

Potentiale durch Kunststoffeinsatz in Elektromotoren

Zur Erlangung des akademischen Grades eines
DOKTORS DER INGENIEURWISSENSCHAFTEN (Dr.-Ing)

von der KIT-Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik
des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT)
angenommene

DISSERTATION

von

Steffen Nicolai Reuter, M. Sc.

geb. in Berlin

Tag der mündlichen Prüfung:

Hauptreferent:

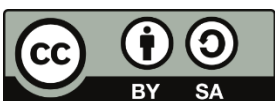
Korreferent:

30. Januar 2024

Prof. Dr.-Ing. Martin Doppelbauer

Prof. Dr.-Ing. Frank Henning

DOI: 10.5445/IR/1000168278



Dieses Werk ist lizenziert unter einer Creative Commons Namensnennung –
Weitergabe unter gleichen Bedingungen 4.0 International Lizenz (CC BY-SA 4.0):
<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/deed.de>

Vorwort

Liebe Leserinnen und Leser,

im Rahmen meiner Rolle als Gruppenleiter Konstruktion im Bereich Neue Antriebssysteme beim Fraunhofer Institut für Chemische Technologie (ICT), entstand die hier vorliegende Dissertation. Die Auseinandersetzung mit leistungsdichten Elektromotoren begleitete mich bereits während meines Studiums, insbesondere durch meine Mitwirkung im Formula Student Team KA-RaceIng. Diese frühe Fokussierung führte mich nahtlos zu meiner ersten Aufgabe bei Fraunhofer – dem Projekt DEmiL, ein direktgekühlter Elektromotor mit integralem Leichtbaugehäuse.

Der entscheidende Anstoß für diese Promotion erfolgte 2018, als ich ein erstes Gespräch mit Herrn Prof. Doppelbauer darüber führte, ob er für einen Maschinenbauer prinzipiell die Möglichkeit einer im Bereich Kunststoffeinsatz bei Elektromotoren sähe. Dieses Gespräch endete mit einem unerwarteten, aber umso ermutigenderen Schritt: Herr Prof. Doppelbauer öffnete die Tür zu seinem Sekretariat und entließ mich mit den Worten: „Machen wir so! Einmal die Anmeldung für eine externe Doktorarbeit für den Herrn Reuter bitte und Ihnen dann viel Erfolg und bis bald!“ Für diesen ersten, entscheidenden Schritt und die folgende exzellente Zusammenarbeit gebührt ihm mein besonderer Dank.

Mein Dank richtet sich ebenso an meinen Institutsleiter Herrn Prof. Henning, der nicht nur durch die Betreuung mehrerer Abschlussarbeiten in diesem Themenfeld wertvolle Hinweise und Einschätzungen beisteuerte.

Ein herzliches Dankeschön geht auch an Dr. Lars Berg, der mir das Vertrauen für die Bearbeitung des Projekts entgegenbrachte und der nicht nur immer ein offenes Ohr, sondern auch einen Rat für Probleme hatte.

Ein großer Dank gebührt meinen Studenten und Kollegen, deren Engagement und Zusammenarbeit es mir ermöglichten, mit Freude und Hingabe an meinen Forschungsthemen zu arbeiten. Hervorheben möchte ich an dieser Stelle Christian Stemmler, der mit seiner Unterstützung einen wertvollen Beitrag zum erfolgreichen Abschluss meiner Arbeit geleistet hat, sowie Tobias Zeller, der mir mehr als einmal eine neue Sichtweise auf die Arbeit ermöglicht hat.

Zum Schluss möchte ich meiner Familie meinen tiefsten Dank aussprechen: Meinen Eltern, die es mir ermöglichten, sorgenfrei zu studieren und zu forschen, und meiner Frau Nina, die mit Verständnis und Unterstützung dafür sorgte, dass ich mich auch außerhalb der regulären Arbeitszeiten – sei es abends oder während des Urlaubs – meiner Dissertation widmen konnte.

Steffen Reuter

Kämpfelbach im Januar 2024

Kurzfassung

In dieser Arbeit wird auf Basis einer vorhandenen elektromagnetischen Auslegung ein permanent erregter Synchronmotor mit innenliegendem Kühlsystem entwickelt, der mittels großserienfähiger Produktionsprozesse prototypisch aufgebaut und vermessen wird.

Es existieren zahlreiche Konzepte und Überlegungen zur effektiveren Kühlung von Elektromotoren als dies nach dem Stand der Technik mittels Kühlhülse oder Ölkühlung möglich ist. Diese werden simulativ oder als vereinfachtes Modell umgesetzt, um die Funktionsfähigkeit nachzuweisen, jedoch lassen sich diese Konzepte oft nicht skalieren, da die notwendigen Produktionsmethoden nicht großserienfähig sind. In dieser Arbeit wird auf Basis eines innenliegenden Kühlkonzepts ein Motor entwickelt, der sich großserienfähig herstellen lässt, anschließend aufgebaut und erprobt. Herzstück der Entwicklung ist der umspritzte Stator, der mit einem Kunststoffgehäuse kombiniert wird, um weiteres Leichtbau- und Integrationspotential zu nutzen. Durch den neuen Ansatz weist der Prototyp eine Dauerleistungsdichte von 5,8 kW/kg auf, was einer Steigerung gegenüber einem Vergleichsmotor mit Kühlhülse um den Faktor 2,6 entspricht. Gleichzeitig konnte das Gewicht um 13 % reduziert werden und durch eine Integration der Lagersitze, der Rotorkühlung und der Phasenstecker die Teileanzahl reduziert werden.

Abstract

"Potentials from the use of plastics in electric motors".

In this thesis, based on an existing electromagnetic design, a permanent magnet synchronous motor with an internal cooling system is developed, prototyped and measured using large-scale production processes.

There are numerous concepts and considerations on how to cool electric motors more effectively than is possible with state-of-the-art cooling sleeves or oil cooling. These are implemented simulatively or as a simplified model to validate their functionality, but often lack the ability to mass produce. In this thesis, a motor is developed based on an internal cooling concept that can be manufactured on a large scale, then built and tested. At the heart of the development is the overmoulded stator, which is combined with a plastic housing to exploit further lightweighting and integration potential. Thanks to this new approach, the prototype has a continuous power density of 5.8 kW/kg. This is a 260 % increase over a reference motor with a cooling sleeve. At the same time, the weight has been reduced by 13% and the number of parts reduced by integrating the bearing seats, rotor cooling and phase connectors into the housing.

Kurzfassung	IV
Abstract	V
Inhaltsverzeichnis	VI
1 Einleitung	1
1.1 Ausgangssituation	1
1.2 Zielsetzung und Abgrenzung der Arbeit	1
2 Stand der Technik	2
2.1 Statorblechpaket	3
2.2 Wicklungsarten	5
2.2.1 Konzentrierte Wicklungen	5
2.2.2 Verteilte Wicklungen	8
2.3 Wicklungsschutz	9
2.4 Verlustmechanismen	12
2.4.1 Stromwärmeverluste	12
2.4.2 Eisenverluste (Ummagnetisierungsverluste)	14
2.4.3 Reibungsverluste	15
2.4.4 Zusatzverluste	15
2.5 Wärmeübertragung	16
2.5.1 Wärmeleitung	16
2.5.2 Konvektion	17
2.5.3 Wärmestrahlung	20
2.6 Temperaturgrenzen	20
2.7 Kühlungskonzepte	21
2.7.1 Außenliegende Stator Kühlung	22
2.7.2 Innere Stator Kühlung	23
2.7.3 Sonderformen der Stator Kühlung	27
2.7.4 Rotor Kühlung	29
2.7.5 Kühlmedien	29
2.8 Kunststoffe	30
2.8.1 Thermoplaste und Duroplaste	30

Inhaltsverzeichnis

2.8.2	Verarbeitung von Duroplasten und gefüllten Duroplasten	32
2.9	Zusammenfassung und Bewertung möglicher Entwicklungsschwerpunkte.....	34
3	Konzept des neuentwickelten Elektromotors.....	36
3.1	Nachteile des Stands der Technik	36
3.2	Ansatz zur Verbesserung gegenüber dem Stand der Technik	36
3.3	Konzeptioneller Aufbau	37
3.4	Hauptabmessungen und Kennwerte	42
4	Detailkonstruktion des entwickelten Elektromotors	43
4.1	Stator.....	43
4.1.1	Statorkühlsystem	45
4.1.2	Kunststoffumspritzung des Stators – mechanische Auslegung	52
4.1.3	Kunststoffumspritzung des Stators – elektrische Auslegung	57
4.1.4	Kunststoffumspritzung des Stators – Werkzeugauslegung.....	58
4.2	Stator im Gehäuse	59
4.3	Rotor.....	64
4.4	Montagekonzept.....	67
5	Prototypenfertigung.....	69
5.1	Stator.....	69
5.2	Spritzpressen – Stator	71
5.3	Spritzgießen – Gehäuse	73
5.4	Zusammenbau.....	75
6	Designverifikation und Ergebnisse	76
6.1	Teiluntersuchungen.....	76
6.1.1	Verifizierung der Statorumspritzung mechanisch	76
6.1.2	Verifizierung der Statorumspritzung elektrisch	81
6.1.3	Verifikation der Phasenstecker	83
6.1.4	Verifikation des Kühlsystems.....	83
6.2	Vorbereitung der Prüfstandsuntersuchungen.....	85
6.3	Validierung auf dem Prüfstand	88
7	Zusammenfassung und Ausblick.....	94
	Abbildungsverzeichnis	97
	Tabellenverzeichnis	100

Inhaltsverzeichnis

Literaturverzeichnis	101
Eigene Veröffentlichungen	107
Betreute studentische Arbeiten	108

Formelzeichen

Zeichen	Einheit	Erklärung
P	W	Leistung
R	Ω	Widerstand
I	A	Strom
T	$^{\circ}\text{C}$	Temperatur
α	1/K	Temperaturkoeffizienten
\dot{Q}	W	Wärmestrom
\dot{q}	W/m ²	Wärmestromdichte
$\text{grad } T$	K/m	Temperaturgradient
ΔT	K	Temperaturdifferenz
λ	W/mK	Wärmeleitfähigkeit
H	W/m ² K	Wärmeübergangskoeffizient
W	m/s	Geschwindigkeit
Δ	M	Dicke der Grenzschicht
A	m ²	Querschnitt
ε	%	Emissionsgrad
σ_s	W/m ² K ⁴	Stefan-Boltzmann-Konstante
c	J/Kkg	Spezifische Wärmekapazität
σ	N/mm ²	Mechanische Spannung
R_m	N/mm ²	Zugfestigkeit
$R_{p0,2}$	N/mm ²	Dehngrenze
F	N	Kraft
A	mm ²	Fläche
m	kg	Masse
P		Polpaarzahl
Z		Zähnezahl
D	mm	Durchmesser
δ	mm	Luftspalt elektrisch
w		Windungszahl

Indizes

Zeichen	Erklärung
V	Verlust
Cu	Kupfer (latein: cuprum)
el	Elektrisch
eff	Effektiv
0	Bezugsgröße
th	Thermisch
Reihe	Reihenschaltung
Parallel	Parallelschaltung
W	Wand
zug	Zug - Längsrichtung
scher	Scherung - parallele Verschiebung gegeneinander
i	Innen
a	Außen
r	Rotor

1 Einleitung

1.1 Ausgangssituation

Batterieelektrische Antriebe für PKWs (sogenannte BEVs – Battery Electric Vehicles) sind inzwischen eine etablierte Antriebsart. Während die Zulassungszahlen von PKWs mit klassischen Verbrennungsmotoren rückläufig sind, werden immer mehr BEVs zugelassen und es drängen neue Hersteller und Modelle auf den Markt. [1] Zukünftig werden, neben der Verfügbarkeit und dem Kaufpreis, die technischen Eigenschaften eine größere Rolle bei der Kaufentscheidung spielen. Aufgrund der höheren Absatzzahlen werden aktuell und zukünftig vermehrt Ressourcen in die Entwicklung investiert. Durch Skaleneffekte werden neue Fertigungsverfahren und Materialien zur Herstellung von Elektromotoren für Traktionsanwendungen relevant. Als Funktionswerkstoffe kommen Eisen-Silizium, Kupfer und seltene Erden (in den Magneten), sowie Kunststoffe und teilweise Keramiken zur elektrischen Isolation, zum Einsatz. Als Strukturwerkstoffe werden fast ausschließlich Metalle, Aluminium und Stahl seltener auch Titan oder Magnesium, eingesetzt. Aufgrund der vielfältigen Vorteile von Kunststoffen werden immer mehr metallische Bauteile im PKW durch Kunststoffbauteile substituiert. Im Bereich der Traktionselektromotoren ist dies bisher nicht der Fall, denn eine simple Materialsubstitution ist hierbei nicht zielführend.

Ein Ansatz, um die Eigenschaften von Elektromotoren zu verbessern, liegt in der Steigerung der Leistungsdichte durch Erhöhung der Kühlleistung. Durch den Einsatz von neuen Materialien und Verarbeitungsmethoden können Optimierungskonflikte (beispielsweise Leistungsdichte und Kosten) aufgelöst und Innovationssprünge erreicht werden.

1.2 Zielsetzung und Abgrenzung der Arbeit

Der Einsatz von hochwärmeleitfähigem Kunststoff, sowohl als Funktions- wie auch als Strukturwerkstoff, bietet das Potential einer echten Innovation anstatt lediglich punktueller evolutionärer Verbesserungen.

Ausgehend vom Stand der Technik relevanter Technologien und Vorentwicklungen werden in dieser Arbeit drei Forschungsfragen abgeleitet. Um diese zu beantworten, wird, aufbauend auf einem elektromagnetischen Entwurf einer permanenterregten Synchronmaschine, der mechanische Aufbau eines Elektromotors mit innen liegender Wicklungskühlung konzipiert. Die Kühlkanäle werden durch den Einsatz wärmeleitfähiger Kunststoffe dargestellt. Deren Verarbeitung im Spritzgussverfahren ist wirtschaftlich und für die Serienfertigung geeignet. Weiteres Potenzial zur Funktionsintegration bieten Kunststoffe mit hoher Wärmeleitfähigkeit und hoher elektrischer Isolation. Dabei sind die Restriktionen zu berücksichtigen, die sich aus den geänderten Fertigungsprozessen in Bezug auf die Geometrie und die Toleranzen ergeben. Das Konzept wird als Prototyp aufgebaut und die entwickelten Lösungen werden einzeln untersucht. Zur Validierung wird ein elektrisch identischer Motor mit Kühlmantel nach Stand der Technik aufgebaut und dem neuentwickelten Motor gegenübergestellt.

2 Stand der Technik

In diesem Kapitel wird der Entwicklungsstand der für die Arbeit relevanten aktuellen Fertigungstechnologien erläutert, zusammengefasst und bewertet. Anschließend werden in Kapitel 2.7 verschiedene relevante Kühlkonzepte betrachtet, bewertet und darauffolgend die Verarbeitung von Kunststoffen und die sich daraus ergebenden Einschränkungen vorgestellt. Auf die Zusammenfassung der Ergebnisse folgt im Kapitel 3 die Identifizierung möglicher Verbesserungspotentiale.

In Abbildung 2-1 ist der typische Aufbau einer permanenterregten Synchronmaschine mit Einzelzahnwicklung (konzentrierte Wicklung) für Traktionsanwendungen dargestellt.

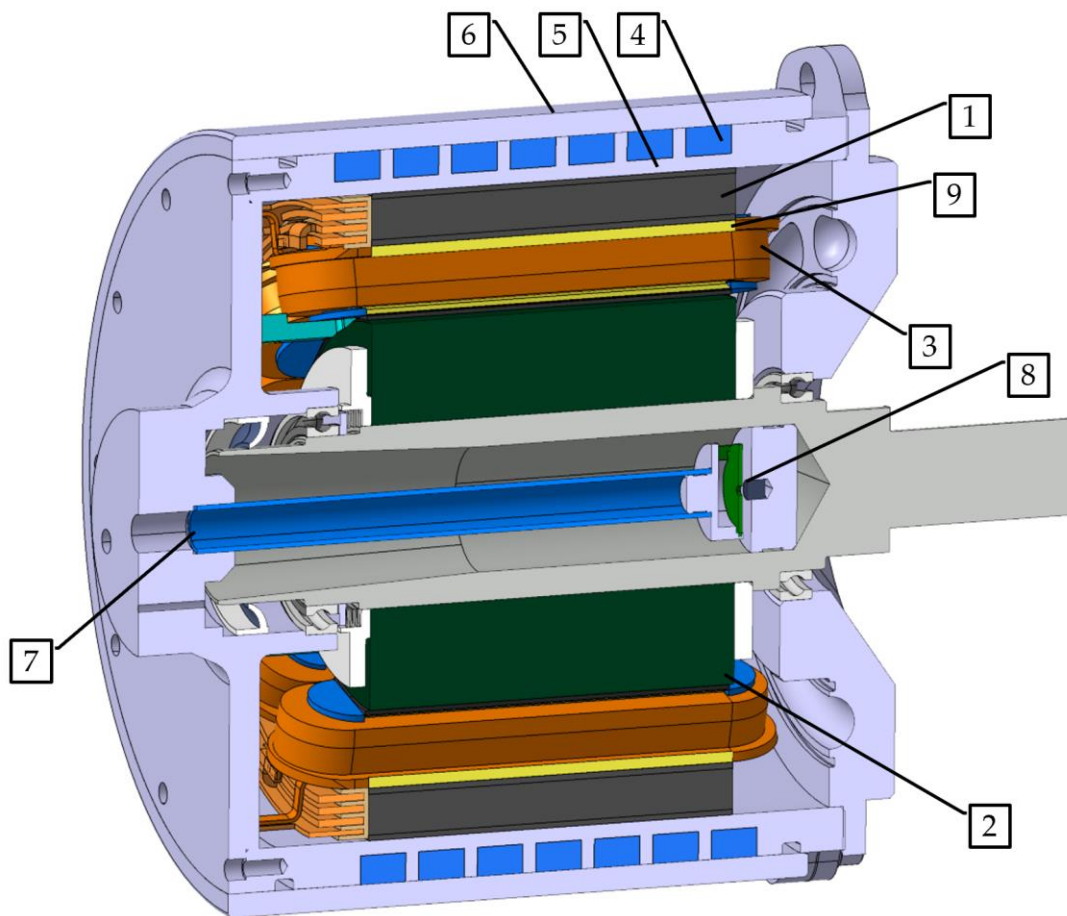


Abbildung 2-1: Aufbau eines Elektromotors mit Mantel- und Rotorkühlung

Der feststehende Stator (1) erzeugt ein Magnetfeld, das den Rotor (2) in Drehung versetzt. Das drehende Magnetfeld im Stator wird durch die Bestromung der Wicklung (3) erzeugt. Zur elektrischen Isolierung ist der Kupferdraht mit Lack beschichtet, zwischen Statorblechpaket und Spule sind zusätzliche Isolationspapiere (9) eingelegt. Der Rotor (2) besteht aus einzelnen

geschichteten Blechen mit eingelassenen (vergrabenen) Magneten. Die Mantelkühlung besteht aus einem zweiteiligen Gehäuse (5 und 6) in dem spiralförmig das Kühlmittel (4) fließt. Zur Kühlung des Rotors wird Kühlmittel in die hohle Rotorwelle geleitet. Zur Regelung des Magnetfelds erkennt ein Drehgeber (8) die Rotorposition.

2.1 Statorblechpaket

Durch das Statorblechpaket wird der magnetische Kreis zum Rotor geschlossen. Das Elektroblech *leitet* das Magnetfeld um drei Größenordnungen besser als Luft. Damit können höhere Drehmomente und eine verbesserte Effizienz erreicht werden. [2] Neben den elektromagnetischen Eigenschaften stützt das Statorblechpaket das Drehmoment des Rotors ab. Aufgrund der elektromagnetischen Felder, die zyklisch durch den Stator verlaufen, muss das Blechpaket in Axialrichtung einen hohen elektrischen Widerstand aufweisen, um Wirbelströme in axialer Richtung zu reduzieren. Aus diesem Grund werden Statoren aus einzelnen Blechen hergestellt, die möglichst hochohmig miteinander verbunden sind. Zur wirtschaftlichen Produktion wurden Möglichkeiten entwickelt, entsprechende Blechpakete in Großserien herzustellen.

Die Kontur des Stators kann aus dem Rohmaterial gestanzt, lasergeschnitten oder drahterodiert werden. Die Stück- bzw. Produktionskosten steigen entsprechend der genannten Aufzählung. Um die Bleche miteinander zu verbinden, kommen mechanische und adhäsive Verfahren zum Einsatz. Letztere, insbesondere das Paketieren mit Backlack, spielen vor allem im prototypischen- und Kleinserienbereich eine große Rolle aufgrund der einfacheren Werkzeuge zur Herstellung. Für große Serien werden die Blechpakete am Außendurchmesser verschweißt oder direkt beim Stanzen der Kontur durch Clinchen zu einem Blechpaket verbunden, da dies Kostenvorteile bietet. Ansätze die Blechpakete mittels additiver Fertigung (3D-Druck) herzustellen sind aktuell Stand der Forschung und sind noch nicht kommerziell einsatzfähig [3].

