Wiesbaden, Vieweg. ISBN 3-528-44076-7.

GERLING, D., 2016. *Elektrische Maschinen und Antriebe* [online] [Zugriff am: 14. Februar 2018]. Verfügbar unter: <https://www.unibw.de/eit61/studium/vorlesungen-uebungen/ema/vorlesung-ema>

GLOOR, R., 2010. *Maxwellkraft* [online] [Zugriff am: 14. Februar 2018]. Verfügbar unter: <http://www.energie.ch/maxwellkraft>

HAGEDORN, J., SELL-LE BLANC, F., FLEISCHER, J., 2016. *Handbuch der Wickeltechnik für hocheffiziente Spulen und Motoren*, Berlin, Heidelberg, Springer Berlin Heidelberg. ISBN 978-3-662-49210-9.

HAMEG INSTRUMENTS GMBH, 2011. *Datenblatt HM1008-2* [online] [Zugriff am: 12. Februar 2018]. Verfügbar unter: [https://cdn.rohde-schwarz.com/hameg-archive/data\\_de\\_HM1008\\_2.pdf](https://cdn.rohde-schwarz.com/hameg-archive/data_de_HM1008_2.pdf)

HENROTTE, F., HAMEYER, K., 2010. Modern Methods for Iron loss computation. In: R. KAWALLA und J. SCHNEIDER, Hg. *4th International Conference on Magnetism and Metallurgy*. Freiberg: Technische Universität Bergakademie Freiberg, S. 413.

HERING, E., K. BRESSLER und J. GUTEKUNST, Hg., 2017. *Elektronik für Ingenieure und Naturwissenschaftler*. 7. Aufl. 2017, Berlin, Heidelberg, Springer Verlag. ISBN 978-3-662-54213-2.

KASTEN, P., MOTTSCHELL, M., KÖPPEL, W., DEGÜNTHER, C., 2016. *Erarbeitung einer fachlichen Strategie zur Energieversorgung des Verkehrs bis zum Jahr 2050* [online] [Zugriff am: 13. Januar 2017]. Verfügbar unter: [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/377/publikationen/2016-11-10\\_endbericht\\_energieversorgung\\_des\\_verkehrs\\_2050\\_final.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/377/publikationen/2016-11-10_endbericht_energieversorgung_des_verkehrs_2050_final.pdf)

KEYSIGHT TECHNOLOGIES INC., 2014a. *Datasheet 34450A Multimeter* [online] [Zugriff am: 12. Februar 2018]. Verfügbar unter: <http://literature.cdn.keysight.com/litweb/pdf/5991-1133EN.pdf>

KEYSIGHT TECHNOLOGIES INC., 2014b. *Datenblatt 33521A Arbitrary Waveform Generator* [online] [Zugriff am: 12. Februar 2018]. Verfügbar unter: <http://literature.cdn.keysight.com/litweb/pdf/5990-5914EN.pdf>

- KEYSIGHT TECHNOLOGIES INC., 2014c. *Users Guide - Keysight E4980A/AL Precision LCR Meter* [online] [Zugriff am: 12. Februar 2018]. Verfügbar unter: <http://literature.cdn.keysight.com/litweb/pdf/E4980-90210.pdf>
- KEYSIGHT TECHNOLOGIES INC., 2016. *Impedance Measurement Handbook* [online]. *A guide to measurement technology and techniques*. 6th Edition [Zugriff am: 25. Januar 2018]. Verfügbar unter: <http://literature.cdn.keysight.com/litweb/pdf/5950-3000.pdf>
- KÖHRING, P., 2009. *Beitrag zur Berechnung der Stromverdrängung in Niederspannungsasynchronmaschinen mit Kurzschlussläufern mittlerer bis großer Leistung* [online]. Dissertation [Zugriff am: 12. Februar 2018]. Verfügbar unter: <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:bsz:105-qucosa-26689>
- KORIES, R., SCHMIDT-WALTER, H., 2010. *Taschenbuch der Elektrotechnik. Grundlagen und Elektronik*. 9., korrigierte Auflage, Frankfurt am Main, Harri Deutsch. ISBN 9783817118588.
- KRALLER, S., 2015. *Entwicklung eines Messkonzepts zur Quantifizierung von Verlusten umgeformter Spulen für effizientere E-Traktionsantriebe*. Bachelorarbeit, Garching bei München, Technische Universität München.
- KUCHLING, H., 2014. *Taschenbuch der Physik*. 21. Auflage, München, Carl Hanser Verlag. ISBN 9783446442184.
- LEICHT, A., ALBACH, M., SPANG, M., KUEBRICH, D., 2011. Current distribution in copper coils with parallel windings. In: *Proceedings of the 2011 14th European Conference on Power Electronics and Applications*, S. 1-8. ISBN 9781612841670.
- MERWERTH, J., 2014. *The hybrid-synchronous machine of the new BMW i3 & i8* [online]. UNIVERSITY LUND [Zugriff am: 14. Februar 2018]. Verfügbar unter: [http://hybridfordonscentrum.se/wp-content/uploads/2014/05/20140404\\_BMW.pdf](http://hybridfordonscentrum.se/wp-content/uploads/2014/05/20140404_BMW.pdf)
- MÜLLER, G., PONICK, B., 2006. *Grundlagen elektrischer Maschinen*. 9. völlig neu bearb. Auflage, Weinheim, Wiley-VCH. ISBN 9783527405244.
- MÜLLER, G., PONICK, B., 2009. *Theorie elektrischer Maschinen*. 6. völlig neu bearb. Auflage, Weinheim, Wiley-VCH. ISBN 9783527405268.
- MÜLLER, G., VOGT, K., PONICK, B., 2008. *Berechnung elektrischer Maschinen*. 6. völlig neu bearbeitete Auflage, Weinheim, Wiley-VCH.

