



Schlussbericht

MTCFC - Grundlagen von integrierten Motorbauformen mit hohem Drehmoment für hochdrehende Turbo Kompressoren für Brennstoffzellen





Datum: 23.12.2019

Ort: Bern

Auftraggeberin:

Bundesamt für Energie BFE
Forschungsprogramm Brennstoffzellen
CH-3003 Bern
www.bfe.admin.ch
energieforschung@bfe.admin.ch

Auftragnehmer/in:

Celeroton AG
Industriestrasse 22
CH-8604 Volketswil
www.celeroton.com

Autor/in:

Simon Wyss, Celeroton AG, simon.wyss@celeroton.com
Andreas Looser, Celeroton AG, andreas.looser@celeroton.com
Christof Zwysig, Celeroton AG, christof.zwysig@celeroton.com

BFE-Bereichsleitung: Stefan Oberholzer, stefan.oberholzer@bfe.admin.ch
BFE-Programmleitung: Stefan Oberholzer, stefan.oberholzer@bfe.admin.ch
BFE-Vertragsnummer: SI/501775-01

Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen sind ausschliesslich die Autoren dieses Berichts verantwortlich.



Zusammenfassung

Hochdrehende Turbokompressoren sind dank ihrer kompakten Bauweise und des hohen Wirkungsgrades ideal für mobile Brennstoffzellensysteme grösserer Leistung geeignet, wie sie z.B. für LKW- und Bahnapplikationen benötigt werden. Diese Kompressoren benötigen elektrische Motoren mit grösserer Leistung. Zusätzlich erfordern die Spezifikationen an Vibrationsresistenz, Drehmoment, Drehzahl und Wirkungsgrad spezielle Motorbauformen, welche bezüglich Auslegung und Fertigung nicht state-of-the-art sind und in diesem Projekt erforscht werden. Die experimentelle Verifikation eines für die Serienfertigung optimierten Prototypen zeigt, dass 95% Wirkungsgrad bei tiefen Serienkosten erreicht werden können, dafür jedoch ein Zielkonflikt mit den Dimensionen des Rotors und des Stators besteht.

Summary

Thanks to their compact size and high efficiency, high-speed turbo compressors are ideally suited for mobile fuel cell systems, e.g. for trucks or trains. These compressors are in need for electric motors with higher power. Furthermore, the specifications for vibration resistance, torque, speed and efficiency require special motor configurations, which are not state-of-the art in terms of design and manufacturing, thus shall be investigated within this project. The experimental verification of a prototype optimized for serial manufacturing proves that 95% efficiency can be achieved while keeping low manufacturing cost, but that there is a trade-off between efficiency and dimensions of rotor and stator.





Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	3
Summary	3
Inhaltsverzeichnis	5
1 Einleitung	6
2 Ausgangslage	6
2.1 Hintergrund / Stand der Technik	6
2.2 Motivation des Projektes	6
2.3 Ziele des Projektes	8
3 Vorgehen und Methode	8
4 Resultate	9
4.1 AP I: Auslegung spezielle Motorbauformen mit Standardtools	9
4.2 AP II: Fertigung Prototypen	11
4.3 AP III: Verifikation erster Prototyp	12
4.4 AP IV: Fertigungsoptimierung damit Einsatz in Serie möglich	12
4.5 AP V: Fertigung und experimentelle Verifikation eines fertigungsoptimierten Prototyps	15
4.6 AP VI: Spezifische Auslegung für spezielle Motorbauformen	19
4.7 AP VII: Quantifizierung und Darstellung der Resultate	19
5 Schlussfolgerungen und Ausblick	19
5.1 Schlussfolgerung	19
5.2 Nächste Schritte nach Projektabschluss	20
6 Publikationen	22
7 Referenzen	23



1 Einleitung

Hochdrehende Turbokompressoren sind dank ihrer kompakten Bauweise und des hohen Wirkungsgrades ideal für mobile Brennstoffzellensysteme grösserer Leistung geeignet, wie sie z.B. für LKW- und Bahnapplikationen benötigt werden. Diese Kompressoren benötigen elektrische Motoren mit grösserer Leistung. Zusätzlich erfordern die Spezifikationen an Vibrationsresistenz, Drehmoment, Drehzahl und Wirkungsgrad spezielle Motorbauformen.

2 Ausgangslage

2.1 Hintergrund / Stand der Technik

Für Brennstoffzellensysteme grösserer Leistung (60 – 120 kW) wie sie z.B. für LKW-, Schiff-, aber auch Bahnapplikationen benötigt werden, werden Kompressoren grösserer Leistung (>10 kW) benötigt. Im automobilen Bereich resultieren die staatlichen Vorgaben zur Erreichung einer minimalen Reichweite von 400 km mit einer Tankfüllung (H_2) in einer Leistungsanforderung von min. 60 kW an den Brennstoffzellenstack. Der Leistungsbedarf des Kompressors und der für den Betrieb des Kompressors benötigten Elektronik beträgt ca. 10% der Leistung des Brennstoffzellenstacks, sprich bei einem Bereich von 60 – 120 kW des Stacks, 6 – 12 kW. Aus diesem Hintergrund avisiert Celeroton für die zukünftige Kompressor-Produktentwicklung einen Leistungsbereich von 6 – 12 kW elektrischer Leistung, was in einem ersten Schritt in einen Massenstrom von 110 g/s bei einem Druckverhältnis von 2.2 bei einer elektrischen Leistung von 12 kW resultiert. Dabei kommt die Drehzahl in dem Bereich von etwa 160 krpm zu liegen.

2.2 Motivation des Projektes

Durch den höheren Leistungsbedarf wird auch ein grösseres Drehmoment benötigt, welches nicht mit der bis anhin bei Celeroton verwendeten Luftspaltwicklungs-Motortopologie (verteilt oder konzentriert-toroid) abgedeckt werden kann. Der Grund dafür liegt in der geringen Drehmomentdichte dieser Topologie. Der Motor kann auch nicht einfach verlängert werden, denn die Anforderungen an Vibrationsresistenz und daraus resultierender Rotordynamik-Randbedingungen erfordern ein möglichst kurzes Motor-Rotorelement (Magnet). Die in der Industrie standardmässig eingesetzten genuteten Motoren (respektive Motorelemente in Kompressoren) mit verteilter Wicklung, werden auch in Brennstoffzellenkompressoren eingesetzt gemäss [1], sind aber wegen des zu langen Wicklungskopfes ebenfalls ungeeignet, zudem skalieren die Kosten dieser Motorbauform nicht genügend mit steigender Stückzahl da die Montage der Wicklung in den Eisenrückschluss nicht oder nur mit Abstrichen in der Performance und hohen Initialkosten teilautomatisierbar ist. Eine mögliche Lösung bieten Motoren mit Toroid-Wicklung, die prinzipbedingt mit einem sehr kurzem Wicklungskopf hergestellt werden kann. Jedoch muss auch diese Motortopologie in speziellen Bauformen ausgeführt werden, damit die Anforderungen von hochdrehenden Kompressoren abgedeckt werden können. Speziell die Rotordynamikanforderungen, die Wirkungsgradanforderungen und die Verlustdichten des Gesamtsystems resultieren in speziellen Motorbauformen mit langen Zähnen und tiefen Nuten. Eine Übersicht über die genannten Motortopologien ist in Tabelle 1 gezeigt. Eine Konzeptskizze einer potentiellen Integration der Motor-Bauform mit Toroid-Wicklung in langen Nuten in einen Turbokompressor ist in Abbildung 1 gezeigt.



