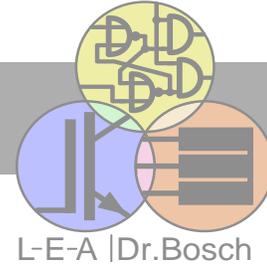


Dienstleistungen rund um den elektrischen Antrieb

Leistungs-Elektronik & Antriebe

Entwicklung — Schulung — Beratung



Untersuchung eines elektrischen Radnabenantriebs für Fahrräder

Version 1.1 vom 15. Mai 2019

Beauftragt von:

Erstellt durch:

Dr.-Ing. Volker Bosch

Humboldtstraße 21

70771 Leinfelden-Echterdingen

Tel: (0711)71 39 67

eMail: info@dr-bosch.com

Web: www.dr-bosch.com

Änderungsnachweis		
Datum	Version	Beschreibung
27. 4. 2015	1.0	Fertigstellung
8. 5. 2015	1.1	Korrektur FFT-Werte und Diagramme

Inhaltsverzeichnis

1	Datenblatt und Mechanischer Aufbau	5
1.1	Kennwerte aus dem Datenblatt	5
1.2	Mechanischer Aufbau	6
1.3	Stator	7
1.3.1	Daten des Stators	9
1.3.2	Wicklung	9
1.4	Rotor	10
1.4.1	Daten des Rotors	11
1.4.2	Rotormagnete	12
2	Messungen	13
2.1	Leerlaufspannungen	13
2.1.1	Sternspannungen	14
2.1.2	Verkettete Spannungen	15
2.2	Luftspaltflussdichte	16
2.3	Induktivitäten	19
2.4	Widerstände	19
3	FEM-Modellierung	21
3.1	Leerlaufspannungen	22
3.2	Luftspaltflussdichte	23
3.3	Induktivitäten	23
3.4	Drehmoment	25

Abbildungsverzeichnis

1.1	Außenansicht des Radnabenantriebs	6
1.2	Motor und Planetengetriebe	7
1.3	Motor.	8
1.4	Stator mit Achse.	8
1.5	Frontalansichten des Stators.	8
1.6	Wickelschema	10
1.7	Felderregerkurve	10
1.8	Rotorglocke mit Magneten	11
1.9	Magnete	12
2.1	Messung der Leerlaufspannung	13
2.2	Leerlaufspannung Strang U	14
2.3	Leerlaufspannung Strang V	15
2.4	Leerlaufspannung Strang W	15
2.5	Verkettete Leerlaufspannungen	16
2.6	Herstellung einer Fluxmeter-Messspule	17
2.7	Fluxmeter-Messspule im Luftspalt der Maschine.	17
2.8	Luftspaltflussdichte	18
2.9	Harmonische Analyse der Luftspaltflussdichte	18
2.10	Induktivitäten	19
3.1	FEM-Modell	21
3.2	Leerlauf-Strangspannungen	22
3.3	Luftspalt-Flussdichte	23
3.4	Winkelabhängige Induktivitäten	24
3.5	Winkelabhängige Induktivitäten ohne Magnete	24
3.6	Drehmoment	25

Tabellenverzeichnis

1.1	Daten des Radnabenantriebs.	5
1.2	Daten des Antriebs gemäß Datenblatt.	6
1.3	Daten des Stators.	9
1.4	Daten des Rotors.	11
2.1	Harmonische Analyse der Sternpunktspannung des Strangs U.	14
2.2	Harmonische Analyse der verketteten Spannung der Stränge U und V.	16
2.3	Harmonische Analyse der Luftspaltflussdichte.	19
2.4	Ohmsche Wicklungswiderstände	20
3.1	Harmonische Analyse der mittels FEM ermittelten Sternpunktspannung des Strangs U.	22
3.2	Harmonische Analyse der Luftspaltflussdichte.	23
3.3	Harmonische Analyse des Drehmoments	25

Kapitel 1

Datenblatt und Mechanischer Aufbau

1.1 Kennwerte aus dem Datenblatt

Der Antrieb wurde aus zweiter Hand erworben. Der originale Umrichter stand nicht zur Verfügung. Der Antrieb ist neuwertig. Der Zustand der Speichen-Bohrungen im Nabenschalen zeigen, dass der Antrieb bislang noch nicht in einem Laufrad verbaut wurde und allenfalls im Leerlauf betrieben wurde. Der Zustand des Fetts im Getriebe erhärtet diesen Eindruck.

Marken- bzw. Handelsname	...
Typ bzw. Bezeichnung	...
Seriennummer	...
Nennspannung am Umrichter	36 V (DC)
Nennleistung	250 W
Laufradgröße	622 mm bzw. 28 Zoll
Prüfnummer:	...

Tabelle 1.1: Daten des Radnabenantriebs.

Die folgenden Daten entstammen dem Datenblatt eines baugleichen Radnabenantriebs. Die Werte sind plausibel und decken sich mit den Daten aus den Messungen und der FEM-Modellierung. Ein Prüfstand zur Verifizierung der Kennlinien und insb. der Wirkungsgrade stand nicht zur Verfügung.

Hersteller des Antriebs (OEM)	...
Arbeitspunkte gem. Datenblatt bei Betrieb an 36 V DC	
Leerlauf	
Stromaufnahme (des Umrichters)	0,629 A
Leistungsaufnahme (des Umrichters)	22,66 W
Drehzahl (hinter dem Getriebe)	228,5 1/min
Max. Wirkungsgrad	
Stromaufnahme (des Umrichters)	5,789 A
Leistungsaufnahme (des Umrichters)	208,5 W
Drehzahl (hinter dem Getriebe)	204,7 1/min
Drehmoment (hinter dem Getriebe)	7,95 Nm
Leistungsabgabe	170,4 W
Wirkungsgrad (inkl. Getriebe)	81,7 %
Max. Leistung	
Stromaufnahme (des Umrichters)	13,53 A
Leistungsaufnahme (des Umrichters)	487,4 W
Drehzahl (hinter dem Getriebe)	172,9 1/min
Drehmoment (hinter dem Getriebe)	20,03 Nm
Leistungsabgabe	362,5 W
Wirkungsgrad (inkl. Getriebe)	74,3 %

Tabelle 1.2: Daten des Antriebs gemäß Datenblatt.

1.2 Mechanischer Aufbau



Bild 1.1: Außenansicht des untersuchten Radnabenantriebs für die Montage im Vorderrad.

Der Radnabenantrieb ist für die Montage im vorderen Laufrad eines Fahrrads vorgesehen. Die Aufnahme des Reaktionsmoments über die Achse erfolgt formschlüssig durch Keile, die in die Nuten der Ausfallenden greifen.

Das Gehäuse ist aus Aluminium gefertigt. Auf der rechten Seite des Antriebs befindet sich ein mit sechs M4-Schrauben befestigter Deckel. Dieser stützt sich über ein Rillenkugellager *6003RS* auf der Achse ab. Das Lager ist in den Deckel eingepresst und sitzt mit einem Schiebesitz auf der Achse. Unter dem Deckel befindet sich der Motor. Die Anordnung ist aus Bild 1.2 ersichtlich.

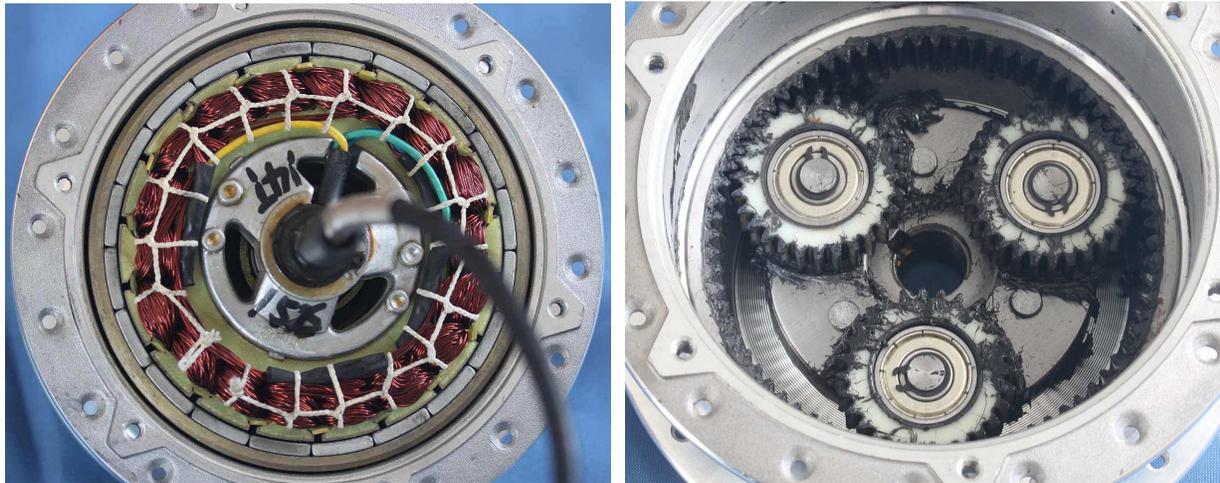


Bild 1.2: Motor im eingebauten Zustand und Planetengetriebe.