Statoren können aus **Einzelzähnen** zusammengesetzt werden. Durch ein Aneinanderreihen der einzelnen Zähne kann ein symmetrischer Stator gebildet werden. Die Materialausnutzung des Rohblechs ist durch die kompakte Form der einzelnen Zähne hoch und die Verwendung von anisotropen Blechwerkstoffen zur Verbesserung der elektrischen Eigenschaften ist möglich. Durch die gute Zugänglichkeit des Einzelzahns lassen sich diese sehr einfach bewickeln. Nachteilig ist die Vergrößerung der Schnittkanten, die oftmals einen Grat aufweisen und damit die Isolation zwischen den Blechen reduzieren. Dies führt zu erhöhten Wirbelstromverlusten. Ebenfalls werden deutlich mehr einzelne Bleche benötigt und die Zähne müssen zueinander mechanisch fixiert werden. Elektromagnetisch negativ auf Drehmoment und Wirkungsgrad wirken sich Spalte zwischen den Zähnen, die in einem Bereich hoher Flussdichte liegen, aus.

Als **Vollschnitt** wird das Herstellen aus kompletten Blechschnitten bezeichnet. Dabei werden weniger Schnittkanten erzeugt, die Zähne sind zueinander mechanisch fest verbunden und die Gesamtlänge an Blechschnitt reduziert sich. Nachteilig ist die deutlich schlechtere Ausnutzung

des Rohmaterials sowie die schlechtere Zugänglichkeit zur Einbringung der Wicklung bzw. zur Bewicklung selbst.

Zusätzlich gibt es zahlreiche Sonderbauformen von Statorblechpaketen. Als **Slinky** wird ein Stator bezeichnet, der aus einem Zahnband wie eine Spiralfeder aufgewickelt wird, dargestellt in Abbildung 2-2. Die Materialausnutzung ist hierbei sehr gut und durch die Möglichkeit des kontinuierlichen Aufwickelns bietet die Bauart ein hohes Potential zur Serienfertigung. Nachteilig ist der hohe Umformungsgrad durch die Biegung des Jochs, was zu einer Dickenänderung des Materials führt. Auch sind die einzelnen Schichten zueinander elektrisch verbunden, was zu erhöhten Wirbelstromverlusten führt. [4]

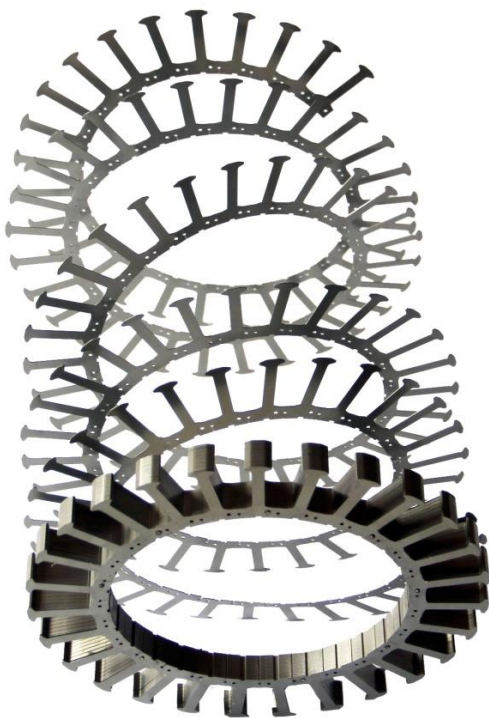


Abbildung 2-2: Slinky Statorblechpaket eines Außenläufers [5]

Besonders für große elektrische Generatoren werden Statoren auch aus verbundenen Einzelzahnsegmenten zusammengesetzt. Diese Bauform bietet vor allem Fertigungsvorteile, da die Blechsausnutzung deutlich besser als im Vollschnitt ist und die Festigkeit des Stators durch die überlappenden Blechsegmente gewährleistet ist.

Eine weitere Möglichkeit ist die Herstellung des Stators aus **SMC** (Soft Magnetic Compound). Diese können im Wesentlichen mittels zweier verschiedener Herstellungsverfahren gefertigt werden: Spritzgießen und Sintern. Durch das Einbetten von Eisenpartikeln in eine Kunststoffmatrix werden Eisenkerne in Spritzprozessen hergestellt. Die feinen Eisenpartikel berühren sich nur punktuell und es entsteht ein Werkstoff mit – im Vergleich zu Luft – hoher

Permeabilität und gleichzeitig hohem elektrischen Widerstand. Um einen mechanisch festen Stator zu fertigen, muss der Kunststoffgehalt hoch genug sein, damit die Eisenpartikel im Kunststoff eingebettet sind und nicht der Kunststoff zwischen den (losen) Eisenpartikeln. Durch die Möglichkeit der Urformung lassen sich dreidimensionale Geometrien darstellen mit entsprechenden Möglichkeiten das magnetische Feld zu beeinflussen. Aufgrund des im Vergleich zu klassischen Blechpaketen reduzierten Eisengehalts erreichen SMCs jedoch nur eine geringere Permeabilität. Dieser Nachteil kann nicht durch die niedrigeren Wirbelstromverluste überkompensiert werden. Deshalb werden diese Materialien momentan nicht für Traktionsmaschinen eingesetzt. Klassische Blechpakete bestehen aus Silizium-Eisen-Blech, welches in verschiedenen Materialgüten und Blechdicken verfügbar ist. Durch den Siliziumanteil im Eisen sinkt die elektrische Leitfähigkeit zur Verringerung der Wirbelstromverluste. [2, 6]

Eine weitere Möglichkeit der Herstellung besteht durch Sintern. Das Basismaterial ist Eisenpulver. Durch die Zugabe weiterer Metalle und Halbmetalle können die Eigenschaften verbessert werden. Äquivalent zu Elektroblech kann Silizium zur Verringerung der Leitfähigkeit und der damit verbundenen Reduzierung der Wirbelstromverluste hinzugefügt werden. Das Pulver wird unter hohem Druck von 600-800 MPa in Form gepresst. Es entsteht der sogenannte Grünling. Dieser wird anschließend bei Temperaturen von 1120-1250 °C unter Schutzatmosphäre gesintert. Es werden Materialdichten von 92-94 % erreicht. Durch den Einsatz neuerer Verfahren wie dem HDT (High Density Technology) können Materialdichten von 95-98 % erreicht werden. Vorteilhaft ist die höhere Permeabilität im Vergleich zu gespritzten SMC. [7]

2.2 Wicklungsarten

Der teuerste und komplexeste Herstellungsschritt bei der Fertigung von Elektromotoren ist das Bewickeln der Statoren mit dem Kupferlackdraht. [8] Dabei kann grundsätzlich zwischen konzentrierter und verteilter Wicklung unterschieden werden. Je nach Fertigungsverfahren und Maschinentyp kann nur einer der beiden Wicklungsarten angewandt werden. [9] Weitere Unterscheidungsmerkmale ergeben sich bezüglich des erreichbaren Nutzfüllfaktor (Verhältnis der effektiven Querschnittsfläche der Kupferleiter zur theoretisch maximalen Querschnittsfläche der Nut), der Wiederholbarkeit der Drahtpositionierung, der Zykluszeit und der umsetzbaren Komplexität des Wickelschemas.

In den folgenden beiden Unterkapiteln werden die genannten Wicklungsarten und deren Fertigungsverfahren vorgestellt und ihre Eigenschaften erläutert.

2.2.1 Konzentrierte Wicklungen

Konzentrierte Wicklungen sind um einen einzelnen Zahn konzentriert. Die elektrischen Eigenschaften der Wicklungen werden in der Literatur eingehend behandelt. [9–11] Aufgrund der komplexen Wechselwirkung mit Blechpaket und Rotor sind pauschale Aussagen zu den Eigenschaften schwierig zu treffen. Jedoch führt eine konzentrierte Wicklung im Allgemeinen zu

einer erhöhten Drehmoment-Welligkeit sowie zu erhöhten Verlusten bzw. einem reduzierten Wirkungsgrad. Weiterhin ergibt sich durch die Drehmomentwelligkeit und die hierdurch erzeugten Vibrationen ein schlechteres NVH-Verhalten (Noise Vibration Harshness – „Geräusch, Vibration, Rauheit“). Vorteilhaft sind die deutlich einfachere Fertigung und die geringe Wickelkopfhöhe. Aufgrund der Eigenschaften werden konzentrierte Wicklungen praktisch ausschließlich in Hybridantrieben eingesetzt. [10]

In Abbildung 2-3 ist das Prinzip des **Linearwickelns** dargestellt.

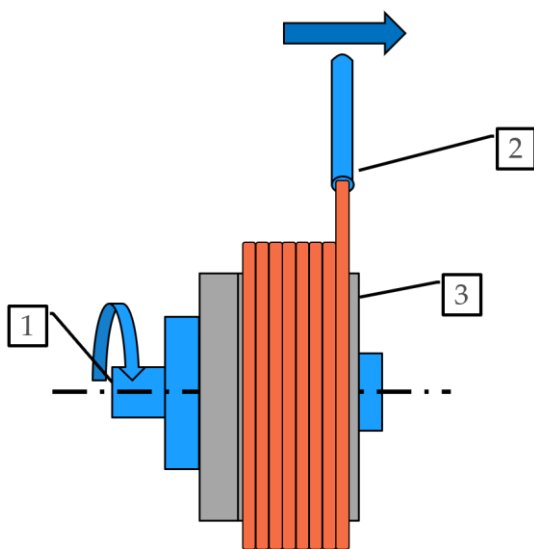


Abbildung 2-3: Prinzip des Linearwickelns nach [12]

Auf einer Drehachse (1) wird der Spulenträger, z.B. ein Einzelzahn (3), befestigt. Durch einen Drahtfühler (2) wird der Draht kontrolliert abgelegt. Dieses Fertigungsverfahren ist weit verbreitet und erlaubt auch komplexe Wicklungsaufgaben, beispielsweise das hochkante Bewickeln mit Flachdraht. Allerdings ist ein guter Zugang zum Spulenkern notwendig. Es können folglich nur Einzelzähne bewickelt werden. [13]

Wird als Spulenträger kein Statorzahn, sondern eine Hilfsvorrichtung verwendet, kann die Spule **körperlos** oder als **Luftspule** hergestellt werden. Diese kann in eine angepasste Statorgeometrie eingefädelt (Einziehwicklung) oder eingebaut werden (geteilter Stator). [13]

Beim **Flyerwickeln**, in Abbildung 2-4 dargestellt, werden am Spulenträger oder dem Eisenkern (3) Vorrichtungen zur Drahtführung (2) angebracht. Durch die Drehung des Drahtfühlers (1) wird der Draht auf das Bauteil aufgewickelt. Aufgrund der Drahtspannung gleitet dieser über die polierte Führungsvorrichtung an die gewünschte Stelle. Nachteilig ist die eingeschränkte Kontrolle über die Verteilung der Wicklung bzw. die genaue Position der einzelnen Drähte. Einsatzbereich ist heutzutage vor allem das Bewickeln von innenliegenden Statorn und Rotoren in großer Stückzahl. [13]

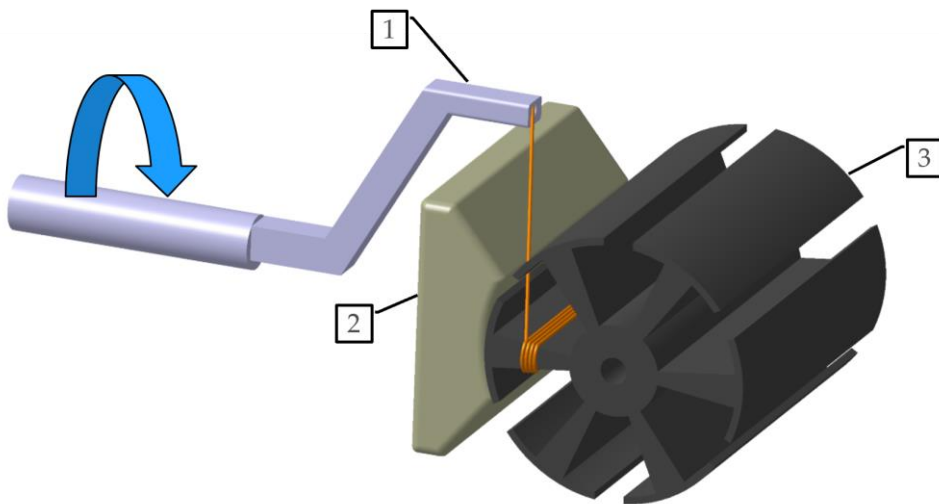


Abbildung 2-4: Prinzip des Flyerwickelns nach [14]

Beim **Nadelwickelverfahren** wird der Draht mit einer hohlen Nadel konturgeführt abgelegt. In Abbildung 2-5 sind die wichtigsten Bauteile für den Prozess sowie deren Bewegungsrichtungen abgebildet. Vorteilhaft ist das genau platzierte Ablegen der Drähte. Nachteilig ist die hohe Zykluszeit und der benötigte Platz für die Nadel in der Nut, wodurch der mögliche Nutfüllgrad sinkt. [13, 15]

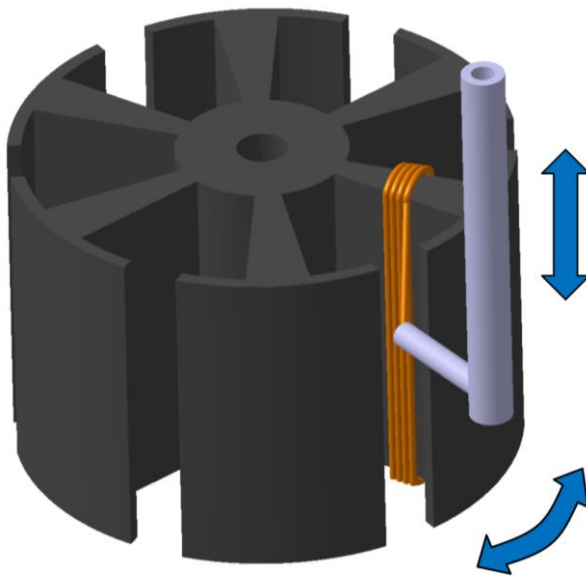


Abbildung 2-5: Kinematisches Prinzip des Nadelwickelns einer Zahnspulenwicklung nach [12]

Die Herstellung von konzentrierten Wicklungen ist auf vielfältige Weise möglich. Die verschiedenen Möglichkeiten erlauben für nahezu jede Stator-Geometrie eine kostengünstige Herstellung und der kurze Wickelkopf ist insbesondere bei kurzen Bauformen vorteilhaft. Diese Fertigungsvorteile gehen zu Lasten der elektromagnetischen Eigenschaften, weshalb neben den fertigungstechnischen Herausforderungen auch der Bauraum über die Wahl der Wicklung entscheidet.

2.2.2 Verteilte Wicklungen

Zur Herstellung verteilter Wicklungen eignet sich das bereits beschriebene Verfahren des **Flyerwickelns**. Eine weitere Methode ist die **Einziehwicklung**. Hierfür werden als Zwischenschritt zuerst Luftspulen hergestellt, die dann mittels eines Übertragungs- oder Einziehwerkzeugs in den Stator eingebracht werden. Das Verfahren ist umfänglich verstanden und beherrschbar. Der Nutfüllgrad ist niedriger als bei einer Hairpin- und ähnlich einer Nadelwicklung. Durch das Einziehen der Wicklung in die Nut kann die Position der Drähte in der Nut nicht gesteuert werden. Zusätzlich werden aufgrund des direkten Kontakts der Phasendrähte im Wickelkopf, Phasentrenner aus Isolationspapier benötigt. Diese können aktuell nicht automatisiert, sondern nur mit entsprechendem Qualitätsrisiko manuell eingebracht werden. Die notwendigen Werkzeuge sowie der prinzipielle Ablauf sind in Abbildung 2-6 dargestellt. [16]

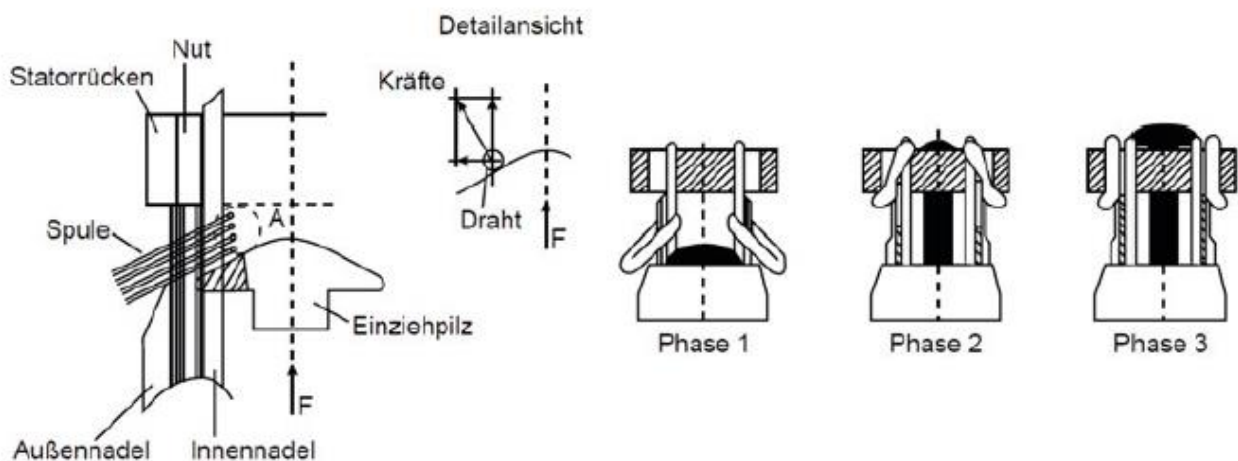


Abbildung 2-6: Prinzip des Einziehens der Wicklung [16]

Eine weitere Möglichkeit zur Erzeugung verteilter Wicklungen sind **Formspulen**. Diese lassen sich fertigungstechnisch in Hairpin-, I-Pin-, D-Pin- und Wellenwicklung einteilen. Für die drei zuerst genannten Wicklungsarten werden meist rechteckige Drähte vorgebogen und in die Nuten gesteckt. Danach erfolgt ein Verdrehen (*twisten*) der offenen Enden und ein Verschweißen, um eine verbundene Wicklung zu erhalten. Vorteilhaft ist der hohe Nutfüllgrad und die gute Kontrolle über die Position der Drähte. Nachteilig ist der hohe Aufwand des Verschweißens bei höherer Nut- und Windungsanzahl. In der Abbildung 2-7 ist ein Stator mit Hairpinwicklung sowie drei einzelne Hairpins dargestellt. [13]

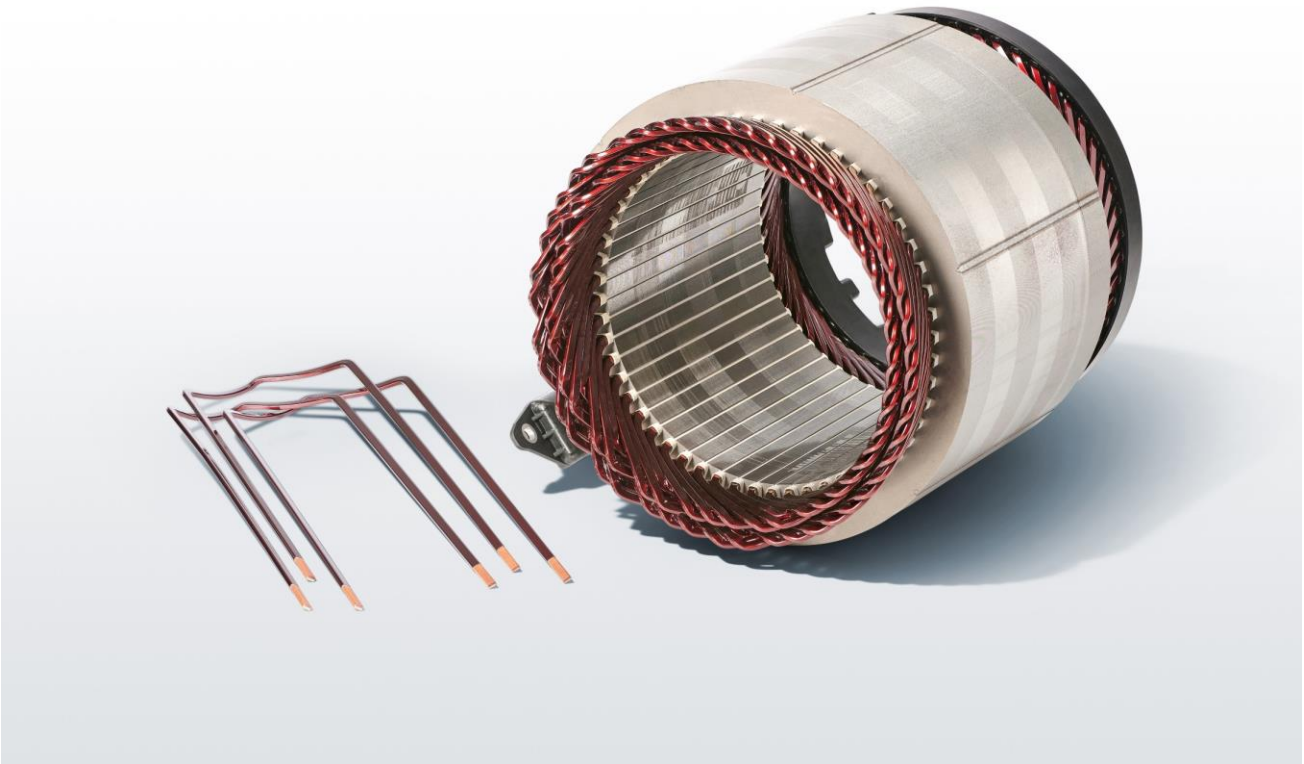


Abbildung 2-7: Stator mit Hairpinwicklung [17]

Eine Weiterentwicklung der Formspulen stellt die **Wellenwicklung** dar. Der Kupferdraht liegt als flache, wellenförmige Struktur vor. Diese wird in den Stator gewalzt und lediglich die Enden müssen elektrisch verbunden werden. Im Vergleich zur klassischen Hairpinwicklung können niedrigere Wickelköpfe umgesetzt werden und der Aufwand für die Verschaltung ist deutlich geringer. Da die Drähte radial in die Nut eingefügt werden, muss entweder ein im Verhältnis zur Nut sehr dünner Draht gewählt werden, um von der Rotorseite eingeführt zu werden, oder ein mehrteiliger Stator aufgebaut werden. Eine weitere Möglichkeit ist es, Nuten ohne Zahnfüße einzusetzen. Dies ermöglicht einen großen Drahtquerschnitt und hohen Nutfüllfaktor, verschlechtert jedoch stark die elektromagnetischen Eigenschaften. [13]

2.3 Wicklungsschutz

Elektromotoren, die für den Antrieb von PKWs eingesetzt werden, sind Vibrationen und Stößen ausgesetzt. Weiterhin werden sie zeitweise nahe ihrer thermischen Leistungsgrenzen betrieben. Die Isolationsschicht von Kupferlackdrähte ist nach IEC 60317 zwischen 2-4 μm stark und weisen Isolationsfehler auf. Diese werden als Isolationsfehler pro 100 m Draht angegeben und liegen im Bereich üblicher Drähte zwischen 1-40 1/100 m. Um eine Isolation auch bei hoher elektrischer Spannung zu gewährleisten, muss der Draht folglich zusätzlich isoliert werden. Im Bereich der Nut wird dies über das Isolationspapier zum Stator hin bewerkstelligt. Die Wicklung erwärmt sich im Betrieb und muss gekühlt werden, dafür muss diese an das Blechpaket oder

Gehäuse thermisch angebunden werden. Diese Aufgaben werden durch den Wicklungsschutz übernommen. Die Prozesse zum Aufbringen dieses Schutzes werden im Folgenden vorgestellt.