<p>Motor mit verteilter Luftspaltwicklung:</p>	<p>Motor mit verteilter Wicklung in Nuten:</p>	<p>Motor mit konzentrierter Toroid-Luftspaltwicklung:</p>	<p>Motor mit Toroid-Wicklung in langen Nuten</p>
<ul style="list-style-type: none"> • Höchste Drehzahlen • Tiefe Leistung / Drehmoment • Mittlere bis lange Motoren (mittlere bis tiefe Rotordynamik- und Vibrationsanforderungen) 	<ul style="list-style-type: none"> • Hohe Drehzahlen • Hohe Leistung / Drehmoment • Mittlere bis lange Motoren (mittlere bis tiefe Rotordynamik- und Vibrationsanforderungen) 	<ul style="list-style-type: none"> • Höchste Drehzahlen • Tiefe Leistung / Drehmoment • Kurze Motoren (hohe Rotordynamik- und Vibrationsanforderungen) 	<ul style="list-style-type: none"> • Höchste Drehzahlen • Hohe Leistung / Drehmoment • Kurze Motoren (hohe Rotordynamik- und Vibrationsanforderungen)
<p>State of the Art:</p>	<p>State of the Art:</p>	<p>Teilweise State of the Art:</p>	<p>Nicht State of the Art:</p>
<ul style="list-style-type: none"> • Im Einsatz bei Celeroton für Kompressoren mit tieferer Leistung. • Im Einsatz in der Industrie für kleine, lange Motoren mit mittlerer Drehzahl. 	<ul style="list-style-type: none"> • Am weitesten verbreitete Motortopologie für grössere Drehmomente. 	<ul style="list-style-type: none"> • In Forschung eingesetzte Motortopologie für höchste Drehzahlen. • In speziellen Industrien eingesetzte Motortopologie für Antriebe kleinerer Leistung. 	<ul style="list-style-type: none"> • In diesem Projekt zu untersuchende Motortopologie. • In Varianten ohne lange Zähne/Nuten in Forschung und Industrie veröffentlichte Motortopologie.
<p>Beispiel: Stator- und Rotorelement für Kompressor (Quelle: ETH Zurich)</p>	<p>Beispiel: Statorelement (Quelle: ATE)</p>	<p>Beispiel: Statorelement für Prüfstand (Quelle: ETH Zürich)</p>	<p>Beispiel: Stator für Kleinventilator (Quelle: Electromag SA)</p>

Tabelle 1: Übersicht über verschiedene Motorbauformen.

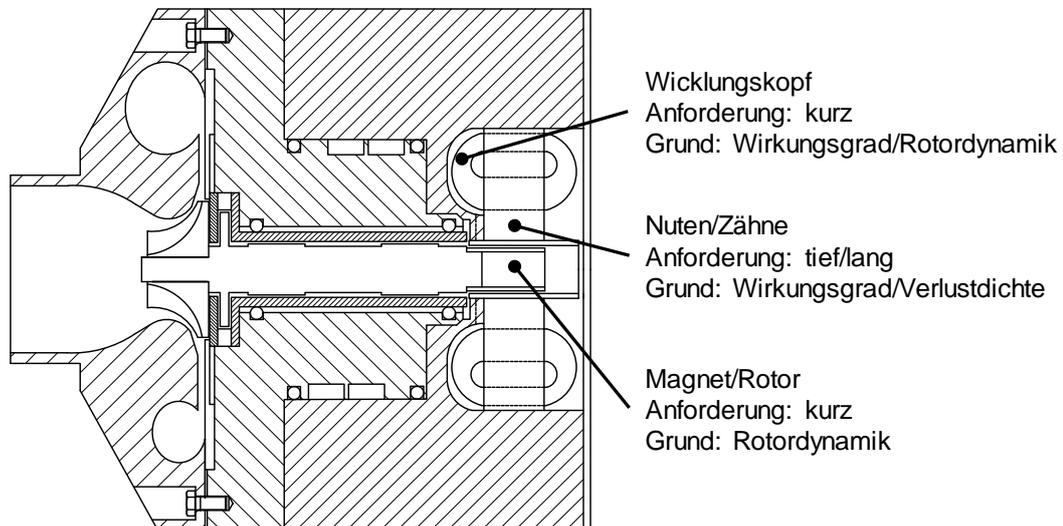


Abbildung 1: Konzeptskizze der Integration der Motor-Bauform mit konzentrierter Toroid-Wicklung in langen Nuten in einen Turbo Kompressor und Anforderungen an die Motorbauform.

2.3 Ziele des Projektes

Erwartete Ergebnisse des Projektes sind:

- Erarbeitung eines fertigungsoptimierten Designs
- Theoretische Erarbeitung und Verifikation der Auslegung für Motorbauformen mit hohen Drehzahlen und hohem Drehmoment
- Realisierung von Prototypen zur Verifikation der Auslegung und der Fertigungsoptimierung

Die Zielsetzung ist, die Lücke in der Auslegung und Fertigung von integrierten Motorbauformen mit hohem Drehmoment und hoher Drehzahl für Turbo Kompressoren zu schliessen. Damit werden auch für Brennstoffzellensysteme grösserer Leistung kompaktere und effizientere Turbo Kompressoren möglich, und damit ein breiterer Einsatzbereich von Brennstoffzellensystemen.

3 Vorgehen und Methode

In einem ersten Schritt soll ein Prototyp der speziellen Motorbauform realisiert werden. Für die Auslegung sollen aus Zeit- und Kostengründen Standardtools verwendet werden. Der erste Prototyp soll experimentell verifiziert werden und somit die Grundlagen für die nachfolgenden zwei Schritte definieren.

In einem zweiten Schritt sollen die speziellen Motorbauformen bezüglich Fertigung optimiert werden. Insbesondere die Wicklungsfertigung (Toroidwicklung) und die Fertigung des Eisenrückschlusses sind nicht konventionell gegenüber anderen Motortopologien, und die spezielle Bauform mit tiefen Nuten erfordert zudem einen spezifischen Wicklungsprozess. Basierend auf den Erkenntnissen der Prototypfertigung soll definiert werden, welche Optimierungsmaßnahmen nötig und sinnvoll sind. Daher soll dieser Schritt zusammen mit der Fertigung des ersten Prototyps starten. Die Auswirkungen von Anpassungen am Motor aufgrund von Fertigungsoptimierung auf die Performance des Motors soll quantifiziert werden. Ein fertigungsoptimierter Prototyp soll realisiert und experimentell verifiziert werden.



In einem dritten Schritt, grösstenteils parallel zum zweiten Schritt, soll basierend auf den Testergebnissen des ersten Prototyps definiert werden, welche kommerziellen Auslegungstools angewendet werden können und welche spezifischen Auslegungstools erarbeitet werden müssen. Die Auslegung soll bei beiden Prototypen (erster Prototyp und fertigungsoptimierter Prototyp) messtechnisch verifiziert werden.