An die Rotorglocke ist abtriebsseitig ein Ritzel mit 17 Zähnen geschraubt, welches als Sonnenrad eines einstufigen Planetengetriebes fungiert. Die drei Planetenräder mit jeweils 28 Zähnen sind aus Kunststoff gefertigt. Der zugehörige Planetenträger stützt sich über einen Freilauf formschlüssig mit einer Passfeder auf der Achse ab. Der Freilauf verhindert, dass der abgeschaltete Motor bei rollendem Fahrrad durch dieses angetrieben wird. Das Hohlräder des Planetengetriebes ist fest mit dem Gehäuse der Nabe verbunden. Es besitzt 73 Zähne, so dass sich eine Übersetzung von $73/17:1$ ergibt. Der Motor kann mitsamt der Achse als komplette Baugruppe aus der Nabe entnommen werden, wie Bild 1.3 zeigt.

1.3 Stator

Der Stator des Außenläufers besteht aus einem 18nutigen Blechpaket. Die Stirninsolation ist aus glasfaserverstärktem Epoxyd, vermutlich Leiterplattenmaterial FR4 gefertigt. Aus diesem Material bestehen auch die Nutverschlusskeile. Die Nutinsolation ist als Rollenpressspan-Runduminsolation ausgeführt. Die Enden der nach dem Wickeln aufgeschnittenen Nutinsolation überlappen sich unter den Nutverschlusskeilen, wie in Bild 1.5 erkennbar.

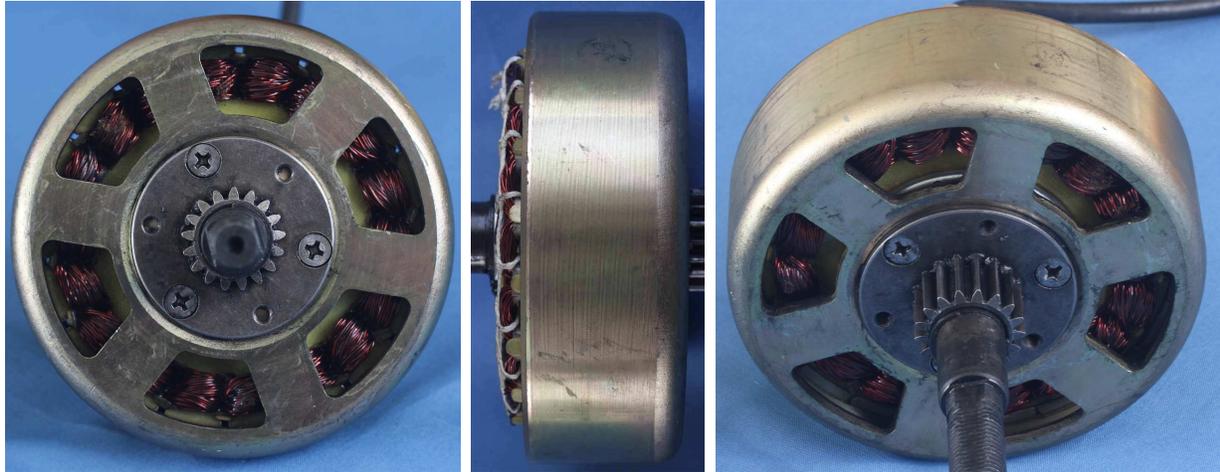
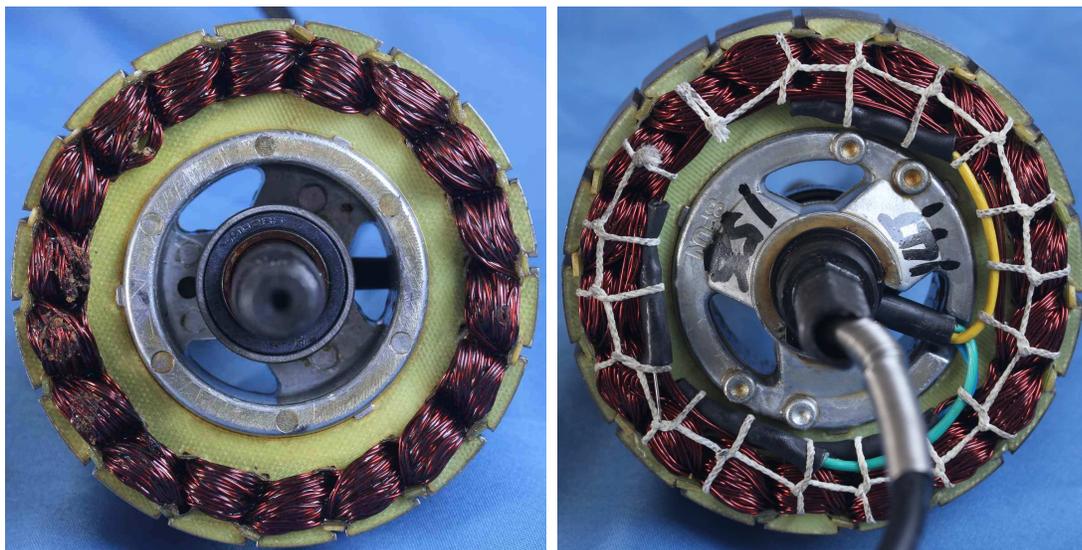


Bild 1.3: Motor.



Bild 1.4: Stator mit Achse.



*Bild 1.5:
Frontal-
ansichten
des
Stators.*



1.3.1 Daten des Stators

Strangzahl	3
Verschaltung	stern
Luftspalthöhe	0,25 mm
Statorblech	0,5 mm
Anzahl Statorbleche	46
Statoraußendurchmesser	92,0 mm
Innendurchmesser Statorjoch	53,0 mm
Radiale Jochhöhe	6,5 mm
Anzahl Statornuten	18
Axiale Länge Statorpaket	24,0 mm
Nutslitzbreite	1,8 mm
Nutslitztiefe	1,7 mm
Zahnform	parallelfankig
Zahnbreite	7,5 mm
Nuttiefe	13,0 mm
Windungen pro Zahn	13 (aus FEM-Rechnung)
Anzahl parallele Drähte	4
Drahtdurchmesser	ca. 0,6 mm (geschätzt)
mittl. Kaltwiderstand über 2 Wicklungen	318 mΩ
Lochzahl N/(2p m)	3/10
Kugellager	2x 6902RS
Abmessungen Kugellager	D_a 28 mm, d_i 15 mm, l 7 mm

Tabelle 1.3:
Daten des
Stators.

Die magnetisch relevanten Daten des Stators können Tabelle 1.3 entnommen werden. Da der Stator für die Untersuchung nicht zerstört werden sollte, wurden die Werte teilweise indirekt ermittelt und sind mit gewissen Fehlern behaftet. Dieses gilt insbesondere für Nuthöhe, Nutbreite und Drahtdurchmesser. Die Windungszahl wurde aus der gemessenen Leerlaufspannung und einer FEM-Rechnung ermittelt.

1.3.2 Wicklung

Die Wicklung ist als imprägnierte Einzelzahnwicklung mit vier parallelen Kupferlackdrähten ausgeführt. Die hohe Nutfüllung lässt eine manuelle Wicklung vermuten. Bild 1.6 zeigt das Wickelschema der Einzelzahn-Wicklung mit 18 Zähnen und 10 Polpaaren. Jeweils drei benachbarte Zähne gehören zu einer Phase. Der mittlere dieser drei Zähne ist gegenständig zu den beiden äußeren einer solche Gruppe bewickelt. Bei 120° Blockkommutierung ergeben sich die in Bild 1.7 dargestellten Felderregkurven.