Imprägnieren beschreibt beispielsweise das Überziehen der Wicklung mit einer dünnen Schicht Harz. Um Material zwischen die einzelnen Drähte der Wicklung zu bekommen, wird niederviskoses Harz eingesetzt und der Motor vorgewärmt. Ein übermäßiges Abtropfen wird verhindert, indem das Harz auf den Wickelkopf und die Nuten geträufelt (**Träufeln**) wird und der erwärmte Stator während des Aushärtens kontinuierlich rotiert, dargestellt in der Abbildung 2-8. Nachteilig sind hierbei die lange Zykluszeit sowie die geringe Wärmeleitfähigkeit des Harzes. Da das Material durch Schwerkrafteinfluss und Kapillarkräfte zwischen die Leiter fließen soll, können keine oder nur geringe Füllstoffmengen zur Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit eingesetzt werden. In der Tabelle 2-1 sind beispielhaft verschiedene Imprägnierharze und ihre Wärmeleitfähigkeiten angegeben, mit einer Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit geht auch eine Erhöhung der Viskosität einher und die Eindringtiefe in die Nut sinkt.

Tabelle 2-1: Wärmeleitfähigkeit verschiedener Imprägnierungsharze

Material	Electrolube ER1450 [18]	Electrolube ER2221 [18]	Araldite XB2252 [19]	PUR LE26/30 [20]
Wärmeleitfähigkeit in W/mK	0,2	1,2	0,7	2,0
Viskosität in mPa·s	250	3.000	2.000	5.800-6.800

Eine weitere Möglichkeit bietet das **Tauchen**. Der Stator wird in ein Harzbad getaucht und anschließend das anhaftende Harz thermisch ausgehärtet. [13] Eine Weiterentwicklung ist das **Strom-UV-Verfahren**. Nach dem Tauchen wird mittels UV das Harz oberflächlich ausgehärtet und ein weiteres Abtropfen vom Stator verhindert. Die thermische Durchhärtung erfolgt mittels Aufheizens durch Bestromung der Wicklung. Auch bei diesem Verfahren können nur geringe Volumenprozent an Füllstoffen mit entsprechend schlechten Wärmeleitfähigkeiten eingesetzt werden. [21]

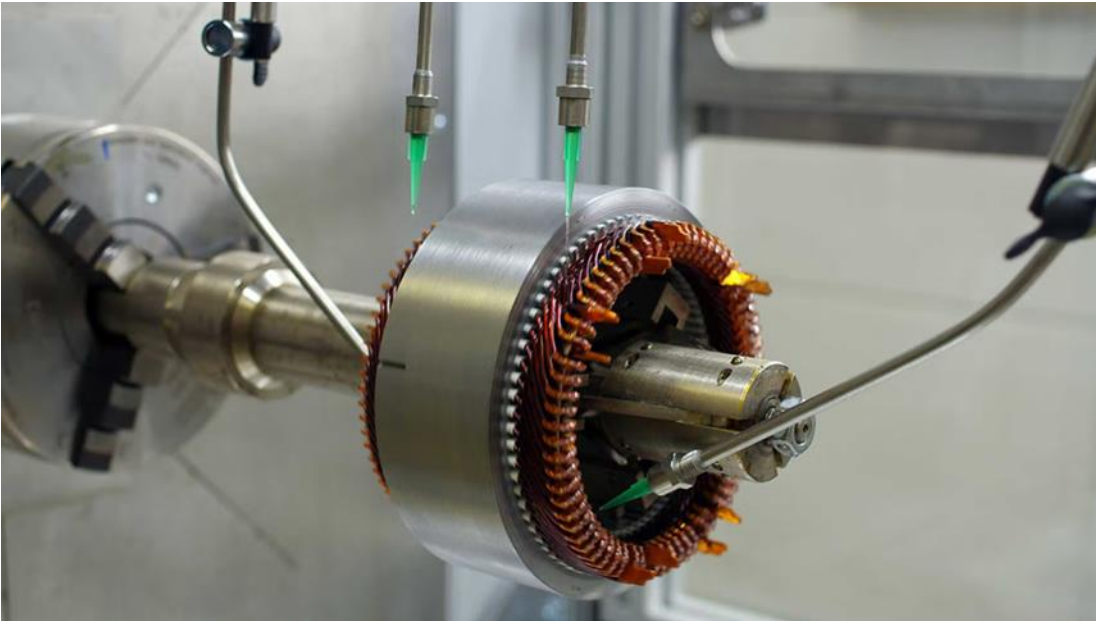


Abbildung 2-8: Imprägnierung eines Stators [22]

Eine weitere Möglichkeit bietet die **Vakuum-Imprägnierung**. Um Fehlstellen (Lufteinschlüsse) im Verguss zu reduzieren, wird dieser im Vakuum durchgeführt. Der Stator sitzt eingepresst im Gehäuse und der Bereich des Rotors wird mittels eines Kerns freigehalten. Es können aufgrund des geringen möglichen Füllstoffgehalts ebenfalls nur Harze mit begrenzter Wärmeleitfähigkeit eingesetzt werden. Durch die direkte thermische Anbindung des Wickelkopfs an das (Kühl-) Gehäuse kann die Leistungsfähigkeit gesteigert werden. [23]

Wärmeleitfähigere Materialien mit entsprechend höherem Füllstoffanteil können eingesetzt werden, wenn der Stator **umspritzt** wird. Durch den höheren Verarbeitungsdruck kann auch Material mit einem höheren Füllstoffanteil und damit einhergehender höherer Viskosität verarbeitet werden. Durch den Spritzdruck kann das Material auch in enge dünne Spalte, wie zwischen die Wicklungen, eingebracht werden. Nachteilig sind die hohen Kosten für die hochwärmeleitfähigen Füllstoffe sowie die Anforderungen an die Gestaltung der Umspritzung aufgrund der Fertigungsrestriktionen der Spritzprozesse. [13]

Zusätzlich, oder bei geringeren Spannungen auch alternativ, kann der Wickelkopf **bandagiert** werden. Dabei wird zwischen den Phasensträngen im Wickelkopf zusätzliches Isolationsmaterial eingebracht. Dieses wird zusammen mit den Wicklungen vernäht. Hierdurch wird die notwendige Isolierung zwischen den Phasen erreicht. Weiterhin steigt die Packungsdichte des Wickelkopfs und die einzelnen Drähte werden insgesamt fixiert, sodass sich diese nicht mehr durch Vibrationen oder Lorentz-Kräfte bewegen und gegenseitig beschädigen können. [13]



Abbildung 2-9: Bandagierter Wickelkopf mit Phasentrennern [24]

2.4 Verlustmechanismen

Die gesamten Verluste eines elektrischen Motors werden üblicherweise in vier Ursachen unterteilt:

- Stromwärmeverluste
- Eisenverluste
- Reibungsverluste
- Zusatzverluste

2.4.1 Stromwärmeverluste

Verluste, die in den Kupferwicklungen auftreten werden Kupferverluste $P_{V\text{CU}}$ genannt. Sie bestehen aus ohmschen Verlusten, die vom elektrischen Widerstand R_{el} und quadratisch vom aufgeprägten, effektiven Strom I_{eff} abhängig sind.

$$P_{V\text{CU}} = R_{\text{el}} \cdot I_{\text{eff}}^2 \quad 2-1$$

Der Widerstand R_{el} hängt vom Material (Cu, Al) und der Temperatur T ab. Für technische Anwendungen hat sich die vereinfachte Linearisierung zur Beschreibung der Temperaturabhängigkeit mittels des Temperaturkoeffizienten α sowie der beliebigen Temperatur T_0 bewährt. Für Kupfer ergibt sich der elektrische, temperaturabhängige Widerstand zu:

$$R(T)_{\text{el}} = R(T_0)_{\text{el}} \cdot (1 + \alpha \cdot (T - T_0)) \quad 2-2$$

Für Kupfer beträgt der Temperaturkoeffizient $\alpha = 3,93 \cdot 10^{-3} \text{ 1/K}$. Durch eine geringere Kupfertemperatur kann somit die Effizienz einer elektrischen Maschine gesteigert werden. Weiterhin hängt der Widerstand der einzelnen Leiter vom Drahtquerschnitt ab. Dieser kann durch eine bessere Raumausnutzung, z.B. rechteckigen statt rundem Draht, erhöht werden.

Zusätzliche Verluste entstehen in den Kupferleitern durch **Stromverdrängungseffekte**, die den effektiven wirksamen ohmschen Widerstand der Kupferleiter durch eine ungleichmäßige

Aufteilung des Stroms erhöhen. Zu diesen gehört der **Skin-Effekt**. In der Abbildung 2-10 ist die Herleitung dieses Effekts gezeigt.

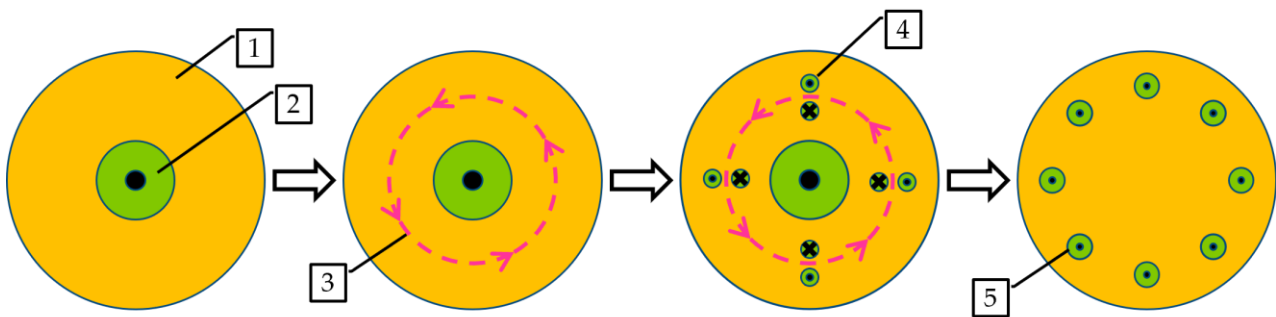


Abbildung 2-10: Vereinfachte Darstellung des Skin-Effekts nach [25]

Im Leiterquerschnitt (1) erzeugt ein Wechselstrom (2) ein Magnetfeld (3). Dies induziert wiederum Wirbelströme (4) am Außendurchmesser mit dem Hauptstromfluss, die im Mittelpunkt entgegen der Hauptrichtung fließen. Diese laufen im Leitermittelpunkt entgegen der Stromrichtung, an der Leitersaußenseite hingegen mit der Stromrichtung. Es resultiert eine lokal unterschiedliche Stromdichtenverteilung (5), die am Außendurchmesser erhöht ist. Aufgrund der quadratischen Abhängigkeit von Stromdichte und Verlustleistung steigt die Gesamtverlustleistung. [25]

Ein weiterer Stromverdrängungseffekt ist der **Proximityeffekt**. In der Abbildung 2-11 ist die Stromverteilung von 16 parallelgeschalteten, wechselstromdurchflossenen Leitern dargestellt.

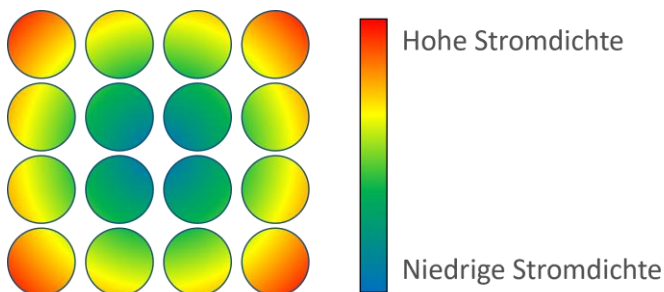


Abbildung 2-11: Konturplot der Stromdichte durch inhomogenes äußeres Magnetfeld nach [25]

Bei den mittleren vier Leitern ist die Stromdichte nahezu homogen über den Querschnitt verteilt, äquivalent zum nahezu homogenen Magnetfeld durch die Leiter selbst erzeugt. Bei den Leitern auf der Außenseite ist die Stromdichte inhomogen und nach außen erhöht. Dieser Effekt tritt auch auf, wenn sich das Magnetfeld, z.B. am Zahnfuß, lokal stark ändert. [25]

Ein weiterer Stromverdrängungseffekt sind **Kreisströme**. Zur Erhöhung des Nutzfüllfaktors oder zur Vereinfachung der Fertigung können mehrere Einzelleiter parallel zusammengeschlossen werden. In Abbildung 2-12 ist eine Statornut im Querschnitt mit zwei unterschiedlichen Verschalteten Leitern gezeigt.

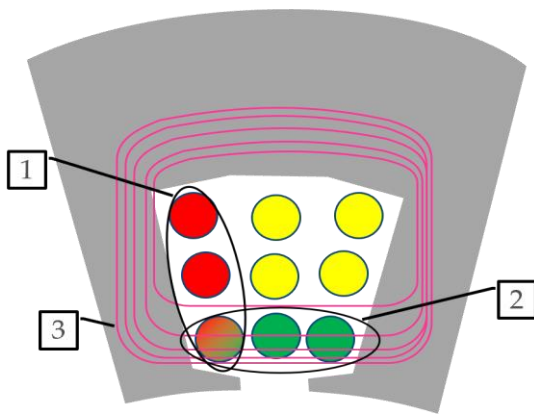


Abbildung 2-12: Vergleich der Stromverteilung bei parallelliegenden Drähten nach [25]

Durch das sich zeitlich ändernde Nutstreufeld (3) entstehen Kreisströme innerhalb der parallelgeschalteten Stränge. Liegen diese in Bereichen mit einem großen Magnetfeldgradient (1) erhöhen sich die Verluste, bei der Anordnung im relativ homogenen Magnetfeld (2) sind sie minimal. [25] Zur Vermeidung der Kreisströme können die Leiter in axialer Richtung verschränkt werden, durch den Positionstausch der Leiter untereinander gleichen sich die Effekte aus. Umgesetzt wird das Prinzip durch verdrehte einzeln isolierte Litzen oder bei sogenannten Roebel-Stäben. [26]

2.4.2 Eisenverluste (Ummagnetisierungsverluste)

Eisenverluste sind Hystereseverluste und Wirbelstromverluste in Stator- und Rotorblechpaketen. Die **Hystereseverluste** sind quadratisch abhängig von der Änderung der magnetischen Flussdichte. Auch das Material beeinflusst die entstehenden Verluste maßgeblich. In Abbildung 2-13 sind exemplarisch die Hysteresekurven eines weichmagnetischen und eines hartmagnetischen Werkstoffs dargestellt. Die Steigung der Kurven entspricht der Permeabilität. Diese sinkt bei steigender Magnetisierung, bis sich die Steigung der Permeabilität von Luft annähert, das Material somit gesättigt ist. Die Restfeldstärke, die im Material nach Abschaltung des äußeren Magnetfelds verbleibt, wird als Remanenz B_r bezeichnet und spiegelt umgangssprachlich die Stärke eines Permanentmagneten wider. Die Koerzitivfeldstärke H_c bezeichnet die magnetische Feldstärke, die nötig ist, um ein Material vollständig zu entmagnetisieren. [27]

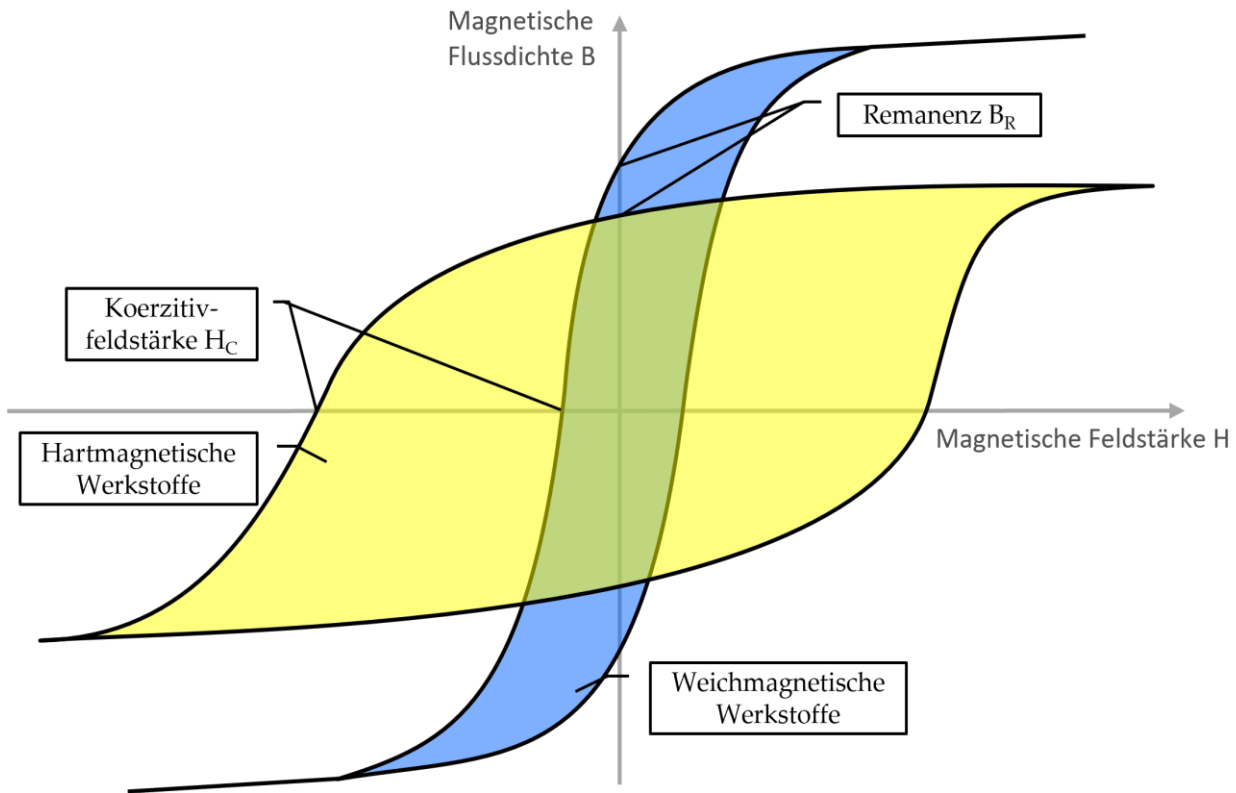


Abbildung 2-13: Hystereseschleifen von hart- und weichmagnetischen Werkstoffen nach [27]

Die **Wirbelstromverluste** entstehen aus induzierten Spannungen im Blechpaket. Zur Reduzierung der Wirbelstromverluste wird die Leitfähigkeit des Eisens im Stator durch die Zugabe von Silizium reduziert und die axialen Strompfade durch dünne elektrische Isolationsschichten (z.B. Backlack oder dünne Oxidschichten auf den Blechen) unterbrochen.