Zur Erreichung der oben beschriebenen Projektziele wird folgender Lösungsweg (Arbeitspakete) definiert:

- I. Auslegung spezielle Motorbauformen (erster Prototyp)
- II. Fertigung erster Prototyp
- III. Verifikation erster Prototyp
- IV. Fertigungsoptimierung damit Einsatz in Serie möglich
- V. Fertigung und Testen (experimentelle Verifikation) eines fertigungsoptimierten Prototyps
- VI. Auslegungstools für spezielle Motorbauformen definieren, erarbeiten und verifizieren
- VII. Quantifizierung und Darstellung der Resultate

4 Resultate

4.1 AP I: Auslegung spezielle Motorbauformen mit Standardtools

In Arbeitspaket (AP) I erfolgt die Auslegung des Prototyps. Der Startpunkt sind die Spezifikationen für einen Motor zum Betrieb eines Kompressor für einen 100 kW Brennstoffzellenstack gemäss Tabelle 2.

1	Allgemeine Spezifikationen	
1.1	Maschinentyp	PMSM
1.2	Polpaarzahl	1
1.3	Anzahl Phasen	3
1.4	Nennmoment (S1)	716 mNm
1.5	Nenn Drehzahl	160'000 rpm
1.6	Nennleistung	12'000 W
1.7	Klemmenspannung (Klemme-Klemme, RMS) unter Nominallast	150 V
1.8	Leistungsfaktor	> 0.7
1.9	Kühlung	Wasserkühlung mit 65°C
1.10	PT100 Temperatursensor	Integriert im Wicklungskopf
1.11	Isolationsklasse Wicklung	Bevorzugt H
2	Geometrie- und Materialvorgaben	
2.1	Permanentmagnet Ø	ca. 15 mm
2.2	Permanentmagnet Länge	ca. 25 mm
2.3	PM Material	SmCo
2.4	Stator Innen-Ø	ca. 18 mm
2.5	Statoreisen Aussen-Ø	ca. 192 mm
2.6	Wicklungsköpfe	< 25 mm

Tabelle 2: Spezifikationen und geometrische Randbedingungen für einen Motor für einen Kompressor für einen 100 kW Brennstoffzellenstack.

Zudem wurde das Kompressorkonzept (Abbildung 1) finalisiert und daraus die geometrischen Randbedingungen in Tabelle 2 abgeleitet.



Die Auslegung erfolgt mit kommerziellen Standard-Motorauslegungstools. Hierzu wird eine Grobauslegung mit einem stark vereinfachten analytischen Modell durchgeführt und die daraus resultierende Statorgeometrie zur weiteren Optimierung mittels kommerzieller Finite-Elemente-Methode (FEM) Tools verwendet. Bei der Auslegung sind folgende Punkte zu beachten:

- Minimierung des Streufeldes zwischen den Zähnen des Motors
(trägt nicht zum Drehmoment des Motors bei)
- Dimensionierung des Jochs auf die Sättigungsflussdichte des verwendeten Stator Eisens
- Die Linearität des Stator Eisens kann nur mit gewissen Einschränkungen angenommen werden

Die Resultate der elektromagnetischen Auslegung sind in Abbildung 2 und in Tabelle 3 zusammengefasst. Das Resultat der Berechnung der Luftreibungsverluste ist ebenfalls in Tabelle 3 gezeigt.

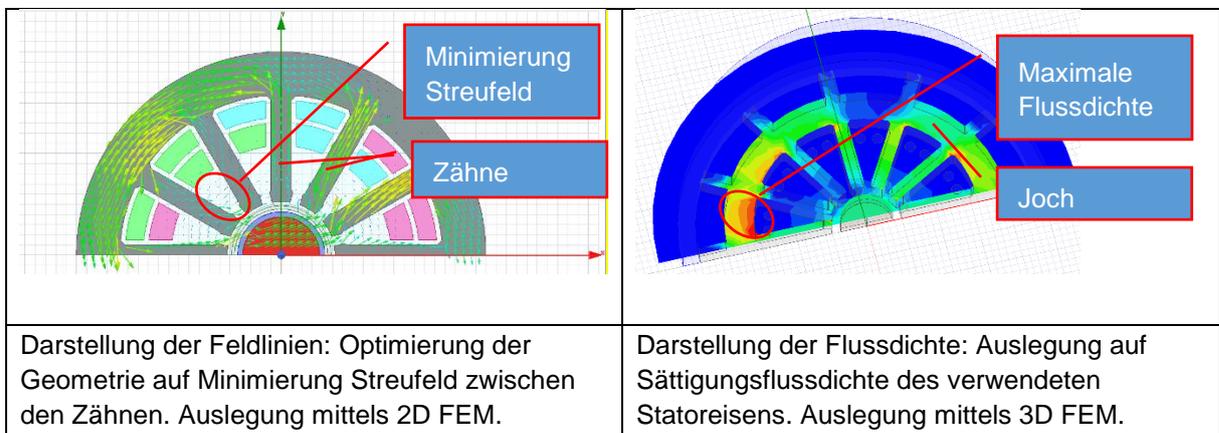


Abbildung 2: Vorgehen und Resultate der elektromagnetischen Auslegung mittels FEM.

Parameter	Wert	Einheit
Wellenleistung	12'000	W
Auslegungsdrehzahl	160'000	rpm
Drehmoment	716.2	mNm
Leerlaufspannung	128	$V_{ph-ph,pk}$
Phasenstrom	76.8	A
Flussverkettung	4.4	mVs
Phasenwiderstand	10.5	mOhm
Phaseninduktivität	95	μH
Rotorverluste	12	W
Eisenverluste	188	W
Kupferverluste	186	W
Lagerverluste (Rotor ohne Magnetpaket)	270	W
Luftreibungsverluste (Magnetpaket)	8	W

Tabelle 3: Motorparameter gemäss FEM-Simulation. Die Verluste sind bei 20 °C angegeben.

Im Anschluss an die Auslegung wird der Motor konstruiert und die Fertigungsunterlagen erstellt, ein Auszug davon ist in Abbildung 3 gezeigt.

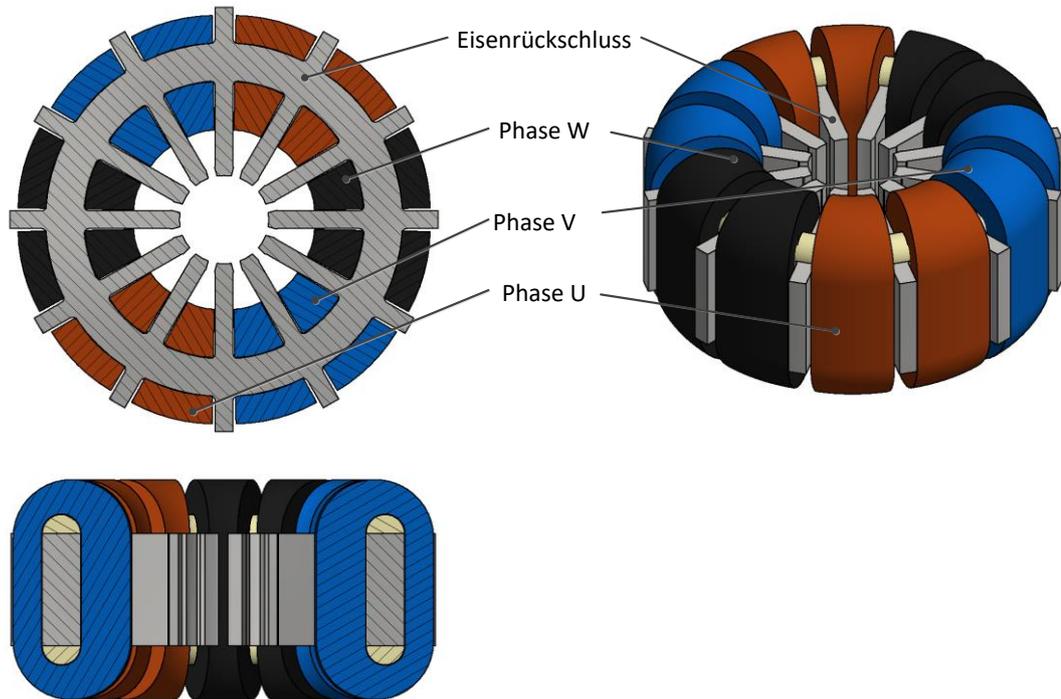


Abbildung 3: Konstruktion und Wicklungsanordnung des ersten Prototypen.