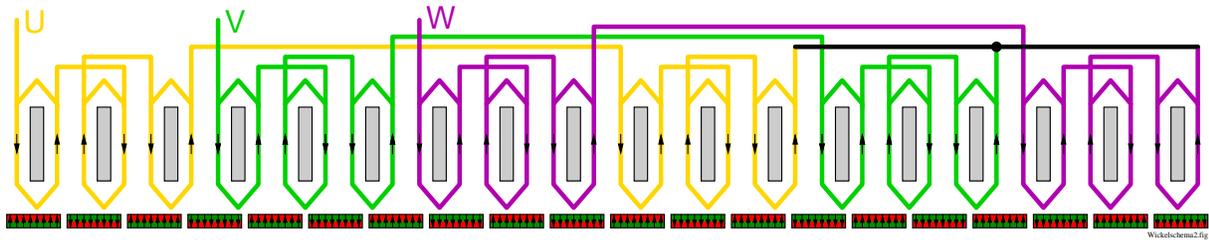


Bild 1.6: Wickelschema. Grau: Zähne, rot und grün: Magnetpole.

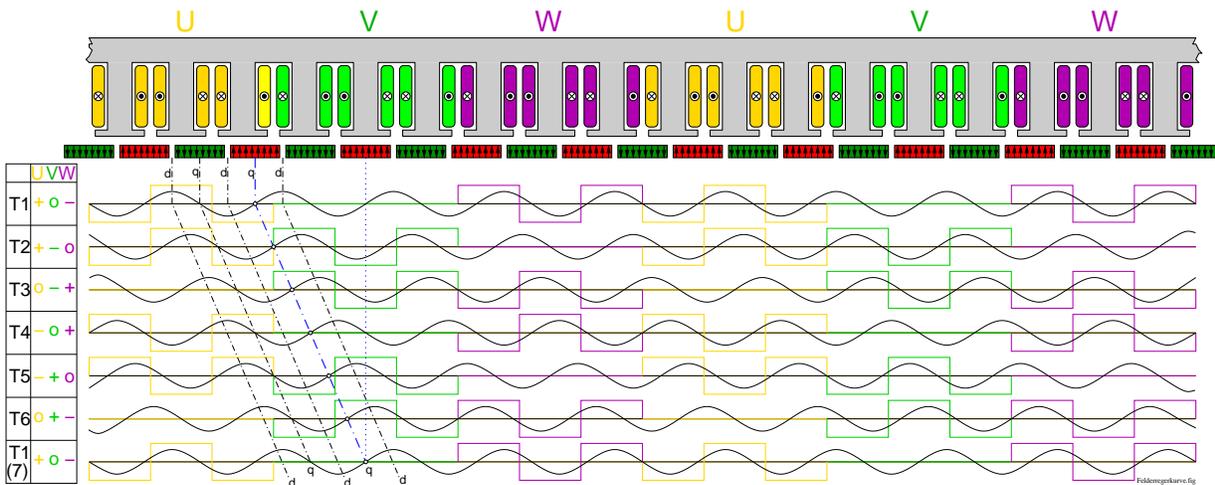


Bild 1.7: Felderregerkurve bei 120° Blockkommutierung mit den zugehörigen Grundwellen.

1.4 Rotor

Der Rotor ist als Glocke ausgeführt. Diese ist einseitig durch zwei Rillenkugellager gelagert. Die Rotorglocke ist massiv aus weichmagnetischem Stahl tiefgezogen. Die Stirnseite weist Öffnungen auf, so dass sechs breite Speichen entstehen.

Die Glocke schließt rechtsseitig bündig mit den Magneten ab. Auf der linken Seite ist sie breiter ausgeführt, da sie die Wickelköpfe umschließen muss. Diese axiale Verlängerung des Jochs setzt sich in radialer Richtung weiter fort, so dass die magnetisch wirksame radiale Höhe des Jochs ungefähr der doppelten Wandstärke des Jochs entspricht, wie in Bild 1.9, rechts, erkennbar ist.



Bild 1.8: Die Rotorglocke mit den 20 schalenförmigen Magneten.

1.4.1 Daten des Rotors

Magnetmaterial	NdFeB, gesintert, passiviert
Remanenzinduktion B_r	$\approx 1,13 \text{ T}$
Anzahl Rotormagnete	20
Polpaarzahl	10
Magnetdicke	3,25 mm
Magnetbreite, tangential, ca.	14,5 mm
Magnetlänge, axial	23,8 mm
Innendurchmesser Rotor	92,5 mm
Außendurchmesser Rotorglocke	106,0 mm
Innendurchmesser Rotorjoch	98,9 mm
Wandstärke Rotorjoch	3,5 mm
Axiale Länge Rotorjoch, innen	32,0 mm
Axiale Länge Rotorjoch, außen	35,3 mm
Luftspalthöhe	0,25 mm
Außendurchmesser Stirnseite Rotorjoch	90,5 mm
Innendurchmesser Stirnseite Rotorjoch	58,1 mm
Anzahl Rotorspeichen	6
Tangentiale Breite Rotorspeichen	15,0 mm
Wandstärke Stirnseite Rotorjoch	4,5 mm
Material Rotorjoch	Stahl, massiv

*Tabelle 1.4:
Daten des
Rotors.*

Die magnetisch relevanten Daten des Rotors können Tabelle 1.4 entnommen werden. Da der Rotor nicht zerstört werden sollte, wurden die Werte teilweise indirekt ermittelt. Der Wert der Remanenzinduktion wurde aus der gemessenen Luftspaltflussdichte und einer FEM-Rechnung ermittelt.

1.4.2 Rotormagnete

Die schalenförmigen Rotormagnete bestehen aus gesintertem Neodym-Eisen-Bor (NdFeB). Sie wurden auf die innere Oberfläche der Rotorglocke geklebt. Als Korrosionsschutz der Magnete ist lediglich eine Passivierung der Oberfläche erkennbar. Die Klebeverbindung wird durch keine erkennbare weitere Maßnahme geschützt. Das Magnetmaterial weist mit einer Remanenzinduktion von ca. 1,13 T einen vergleichsweise geringen Wert auf.

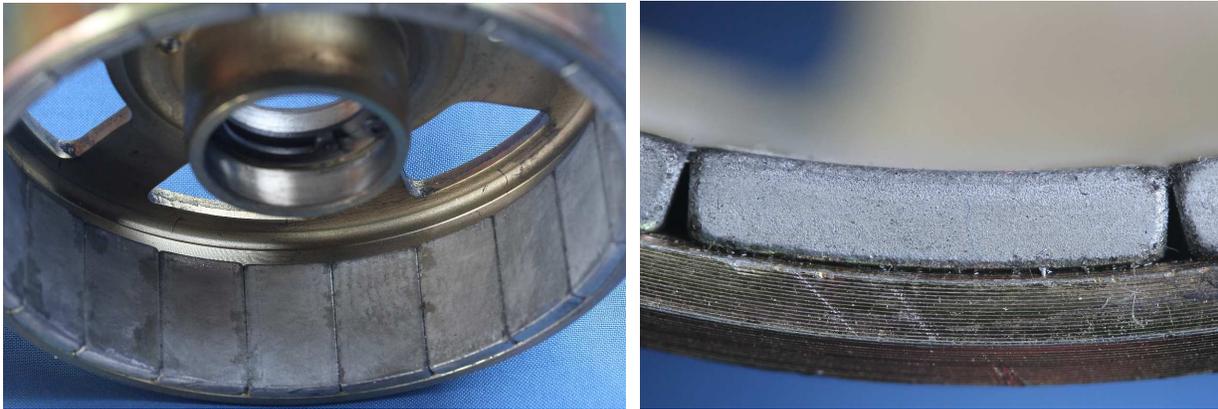


Bild 1.9: Die Magnete auf der Innenseite der Rotorglocke.

Kapitel 2

Messungen

2.1 Leerlaufspannungen

Eine der einfachsten Messungen ist die Ermittlung der Leerlaufspannungen. Hierfür wird der Prüfling angetrieben. An den Anschlussklemmen kann dann die Leerlaufspannung mit einem Oszilloskop gemessen werden, wie in Bild 2.1 dargestellt.