2.4.3 Reibungsverluste

Reibungsverluste entstehen durch Differenzbewegung zweier Oberflächen zueinander. In Elektromotoren sind das im Wesentlichen Lagerreibung und Luftreibung im Luftspalt sowie an den Rotorendscheiben. Die Reibung von Wälzlagern hängt besonders von der Bauart, dem Durchmesser, der Temperatur und der wirkenden Lagerkraft ab. [28]

Die Luftreibung ist in dritter Potenz von der Strömungsgeschwindigkeit sowie von der Geometrie abhängig. Die Temperaturabhängigkeit der Luftreibung spielt im Temperaturbereich klassischer Elektromotoren nur eine untergeordnete Rolle. [29]

2.4.4 Zusatzverluste

Unter den Zusatzverlusten werden alle weiteren Verluste zusammengefasst, die nur eine untergeordnete Größe im Bereich von typischerweise 0,5-2 % der aufgenommenen elektrischen Last aufweisen. Dies können beispielweise Wirbelstromverluste im Gehäuse oder an anderen Komponenten sein. [30]

2.5 Wärmeübertragung

Im Folgenden wird ein Überblick über die verschiedenen Wärmeübertragungsmechanismen gegeben. Diese spielen eine entscheidende Rolle bei der Auslegung der Kühlung von Elektromotoren.

2.5.1 Wärmeleitung

Die Wärmeleitung, auch Konduktion genannt, beschreibt den Transport von thermischer Energie innerhalb eines Festkörpers oder Fluids. Wärme kann nach dem 2. Hauptsatz der Thermodynamik immer nur in Richtung der niedrigeren Temperatur geleitet werden. Die Wärmestromdichte \dot{q} hängt dabei vom Temperaturgradienten $grad T$ sowie der Wärmeleitfähigkeit λ ab und kann wie folgt beschrieben werden:

$$\dot{q} = -\lambda \cdot grad T \quad 2-3$$

Für den stationären Fall und den Sonderfall einer eindimensionalen Betrachtung kann die Gleichung für den Wärmestrom \dot{Q} mit Hilfe des thermischen Widerstands R_{th} wie folgend vereinfacht werden:

$$\dot{Q} = \frac{\Delta T}{R_{th}} \quad 2-4$$

Für den stark vereinfachten Fall einer ebenen Platte ergibt sich der thermische Widerstand zu:

$$R_{th} = \frac{l}{\lambda \cdot A} \quad 2-5$$

Die Wärmeleitfähigkeit λ beschreibt stoffspezifisch, welcher Wärmestrom pro Flächeneinheit A und pro Temperaturunterschied ΔT durch ein Material fließt. Der Wärmewiderstand kann also durch eine Erhöhung der leitenden Fläche A oder eine Reduzierung der Länge l reduziert werden.

In Fluiden wird die Wärme durch mikroskopische Bewegungen von Atomen bzw. Molekülen transportiert. In Festkörper wird die Wärme durch Gitterschwingungen transportiert und bei Metallen transportieren zusätzlich freie Elektronen die Wärme. Deshalb liegt die Wärmeleitfähigkeit von elektrisch leitfähigen Metallen im Allgemeinen deutlich über der von Nichtmetallen (siehe Abbildung 2-14).

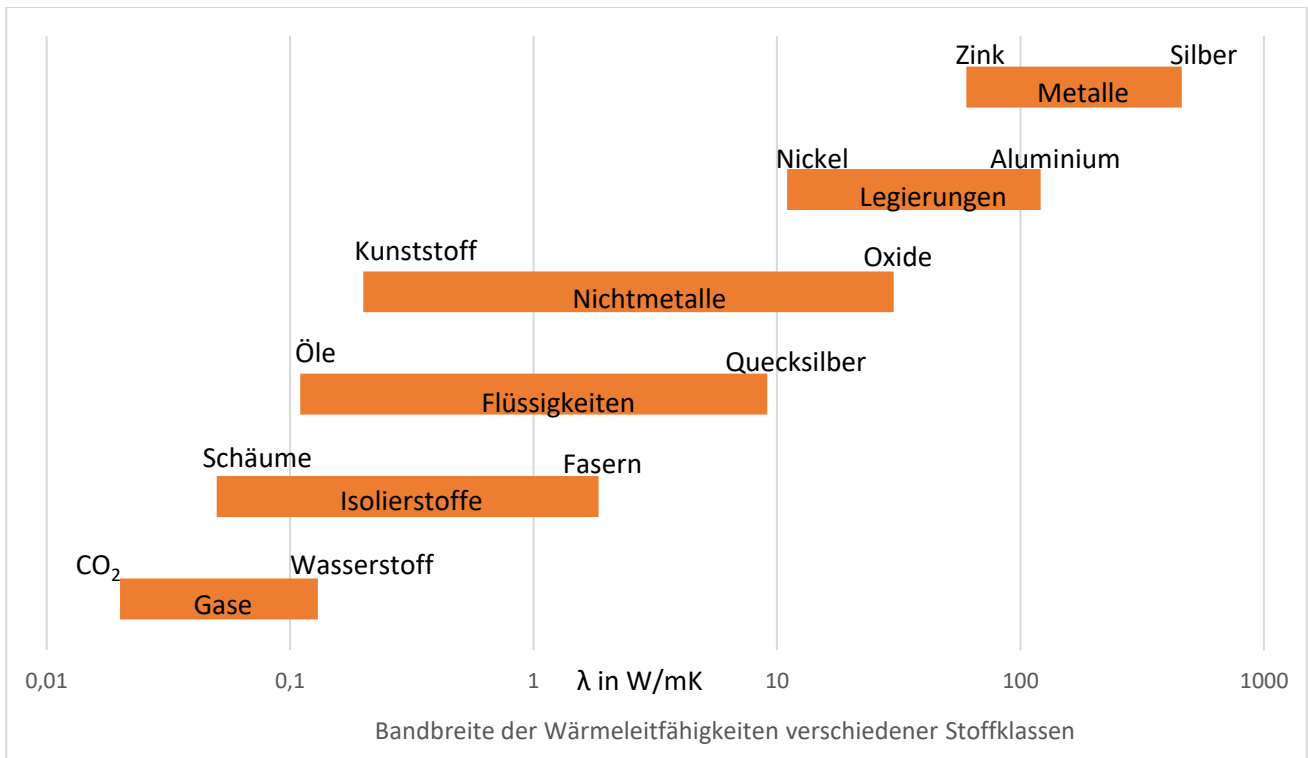


Abbildung 2-14: Bandbreite der Wärmeleitfähigkeiten verschiedener Stoffklassen [31, 32]

Fließt der Wärmestrom durch mehrere Materialien, kann der Gesamtwärmewiderstand durch die Regeln der elektrischen Reihen- und Parallelschaltung berechnet werden. Zusätzlich entstehen an realen Kontaktflächen Widerstände. [33, 34]

$$R_{\text{Reihe}} = R_1 + R_2 + R_3 + \dots + R_n \quad 2-6$$

$$\frac{1}{R_{\text{Parallel}}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \dots + \frac{1}{R_n} \quad 2-7$$

2.5.2 Konvektion

Der Wärmeübergang von einem Feststoff in ein Fluid wird als konvektive Wärmeübertragung bezeichnet. Weiter kann in erzwungene und freie Konvektion unterschieden werden. Bei der freien Konvektion entstehen aufgrund der Temperaturunterschiede innerhalb des Fluids Strömungen, z.B. bei der passiven Kühlung von Servomotoren. Bei der erzwungenen Konvektion wird die Strömung des Fluids durch eine äußere Einwirkung verursacht, z.B. durch eine Pumpe, die das Kühlmittel durch den Elektromotor befördert.

In Abbildung 2-15 ist eine laminare Strömung eines kälteren Fluids über eine warme Wand dargestellt.

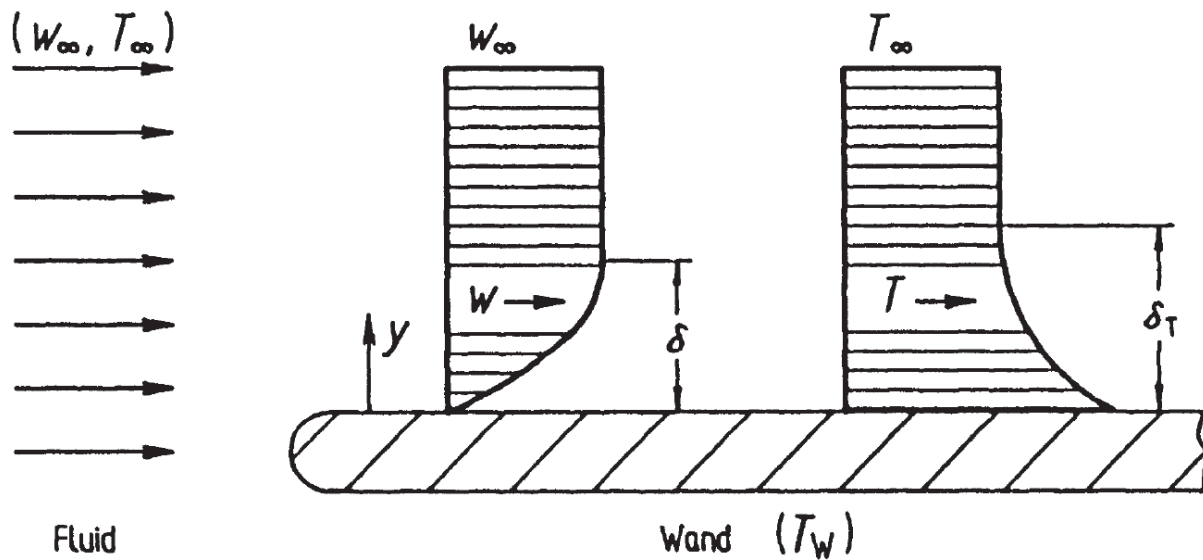


Abbildung 2-15: Grenzschichtströmung längs einer ebenen Wand. Geschwindigkeitsprofil W und Temperaturprofil T [35]

Aufgrund der Haftreibungsbedingungen ist die Geschwindigkeit W des Fluids an der Wand *Null*. Die Geschwindigkeit des Fluids nimmt über die Dicke der Grenzschicht δ stetig zu. Die Temperatur T des Fluids verläuft entsprechend äquivalent. Direkt an der Wand herrscht die Temperatur T_W , diese fällt stetig innerhalb der Grenzschicht δ_T bis auf die Fluidtemperatur T_∞ an.

In Abbildung 2-16 ist der Grenzschichtverlauf einer turbulenten Strömung an einer ebenen Platte dargestellt.

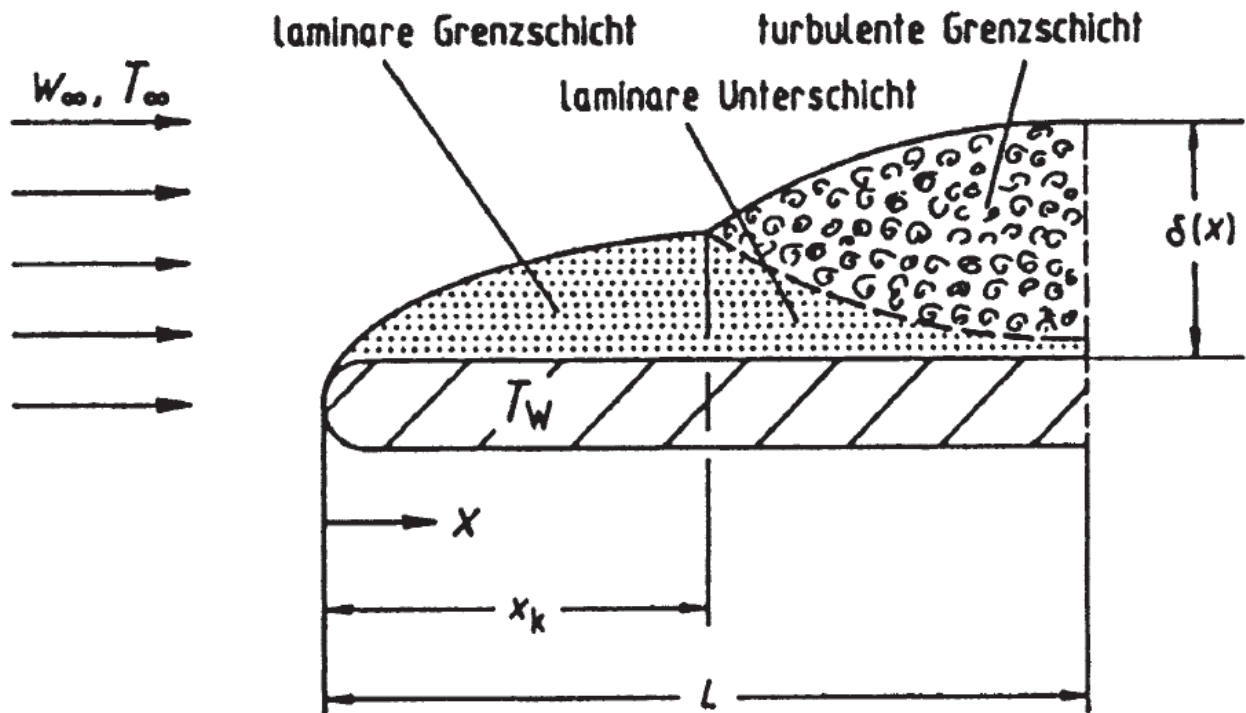


Abbildung 2-16: Grenzschichtverlauf längs einer ebenen Wand [35]

Nach dem Auftreffen der laminaren Strömung auf die Platte beginnt sich eine Grenzschicht auszubilden. Die Dicke dieser Schicht wächst, bis es zum Strömungsabriss kommt und sich oberhalb der laminaren Unterschicht eine turbulente Grenzschicht ausbildet. Durch die Strömungen innerhalb der turbulenten Grenzschicht, steigt die Wärmeleitung stark an. Der Wärmeübergang zwischen Fluid und Wand ist im Bereich der turbulenten Strömung größer als bei einer laminaren Strömung. [35]

Der Wärmeübergangskoeffizient α gibt den zwischen einem strömenden Fluid und einer festen Wand ausgetauschten Wärmestrom pro Fläche und Temperaturdifferenz an. Der Wärmeübergangskoeffizient hängt dabei nicht nur von den Stoffeigenschaften, sondern auch von der Geometrie und den Strömungsverhältnissen ab. Der Wärmestrom \dot{Q} kann mit folgender Formel berechnet werden:

$$\dot{Q} = \alpha \cdot A \cdot \Delta\vartheta_{LN} \quad 2-8$$

Der Wärmeübergangskoeffizient α kann auf Grundlage der vorherrschenden Strömungsbedingungen und Stoffparameter nur für sehr einfache Fälle analytisch berechnet werden. Zahlreiche Autoren haben deshalb Ergebnisse ihrer Messungen unter Variation der Strömungs- und Geometriebedingungen in Form von Korrelationen veröffentlicht. In Tabelle 2-2 sind auszugsweise Werte dargestellt. Die Spreizung der Werte zeigt, dass eine Abschätzung des

Wärmeübergangs nur sehr schwer möglich ist und dieser im Allgemeinen immer simuliert werden muss.

Tabelle 2-2: Typische Werte für α in verschiedenen Wärmeübergangssituationen

Wärmeübergangs-koeffizient in W/m ² K	Art
250 – 700	Ruhendes Wasser [36]
600 – 12.000	Wasser bei erzwungener Strömung [37]
1.000 – 4.000	Strömendes Wasser durch einen Plattenwärmetauscher [38]
4.700 – 7.000	Siedendes Wasser in Rohren [38]

2.5.3 Wärmestrahlung

Wird Wärme in Form von Strahlung übertragen, spricht man von Wärmestrahlung. Da die Wärme in Form von elektromagnetischer Strahlung transportiert wird, ist sie auf kein Trägermedium angewiesen. Wärmestrahlung liegt im Wellenlängenbereich von 0,8 – 400 μm oberhalb des sichtbaren Lichts im Infrarot. Die Intensität der Strahlung und damit die Energieübertragung erhöht sich mit steigender Temperatur. Weiterhin ist die Wärmeübertragung vom Emissionsgrad ε abhängig. Die Wärmestrahlung, die von einem Körper der Temperatur T an die Umgebung abgegeben wird, lässt sich mit der folgenden Formel berechnen:

$$\dot{Q} = \varepsilon \sigma_s A T^4 \quad 2-9$$

σ_s beschreibt die Stefan-Boltzmann-Konstante. Da diese mit $\sigma_s = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$ sehr klein ist und die Temperaturen bzw. die Temperaturunterschiede in Standardanwendungen von Elektromotoren nur im Bereich von maximal 160 K liegen, ist die Wärmeübertragung mittels Strahlung in einer unbedeutenden Größenordnung.

Zusammenfassend steigert sich die übertragbare Wärmemenge mit dem Temperaturunterschied. Im Folgenden werden die Temperaturgrenzen der verschiedenen Werkstoffe eines Elektromotors vorgestellt.

2.6 Temperaturgrenzen

Die in Elektromotoren eingesetzten Materialien können unterschiedlich hohen Temperaturen widerstehen. Diese können nicht einfach bestimmt werden, hängen diese doch von zahlreichen weiteren Faktoren ab, z.B. der mechanischen Spannung, der maximal zulässigen Verformung oder der elektrischen Durchschlagfestigkeit über die Lebensdauer des Motors. Zur Orientierung und zum Vergleich bietet die DIN EN 60085 verschiedene Isolierstoffklassen. Diese werden mit Buchstaben bezeichnet. In der Tabelle 2-3 sind sowohl die thermische Klasse sowie die zugehörige Grenztemperatur aufgetragen. Dabei gilt, dass mit steigender Temperaturklasse im Allgemeinen auch die entsprechenden Materialkosten steigen.

Tabelle 2-3: Isolierstoffklassen nach DIN EN 60085

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

Zu den Isolationsstoffen zählen die zusätzliche Drahtisolierung aus Epoxidharz oder Polyurethan sowie die Isolationspapiere und weitere Bauteile, deren Zweck primär die Erhöhung der Spannungsfestigkeit ist.

Die Einsatztemperatur der Funktionswerkstoffe, also des Eisenblechs oder des Kupfers, liegt deutlich oberhalb der Grenztemperaturen der Isolationswerkstoffe. Ausnahmen bilden Wicklungen bzw. Käfige aus Aluminium. Aufgrund der geringen Warmfestigkeit von Aluminium kann dies eine thermische Grenze des Motors darstellen.

Weiterhin weisen die Magnete von permanent erregten Synchronmaschinen temperaturabhängige Eigenschaften auf. Die Temperatur bei der ein Magnet dauerhaft geschädigt wird, hängt auch von dem äußerlich einwirkenden Magnetfeld ab. Ohne äußerliche Einflüsse entmagnetisiert sich der Magnet bei Erreichen der Curie-Temperatur. Üblich sind für die eingesetzten Magnete Curie-Temperaturen zwischen 80 °C und 140 °C [39], somit liegen sie deutlich unterhalb der thermischen Isolationsklasse H für Elektromotoren, die dauerhaft Temperaturen bis 180 °C erlaubt. Eine Erhöhung der Temperaturfestigkeit wird über das teure seltene Erden-Element Dysprosium erreicht. Gleichzeitig sinkt dabei aber die Koerzitivfeldstärke und damit auch der Wirkungsgrad sowie das maximal erreichbare Drehmoment des Elektromotors. Durch den lokalen Einsatz von Dysprosium, insbesondere den Kanten, in denen die höchsten Temperaturen und Magnetfelder auftreten, können die Eigenschaften von Magneten bei minimalen Materialeinsatz verbessert werden. [40]

2.7 Kühlungskonzepte

Entscheidend für die Leistungsfähigkeit von Elektromotoren ist, neben der elektromagnetischen Auslegung, die Möglichkeit, entstehende Verlustwärme abzuführen. Besonders temperaturempfindlich sind die Isolationsstoffe der Wicklungen im Stator und die Magnete im Rotor. Diese begrenzen die zulässigen Temperaturen und damit auch den möglichen Wärmestrom aus dem Motor und letztendlich die mögliche Dauerleistung des Motors. Zur besseren Nachvollziehbarkeit sind im Folgenden die Kühlkonzepte anhand ihres Wirkungsortes gegliedert.

2.7.1 Außenliegende Stator Kühlung

Als gängiges Verfahren zur Entwärmung des Stators oder auch zur kompletten Kühlung des Motors im PKW-Bereich hat sich die Kühlung über das Gehäuse etabliert. Diese Methode wird als **Mantelkühlung** bezeichnet. Das Statorblechpaket wird hierfür in ein Aluminiumgehäuse eingepresst. Entweder ist in diesem bereits eine Kühlkanalstruktur enthalten, die z.B. durch einen Gussprozess hergestellt wurde, oder die Struktur entsteht mit einem weiteren Gehäusebauteil. In Abbildung 2-17 ist ein Elektromotor mit Mantelkühlung, ausgeführt als Spirale, abgebildet. Der Wärmestrom der Wicklung muss bei einer Mantelkühlung durch das Statorblechpaket in das Gehäuse laufen. Zusätzliche Wärmeübergänge, wie sie am Isolationspapier zwischen Wicklung und Blech auftreten, verschlechtern den Gesamtwärmeübergang zwischen Wicklung und Kühlmittel und begrenzen die Leistungsfähigkeit des Elektromotors.