RAU, G., STRÖBEL, R., 2004. *Die Metalle. Werkstoffkunde mit ihren chemischen und physikalischen Grundlagen*. 19. inhaltlich unveränderte Auflage, München, Neuer Merkur. ISBN 3929360446.

RISCH, F., SCHILP, H., SCHLAG, P., BECKMÖLLER, S., KEHL, N., HALDER, H., RÖSLER, C., SCHUSTER, C., AMESÖDER, S., BICKEL, B., SCHNEIDER, M., VOGT, S., LINGAUER, A., 2016. *Hochflexible Produktionssysteme für effizienzgesteigerte E-Traktionsantriebe (HeP-E)*, Frankfurt am Main, Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau e.V.

SCHOPPA, A.P., 2001. *Einfluss der Be- und Verarbeitung auf die magnetischen Eigenschaften von schlussgeglühtem, nichtkornorientiertem Elektroband*. Dissertation, Aachen, Technische Hochschule Aachen.

SEQUENZ, H., 1950. *Die Wicklungen elektrischer Maschinen*, Vienna, Springer Vienna. ISBN 978-3-7091-3230-2.

SERKYOV, I., 2015. *Quantifizierung der Stromverdrängung zur Verlustminimierung in Traktionsmotoren für Elektrofahrzeuge*. Bachelorarbeit, Garching bei München, Technische Universität München.

SHERMAN, D., 2011. *We Build the Chevy Spark EV's AC Permanent-Magnet Motor* [online] [Zugriff am: 28. Februar 2018]. Verfügbar unter: <https://blog.caranddriver.com/we-build-the-chevy-spark-evs-ac-permanent-magnet-motor/>

STEENTJES, S., FRANCK, D., HAMEYER, K., VOGT, S., BEDNARZ, M., VOLK, W., DIERDORF, J., HIRT, G., SCHNABEL, V., MATHUR, H.N., KORTE-KERZEL, S., 2014a. On the effect of material processing: microstructural and magnetic properties of electrical steel sheets. In: *2014 4th International Electric Drives Production Conference (EDPC)*. Nuremberg.

STEENTJES, S., HAMEYER, K., BEDNARZ, M., VOGT, S., VOLK, W., DIERDORF, J., HIRT, G., 2014b. Influence of material processing steps annealing and cutting on magnetic materials' properties relevant for electrical machine design. In: *6th Forming Technology Forum*. Herrsching.

STEUDLER, K., 2004. *RLC Messung* [online]. *Grundlagen der Impedanzmessung* [Zugriff am: 27. Januar 2017]. Verfügbar unter: [http://www.steudler.ch/kurt/Elektro/Labor/EB02\\_RLC\\_Messung.pdf](http://www.steudler.ch/kurt/Elektro/Labor/EB02_RLC_Messung.pdf)

BRUSA ELEKTRONIK AG. Formlitze, deren verwendung, sowie verfahren zur herstellung eines stators für eine elektrische maschine. Erfinder: M. STÖCK. Anmeldung: 2015. WO2015162586 A2.

STÖCK, M., 2016. *Steigerung der Leistungsdichte und der Wirtschaftlichkeit von Elektromotoren für atomotive Fahrtriebe*. Diss. Nr. 23292, ETH Zürich.