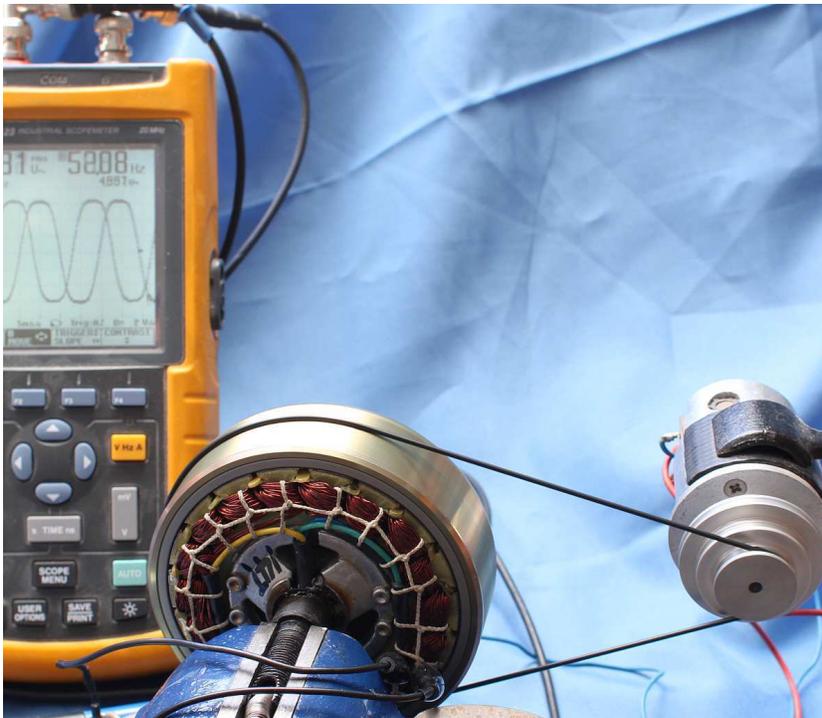


Bild 2.1: Messung der Leerlaufspannung an dem fremd angetriebenen Prüfling mit einem Oszilloskop.

2.1.1 Sternspannungen

Die Sternspannungen sind am aussagekräftigsten, da Oberschwingungen der Ordnung $\nu = 3$ und deren Vielfache nur gegen den Sternpunkt der Maschine gemessen werden können.

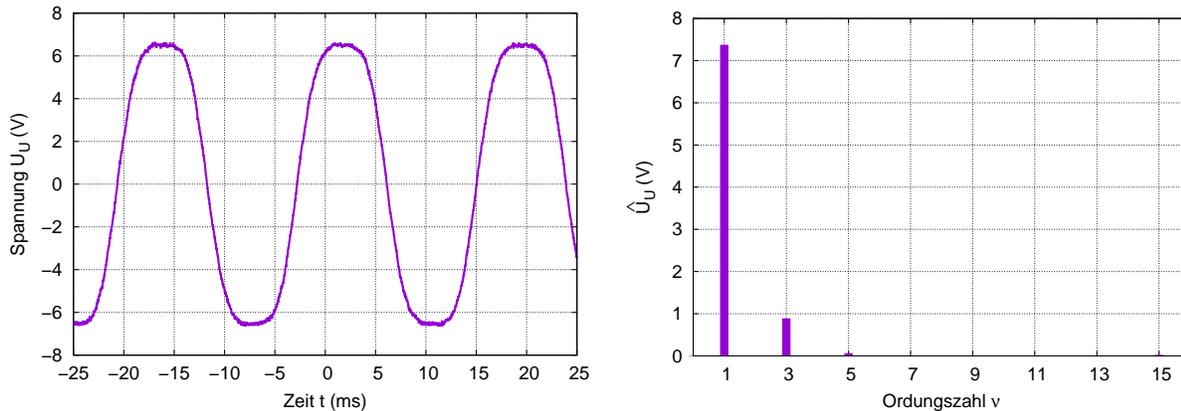


Bild 2.2: Leerlaufspannung des Strangs U (gelbe Anschlussleitung). Links ist der zeitliche Verlauf der Sternspannung dargestellt, rechts das zugehörige Spektrum.

Harm.	Frequenz	Amplitude	Harm.	Frequenz	Amplitude
0	0 Hz	13,627 mV	8	448,2 Hz	9,478 mV
1	56,02 Hz	7,375 V	9	504,2 Hz	7,641 mV
2	112,0 Hz	10,085 mV	10	560,2 Hz	9,990 mV
3	168,1 Hz	890,695 mV	11	616,2 Hz	10,094 mV
4	224,1 Hz	12,220 mV	12	672,3 Hz	6,900 mV
5	280,1 Hz	64,929 mV	13	728,3 Hz	4,634 mV
6	336,1 Hz	2,309 mV	14	784,3 Hz	4,829 mV
7	392,2 Hz	9,626 mV	15	840,3 Hz	26,362 mV

Tabelle 2.1: Harmonische Analyse der Sternpunktspannung des Strangs U.

Tabelle 2.1 zeigt beispielhaft für die drei Strangspannungen die harmonische Analyse der Leerlaufspannung des Strangs U. Wie von der Theorie her zu erwarten war, sind keine Harmonischen mit einer geraden Ordnungszahl im Spektrum vertreten¹. Die Leerlaufspannung des Strangs V weicht nicht von der des Strangs U ab. Der Vollständigkeit halber folgt abschließend die Leerlaufspannung des Strangs W. Auch diese weicht nicht von der des Strangs U ab.

¹ Eine Teilentmagnetisierung der Magnete führt zu einer unsymmetrischen Leerlaufspannung und damit auch zu Harmonischen mit gerader Ordnungszahl.

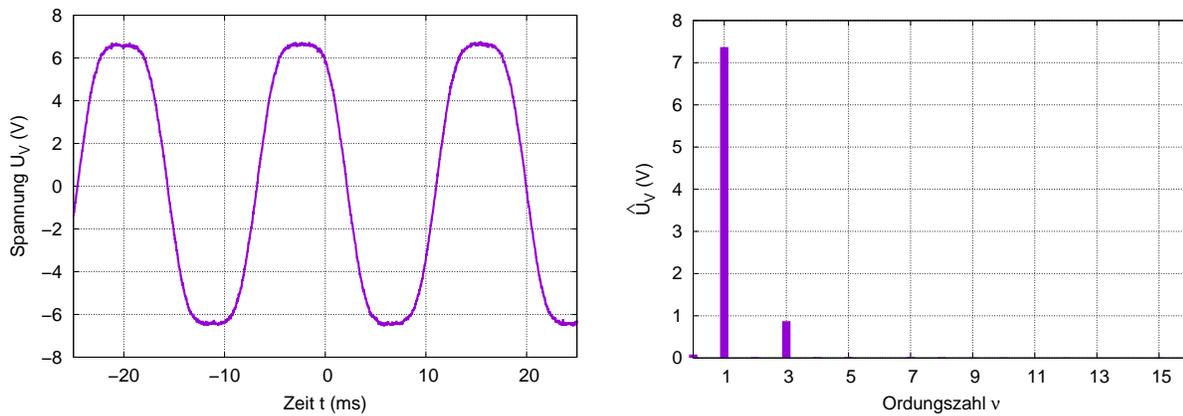


Bild 2.3: Leerlaufspannung des Strangs V (grüne Anschlussleitung). Links ist der zeitliche Verlauf der Sternspannung dargestellt, rechts das zugehörige Spektrum.

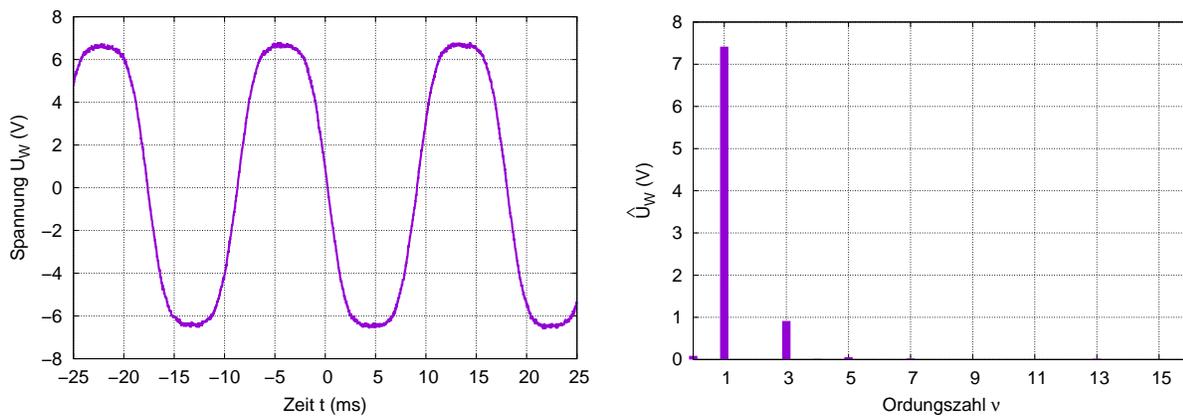


Bild 2.4: Leerlaufspannung des Strangs W (blaue Anschlussleitung). Links ist der zeitliche Verlauf der Sternspannung dargestellt, rechts das zugehörige Spektrum.