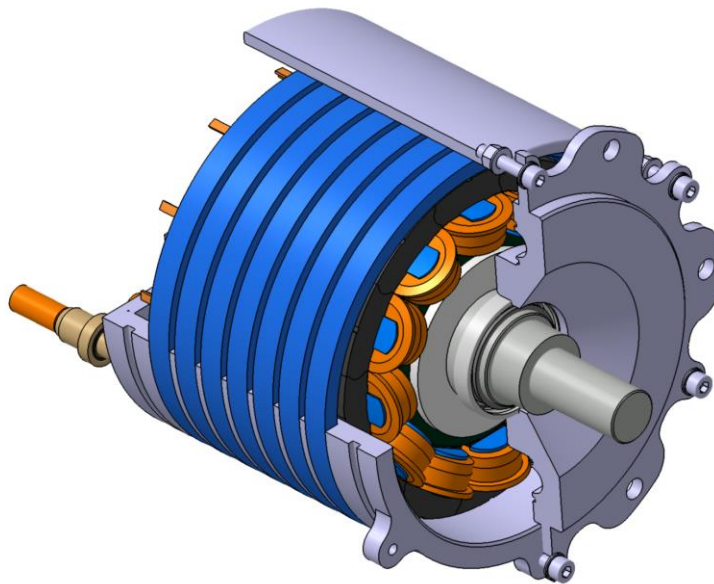


Abbildung 2-17: Schnittdarstellung eines Elektromotors mit Mantelkühlung

Eine Verbesserung dieses Konzepts ist die Vermeidung des Wärmeübergangs zwischen Hülse und Blechpaket. *Fan* [41] untersucht einen Motor, bei dem das Statorblechpaket um drei Kühlbleche (WP – water cold plate) ergänzt wurde, zu sehen in Abbildung 2-18. Die Bleche sind zweiteilig aufgebaut und miteinander verlötet. Mit einer Dicke von 8 mm sind diese deutlich dicker als die restlichen Bleche des Pakets mit 0,35 mm. Um Wirbelströme zu reduzieren und die Wärmeleitfähigkeit zu erhöhen, wurden die Kühlbleche aus Aluminium gefertigt. In Versuchen konnte gegenüber einem Vergleichsmotor mit Mantelkühlung, eine Temperatursenkung von 20 K bei einer Wicklungstemperatur von 115 °C und eine Kühlmitteltemperatur von 26 °C erreicht werden. [41]

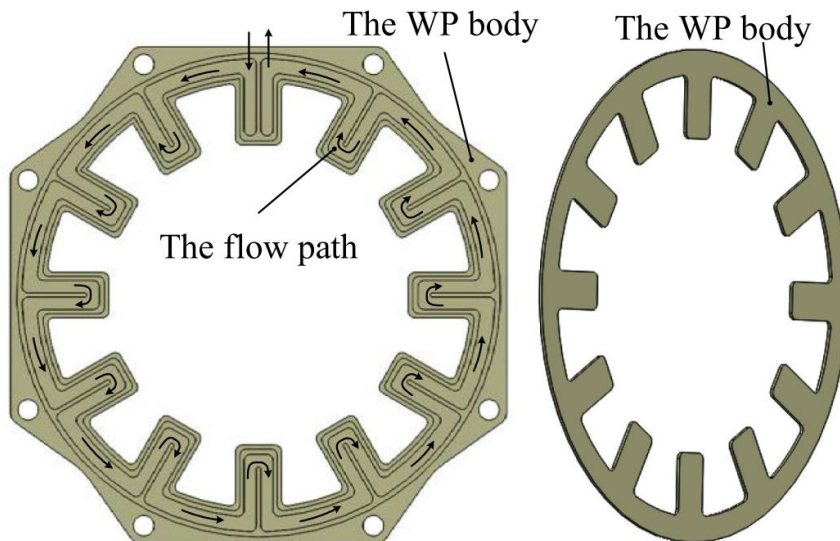


Abbildung 2-18: Cold water plate des Stators [41]

2.7.2 Innere Stator Kühlung

Konzepte zur inneren Kühlung basieren auf einer Kühlmedienführung innerhalb des Gehäuses. Dadurch können deutlich kürzere Wärmeleitwege realisiert werden. Durch die Nähe zu den spannungsführenden Teilen sowie zu leicht korrodierenden Materialien wie Elektroblech ergeben sich hohe Anforderungen an die elektrische Isolation, thermische Leitfähigkeit und Dichtigkeit. Da die Kühlung zusätzlich in den Stator eingebracht werden muss, muss zwischen elektromagnetisch aktivem Material und Kühlfunktion abgewogen werden. Durch den Einsatz von Flachdraht gegenüber Runddraht kann bei gleichem Nutfüllgrad ein Kühlkanal zwischen zwei Wicklungen eingebracht werden. Aufgrund der Magnetfelder kann kein elektrisch leitfähiges Material zur Formung des Kühlkanals eingesetzt werden, ohne dass große Wirbelstromverluste entstehen. *Schiefer* [42] nutzt deshalb Röhrchen aus dünnwandigem Polyimid (Handelsname Kapton), nicht dargestellt in der Abbildung 2-19. Es konnte eine erheblich höhere Dauerleistung als bei vorher üblichen Methoden nachgewiesen werden. Problematisch ist die Dichtigkeit des Kühlsystems aufgrund der vielen Trennstellen und Materialübergängen. [42]

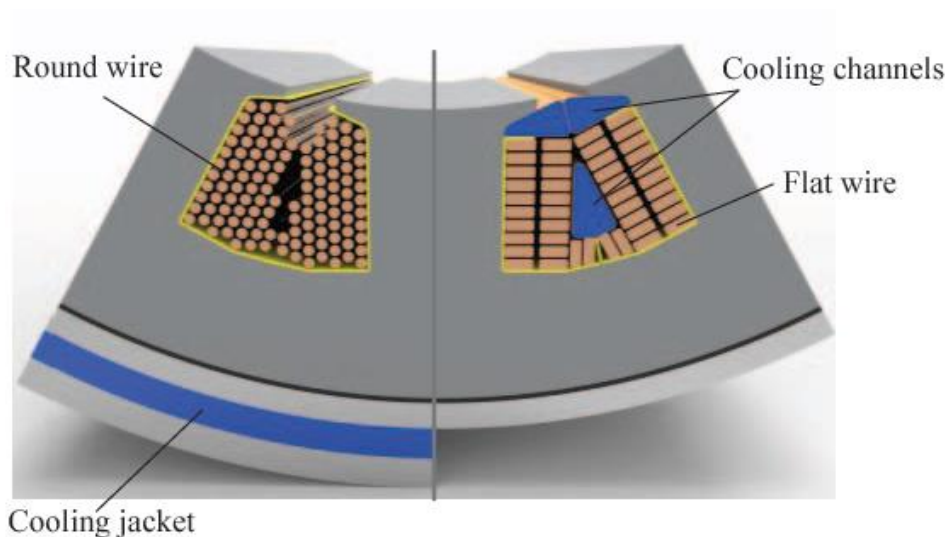


Abbildung 2-19: Innenliegendes Kühlkonzept [42]

Acquaviva [43] stellt eine Maschine mit ähnlichem Kühlkonzept vor. Die Kühlkanäle werden durch einen Vakuumverguss erzeugt, zusätzlich werden weitere Kühlkanäle im Statorjoch geschaffen. Mit Kühllöl kann eine Stromdichte von $17,5 \text{ A/mm}^2$ im Versuch bzw. 25 A/mm^2 simulativ erreicht werden, was einer simulativen Verbesserung von 250 % gegenüber dem Stand der Technik mittels einer Kühlhülse entspricht. [43]

Rhebergen [44] untersucht simulativ axiale Kühlkanäle entlang der Wicklung, herstellbar im Vakuumverguss. Der konzeptionelle Aufbau ist in Abbildung 2-20 dargestellt. Neben der Auslegung und Untersuchung im 2D-Statorschnitt fehlt jedoch ein Konzept zur Umsetzung der Umlenkung des Kühlmittels und zur Herstellung der dreidimensionalen Kühlkanäle. Des Weiteren ist bei dem vorgestellten Konzept kein Zahnfuß vorhanden. Dadurch erhöhen sich die Oberschwingungen der Wicklung mit entsprechenden negativen Effekten. [44]

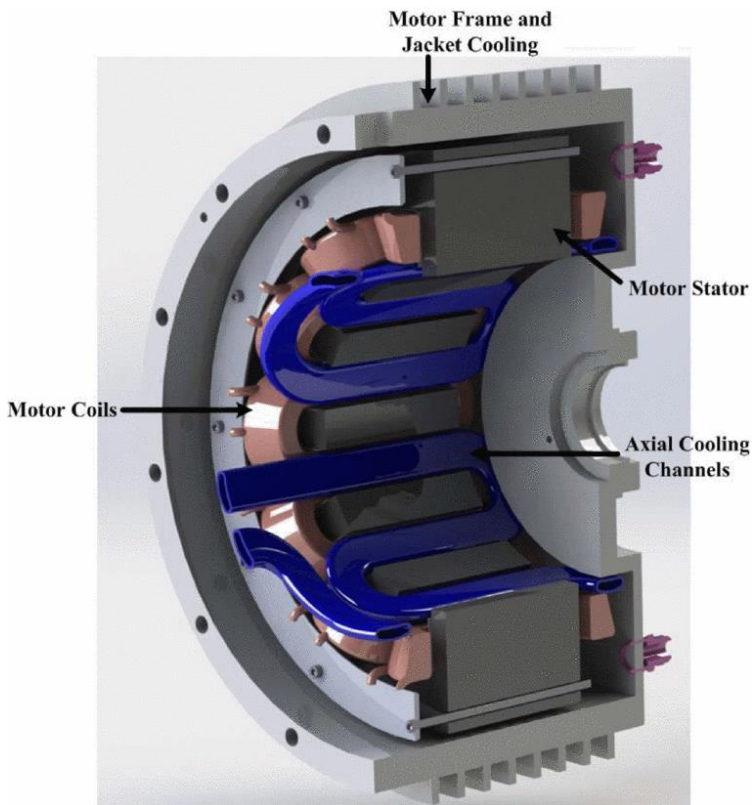


Abbildung 2-20: Innenliegendes Kühlkonzept am Zahnfuß [44]

Semidey [45, 46] beschreibt eine Kühlung der Wicklung durch das Einbringen von Mikrowärmetauschern aus Kupfer. Dadurch entstehen im Betrieb hohe Wirbelstromverluste, die sich in den Wärmetauschern selbst ausbilden. Die Anbindung der einzelnen Wärmetauscher (DWHX – Direct winding heat exchanger) an das Kühlsystem ist mit vielen Trennstellen verbunden und aufgrund der kleinen Strukturen anfällig für Verstopfungen und Ablagerungen. [45, 46]

Auch größere Varianten der Wärmetauscher an dieser Stelle wurden bereits untersucht. [47]

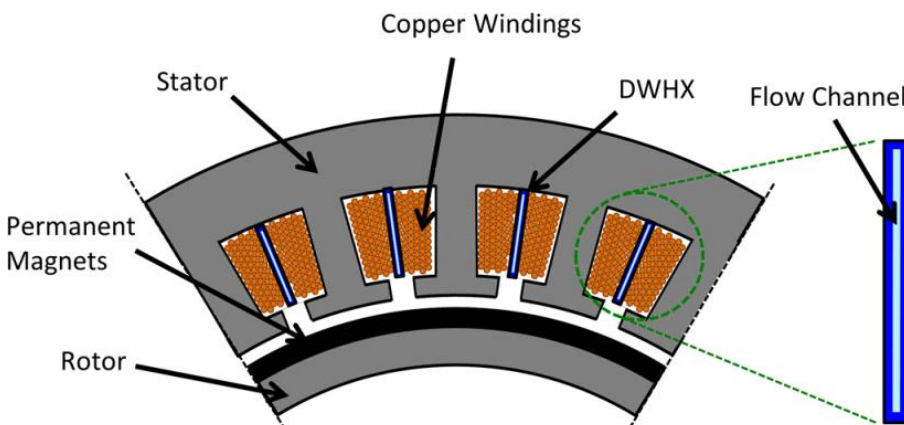


Abbildung 2-21: Innenliegendes Kühlkonzept mit Microwärmetauschern [45]

Eine weitere Möglichkeit sind hohle Einzelleiter, die mit deionisiertem Wasser durchströmt werden. Für Elektromotoren im Bereich der PKW-Antriebe ist eine aufwendige

Wasseraufbereitung nicht zielführend. Daher bietet die Firma *dynamic E-flow GmbH* diese Technologie basieren auf Öl an. In Abbildung 2-22 ist eine Nut exemplarisch mit den Hohlleitern bewickelt. Schwierigkeiten ergeben sich durch die elektrisch isolierende Anbindung an den Kühlkreislauf sowie die hohen Drücke im Kühlsystem von 70-100 bar, die die Gesamteffizienz reduzieren. [48]



Abbildung 2-22: Fluiddurchströmte Hohlleiter, exemplarisch in einer Nut [48]

Eine weitere Möglichkeit der direkten Leiterkühlung besteht in dem Umwickeln eines Edelstahlröhrchens mit den elektrischen Leitern. Aufgrund der geringeren elektrischen Leitfähigkeit des dünnwandigen Edelstahls entstehen nur wenig Wirbelstromverluste im Röhrchen selbst. Durch die geringen Abmessungen stellt sich jedoch ein Druckverlust von 6 bar bei 2 l/min [49] bzw. 5 bar bei 10 l/min ein [50]. Dies liegt außerhalb der üblichen Spezifikationen gängiger Wasserpumpen in der Automobilindustrie, die aktuell bis 2,5 bar angeboten werden. [51]



Abbildung 2-23: Aufgetrennte Wickellitze mit mittiger Edelstahlleitung [49]

Weitere Möglichkeiten einer direkten Leiterkühlung mit Öl oder anderen nichtleitenden Flüssigkeiten durch additiv gefertigte oder gebaute Spulen wurden in [52] untersucht. In Abbildung 2-24 ist die eine gegossene Spule dargestellt. Diese wird mittels Pulverbeschichtung isoliert. Dennoch werden nur nichtleitende Flüssigkeiten zur Kühlung eingesetzt. In einem Modellversuch konnten hohe Stromtragfähigkeiten von 100 A/mm^2 erzielt werden. Nicht gelöst wird die Anbindung der Spulen an einen Kühlkreislauf. So lässt sich das Konzept im Querschnitt simulieren. Ein Prototyp konnte nicht aufgebaut werden. [52]

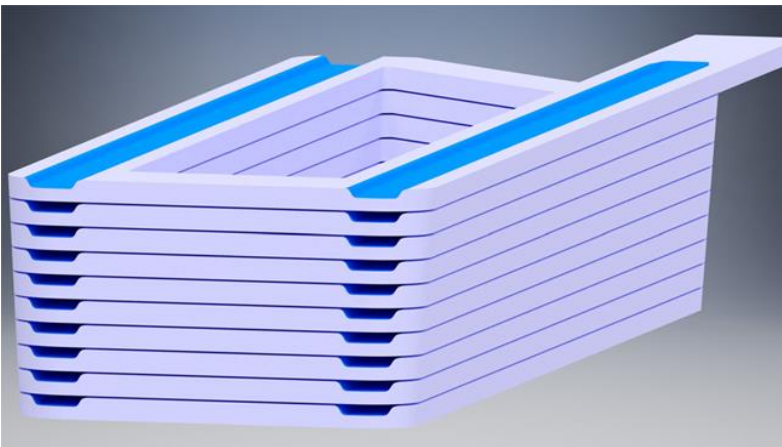


Abbildung 2-24: Gegossene Spule mit integrierten Kühlkanälen [52]

2.7.3 Sonderformen der Statorkühlung

Zur Erzielung von hohen Dauerleistungen können die Wickelköpfe auch direkt mit Öl gekühlt werden. Dafür werden diese entweder mit Öl besprüht, welches durch die Schwerkraft am Wickelkopf abläuft und wieder abgesaugt wird oder direkt mit Öl umspült. Größter Nachteil ist das Eindringen von Kühllöl in den Rotorspalt. Aufgrund der hohen relativen Bewegung zwischen Rotor und Stator und dem geringen Abstand entstehen hohe Verlustleistungen und die Gesamteffizienz des Motors sinkt. Durch Schleuderscheiben bzw. Dichtgeometrien auf den Endscheiben des Rotors kann das Eindringen von Kühllöl in den Rotorspalt im Betrieb reduziert

werden, das Konzept bleibt jedoch weiterhin anfällig für Lageänderungen (bspw. Längere Kurvenfahrt), wenn das Öl gegen den Rotor bzw. in den Rotorspalt gedrückt wird. [53]

In der Abbildung 2-25 ist der aufgeschnittene Stator des Tesla Model 3 Heckantrieb zu sehen. Durch einen zentralen Zulauf mittig auf den Außendurchmesser des Blechpakets wird das Kühlmedium axial durch das Blech Richtung Wickelkopf geleitet. Durch den direkten Kontakt zum Blech und die kleinen Kühlkanäle mit entsprechend hohen Strömungsgeschwindigkeiten können gute Wärmeübergangskoeffizient erreicht werden.



Abbildung 2-25: Aufgeschnittener Stator des Tesla Model 3 [54]

Die Firma Lucid Motors ergänzt die Ölkühlung des Stators durch einen weiteren Kanal im Bereich zwischen Joch und Zahn. Das Kühlöl spritzt beim Verlassen des Stators dabei direkt in den Wickelkopf, hierdurch werden hohe Dauerleistungen erreicht. [54] In Abbildung 2-26 ist Stator mit austretendem Kühlöl, ohne Wicklung gezeigt. Nachteil der Kühlung mittels Öl ist der erhöhte Aufwand bei der Kühlung des Öls sowie des allgemein höheren Aufwands, detaillierter erklärt in Kapitel 2.7.5.

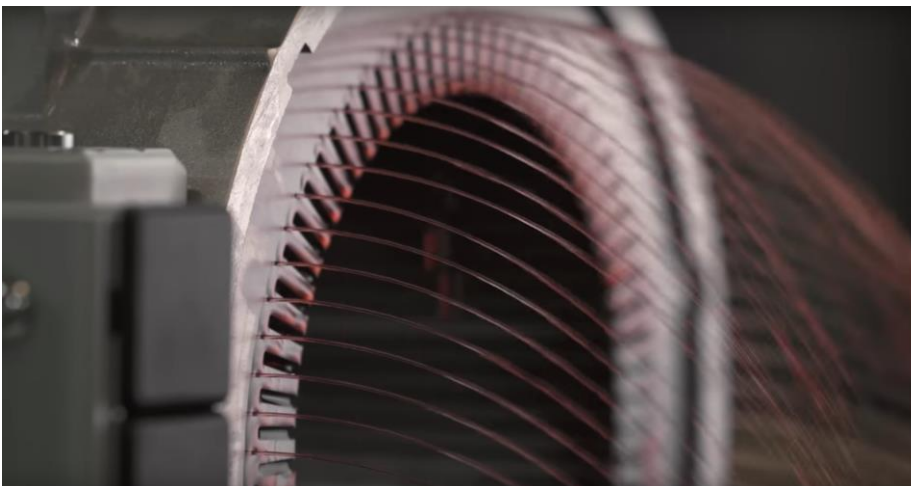


Abbildung 2-26: Stator kühlendes System des Lucid Air [54]

Alternativ kann mittels Spalttopf der Wickelkopfraum vom Rotor getrennt werden, wodurch der gesamte Wickelkopf von Öl umflossen wird. [55] Schwierigkeiten bereitet der Spalttopf selbst,

der hohe Ansprüche an die mechanische Festigkeit sowie die Steifigkeit stellt, aber auch möglichst dünnwandig und elektrisch nichtleitend sein muss, um Wirbelstromverluste zu vermeiden. Durch den zusätzlichen Bauraum im Rotorspalt wird außerdem das Motordrehmoment reduziert. [56]

2.7.4 Rotorkühlung

Wie in Kapitel 2.6 dargestellt, stellen die Magnete im Rotor eine Temperaturgrenze dar. Die Er- und Entwärmung des Rotors muss deshalb immer betrachtet werden.

Industriell haben sich vor allem passive Rotorkühlungen, die über den Rotorspalt Wärme in den Stator transferieren, durchgesetzt. Aufgrund der hohen Oberflächengeschwindigkeiten des Rotors und des engen Luftspaltes zum Stator, können für Gase hohe Wärmeübertragungskoeffizienten erreicht werden. [31]

Neben der passiven besteht die Möglichkeit der aktiven Rotorkühlung. Hierfür wird die Rotorwelle von innen aktiv gekühlt. Neben dem Einspritzen einer Wasser-Glykol-Mischung wird auch Öl genutzt. Aufgrund der Schmierwirkung von Öl, kann auch bei höheren Drehzahlen bzw. Umfangsgeschwindigkeiten die Rotorwelle gedichtet werden. Wasser-Glykol-Mischungen lassen nur geringere Drehzahlen zu. Jedoch sind die Wärmekapazitäten und -übergangskoeffizienten von Ölen niedriger als von Wasser-Glykol-Mischungen und damit auch die Kühlwirkung. [31, 57, 58]

2.7.5 Kühlmedien

Als Kühlmedien für Elektromotoren eignen sich neben Luft vor allem flüssige Medien, insbesondere Wasser-Glykol-Mischungen oder Öl. In Tabelle 2-4 sind für diese drei verschiedenen Kühlmedien beispielhaft Eigenschaften aufgetragen.