4.2 AP II: Fertigung Prototypen

In AP II wird die Fertigung des ersten Prototyps durchgeführt, Abbildung 4 zeigt die Wicklungsfertigung.

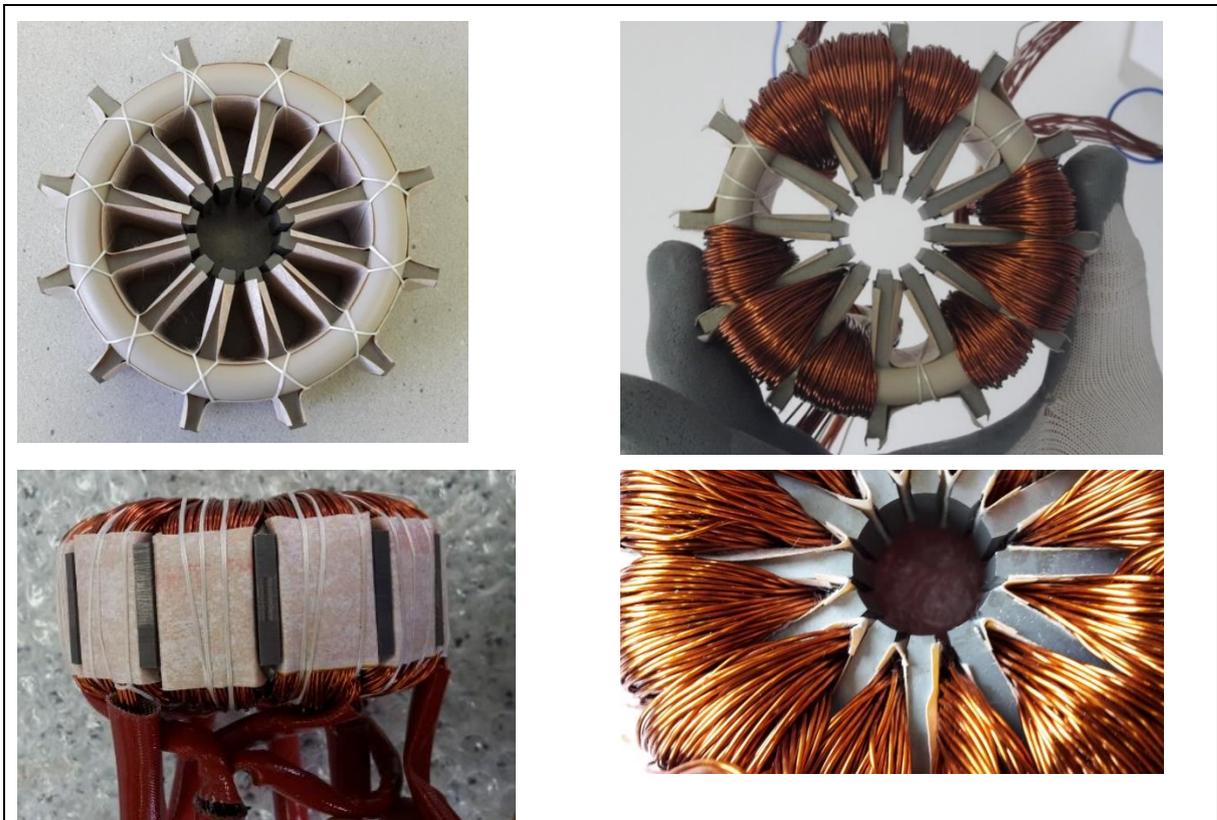


Abbildung 4: Wicklungsfertigung des ersten Prototypen.

4.3 AP III: Verifikation erster Prototyp

Der in AP II gefertigte erste Prototyp wird in einem Motor-Prüfstandes ausgemessen und verifiziert. Die Resultate sind in Tabelle 6 zusammengefasst. Die Induktivität ist tiefer als in der Auslegung, der eruierte Grund sind Wirbelströme im Gehäuse, welche eine Schirmwirkung ergeben. Die Wirbelströme sind auch für die erhöhten Verluste im Auslaufversuch verantwortlich.

4.4 AP IV: Fertigungsoptimierung damit Einsatz in Serie möglich

In APIV wird eine Fertigungsoptimierung auf Basis der Analyse der Fertigung des ersten Prototypen durchgeführt. Insbesondere die Wicklungsfertigung (Toroidwicklung) und die Fertigung des Eisenrückschlusses sind nicht konventionell gegenüber anderen Motortopologien, und die spezielle Bauform mit tiefen Nuten erfordert zudem einen spezifischen Wicklungsprozess. Die ersten Erkenntnisse der Prototypfertigung bestätigen diese Erkenntnis. Daher werden folgende Verbesserungen umgesetzt damit eine Serienfertigung mit reduzierter Fertigungszeit möglich wird:

- Segmentierung des Eisenrückschlusses damit die Spulen vorgewickelt werden können und nicht manuell eingelegt werden müssen
- Verwendung neuartiger Materialien für den Eisenrückschluss die mittels Sinterprozess gefertigt werden können, diese werden bereits für elektrische Maschinen eingesetzt gemäss [2]
- Verwendung von Formspulen dessen Fertigung automatisiert werden kann
- Vereinfachte Nutisolation mittels Kunststoffteile die in Spritzgusstechnik realisiert werden können

Die Resultate der elektromagnetischen Auslegung sind in Abbildung 5 und Abbildung 6 gezeigt, die Annahmen und Resultate der thermischen Auslegung in Tabelle 5 und Abbildung 7. Ein Vergleich der Resultate der Auslegung des ersten Prototypen und des fertigungsoptimierten Designs ist in Tabelle 6



gezeigt. Dabei zeigt sich dass 95% Wirkungsgrad auch mit dem fertigungsoptimierten Design erreicht werden kann, dafür jedoch eine Vergrößerung des Magneten und damit eine Erhöhung des Rotorgewichts in Kauf genommen werden muss, was einen Zielkonflikt mit der Rotordynamik des Systems bedeutet.

Parameter	Wert	Einheit
Wellenleistung	12'000	W
Auslegungsdrehzahl	160'000	rpm
Drehmoment	716.2	mNm
Leerlaufspannung	126	V _{ph-ph, pk}
Phasenstrom	78.2	A
Flussverkettung	4.32	mVs
Phasenwiderstand	12.5	mOhm
Phaseninduktivität	74	μH
Kupferverluste	230	W
Verluste Auslaufversuch ¹	410	W

Tabelle 4: Gemessene Werte des ersten Prototypen.