2.1.2 Verkettete Spannungen

Die verketteten Spannungen der Maschine weisen keine Harmonischen mit der Ordnung $\nu = 3$ oder deren Vielfache auf. Dieses ist gut erkennbar an dem deutlich „sinusförmigeren“ Verlauf der entsprechenden Spannungen in Bild 2.5.

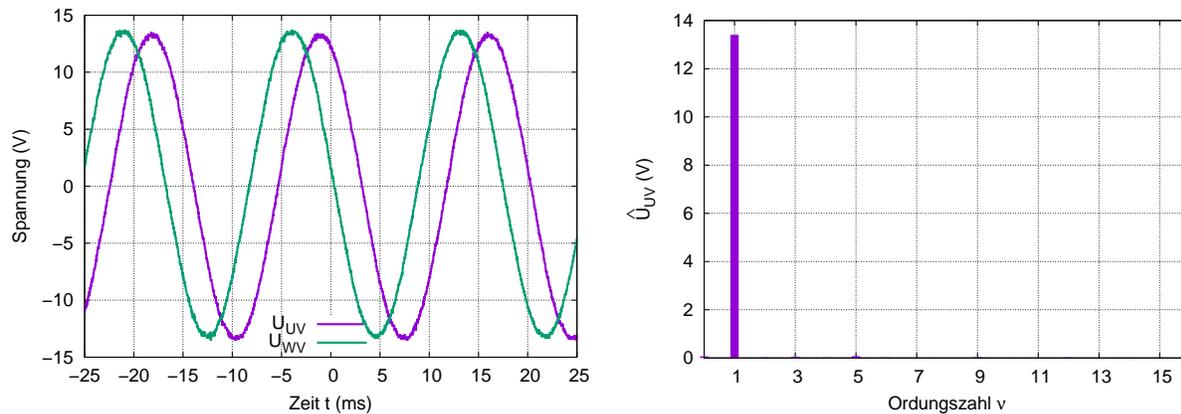


Bild 2.5: Verketete Leerlaufspannungen der Stränge U-V und W-V. Links ist der zeitliche Verlauf dargestellt, rechts das zugehörige Spektrum der Stränge U und V.

Harm.	Frequenz	Amplitude	Harm.	Frequenz	Amplitude
0	0 Hz	70,051 mV	8	469,2 Hz	7,336 mV
1	58,65 Hz	13,405 V	9	527,9 Hz	30,394 mV
2	117,3 Hz	23,564 mV	10	586,5 Hz	5,175 mV
3	176,0 Hz	53,529 mV	11	645,2 Hz	9,759 mV
4	234,6 Hz	16,659 mV	12	703,8 Hz	22,471 mV
5	293,3 Hz	75,904 mV	13	762,5 Hz	6,997 mV
6	351,9 Hz	16,584 mV	14	821,1 Hz	12,762 mV
7	410,6 Hz	11,533 mV	15	879,8 Hz	18,290 mV

Tabelle 2.2: Harmonische Analyse der verketteten Spannung der Stränge U und V.

Tabelle 2.2 zeigt beispielhaft für die drei verketteten Spannungen die harmonische Analyse der Leerlaufspannung zwischen den Strängen U und V. Wie zu erwarten war, fehlen in diesem Spektrum die Harmonischen mit den Ordnungszahlen zwei und drei sowie deren Vielfache.

2.2 Luftspaltflussdichte

Aufgrund der sehr geringen Luftspalthöhe von ca. 0,25 mm kann die Messung der Luftspaltflussdichte nicht mit einem Gaussmeter erfolgen, da die kleinsten erhältlichen Messsonden eine Höhe von gut 0,30 mm aufweisen. Für die Messung wird ein Fluxmeter mit einer kalibrierten Spule verwendet. Diese Spule wird eigens für diese Messung hergestellt. Bild 2.6 zeigt die zugehörigen Arbeitsschritte.

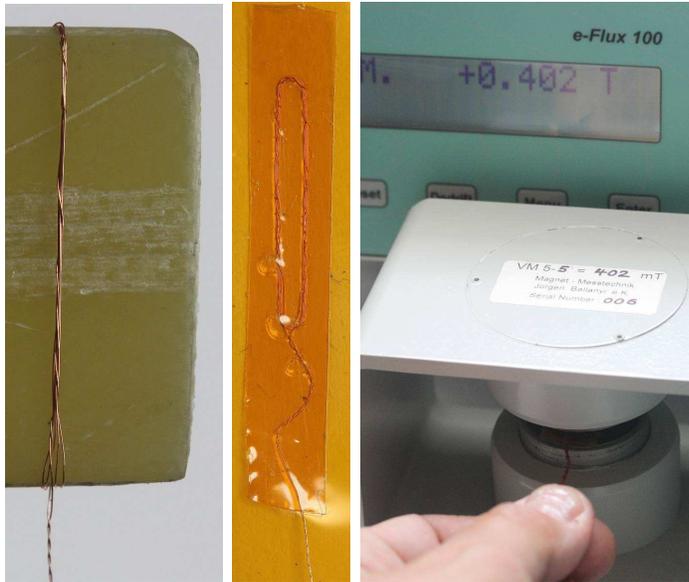


Bild 2.6: Herstellung einer Messspule zur Erfassung der Luftspaltflussdichte. Links: Spule auf Wickelkörper. Mitte: Spule auf Klebestreifen. Rechts: Kalibrierung der effektiven Spulenfläche im Referenzmagnet.

Diese Messspule wird mittig auf einem Zahn der Maschine angeordnet, wie in Bild 2.7 dargestellt.

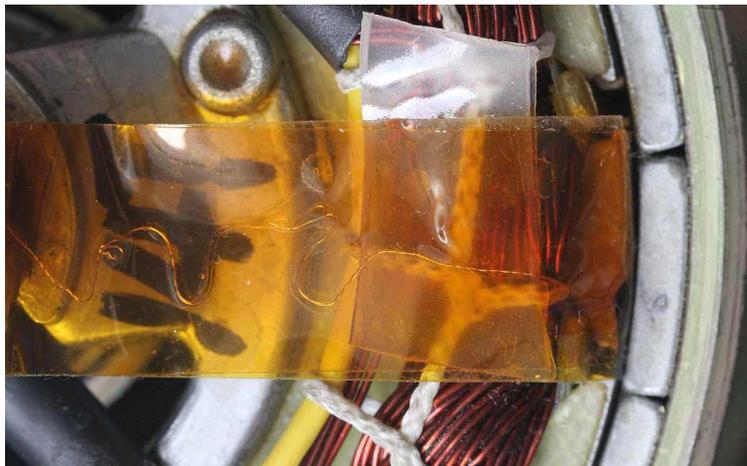


Bild 2.7: Fluxmeter-Messspule im Luftspalt der Maschine.

Wird der Rotor gleichmäßig gedreht, kann mit einem Oszilloskop, das an den Analogausgang des Fluxmeters angeschlossen wird, der räumliche Verlauf der Luftspaltflussdichte erfasst werden.