Tabelle 2-4: Eigenschaften verschiedener Kühlmedien

Eigenschaft	Wasser [59]	Glykosol N [60]	Novac 7100 [61]
Dichte in kg/l	1,02	1,12	1,52
Spezifische Wärmekapazität in kJ/kg · K	4,2	2,3	1,17
Kinematische Viskosität in mm ² /s	1,0	22,0	0,38
Elektrischer Widerstand in Ωcm	1,82 · 10 ¹¹	3 · 10 ⁵	3,29 · 10 ⁹

Wasser-Glykol-Mischungen haben je nach Mischungsverhältnis eine spezifische Wärmekapazität von 3 - 4,2 kJ/kgK. Im Gegensatz zu Öl ist durch die geringe Viskosität bei vielen Anwendungen mit turbulenter Strömung und damit einem höheren Wärmeübergangskoeffizienten zu rechnen. Spezielles Kühlöl wie z.B. Novac [61] besitzt nur eine spezifische Wärmekapazität von 1,1 kJ/kgK bei einer höheren Viskosität und damit ein deutlich schlechteres Kühlverhalten im Vergleich zu Wasser-Glykol-Mischungen. Der Vorteil dieser Flüssigkeiten liegt einzig in den guten elektrischen Isolationseigenschaften. Durch die erhöhte Viskosität sinkt dabei nicht nur die Turbulenz und damit der Wärmeübergang in das Kühlmittel,

sondern auch der Gesamtwirkungsgrad durch den erhöhten Leistungsbedarf der Kühlmittelpumpe. Im PKW-Bereich gibt es üblicherweise einen Kühlkreislauf auf Wasser-Glykol Basis. Durch die hohe Wärmekapazität von Wasser können Wasser/Luft-Wärmetauscher im Vergleich zu Öl/Luft-Wärmetauschern kleiner gebaut werden. Aus aerodynamischen Gründen werden deshalb fast ausschließlich Wasser/Luft-Wärmetauscher eingesetzt. Muss ein zusätzlicher Ölkreislauf gekühlt werden, wird dies über einen Wasser/Öl-Wärmetauscher realisiert oder bei hohen Öltemperaturen und geringen Wärmemengen über zusätzliche Öl/Luft-Wärmetauscher. Als Beispiel sei hier der Wärmetauscher für die Hydraulik der Servolenkung oder die Getriebeölkühlung von Sportwagen angeführt.

Als Pumpen für Wasser-Glykol-Mischungen werden Kreiselpumpen mit mechanischem oder elektrischem Antrieb eingesetzt. Für den PKW-Bereich werden Pumpen mit Durchflüssen von 8-31 l/min bei 0,2-0,56 bar für kleine elektrische Kühlmittelpumpen und 24-250 l/min bei 0,6-2,5 bar für elektrische Hauptkühlmittelpumpen für Spannungsniveaus oberhalb dem 12 V Bordnetz. [51]

2.8 Kunststoffe

Technische Kunststoffe werden kontinuierlich weiterentwickelt und werden vermehrt gegenüber klassischen metallischen Konstruktionswerkstoffen eingesetzt. Neben den Vorteilen einer geringeren Dichte und einer kostengünstigen Verarbeitung weisen Kunststoffe auch Nachteile auf. Im Allgemeinen ist mit einem deutlich niedrigeren Elastizitätsmodul und einer verminderten Temperaturbeständigkeit zu rechnen. Zusätzlich müssen durch die Verarbeitung in Spritzprozessen andere Einschränkungen bezüglich der Formgebung beachtet werden. Im Folgenden wird ein kurzer Überblick über die technisch relevanten Kunststoffe, deren Verarbeitung und ihrer Eigenschaften gegeben.

2.8.1 Thermoplaste und Duroplaste

Kunststoffe bestehen aus langen Molekülketten. Je nach Grad der Vernetzung spricht man dabei von Thermoplasten, Abbildung 2-27 (a und b), Elastomeren (c) oder Duroplasten (d). Während sich Thermoplaste aufschmelzen lassen und bei Erreichen der Erweichungstemperatur keine Formstabilität mehr besitzen, müssen Duroplaste während des Vernetzungsprozesses der Ketten geformt werden.

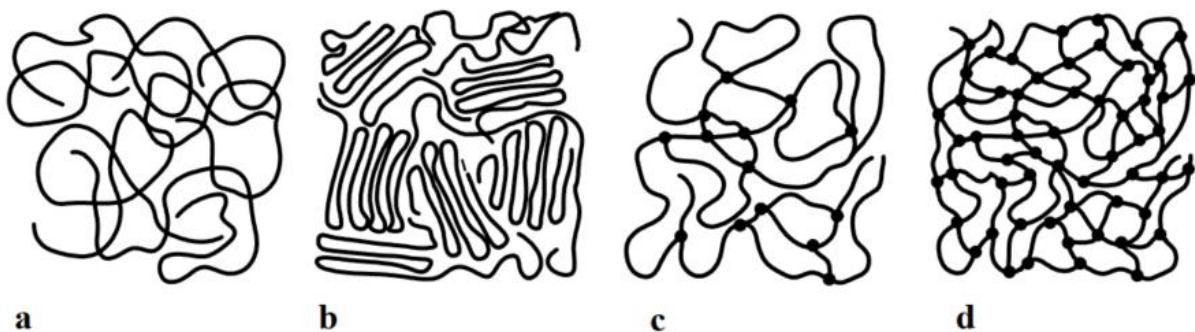


Abbildung 2-27: Molekülketten verschiedener Kunststoffarten [62]

Bei der Erwärmung von **Thermoplasten** bewegen sich die Ketten immer stärker, bis ein gegenseitiges Abgleiten ermöglicht wird. Der Werkstoff verformt sich plastisch. Dies bewirkt auch ein Kriechen des Materials, eine dauerhafte Verformung des Materials durch andauernde Krafteinwirkung unterhalb der Glasübergangstemperatur.

Die Bindungen zwischen den Molekülketten sind bei **Elastomeren** nur sehr schwach ausgeprägt, was einerseits zu einem sehr geringen Elastizitätsmodul führt, andererseits hohe Dehnungen ermöglicht. Aufgrund der geringen mechanischen Festigkeit ist diese Materialklasse nicht als Strukturwerkstoff geeignet, sondern wird vor allem zur Herstellung von Dichtungen genutzt.

Duroplaste weisen durch die dreidimensionale Vernetzung der Ketten eine hohe Temperaturstabilität und eine geringe Kriechneigung auf. Durch die starke Bindung der Ketten besitzen Duroplaste keine Erweichungstemperatur, sondern zersetzen sich bei zunehmender Erwärmung. Im Gegensatz zu Thermoplasten können die Ketten nicht aneinander abgleiten, weshalb die Bruchdehnung niedrig und das Verhalten als spröde zu bezeichnen ist. [62–65]

Durch Zugabe von **Füllstoffen** lassen sich die Eigenschaften von Kunststoffen gezielt beeinflussen. Insbesondere zur Erhöhung der Festigkeit können Fasern beigemischt werden. Mit Kohlenstoffendlosfasern können Steifigkeiten im Bereich von Stählen erreicht werden und mit Zugabe von Kurzfasern Steifigkeiten im Bereich von Aluminium. [63] Zur Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit, die bei reinen Kunststoffen im Bereich um 0,2 W/mK liegt, können Glaskugeln, Bornadeln oder andere wärmeleitfähige Stoffe beigemischt werden. Damit können Wärmeleitfähigkeiten von bis zu 12 W/mK erreicht werden. [66, 67]

In Tabelle 2-5 sind vorausgewählte Matrixmaterialien aufgeführt, die prinzipiell für die Umspritzung von Statoren in Frage kommen. Das bedeutet, dass diese mit wärmeleitfähigen Füllstoffen compoundingiert und industriell für eine Serienfertigung eingesetzt werden können. Die wärmeleitfähigen Füllstoffe beeinflussen dabei hauptsächlich die Kosten und nur eingeschränkt die Eigenschaften in der Verarbeitung. Die Bewertung in der Tabelle reicht von sehr positiv ++ bis zu sehr negativ --.

Tabelle 2-5: Bewertung möglicher Kunststoff-Matrixmaterialien zur Umspritzung

Eigenschaft	Epoxidharz	Polyester	Polyamid
Wärmeleitfähigkeit (modifiziert)	++	++	++
Temperaturbeständigkeit	++	+	0
Verarbeitungsdruck	++	+	-
Spaltfüllende Eigenschaften	++	+	--
Chemische Beständigkeit	++	-	+
Kosten	--	+	++

Die mangelnde chemische Beständigkeit von **Polyester** gegenüber heißen Wasser-Glykol-Mischungen schließt eine Verwendung im PKW-Kühlkreislauf über die Lebensdauer aus.

Polyamide werden häufig im PKW im Motorraum verbaut. Aufgrund der Verarbeitung des Thermoplasts durch Aufschmelzen, Spritzgießen und Abkühlen ist das Material nicht so niederviskos verarbeitbar wie ein Duroplast. Dies führt zu hohen Kräften auf mögliche Einlegerteile und vergrößert die Mindestbreite für Spalte, die gefüllt werden können. Chemisch ist Polyamid stabil gegenüber vielen Stoffen im Fahrzeugumfeld. Jedoch nimmt das Material, dies betrifft auch chemisch verbesserte Versionen, bis zu 8 % Wasser auf und lagert dieses reversibel in die Molekülstruktur ein. Dieser Vorgang ist mit einer Volumenzunahme und einem deutlichen Abfall der mechanischen Eigenschaften verbunden und kann zu hohem Verzug und Spannungen im Material führen.

Epoxidharze bieten neben guter chemischer Beständigkeit eine hohe chemische Haftung, geringe Schwindung und die Möglichkeit der niederviskosen Verarbeitung. [68]

Daraus folgt, dass Epoxidharze zwar die teuerste Lösung aber zugleich die technisch beste darstellen. Epoxidharze können drucklos verarbeitet werden, z.B. als Gießharz. Um die Wärmeleitfähigkeit zu erhöhen, werden dem Harz Füllstoffe beigemischt. Die Wärmeleitfähigkeit steigt mit der beigemischten Menge des wärmeleitfähigen Füllstoffs. Der Anteil wird jedoch durch die Verarbeitbarkeit und die Eigenschaften des gefüllten Kunststoffes begrenzt. Eine weitere Möglichkeit, um die Wärmeleitfähigkeit zu erhöhen, ist die Partikelgröße der Füllstoffe zu erhöhen. Die Partikelgröße wird durch den Filtrationseffekt begrenzt. Lange und dünne Spalte wie sie im Bereich der Statornuten auftreten, werden dann nur mit dem Matrixmaterial gefüllt, da die zu großen Partikel nicht in die dünnen Spalte vordringen können. Neben der geringeren Wärmeleitfähigkeit innerhalb des Spalts wird auch die Verteilung der Füllstoffe verändert und kann lokal so hoch werden, dass sich die Partikel nicht mehr in die Matrix einbetten und kein fester Verbundwerkstoff entsteht. [69] Weiterhin können Füllstoffe mit höherer Wärmeleitfähigkeit verwendet werden. Exotische Füllstoffe mit dieser Eigenschaft (z.B. Kohlenstoffnanoröhrchen) können diese zwar stark erhöhen, aufgrund der hohen Kosten ist ein Einsatz in der Serienproduktion derzeit aber ausgeschlossen.

2.8.2 Verarbeitung von Duroplasten und gefüllten Duroplasten

Duroplaste können nicht aufgeschmolzen werden, weshalb die Formgebung urformend geschieht. Die Aushärtereaktion der Duroplaste ist üblicherweise endotherm, bei Epoxiden ist sie exotherm. Für Spritzprozesse werden Duroplaste angemischt und die Vernetzungsreaktion gestartet (Polykondensation oder Polyaddition). Durch ein Abkühlen kann die Reaktion nahezu gestoppt und das Material zu rieselfähigem Granulat verarbeitet werden. Dieses ist üblicherweise Tage bis Monate lagerbar. Besonders für Serienfertigungen sind Spritzprozesse mit geringer Zykluszeit und hoher Wiederholgenauigkeit geeignet. [65]

In Abbildung 2-28 ist der Prozessablauf des Umspritzens eines Stators dargestellt.

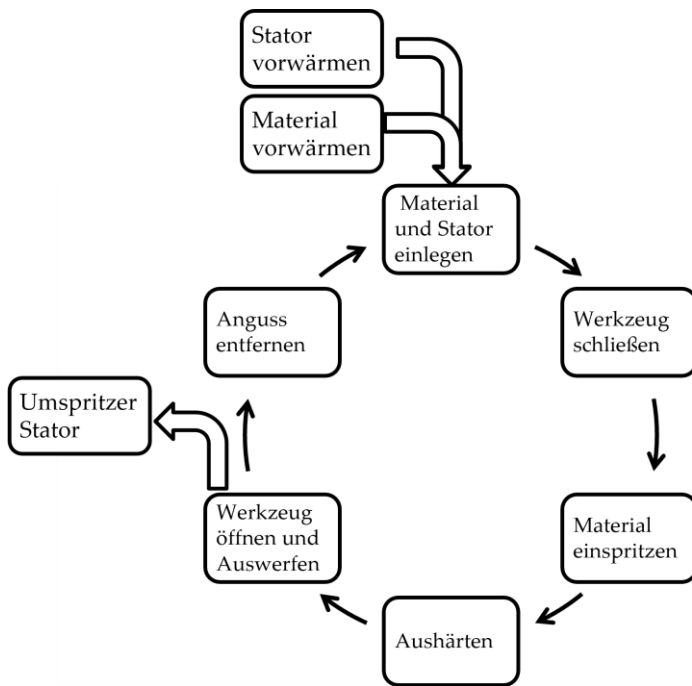


Abbildung 2-28: Ablaufdiagramm des Statorumspritzens

Zunächst wird der Stator auf die Werkzeugtemperatur von üblicherweise 150-180 °C aufgeheizt, das Duroplastmaterial wird auf 90 °C aufgewärmt. In diesem Zustand sinkt die Viskosität des Materials und der eingefrorene Vernetzungsprozess setzt sich fort. Der Einleger wird in das vorgeheizte Werkzeug gesetzt und der Kunststoff in der Maschine aufbereitet. Beim Spritzguss wird das Material in einer Schnecke vorgewärmt und aufdosiert, beim Spritzpressen wird es vorgewärmt in einen Zylinder eingelegt. Das Werkzeug wird maschinell geschlossen und verriegelt. Durch die Schnecke bzw. einen Stempel wird das Material in die Kavität gepresst. Übliche Einspritzdrücke bewegen sich im Bereich von 500 - 1750 bar. Nach der vollständigen Füllung des Werkzeugs wird aufgrund der Erwärmung durch die Werkzeugwände bzw. den Einleger die Vernetzungsreaktion beschleunigt. Übliche Aushärtezeiten sind 60 - 240 Sekunden. Anschließend öffnet sich das Werkzeug und das umspritze Bauteil wird über maschinell angetriebene Auswerfer aus dem Werkzeug ausgestoßen. Der Anguss wird entfernt und der Zyklus startet von neuem. [63, 64]

Für besonders niederviskose Materialien reicht die Abdichtung der Schnecke zum Zylinder nicht aus. Diese lassen sich jedoch im Spritzpressverfahren, bei dem keine Schnecke, sondern ein Zylinder das Material in die Kavität presst, verarbeiten.

Die Funktionsweise ist in Abbildung 2-29 dargestellt.

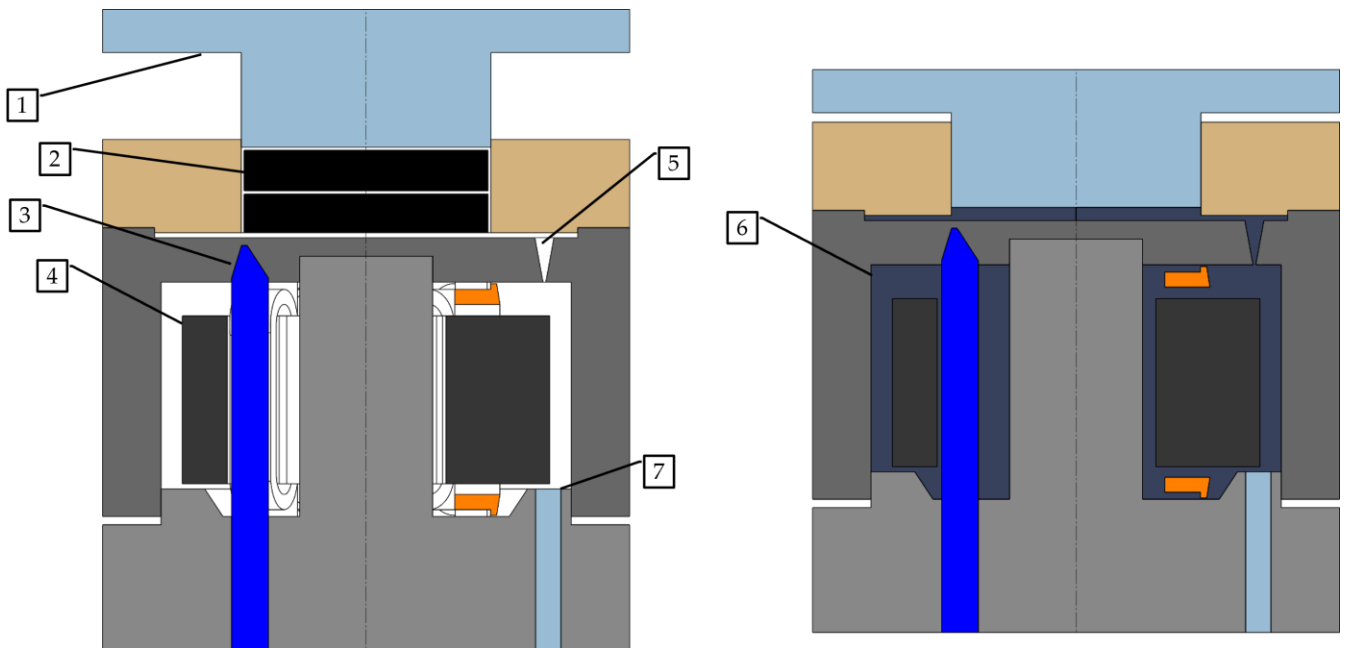


Abbildung 2-29: Prinzipskizze Spritzpressen

Der Kolben (1) drückt das vorgewärmte Material (2) über den Angusskanal (5) in die Kavität. Dort können Teile, wie etwa ein Stator (4), eingelegt sein. Durch Kerne (3) im Werkzeug können Löcher im fertigen Bauteil geschaffen werden. Nach dem Vernetzen des Materials wird die obere Werkzeughälfte geöffnet und das fertige Bauteil (6) mittels Auswerferstiften (7) aus dem Werkzeug gedrückt.

2.9 Zusammenfassung und Bewertung möglicher Entwicklungsschwerpunkte

In Tabelle 2-6 wird der vorgestellte Stand der Technik hinsichtlich der Leistungsdichte, Serienumsetzbarkeit und Kosten bewertet. Synergieeffekte bzw. Ausschlusskriterien zwischen Technologien wurden nicht betrachtet.

Tabelle 2-6: Bewertung der Stand-der-Technik-Technologien

	Leistungsdichte	Serienumsetzbarkeit	Kosten
Statorblechpaket			
Einzelzähne	+	++	0
Vollschnitt	+	++	+
Sonderbauformen	0	0	+
Wicklungsarten (konzentriert)			
Einzelzahnwicklung	0	++	+
Aufsteckwicklung	0	++	+
Flyerwicklung	+	++	+
Nadelwickeln	+	+	0
Wicklungsarten (verteilt)			
Nadelwickeln	+	+	0
Hairpin	++	+	+
Wellenwicklung	++	+	+
Einziehwicklung	+	+	+
Wicklungsschutz			
Imprägnierung	0	++	+
Umspritzung	++	+	+
Bandagierung	-	0	+
Kühlkonzepte			
Mantelkühlung	+	++	++
Innenliegende Kühlung	++	0	0
Direkte Kühlung	++	0	-
Passive Rotorkühlung	-	++	++
Aktive Rotorkühlung	+	0	-
Kühlmedien			
Wasser-Glykol-Mischung	+	++	++
Öl	0	0	-

3 Konzept des neuentwickelten Elektromotors

In diesem Kapitel wird das Konzept der Funktionsintegration durch Kunststoffeinsatz in Traktionsmaschinen vorgestellt. Hierzu werden die Nachteile des Stands der Technik, der in Kapitel 2 beschrieben ist, kurz zusammengefasst und darauf aufbauend ein Ansatz zur Weiterentwicklung hergeleitet. Dieser Ansatz wird konzeptionell beschrieben. Abschließend werden die charakteristischen Motorkennwerte zusammengefasst aufgelistet. Im nachfolgenden Kapitel 4 wird das Konzept im Detail ausgearbeitet und erklärt.