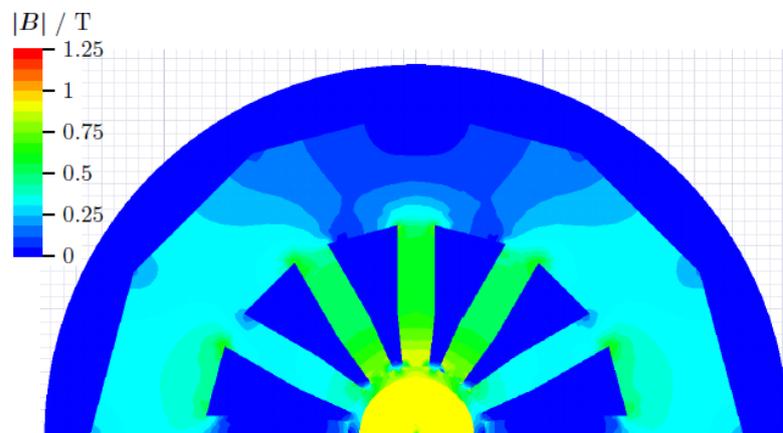


Abbildung 5: Flussdichte fertigungsoptimiertes Design im Leerlauf.

¹ Enthält Anteile von: Eisenverlusten, Rotorverlusten, Wirbelstromverlusten im Gehäuse, Luftreibungverlusten, Lagerverlusten

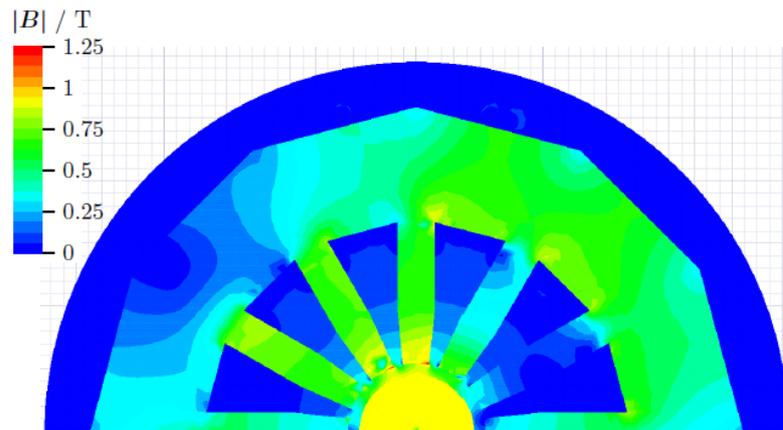


Abbildung 6: Flussdichte fertigungsoptimiertes Design unter Nennlast.

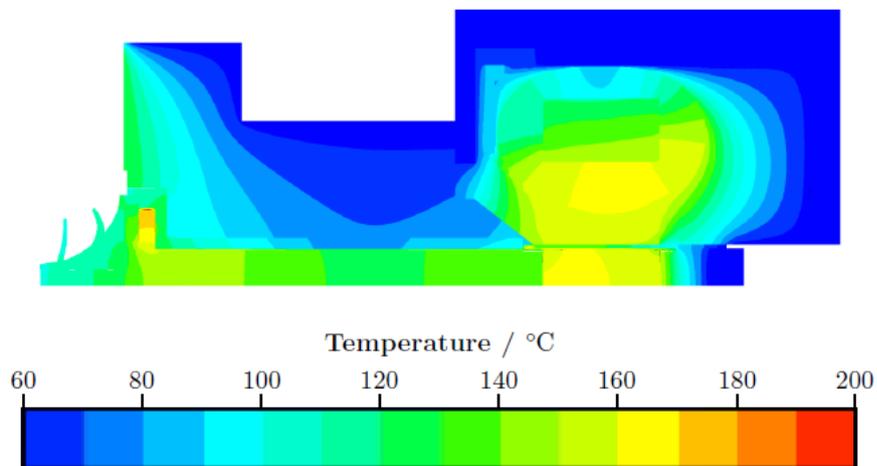


Abbildung 7: Temperaturverteilung fertigungsoptimiertes Design gemäss thermischer FEM-Simulation.

Parameter	Wert	Einheit
Kühlwassertemperatur	55	°C
Rotorverluste	16	W
Eisenverluste	100	W
Kupferverluste	350	W
Lagerverluste	280	W
Luftreibungsverluste	16	W

Tabelle 5: Randbedingungen und Verluste für die thermische Simulation. Die angegebenen Verluste entsprechen einer Temperatur von 160 °C.



Parameter	Erster Prototyp	Fertigungsoptimiertes Design	Einheit
Wellenleistung	12'000	12'000	W
Auslegungsdrehzahl	160'000	160'000	rpm
Drehmoment	716.2	716.2	mNm
Leerlaufspannung	128	160	$V_{ph-ph,pk}$
Phasenstrom	76.8	61.4	A
Flussverkettung	4.4	5.5	mVs
Phasenwiderstand	10.5	14.5	mOhm
Phaseninduktivität	95	89	μH
Rotorverluste	12	5.6	W
Eisenverluste	188	78	W
Kupferverluste	186	170	W
Lagerverluste (Rotor ohne Magnetpaket)	270	270	W
Luftreibungsverluste (Magnetpaket)	8	16	W
Wirkungsgrad	94.8	95.7	%

Tabelle 6: Vergleich der Auslegung des ersten Prototypen und der fertigungsoptimierten Designs. Die Werte wurden mittels 3D-FEM-Simulationen errechnet, sind Auslegungswerte und unterscheiden sich daher von den gemessenen Werten in Tabelle 3 und Tabelle 8.

4.5 AP V: Fertigung und experimentelle Verifikation eines fertigungsoptimierten Prototyps

In AP V wird ein fertigungsoptimierten Prototyps hergestellt und verifiziert, Abbildung 8 den montierten Stator vor dem Verguss.

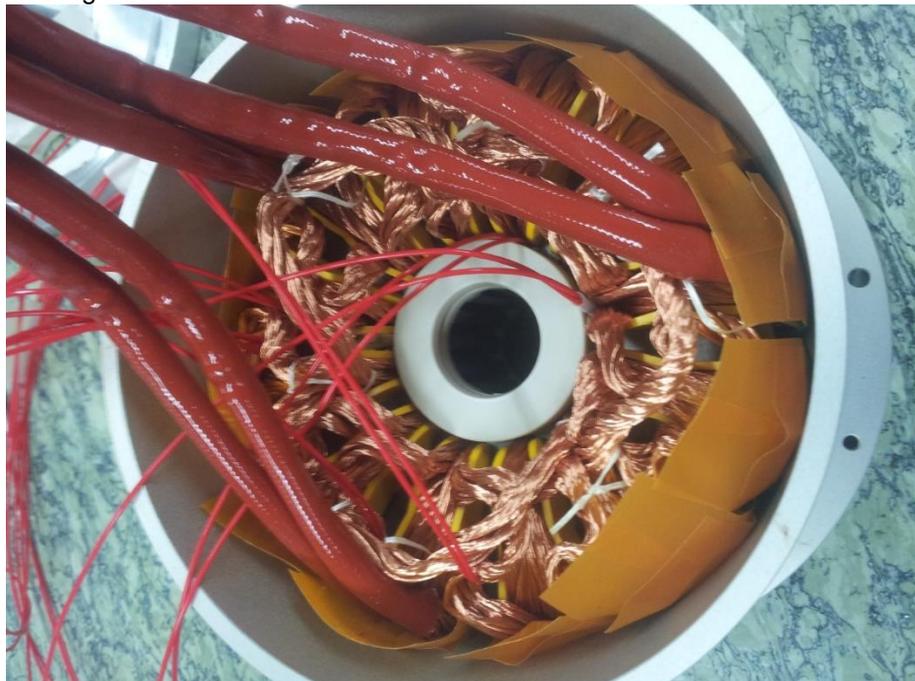


Abbildung 8: Stator bereit zum Verguss.