STÖCK, M., LOHMEYER, Q., MEBOLDT, M., 2015. Increasing the Power Density of e-motors by Innovative Winding Design [online]. *Procedia CIRP*, **36**, 236-241. ISSN 22128271. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.procir.2015.01.078

SUPERIOR ESSEX INC., 2010. *Datasheet Magnetemp CA-200* [online] [Zugriff am: 12. Februar 2018]. Verfügbar unter: [http://www.essexeuropa.com/uploadedFiles/EssexEurope/Products/Energy\\_Wires/MAGNET\\_EMP%20CA-200.pdf](http://www.essexeuropa.com/uploadedFiles/EssexEurope/Products/Energy_Wires/MAGNET_EMP%20CA-200.pdf)

TDK-LAMBDA, 2017a. *Datasheet Genesys 3.3kW* [online] [Zugriff am: 15. November 2017]. Verfügbar unter: <https://de.tdk-lambda.com/KB/GenesysTM-3-3kW-2U-Datasheet.pdf>

TDK-LAMBDA, 2017b. *User Manual Genesys 3.3kW* [online] [Zugriff am: 15. November 2017]. Verfügbar unter: <https://de.tdk-lambda.com/KB/GenesysTM-2U-3-3kW-Series-User-Manual.pdf>

TZSCHEUTSCHLER, R., OLBRISCH, H., JORDAN, W., 1990. *Technologie des Elektromaschinenbaus*, Berlin, Verl. Technik. ISBN 3341008519.

UMWELT BUNDESAMT, 2016. *Elektromobilität volkswirtschaftlich klar im Vorteil* [online]. *Ziele des Klimaschutzplans nur mit Energiewende im Verkehr zu erreichen*. 2016 [Zugriff am: 13. Januar 2017]. Verfügbar unter: <http://www.umweltbundesamt.de/presse/presseinformationen/elektromobilitaet-volkswirtschaftlich-klar-im>

VOGT, S., KRALLER, S., VOLK, W., 2015. Effects of twisted windings on the impedance of e-traction drives. In: *2015 5th International Electric Drives Production Conference (EDPC). Proceedings : September 15th-16th , 2015, Nuremberg, Germany*: IEEE. ISBN 978-1-4673-7512-2.

VOGT, S., VOLK, W., 2014a. Segmented Hairpins Made of Metal Formed Round Wires. In: *Coiltech 2014 - World Magnetic Conference*. Pordenone: Quickfairs S.r.l.

---

VOGT, S., VOLK, W., 2014b. Umgeformte segmentierte Formstäbe für effizientere E-Traktionsantriebe. In: *münchener kolloquium - Produktionskongress*. Garching bei München: Bayern Innovativ GmbH.

WEISS, H.A., VOGT, S., BACKS, A., NEUWIRTH, T., STEENTJES, S., LEUNING, N., SCHULZ, P., VOLK, W., HAMEYER, K., BÖNI, P., 2017. Targeted Local Stress Imprint in Electrical Steel as Means of Improving the Energy Efficiency [online]. *4th Conference on X-ray and Neutron Phase Imaging with Gratings*. Verfügbar unter: <https://indico.psi.ch/getFile.py/access?resId=1&materialId=2&confId=5055>

WIEDEMANN, E., KELLENBERGER, W., 1967. *Konstruktion elektrischer Maschinen*, Berlin, Heidelberg, Springer Berlin Heidelberg.

WILHELM, S., MAYER, C.A., SCHULTE, U., FUNK, G.-U., BÖHM, F., 2011. *Elektromobilität in Deutschland - Praxisleitfaden : Aufbau einer öffentlich zugänglichen Ladeinfrastruktur für Genehmigungsbehörden und Antragsteller* [online] [Zugriff am: 11. Januar 2017]. Verfügbar unter: <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:kobv:109-opus-246384>



## **D Studienarbeiten**

Die nachfolgend aufgeführten Studienarbeiten wurden im Rahmen der vorliegenden Dissertation am Lehrstuhl für Umformtechnik und Gießereiwesen der Technischen Universität München angefertigt. Die Aufgabenstellung und Bearbeitung sowie die Auswertung, Interpretation und Darstellung von Ergebnissen erfolgten unter wissenschaftlicher Anleitung des Betreuers Simon Vogt. Die erzielten Ergebnisse sind zum Teil mit in diese Arbeit eingeflossen.

- Betz, M.: Konstruktion eines Umformwerkzeugs zum Verpressen von Kupferspulen für elektrische Traktionsantriebe. Semesterarbeit, Technische Universität München, 2014.
- Kraller, S.: Entwicklung eines Messkonzepts zur Quantifizierung von Verlusten umgeformter Spulen für effizientere E-Traktionsantriebe. Bachelorarbeit, Technische Universität München, 2015.
- Serkyov, I.: Quantifizierung der Stromverdrängung zur Verlustminimierung in Traktionsmotoren für Elektrofahrzeuge. Bachelorarbeit, Technische Universität München, 2015.