3.1 Nachteile des Stands der Technik

Durch den Vergleich der Anforderungen und des Stands der Technik lassen sich aktuelle Defizite erkennen. Als Wärmeträger bieten Wasser-Glykol-Gemische zwar gute thermische Eigenschaften, sie sind elektrisch jedoch leitfähig. Kühlöle verhalten sich entsprechend umgekehrt. Innenliegende, indirekte Kühlungen, die eine hohe Leistungsdichte ermöglichen, weisen viele Trennstellen mit entsprechenden Unsicherheiten bezüglich Leckage auf. Innenliegende direkte Kühlungen benötigten ein elektrisch isolierendes Kühlmittel mit den oben genannten Nachteilen. Zusätzlich wird für alle Kühllösungen ein zusätzlicher Wickelkopfschutz benötigt. Durch die Verarbeitung in drucklosen Prozessen wie Träufeln oder Tauchen können nur Kunststoffe mit geringen Füllstoffanteilen und somit auch niedriger Wärmeleitfähigkeit verarbeitet werden. Als Gehäusematerial kommen ausschließlich metallische Werkstoffe mit den entsprechenden Einschränkungen zur Funktionalisierung durch die elektrische Leitfähigkeit des Materials zum Einsatz.

Weitere ökonomische Verbesserungsmöglichkeiten betreffen die hohe Zykluszeit der Imprägnierung des Wickelkopfs, welche neben einem Kostenfaktor auch Probleme bei der Serienproduktion erzeugen, indem mehrere Anlagen parallel betrieben werden müssen. Weiterhin steigt bei Elektromotoren mit einfachem, kostengünstigem Kühlsystem die Menge an notwendigem Eisenblech, Kupfer und benötigten Magneten bei gleichbleibender Leistung. Das Leistungsgewicht sinkt durch das einfachere Kühlsystem. Neben den technischen Einschränkungen zur Funktionalisierung von Metallgehäusen ist auch die mechanische Nachbearbeitung ein Kostenfaktor. Nach dem aktuellen Stand der Technik ist es nicht möglich, metallische Gehäuse kosteneffektiv ohne mechanische Nachbearbeitung zu fertigen.

3.2 Ansatz zur Verbesserung gegenüber dem Stand der Technik

Auf Basis der Nachteile des Stands der Technik stellen sich folgende Forschungsfragen:

1. Wie muss ein innenliegendes Kühlsystem auf Wasser-Glykol Basis beschaffen sein, um es großserienfähig herstellen zu können?

Es existieren zahlreiche Konzepte, die im 2D-Querschnitt des Motors funktionieren. Erweitert um die Umlenkungen und Verteilung des Kühlmittels in einer 3D-Konstruktion können diese

jedoch nicht mehr hergestellt werden. Weiterhin gibt es Konzepte, die zwar prototypisch aufgebaut wurden, diese können jedoch anschließend nicht großserienfähig umgesetzt werden.

2. Welche Potentiale ergeben sich aus der innenliegenden Kühlung und wie können diese genutzt werden?

Durch die innenliegende Kühlung entfällt die Anforderung der Wärmeleitfähigkeit für das Gehäusematerial. Dies ermöglicht den Einsatz von Kunststoff, der durch die Verarbeitung mittels Spritzprozesse neue Möglichkeiten zur Funktionsintegration und zum Leichtbau bietet, insbesondere die Homogenisierung des Kühlmittelstroms und die Integration des Gehäuses als Bestandteil der Phasenanschlüsse.

3. Wie groß ist die quantitative Verbesserung der Leistungsdichte zum Stand der Technik?

Unterschiedliche Angaben zur Effektivität des Kühlsystems verschleiern die tatsächliche Verbesserung der neuen Kühlkonzepte. Durch einen elektrisch baugleichen Motor kann die Verbesserung der Motoreigenschaften direkt quantitativ bewertet und die Dauerleistungsdichte sowie die Rotortemperatur bei gleicher Belastung verglichen werden.

Als Verbesserung des Stands der Technik kann durch die Kombination aus innenliegender Kühlung, Umspritzen des Stators mit einem wärmeleitfähigen, gefüllten Duromersystems im Spritzpressverfahren und funktionsintegrierendem Duroplast-Leichtbaugehäuse erhebliches Verbesserungspotenzial in den Bereichen Leistungsfähigkeit, Qualität, Funktionsintegration und Großserienfähigkeit erreicht werden.

Die innenliegende Kühlung ermöglicht die Realisierung eines Elektromotors mit höherer Dauerleistung im Vergleich zu Elektromotoren mit konventionellen Kühlkonzepten. Das Umspritzen des Stators mit hochwärmeleitfähigen Duromersystemen im Spritzpressverfahren ermöglicht bei gleichbleibend hoher Qualität eine Großserienfertigung. Zusätzlich ermöglicht der neuartige Ansatz die Umsetzung eines strukturellen duromeren Kunststoffgehäuses, das durch einen hohen Grad an Funktionsintegration sowohl Potenzial zur Verringerung der Teileanzahl wie auch zur Kostenreduktion bietet.

3.3 Konzeptioneller Aufbau

In Abbildung 3-1 ist im Querschnitt das Konzept des entwickelten Elektromotors dargestellt mit der elektrischen Auslegung von *M. Schiefer* [42].

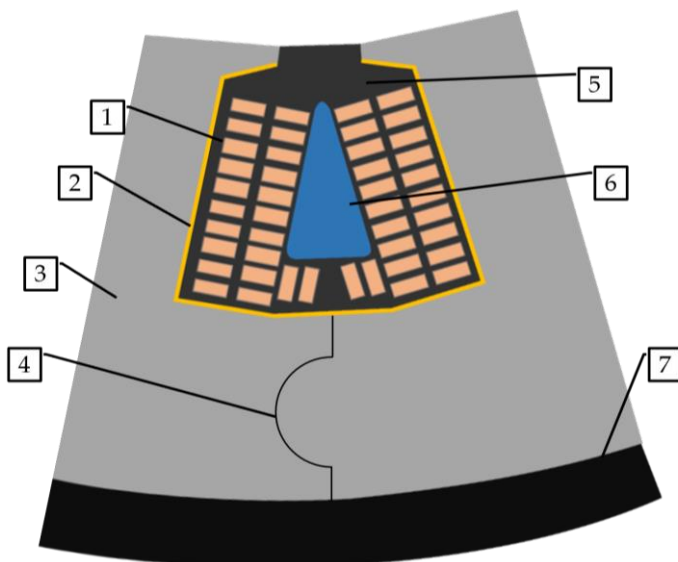


Abbildung 3-1: Querschnitt des Konzepts

Die konzentrierte Wicklung (1) wird zur Verringerung der Stromverdrängungseffekte hochkant um Einzelzähne (3) gewickelt. Zum Schutz der Wicklung und zur zusätzlichen Isolation wird ein Isolationspapier (2) eingesetzt. Durch ein Feder-Nut-System (4) werden die Einzelzähne aneinandergereiht und zueinander ausgerichtet. Der gesamte Stator wird mit einem wärmeleitfähigen Kunststoff (5) umspritzt, durch einen Kern im Werkzeug wird ein Kühlkanal (6) geformt. Aufgrund der innenliegenden Kühlung kann ein Gehäuse aus Kunststoff (7) zur Funktionsintegration eingesetzt werden.

Auf Basis des zweidimensionalen Konzepts kann die dreidimensionale Konstruktion des Stators abgeleitet werden. In Abbildung 3-2 ist ein Einzelzahn sowie die Bestandteile, aus denen er zusammengesetzt ist, dargestellt.

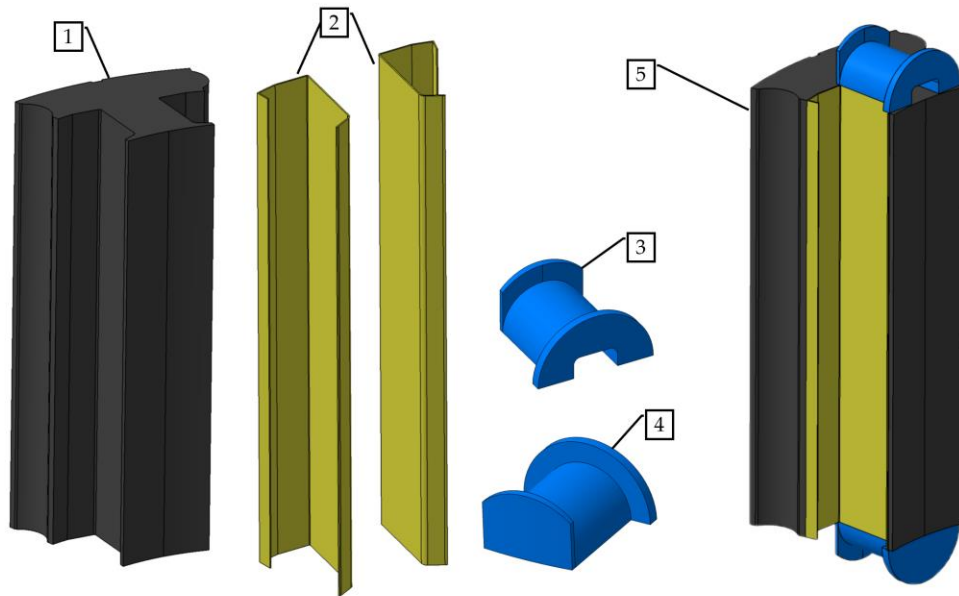


Abbildung 3-2: Einzelteile und vormontierter Einzelzahn

Die Einzelzähne (1) werden vor dem Wickeln mit Isolationspapier (2) und Wickelkopfformern (3 und 4) versehen. Der so fertig vorbereitete Einzelzahn zum Bewickeln ist in (5) dargestellt.

Im linearen Wickelverfahren wird mit Flachdraht hochkant gewickelt. Aus zwölf Einzelzähnen wird ein kompletter Statorring gebildet. Stirnseitig wird ein Phasenanschlussring aufgesetzt, der aus vier Kupferringen in einem Kunststoffträger besteht. Die Spulen können mittels Schweiß- oder Hartlötverfahren mit den Ringen verschaltet werden. Drei Temperatursensoren können am Stator befestigt werden, um die Temperaturen im Motor nach dem Umspritzen zu messen. Mithilfe von zusätzlichen Kunststoffteilen werden die Anschlussbuchsen der Sensoren am Stator befestigt. Es entsteht das Statorpaket wie in Abbildung 3-3 dargestellt.

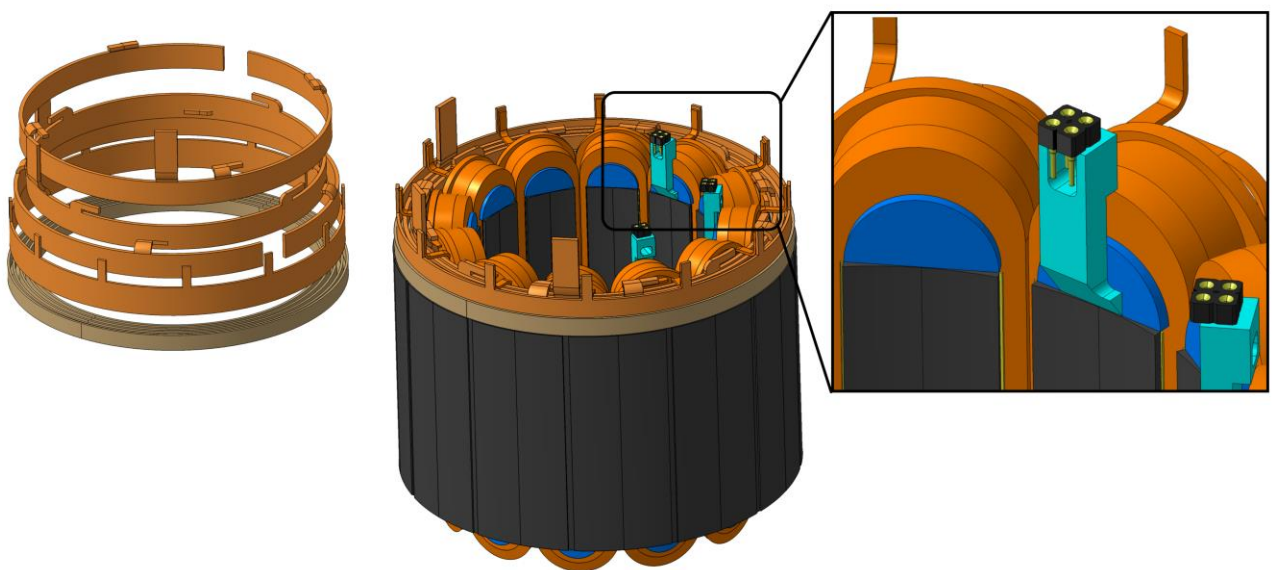


Abbildung 3-3: Bauteile des Stators und fertig vormontierter Stator

Das für das Umspritzen vorbereitete Statorblechpaket wird im Ofen vorgewärmt und in einem Werkzeug mit zwölf Kühlkanalkernen positioniert. Im Werkzeug wird der Stator mit hochwärmeleitfähigem Kunststoff überspritzt. Die zwölf Kerne hinterlassen im umspritzten Stator als Abguss die Kühlkanäle. In der Abbildung 3-4 ist eine Schnittdarstellung des Werkzeugs mit Stator dargestellt. Die Werkzeugoberplatte sowie der Angussverteiler sind nicht dargestellt.

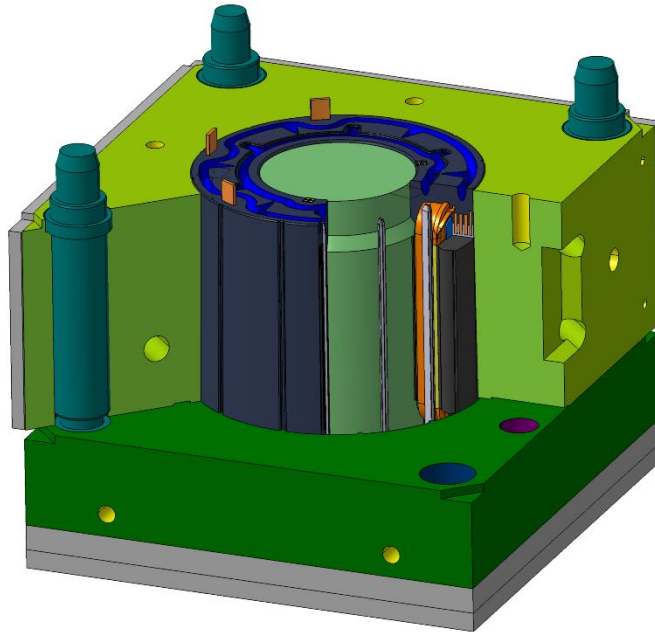


Abbildung 3-4: Schnittdarstellung des umspritzten Stators im Werkzeug

Das Gehäuse wird im Duromer-Spritzgussprozess werkzeugfallend hergestellt. Zur Montage wird der Stator in das Gehäuse geschoben. Durch ein Feder-Nut-System wird das Drehmoment des Stators in das Gehäuse übertragen. Die Verteilung des Kühlmittels erfolgt über zwei Ringkanäle, die durch das Gehäuse und den umspritzten Stator gebildet werden. Zur Abdichtung werden O-Ringe eingesetzt. In das Gehäuse wird eine Lanze zur Kühlmiteleinspritzung in den hohlen Rotor montiert. Der Drehgeber ist stirnseitig am Ende der Lanze befestigt. Der Stator und das geschnitten dargestellte Gehäuse sind auseinandergezogen in Abbildung 3-5 dargestellt.

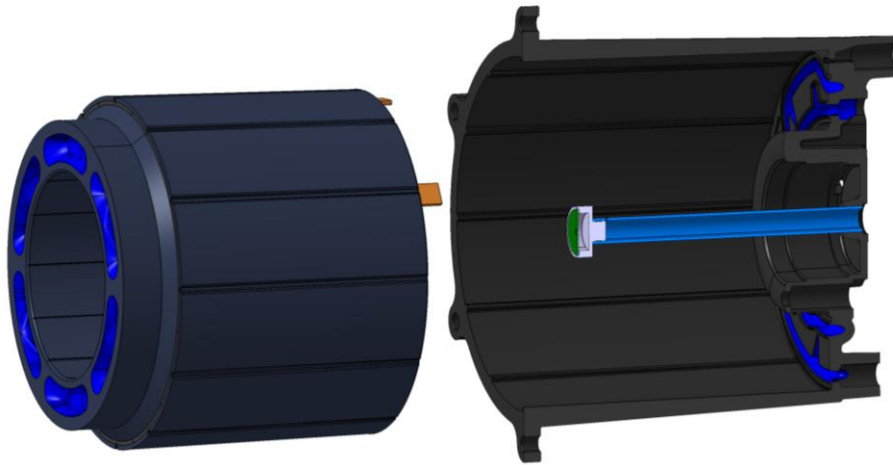


Abbildung 3-5: Stator vor der Montage in das geschnittene Gehäuse

Das Rotorblechpaket wird auf eine hohle Welle gepresst und die Lager sowie die Dichtung montiert. Die vormontierte Rotorwelle wird zur Montage in das Gehäuse geschoben. In Abbildung 3-6 ist der montierte Stator mit bereits eingebautem Rotor im Schnitt dargestellt.

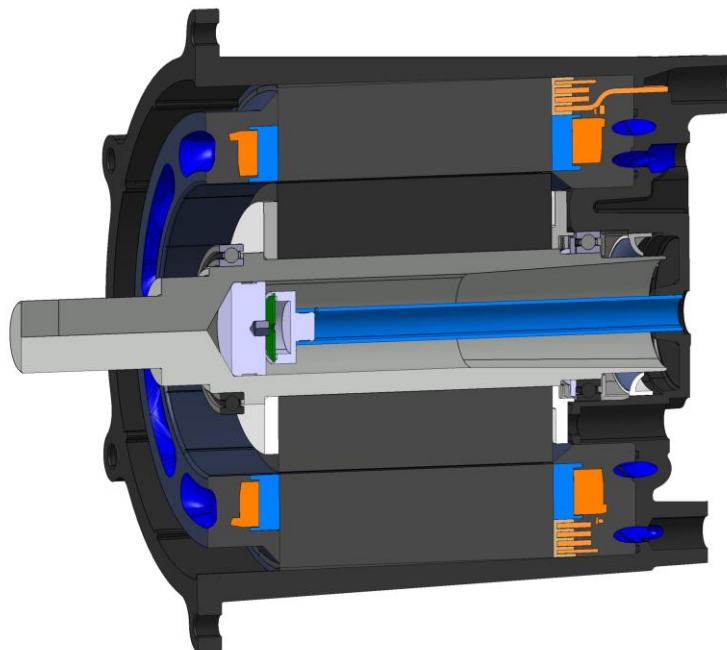


Abbildung 3-6: Stator mit montiertem Rotor

Mit einem Aluminium A-Lagerschild werden der Motor verschlossen und die rückführenden Kühlmedienkanäle gebildet. Zur Abdichtung werden O-Ringe eingesetzt. Auf der Rückseite werden ein Infrarotthermometer und die Phasenstecker montiert. Der komplettierte Motor ist in Abbildung 3-7 im Schnitt dargestellt.

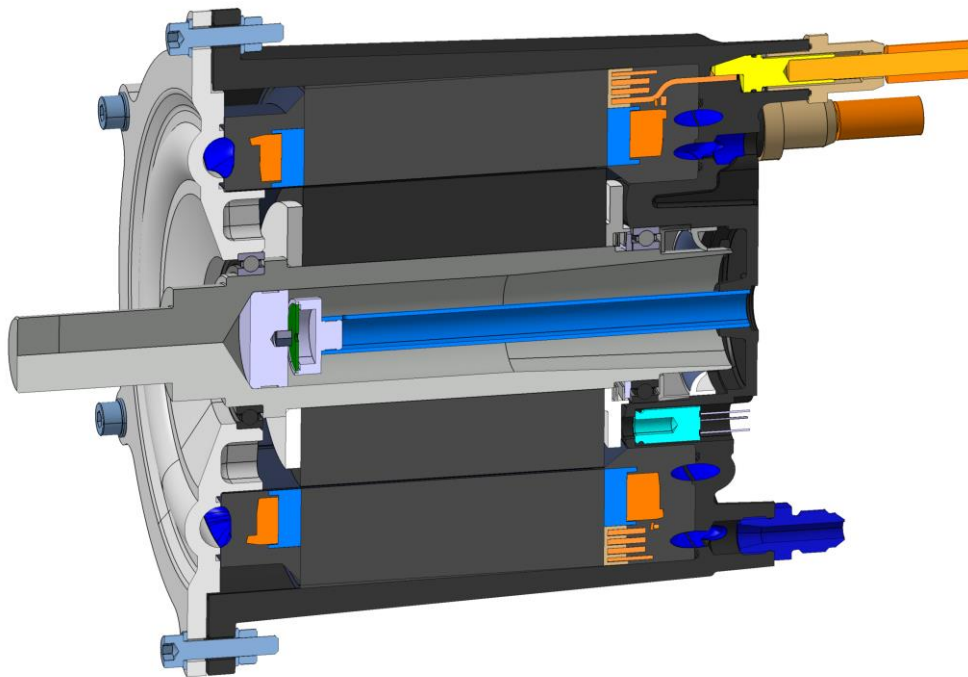


Abbildung 3-7: Kompletierter Motor im Schnitt

3.4 Hauptabmessungen und Kennwerte

Das elektrische Design des Motors basiert auf der Arbeit von *Schiefer* [42]. Es handelt sich dabei um eine permanent erregte Synchronmaschine mit konzentrierter Hochkant-Flachdrahtwicklung. Die elektrischen Eigenschaften sowie die Hauptabmessungen und Kennwerte sind in Tabelle 3-1 zusammengefasst:

Tabelle 3-1: Hauptabmessungen und Kennwerte

Art	Wert
Phasenanzahl m	3
Polpaarzahl P	4
Zähnezahl Z	12
Außendurchmesser Stator D_a	134 mm
Aktivlänge l_{Fe}	80 mm
Rotordurchmesser D_i	80 mm
Rotorwellendurchmesser D_w	40 mm
Luftspalt (elektrisch) δ	0,7 mm
Drahtabmessungen	2,5 x 1 mm
Windungsanzahl w	22
Winkelgeber	Hall-Encoder on axis
Gesamtgewicht	10,5 kg

4 Detailkonstruktion des entwickelten Elektromotors

Auf Basis des vorgestellten Konzepts werden die Details der Konstruktion erarbeitet. Durch den Einsatz der Spritzprozess für die Herstellung der Kühlkanäle und des Gehäuses müssen Einschränkungen bei der Gestaltung beachtet und die neuen, sich ergebenden Möglichkeiten genutzt werden. Erst durch die Lösungen im Detail wird das Konzept als Ganzes umsetzbar.