Als erstes wurden die magnetischen Eigenschaften des Eisenrückschlusses verifiziert. Dies ist wichtig da aufgrund der Segmentierung des Eisenrückschlusses und der limitierten geometrischen Formgenauigkeit der Segmente minimale Luftspalte zwischen den Segmenten entstehen, welche die Permeabilität des montierten Eisenrückschlusses verringern gegenüber der theoretischen Permeabilität des Statoreisens. Der Messaufbau zur Bestimmung der Permeabilität ist in Abbildung 9 gezeigt, damit kann die B-H Kennlinie gemäss Abbildung 10 gemessen werden, aus welcher die gemessene Permeabilität berechnet werden kann. Die Resultate der Messung und der Vergleich mit den theoretisch maximal erreichbaren Werten ohne Luftspalte sind in Tabelle 7 dargestellt. Die Messung wurde für zwei verschiedene Materialien durchgeführt. Die Reduktion der Permeabilität ist im erwarteten Bereich, es zeigt sich aber dass die Reduktion in der Auslegung berücksichtigt werden muss da diese sich direkt auf die Motorparameter wie Flussverkettung und Induktivität auswirkt. Als zweites wird die Flussverkettung gemessen. Dies geschieht mittels eines in einem Kompressor eingebauten fertigungsoptimierten Prototypmotor, gezeigt in Abbildung 11. Der Kompressor wird auf eine Drehzahl von 50'000 rpm beschleunigt und danach in den Leerlauf geschaltet. Während des Auslaufes werden die Klemmenspannungen gemessen gemäss Abbildung 12, aus welcher die Flussverkettung berechnet werden kann (Spannung geteilt durch Drehzahl), gezeigt in Abbildung 13. Tabelle 8 zeigt die Gegenüberstellung der Resultate der Auslegung und der experimentellen Verifikation. Die tiefere Induktivität und Flussverkettung kann aufgrund der reduzierten Permeabilität und die Wirbelströme in den Gehäuseteilen erklärt werden, der erhöhte Phasenwiderstand aufgrund der Spulenübergänge.

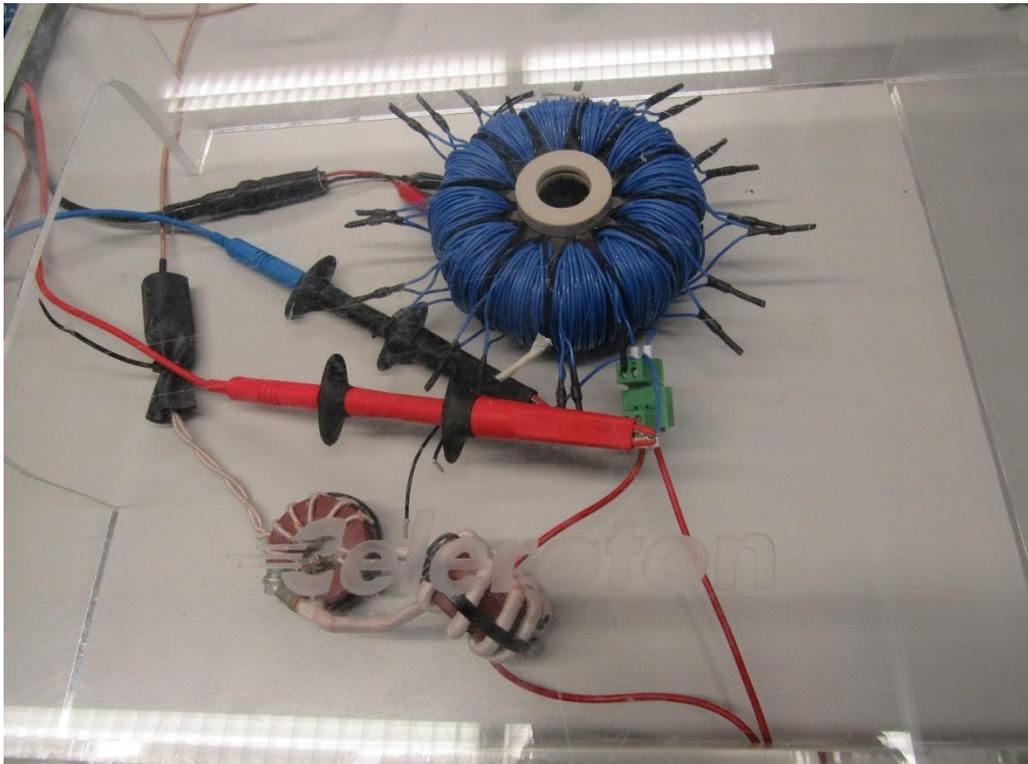


Abbildung 9: Messaufbau zur Aufnahme der BH-Kennlinie. Um das Material voll in die Sättigung zu fahren, sind grosse Feldstärken notwendig. Um den Betriebsstrom dennoch in Grenzen zu halten, sind die vielen Windungen notwendig.

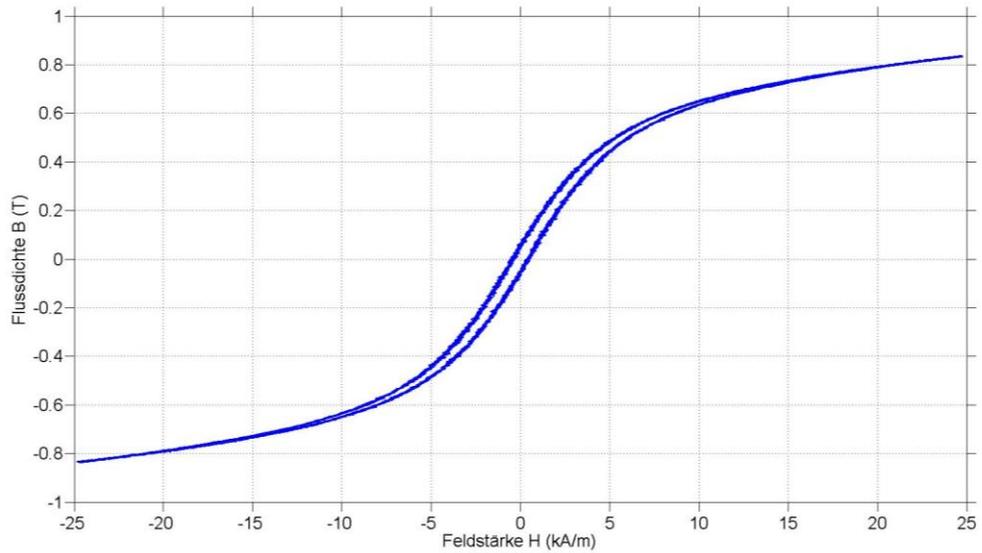


Abbildung 10: BH-Kennlinie des Statoreisenmaterials bei 50 Hz.