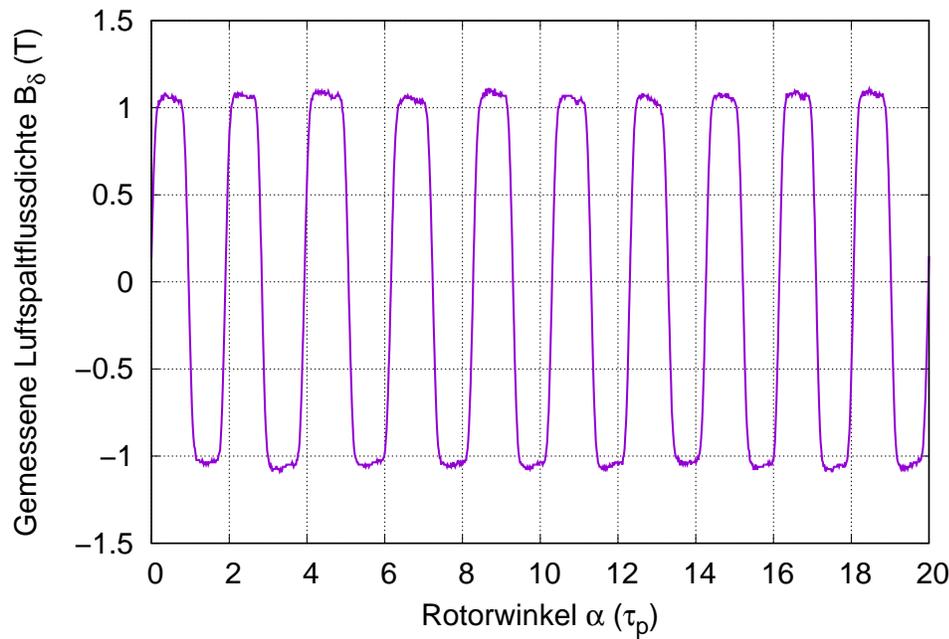


Bild 2.8: Luftspaltflussdichte über eine Umdrehung, bzw. 10 Polpaare.

Für die harmonische Analyse wird der Verlauf über einem einzigen Polpaar aufgezeichnet und mittels der schnellen Fourier-Transformation (FFT) harmonisch analysiert, wie in Bild 2.9 abgebildet. In Tabelle 2.3 sind die Zahlenwerte der harmonischen Analyse dargestellt.

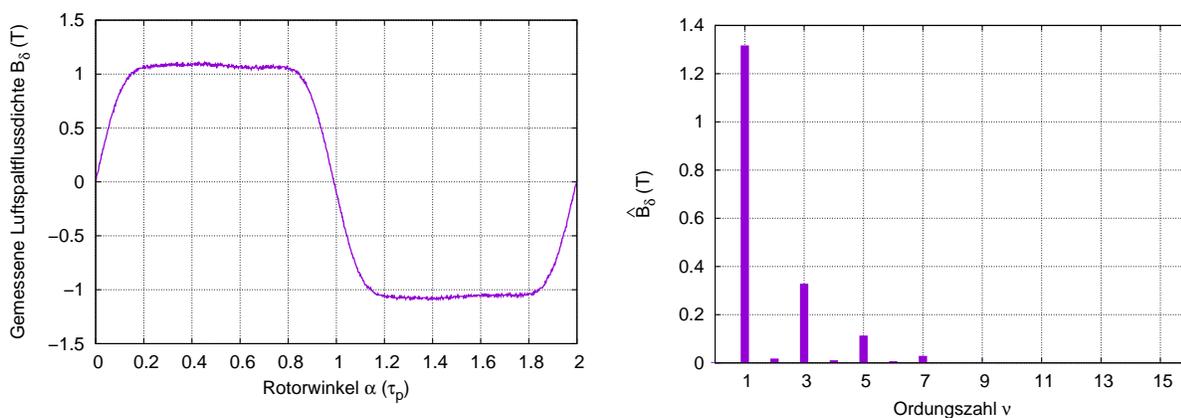


Bild 2.9: Harmonische Analyse der Luftspaltflussdichte über eine Periode bzw. ein Polpaar.

Harm.	Amplitude	Harm.	Amplitude	Harm.	Amplitude
1	1,32 T	6	7,37 mT	11	2,68 mT
2	18,07 mT	7	29,09 mT	12	1,12 mT
3	328,87 mT	8	1,88 mT	13	2,26 mT
4	10,99 mT	9	3,37 mT	14	486,02 μ T
5	113,61 mT	10	1,70 mT	15	749,83 μ T

Tabelle 2.3: Harmonische Analyse der Luftspaltflussdichte.

2.3 Induktivitäten

Die Messung der Induktivitäten erfolgt mit einer RLC-Messbrücke. Die Messfrequenz wird auf die geringste Frequenz eingestellt, um Verfälschungen des Messwerts in Folge der Eisenverluste zu vermeiden. Für die Messung bei niedrigen Messfrequenzen ist es wichtig, dass der Rotor mechanisch fixiert wird und nicht durch die Wechselströme der Messbrücke zum Schwingen angeregt werden kann. Die durch diese Schwingungen induzierten Spannungen in den Wicklungen können zu einer erheblichen Verfälschung der Messwerte führen.

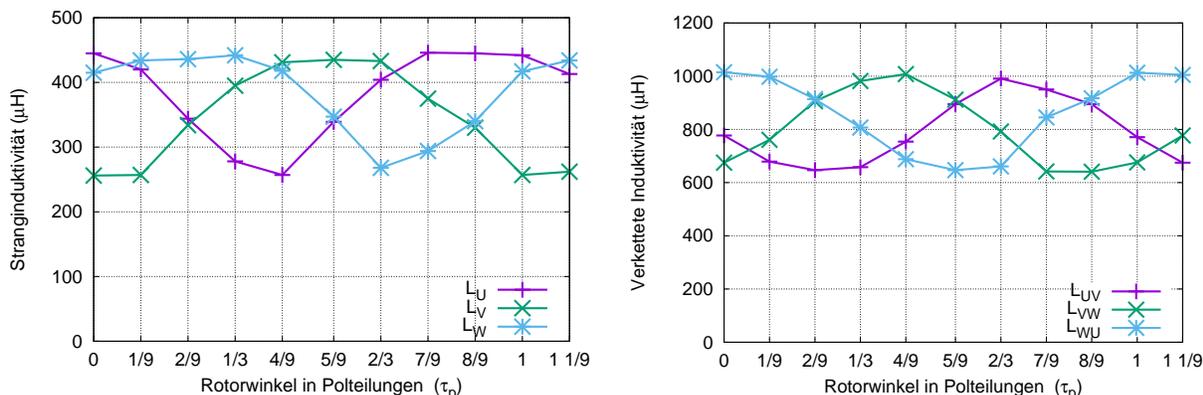


Bild 2.10: Gemessene Induktivitäten in Abhängigkeit vom Rotorwinkel

Die Messwerte zeigen eine deutliche Abhängigkeit der Induktivitäten vom Rotorwinkel. Die Ursachen dieser Winkelabhängigkeit werden in Abschnitt 3.3 erläutert.

2.4 Widerstände

Tabelle 2.4 zeigt die ohmschen Widerstände, gemessen zwischen jeweils zwei Wicklungsenden bei offenem Sternpunkt. Das verwendete Milliohmmeter misst mit Gleichstrom, so dass keine Beeinflussung der Messwerte durch die Eisenverluste möglich ist.



Strangwiderst.	Anschlussleitungen	Widerstand
R_{UV}	gelb – grün	316 m Ω
R_{VW}	grün – blau	319 m Ω
R_{WU}	blau – gelb	318 m Ω

Tabelle 2.4: Verkettete ohmsche Wicklungswiderstände.