Statormaterial	Gemessene relative Permeabilität	Theoretische relative Permeabilität	Einheit
Material 1	109	125	-
Material 2	121	160	-

Tabelle 7: Relative Permeabilität der Statoreisenmaterialien.

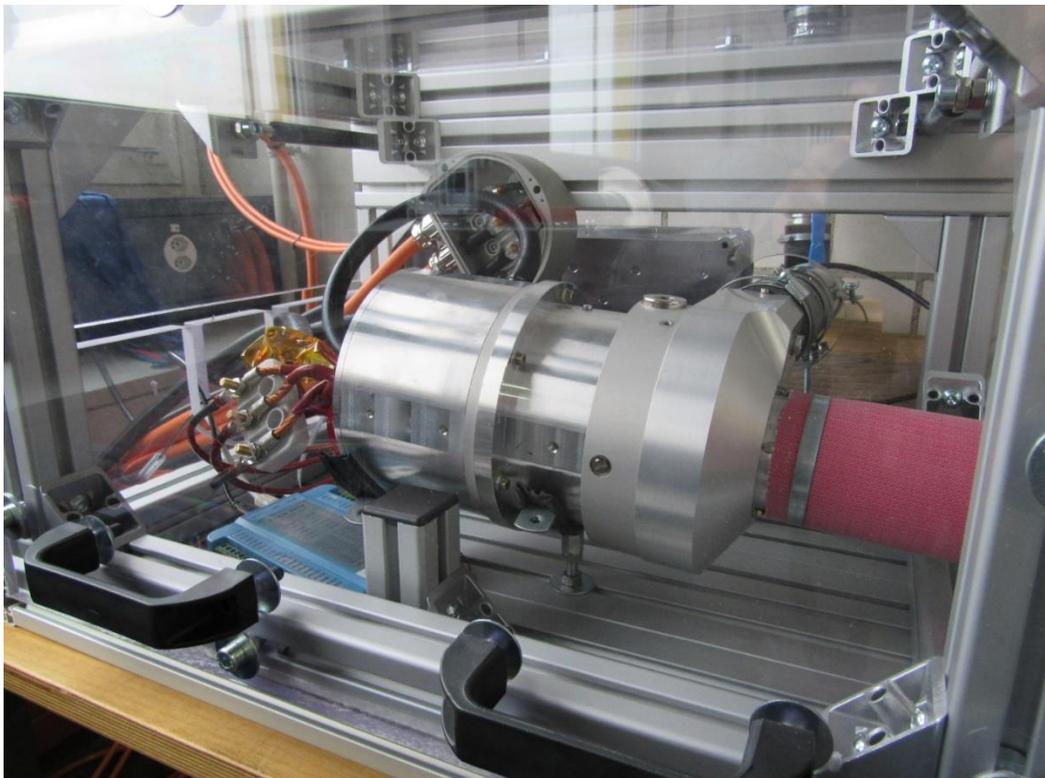


Abbildung 11: Kompressor mit eingebautem fertigungsoptimierten Prototypen auf dem Prüfstand.

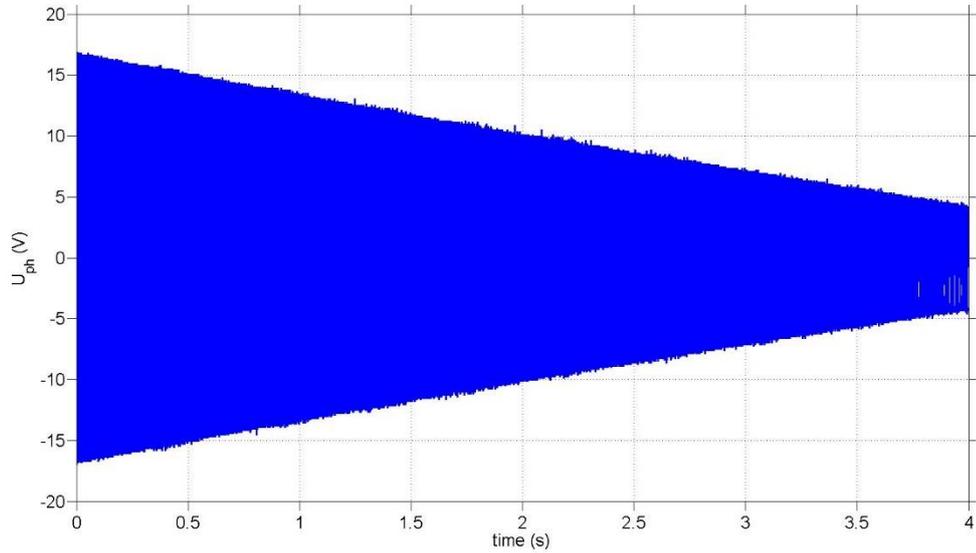


Abbildung 12: Spannungsverlauf während des Auslaufversuches.

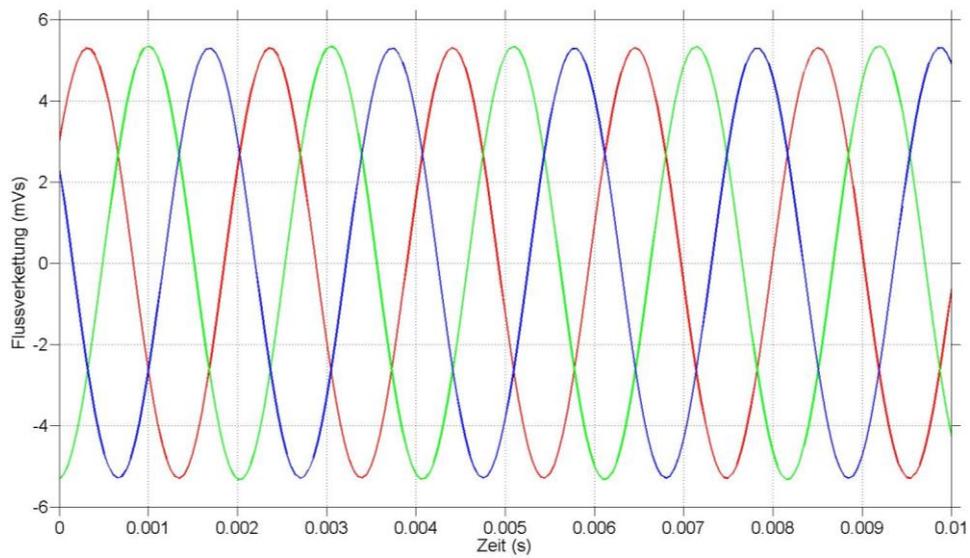


Abbildung 13: Flussverkettung der drei Phasen.

Parameter	Simulation	Gemessen	Einheit
Flussverkettung	5.5	5.0	mVs
Phasenwiderstand	14.5	16.3	mOhm
Phaseninduktivität	89	71	μH

Tabelle 8: Simulierte und gemessene Parameter der Serienmaschine.



4.6 AP VI: Spezifische Auslegung für spezielle Motorbauformen

Parallel zur Auslegung und Verifikation wurden im Arbeitspaket VI analysiert welche spezifischen Punkte in der Auslegung der speziellen Motorbauformen beachtet werden müssen, und für welche Auslegungsbereiche allenfalls spezifische Tools benötigt werden. Dabei ergaben sich folgende Erkenntnisse:

- Die Permeabilität des montierten Eisenrückschlusses unterscheidet sich zur theoretischen Permeabilität, da aufgrund der erreichbaren Formgenauigkeit der Segmente des Eisenrückschlusses magnetische Luftspalte entstehen. Die Verminderung der Permeabilität ist modelltechnisch nur schwer abbildbar, daher wird mittels Verifikationsmessungen ein Reduktionsfaktor bestimmt der in zukünftigen Auslegungen berücksichtigt werden kann.
- Durch die kurze Bauform und die tiefe Permeabilität des Eisenrückschlusses ergeben sich magnetische Streufelder in den Gehäuseteilen. Dies führt zu Wirbelströmen in diesen Gehäuseteilen, welche 2 Auswirkungen haben: Es fallen Zusatzverluste an die den Wirkungsgrad vermindern und die Induktivität und Flussverkettung werden vermindert. Die Wirbelströme können mittels kommerziellen 3D FEM Tools berechnet werden, jedoch muss diese spezifisch durchgeführt werden da sie in üblichen Motoren nicht durchgeführt wird.

Diese Erkenntnisse führen also nicht zu spezifischen Auslegungstools, aber zu einem spezifischen Vorgehen und Ablauf in der Auslegung mittels verschiedener kommerzieller Auslegungstools.

4.7 AP VII: Quantifizierung und Darstellung der Resultate

Tabelle 9 zeigt den quantifizierten Vergleich zwischen dem Industriestandard (gemäss Tabelle 1) und den in diesem Projekt ausgelegten und experimentell verifizierten Motorbauformen. Dabei zeigt sich dass 95% Wirkungsgrad bei tiefen Serienkosten erreicht werden können, dafür jedoch ein Zielkonflikt mit den Dimensionen und damit dem Gewicht des Rotors besteht.

Variante	Kosten @ 1000 Stück	Wirkungsgrad	Status
Motor mit verteilter Wicklung in Nuten	100%	~95%	Industriestandard für hohe Drehzahlen/Drehmomente
Erster Prototyp	85%	~95%	Prototypen-Produktion
Fertigungs-optimiertes Design	20%	~95%	Verifikation erfolgt, Produktionsalisierung ausstehend

Tabelle 9: Quantifizierung und Darstellung der Resultate.

5 Schlussfolgerungen und Ausblick

5.1 Schlussfolgerung

Die Auslegung und experimentelle Verifikation eines für die Serienfertigung optimierten Prototypen zeigt dass 95% Wirkungsgrad bei Faktor 5 tieferen Serienkosten erreicht werden kann, dafür jedoch ein Zielkonflikt mit den Dimensionen und damit des Gewichts des Rotors besteht. Der Vergleich zwischen Auslegung und experimenteller Verifikation zeigt zudem, dass zwar keine spezifischen Auslegungstools erforderlich sind, aber ein spezifischer Ablauf in der Auslegung nötig ist der die magnetischen Luftspalte welche durch die limitierten Formtoleranzen entstehen, sowie die Wirbelströme in den Gehäuseteilen berücksichtigt.



5.2 Nächste Schritte nach Projektabschluss

Der Zielkonflikt zwischen Kosten und Rotorgewicht benötigt eine Gesamtbetrachtung des Kompressorsystems, d.h. inklusive der Rotordynamik und mechanischen Auslegung. Dies wird in einem Redesign des gesamten Kompressors in einem nächsten Schritt berücksichtigt. Zudem wird fertigungsoptimierte Design in einem nächsten Schritt produktionalisiert, das heisst die Lieferkette wird definiert, die Produktionsunterlagen werden erstellt sowie die Produktionsmittel konstruiert und gebaut. Generell werden die Erkenntnisse aus diesem Projekt in verschiedenen bestehenden Produkten und Neuentwicklungen berücksichtigt und umgesetzt.

5.3 Allgemeinen Erkenntnisse

Durch dieses Projekt konnten die allgemeinen Erkenntnisse gemäss Tabelle 10 gewonnen werden.



Bereich	Erkenntnis	Zielpersonen
Luftversorgung für Brennstoffzellenstacks im Bereich 60-120 kW Stackleistung	Die Spezifikationen für Kompressoren für die Luftversorgung von Brennstoffzellenstacks im Bereich von 60 – 120 kW Stackleistung sind: Massenstrom von 110 g/s bei einem Druckverhältnis von 2.2 resultierend in einer elektrischen Kompressorleistung von 12 kW.	Forscher im Bereich Luftversorgung von Brennstoffzellen, Hersteller und Entwickler von Kompressoren für Brennstoffzellen, Systemintegratoren von Brennstoffzellen
Turbo Kompressoren (für die Luftversorgung von Brennstoffzellen oder andere)	Bei Verwendung eines Turbokompressors für die Luftversorgung gemäss Spezifikationen oben kommt die Drehzahl des Turbo Kompressors in den Bereich von etwa 160 krpm zu liegen.	Entwickler von Turbo Kompressoren
Elektromotoren	Für Drehzahlen im Bereich 100-200 krpm und Leistungen im Bereich 10-20 kW gibt es einen Zielkonflikt zwischen Kosten und Rotorgewicht. Die industrielle Standardlösung in diesem Bereich ermöglicht das geringste Rotorgewicht, ist aber bezüglich Kosten nicht geeignet für hohe Stückzahlen (übliche Stückzahlen in industriellen Anwendungen mit ähnlichen Spezifikationen bewegen sich unter 1000 Stück/Jahr). Die neu entwickelte Motortopologie in diesem Projekt erlaubt viel tiefere Kosten in der Serie, hat aber den Nachteil des höheren Rotorgewichtes.	Forscher im Bereich Elektromotoren, Entwickler von Motoren für Turbo Kompressoren für Brennstoffzellen oder andere Anwendungen mit ähnlichen Spezifikationen
Elektromotoren	Neuartige Motortopologien benötigen keine speziellen Auslegungstools, aber sie benötigen ein spezifisches Vorgehen in der Auslegung mittels verschiedener kommerzieller Auslegungstools, welcher Auslegungsvorgang welches die Formgenauigkeit der Segmente des Eisenrückschlusses sowie die magnetischen Streufelder beachtet.	Forscher im Bereich Elektromotoren, Entwickler von Motoren für Turbo Kompressoren für Brennstoffzellen oder andere Anwendungen mit ähnlichen Spezifikationen

Tabelle 10: Allgemeine Erkenntnisse.



6 Publikationen

Im Zuge dieses Projektes sind folgende Publikationen entstanden:

- Simon Wyss, Permanentmagnet-Synchronmaschine mit SMC Stator, Master Thesis, ETH Zürich, 2019.



7 Referenzen

[1] D.-K. Hong, B.-C. Woo, J.-Y. Lee, D.-H. Koo, "Ultra high speed motor supported by air foil bearings for air blower cooling fuel cells", *IEEE Trans. Magn.*, vol. 48, no. 2, pp. 871-874, 2012.

[2] A. Reinap, "Design of Powder Core Motors", PhD Thesis, Lund Institute of Technology, 2005.