Kapitel 3

FEM-Modellierung

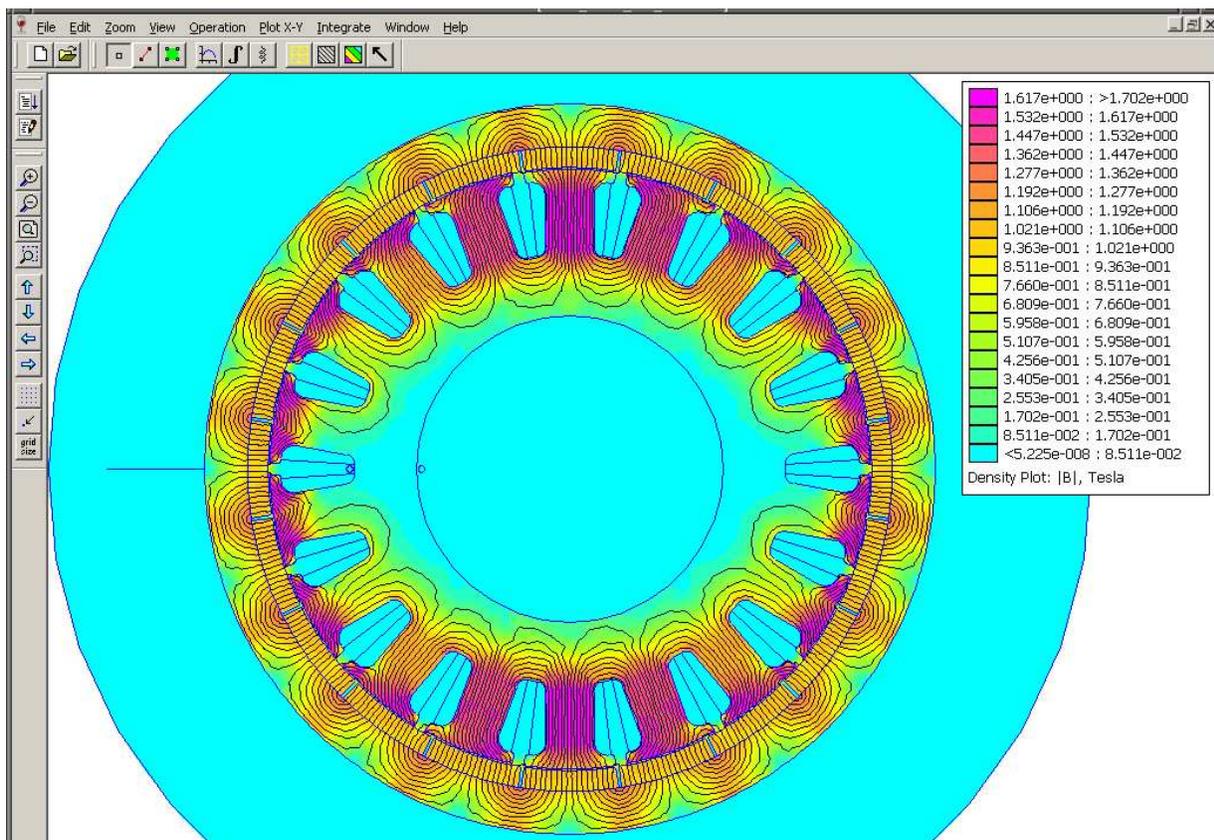


Bild 3.1: 2D-FEM-Modell bei unbestromter Wicklung.

Für die Verifizierung und Plausibilisierung der gemessenen Werte wird die Maschine mittels zweidimensionaler Finite-Element-Methode (2D-FEM) modelliert. Diese Maßnahme ermöglicht auch die zerstörungsfreie Ermittlung der Remanenzinduktion des verwendeten

Magnetmaterials und der Windungszahlen durch den Vergleich mit den Grundwellen der gemessenen Luftspaltflussdichte und Leerlaufspannungen.

Wie bereits in Abschnitt 1.4 dargelegt, wird die axiale Verlängerung des Jochs durch eine Vergrößerung der Jochdicke in der zweidimensionalen FEM-Modellierung berücksichtigt.

3.1 Leerlaufspannungen

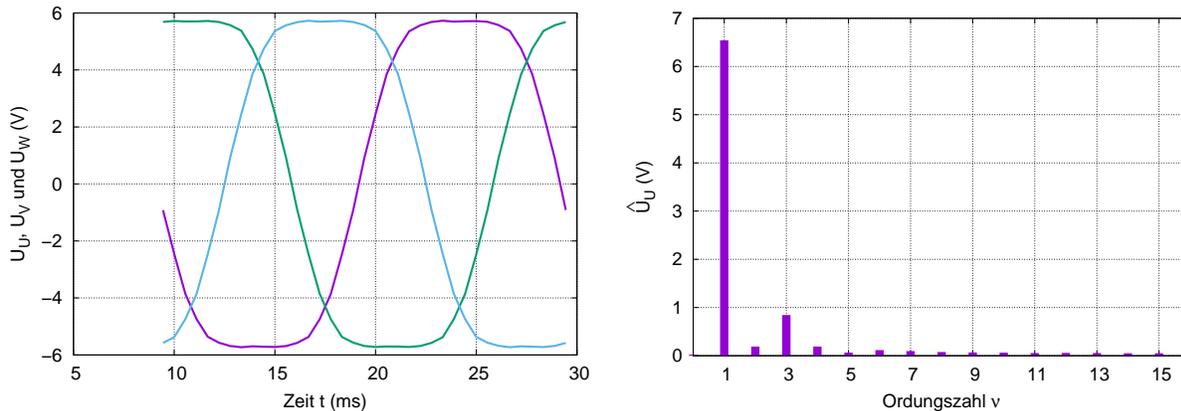


Bild 3.2: Leerlauf-Strangspannungen und zugehöriges Spektrum der Strangspannung U_U , ermittelt über die FEM-Modellierung.

Für die Ermittlung der Leerlaufspannungen wird der Rotor im FEM-Modell in Ein-Grad Winkelschritten gegenüber dem Stator verdreht. Nach jedem Schritt muss die Geometrie neu vernetzt werden und die Feldgleichungen gelöst werden. Anschließend werden die mit jeder Wicklung verketteten magnetischen Flüsse ermittelt. Über die numerische Differentiation der Spulenflüsse werden die Leerlaufspannungen ermittelt.

Harm.	Frequenz	Amplitude	Harm.	Frequenz	Amplitude
0	0 Hz	24,659 mV	8	300,0 Hz	78,011 mV
1	50,0 Hz	6,543 mV	9	450,0 Hz	68,945 mV
2	100,0 Hz	191,181 mV	10	400,0 Hz	63,316 mV
3	150,0 Hz	844,403 mV	11	550,0 Hz	55,143 mV
4	200,0 Hz	191,209 mV	12	500,0 Hz	58,350 mV
5	250,0 Hz	64,978 mV	13	650,0 Hz	55,552 mV
6	300,0 Hz	116,224 mV	14	600,0 Hz	51,620 mV
7	350,0 Hz	96,556 mV	15	750,0 Hz	51,630 mV

Tabelle 3.1: Harmonische Analyse der mittels FEM ermittelten Sternpunktspannung des Strangs U .

Wie bereits bei den am Versuchsmuster gemessenen Spannungen, werden auch die aus der FEM-Modellierung ermittelten Spannungen einer harmonischen Analyse unterzogen.

Hierbei ist zu beachten, dass die Anzahl der durch die FFT ermittelbaren Harmonischen von der Auflösung des Datensatzes, d.h. von der Anzahl der Wertepaare, begrenzt wird.

3.2 Luftspaltflussdichte

Bild 3.3 zeigt den Plot der Normalkomponente der Luftspaltflussdichte in der Mitte des Luftspalts. Deutlich erkennbar ist die Beeinflussung durch die Nutschlitz. Die dort abgebildeten Spitzen sind physikalisch nicht erklärbar und resultieren aus numerischen Effekten der FEM-Modellierung.

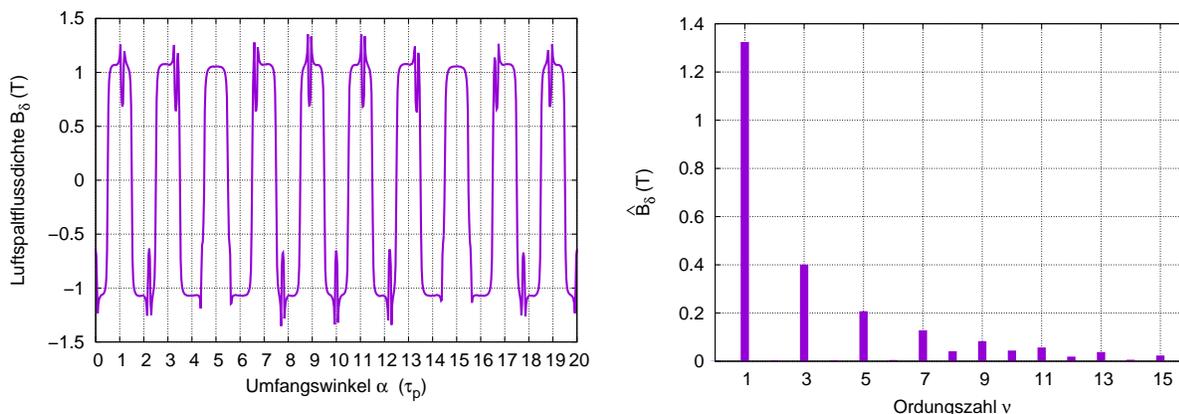


Bild 3.3: Räumliche Verteilung der Luftspaltflussdichte bei unbestromtem Stator und zugehöriges Spektrum, ermittelt über die FEM-Modellierung.

Die Zahlenwerte der harmonischen Analyse sind in Tabelle 3.2 dargestellt.

Harm.	Amplitude	Harm.	Amplitude	Harm.	Amplitude
1	1,324 T	6	5,242 mT	11	57,025 mT
2	3,021 mT	7	128,512 mT	12	19,183 mT
3	401,024 mT	8	41,670 mT	13	38,056 mT
4	3,948 mT	9	83,220 mT	14	6,220 mT
5	207,363 mT	10	44,421 mT	15	23,833 mT

Tabelle 3.2: Harmonische Analyse der Luftspaltflussdichte.

3.3 Induktivitäten

Die FEM-Modellierung ermöglicht auch die Ermittlung der Wicklungsinduktivitäten. Neben den Selbstinduktivitäten interessieren auch die Gegeninduktivitäten. Letztere werden

jedoch nicht explizit ermittelt, sondern gemeinsam mit den Selbstinduktivitäten als verkettete Stranginduktivitäten. Die Vorgehensweise sei hier nur kurz in Stichworten beschrieben:

1. Ermittlung der Spulenflüsse $\Psi_U^{(n)}$, $\Psi_V^{(n)}$ und $\Psi_W^{(n)}$ bei bestromten Wicklungen.
2. Verminderung des Stromes in der bzw. den zu untersuchenden Wicklungen um den Wert ΔI .
3. Ermittlung der neuen Spulenflüsse $\Psi_U^{(n+1)}$, $\Psi_V^{(n+1)}$ und $\Psi_W^{(n+1)}$.
4. Aus der Änderung $\Delta\Psi = \Psi^{(n)} - \Psi^{(n+1)}$ kann die differentielle Induktivität im aktuellen Arbeitspunkt $L_{diff} = \Delta\Psi/\Delta I$ ermittelt werden.

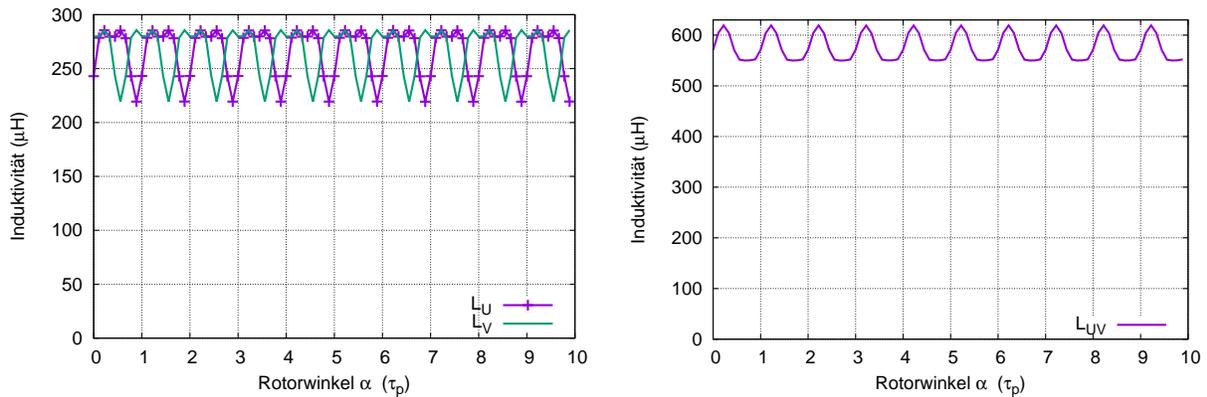


Bild 3.4: Induktivitäten in Abhängigkeit vom Rotorwinkel bei unbestromten Wicklungen, ermittelt aus der FEM-Modellierung

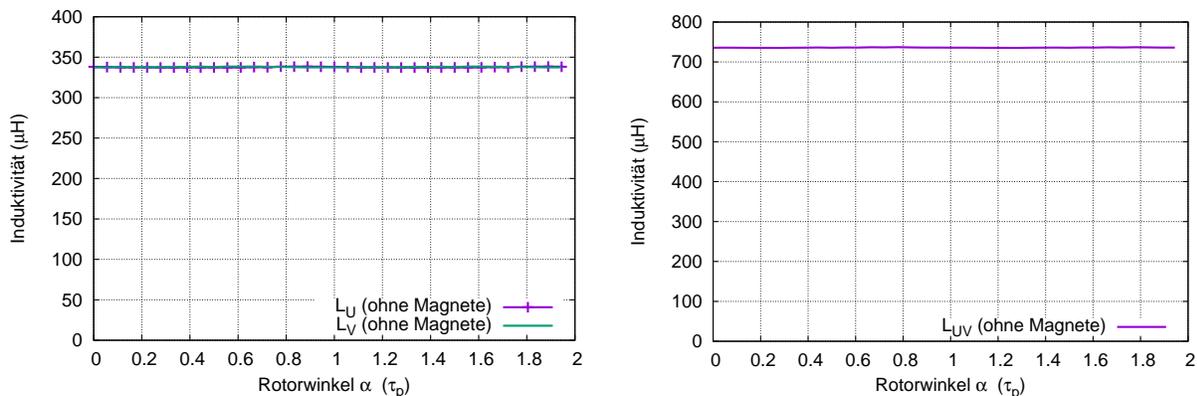


Bild 3.5: Induktivitäten in Abhängigkeit vom Rotorwinkel bei unbestromtem Stator. Die Dauermagnete wurden durch Luft ersetzt.

Da der Rotor der Maschine keinerlei magnetische Achsigkeit aufweist, kann die Abhängigkeit der Induktivitäten vom Rotorwinkel nur von der Sättigung der Zahnköpfe durch die Dauermagnete herrühren.

3.4 Drehmoment

für die Ermittlung des Drehmoments werden die Stränge U und V mit einem Gleichstrom von $+10\text{ A}$ bzw. -10 A bestromt und der Rotor in konstanten Winkelschritten gedreht. Dieser Gleichstrom entspricht einem Wechselstrom mit einer $2/\sqrt{3}$ -fachen Amplitude, also ca. $+11,55\text{ A}$.

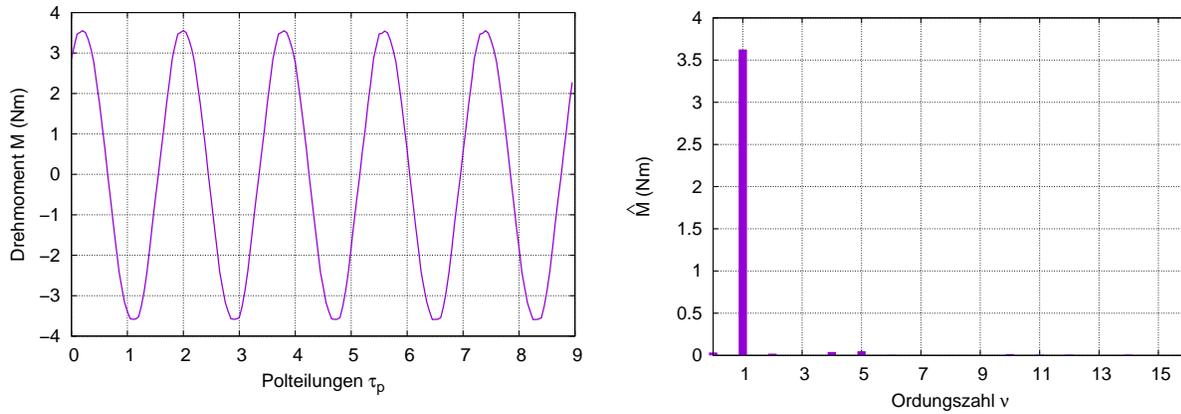


Bild 3.6: Drehmoment über dem Rotorwinkel bei einer Bestromung der Stränge U und V mit einem Gleichstrom von $+10\text{ A}$ und -10 A .

Harm.	Amplitude	Harm.	Amplitude	Harm.	Amplitude
1	3,63 Nm	6	5,52 mNm	11	7,37 mNm
2	21,07 mNm	7	4,12 mNm	12	8,20 mNm
3	2,24 mNm	8	3,50 mNm	13	1,79 mNm
4	40,42 mNm	9	881,15 μNm	14	9,13 mNm
5	49,03 mNm	10	15,90 mNm	15	2,21 mNm

Tabelle 3.3: Harmonische Analyse des Drehmoments bei bei Bestromung der Stränge U und V mit $+10\text{ A}$ und -10 A , dargestellt über dem Rotorwinkel.