4.1 Stator

Kern der Entwicklung ist der umspritzte Stator. Dieser besteht aus zwölf Einzelzähnen, die zueinander ausgerichtet werden. Die Trennung der Zähne am Statorjoch ist halbkreisförmig ausgeführt. Dies erlaubt einen geringen Winkelausgleich der Zähne zueinander. Zur besseren Sichtbarkeit ist in Abbildung 4-1 der Spalt vergrößert dargestellt. Gleichzeitig sorgt die Geometrie aber auch für einen Hinterschnitt in radialer Richtung, sodass einzelne Zähne nicht nach außen kippen können. Die Zähne wurden im wirtschaftlichsten Verfahren – mittels Prototypenwerkzeug gestanzt und Backlack paketiert – gefertigt.

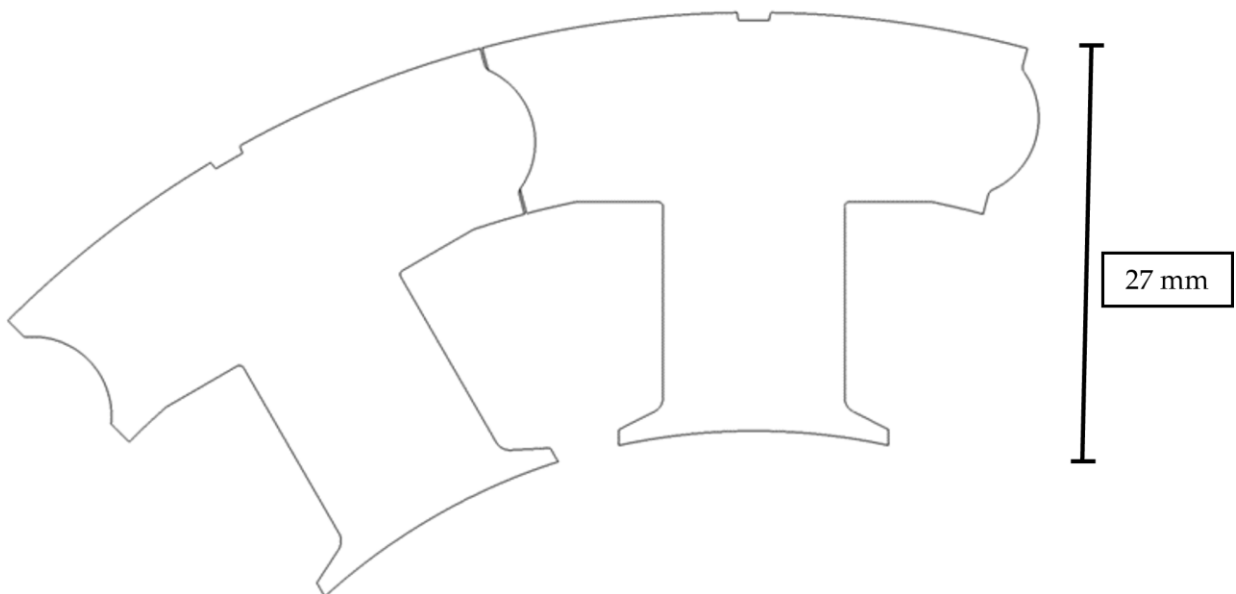


Abbildung 4-1: Geometrie der Einzelzähne zur Ausrichtung zueinander

In Abbildung 4-2 sind Bauteile zur Formung des Wickelkopfs (1) mit zusätzlichem Ausschnitt (2) für einen Buchsenhalter (3) dargestellt.

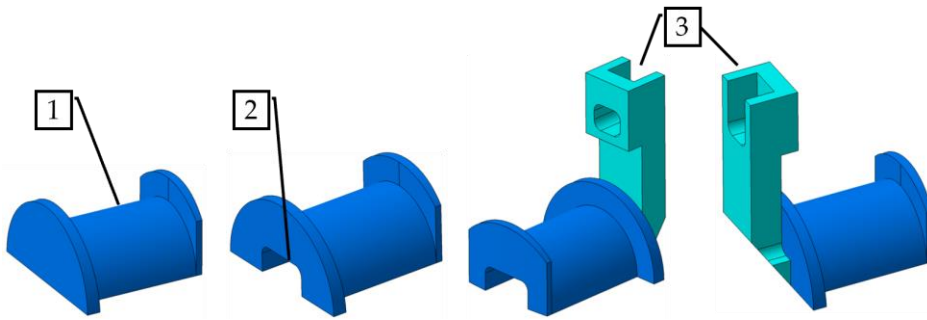


Abbildung 4-2: Wickelkopfformteile mit und ohne Buchsenhalter

Die Formteile sind aus Vyncolit X7100, einem Phenolharz, hergestellt. Das Material hat eine hohe Temperaturbeständigkeit und ist chemisch kompatibel zur wärmeleitfähigen Umspritzung, weshalb sämtliche zusätzlichen Kunststoffteile aus diesem Material gefertigt werden. Ein Bund auf der Oberseite unterstützt den Wickelprozess, indem der Draht zusätzlich geführt wird. In der mittigen Aussparung kann zudem ein Buchsenhalter (3) montiert werden. Dieser positioniert die Buchsen der Temperatursensoren für das spätere Umspritzen an der Werkzeugwand, sodass diese nach dem Umspritzen zugänglich sind.

In der Abbildung 4-3 ist die Verschaltung der Spulen im Detail gezeigt.

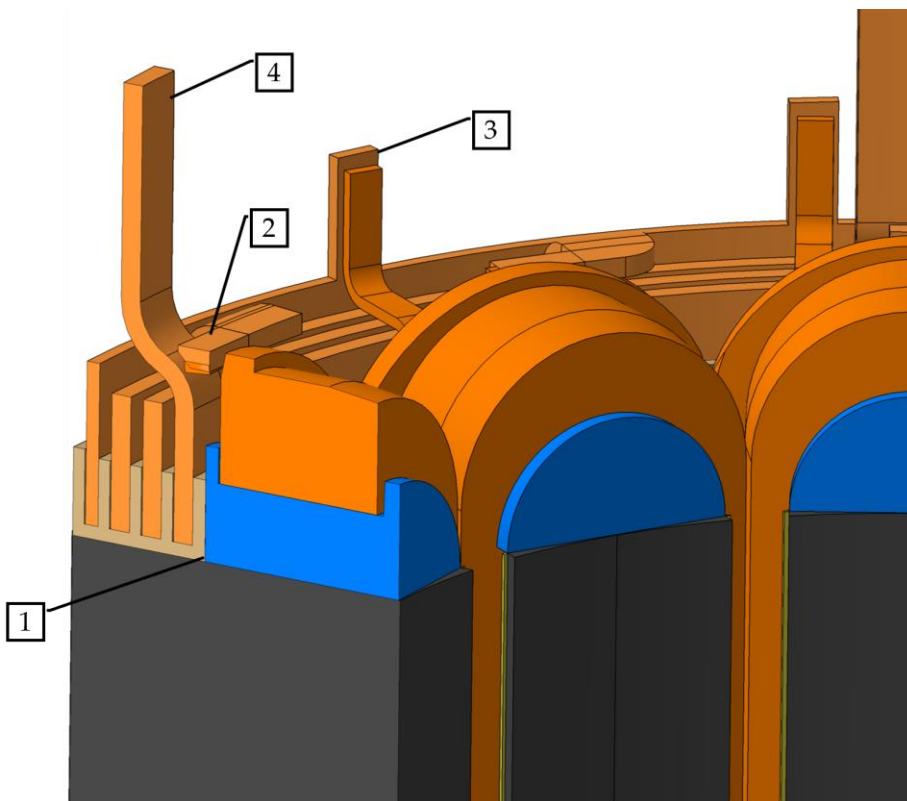


Abbildung 4-3: Schaltung des Stators im Detail

Mittels der Wickelhilfen wird der Phasenringträger stirnseitig auf dem Blechpaket zentriert (1). Im Phasenringträger sitzen vier Ringe, drei zur Verschaltung der drei Phasen sowie ein Ring als Sternpunkt. Durch eine Lasche (2) am Kupferblech können die jeweiligen Spulen verbunden

werden. Der äußerste Ring dient als Sternpunkt (3). Aufgrund der beengten Platzverhältnisse eignen sich nur Verfahren mit besonders geringem Platzbedarf zur Verschaltung der Wicklung. Dies schließt Schraub-, Klemm- oder Crimpverbindungen aus. Umsetzbar ist das Verbinden mittels Hartlöten oder Schweißen. Verbindungen aus Hartlot weisen aufgrund des zusätzlichen Materials einen erhöhten elektrischen Widerstand auf, weshalb die Anschlüsse verschweißt werden sollen. Dafür müssen die zu verschweißenden Bauteile eine ähnliche Wärmeleitfähigkeit besitzen, um ein gleichzeitiges und gleichmäßiges Aufschmelzen zu ermöglichen. Die Laschen (2) sind entsprechend im Querschnitt reduziert. Zur Kontaktierung des Motors werden die drei Phasenringe verlängert und ragen aus der späteren Umspritzung hervor (4).

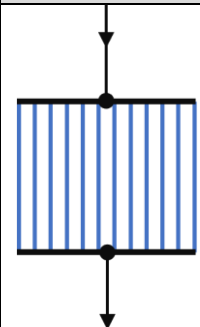
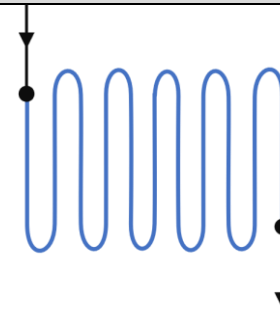
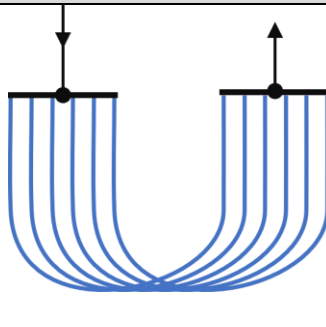
4.1.1 Statorkühlsystem

Das Kühlsystem kann in zwei Teilsysteme, der Stator Kühlung und der Rotorkühlung, aufgeteilt werden. Letzteres wird im Kapitel 4.3 beschrieben.

Ziel des Statorkühlsystems ist eine möglichst hohe Wärmeabfuhr aus dem Motor bei gleichzeitiger Vermeidung von Hotspots und einem möglichst geringen Druckverlust. Da die Position und die Geometrie der Kühlkanäle innerhalb der Nut bereits festgelegt sind, kann die Wärmeabfuhr nur noch über den Wärmeübergangskoeffizient beeinflusst werden. Dieser hängt vom Kühlmedium, der Fluidgeschwindigkeit und der Wärmeleitfähigkeit des Materials ab. Da sowohl Material als auch Kühlmedium festgelegt wurden, besteht die Herausforderung in der Verschaltung der Kühlkanäle, sodass diese bei möglichst hoher Fluidgeschwindigkeit und gleichzeitigem geringen Druckverlust gleichmäßig durchströmt werden.

In Tabelle 4-1 sind die Extremfälle möglicher Verschaltungsarten aufgelistet: alle Kanäle parallel, alle Kanäle seriell und eine Mischung beider Konzepte. Diese werden nach dem parallel durchströmten Querschnitt, der Strömungsgeschwindigkeit, dem Druckverlust, der Verschaltungskomplexität und bezüglich der Ein- und Auslassseite bewertet.

Tabelle 4-1: Übersicht und Bewertung der Verschaltungsmöglichkeiten der Statorkühlkanäle

Verschaltung	Parallel	Seriell	Seriell-parallel
Darstellung			
Kleinster Querschnitt	12x8 mm ²	8 mm ²	6x8 mm ²
Strömungsgeschwindigkeit im Kanal (normiert)	1/12	1	1/6
Druckverlust	Niedrig	Sehr hoch	Niedrig
Komplexität	Mittel	Niedrig	Mittel
Ein- /Auslass auf gleicher Seite	Nein	Ja	Ja

Bei einer **parallelen** Durchströmung aller zwölf Kanäle ist der durchströmte Querschnitt maximal, Strömungsgeschwindigkeit, Druckverlust und Wärmeübergangskoeffizient sind jedoch minimal. Die Komplexität der Verschaltung wird im mittleren Bereich bewertet, da die Kühlkanäle nicht nur miteinander verschaltet werden müssen, sondern auch ein Mechanismus zur Homogenisierung der Durchströmung hinzugefügt werden muss. Ohne diesen fließt durch die einlassnahen Kanäle deutlich mehr Kühlmittel als durch die einlassfernen Kanäle und es kommt zu Hotspots im Motor. Die Ein- und Auslassseite der Kühlung sind bei dieser Lösung auf jeweils gegenüberliegenden Seiten, dies kann zu Einschränkungen der späteren Verwendung führen, da eine Zugänglichkeit von beiden Seiten gewährleistet sein muss.

Bei einer **seriellen** Verschaltung aller Kühlkanäle ist die durchströmte Querschnittsfläche minimal und damit sind die Strömungsgeschwindigkeit, der Druckverlust und der Wärmeübergangskoeffizient maximal. Die Komplexität ist gering, der Durchfluss bei allen Kühlkanälen gleich. Aufgrund der kleinen Querschnitte und vielen Umlenkungen der Kühlkanäle ist mit einem hohen Druckverlust zu rechnen. Der äquivalente Kreisdurchmesser der Kühlkanäle beträgt 3,2 mm, dies ist deutlich kleiner als übliche Kühlmittelschläuche im PKW-Bereich, weshalb der Druckverlust über dem üblicher Kühlmittelpumpen liegen wird. Ebenfalls liegen sich die Ein- und Auslassseite mit den bereits genannten möglichen negativen Auswirkungen gegenüber.

Bei einer **Kombination** von Parallel- und Seriellschaltung werden jeweils zwei Kanäle in Serie und davon sechs parallel verbunden. Hierdurch liegen Ein- und Auslass auf der gleichen Motorseite. Pro serieller Kühlkanalverschaltung ist eine Umlenkung erforderlich. Der gesamt durchströmte Querschnitt von 48 mm² entspricht einem Kreis von 7,8 mm Durchmesser, dies liegt im unteren Bereich der verbauten Kühlmittelleitungsquerschnitte in PKWs. Der

Detailkonstruktion des entwickelten Elektromotors

Durchverlust sollte im Bereich der Leistungsfähigkeit von klassischen Kühlmittelpumpen liegen und wird im weiteren Verlauf der Arbeit noch genauer bestimmt. Diese Verschaltungsart kombiniert die positiven Eigenschaften der beiden anderen Extremfälle und wird entsprechend gewählt.

In Abbildung 4-4 ist das Kühlmittel ohne den restlichen Motor dargestellt.



Abbildung 4-4: Kühlmittel des Stator Kühlsystems

Durch den inneren Ring wird das Kühlmittel gleichmäßig über den Umfang auf sechs Kühlkanäle verteilt. Auf der entgegengesetzten Motorseite werden die sechs Kanäle jeweils umgelenkt und in den anderen sechs Kanälen wieder zurückgeleitet. Im äußeren Ring werden die Fluidströme gesammelt und aus dem Motor ausgeleitet. Die Ringkanäle sind radial im Bauraum beschränkt. Um den Querschnitt zu erhöhen und den Druckverlust zu reduzieren, werden die Kanäle oval ausgeführt.

Zur Verifizierung des konstruierten Kühlkonzepts wird eine CFD (*Computational Fluid Dynamics*) Simulation aufgesetzt. In iterativen Schleifen kann auf Basis der Ergebnisse die Konstruktion angepasst werden. Ziel der Simulation ist die Minimierung des Druckverlusts, eine Homogenisierung der Kanaldurchflüsse und die Vermeidung von Hotspots durch stehendes Kühlmittel.

Die späteren Versuche am Prüfstand werden mit reinem Wasser durchgeführt, welches auch in der Simulation als Medium definiert wird. In Abbildung 4-5 ist das vernetzte Fluidvolumen abgebildet.

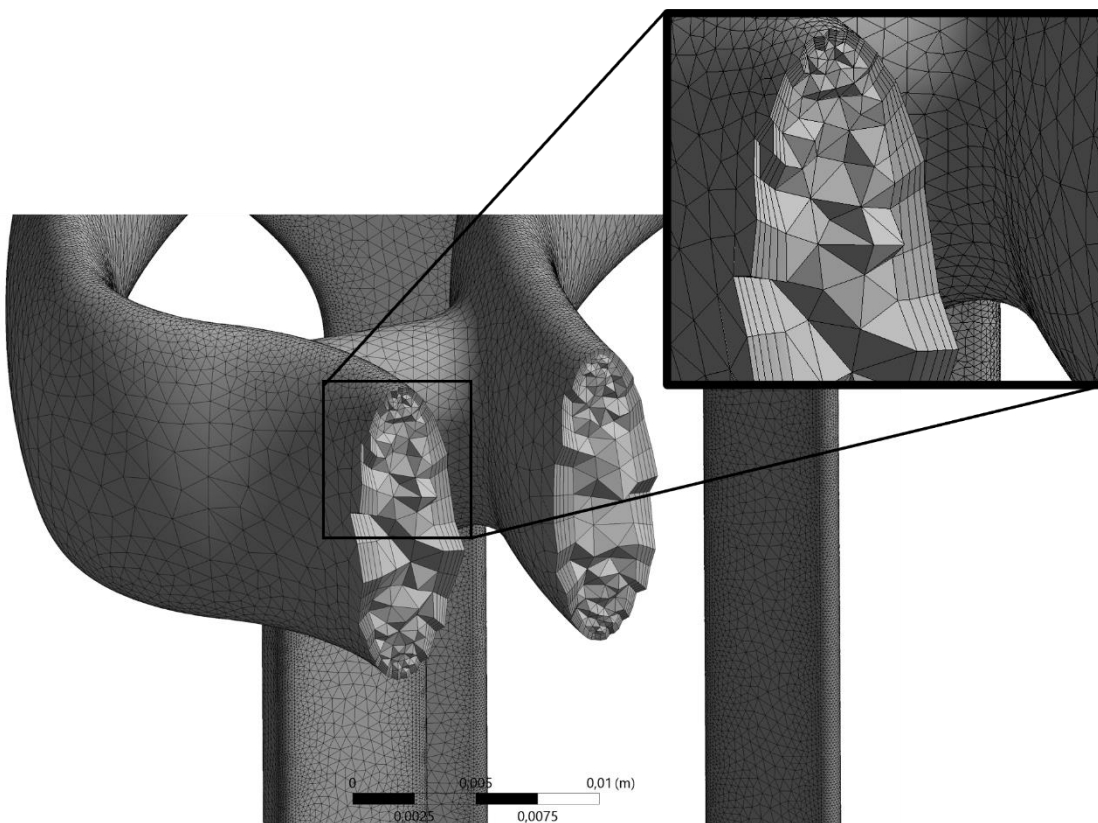


Abbildung 4-5: Schnitt durch das vernetzte Kühlmittel

Zur genaueren Simulation der wandnahen Strömung wird die Dicke der Elemente für die ersten fünf wandnahen Schichten verringert und somit die Auflösung der Simulation erhöht. Insgesamt werden 13 Millionen prismatische Elemente mit 4,5 Millionen Knoten berechnet. Als Randbedingungen wird Wandanhaftung, das bedeutet, dass die Geschwindigkeit des Fluids an der Wand null ist, gerechnet. Aufgrund der geringen Motorabmessungen wird sich mit dem Durchfluss am unteren Bereich der kommerziell erhältlichen Pumpen orientiert und mit 6,5 kg/min gerechnet.

Durch die einseitige Anströmung des Ringkanals ergeben sich ungleiche Leitungslängen und damit auch unterschiedliche Durchflüsse in den einzelnen Kühlkanälen. Um diese zu homogenisieren, werden die Abzweigungen vom Ringkanal in die einzelnen Kühlkanäle iterativ angepasst. In Abbildung 4-6 ist sowohl der kleinste (links) wie auch der größte Querschnitt (rechts) dargestellt. Durch diese Anpassung ergibt sich für jeden Kühlkanal ein ähnlicher Volumenstrom.

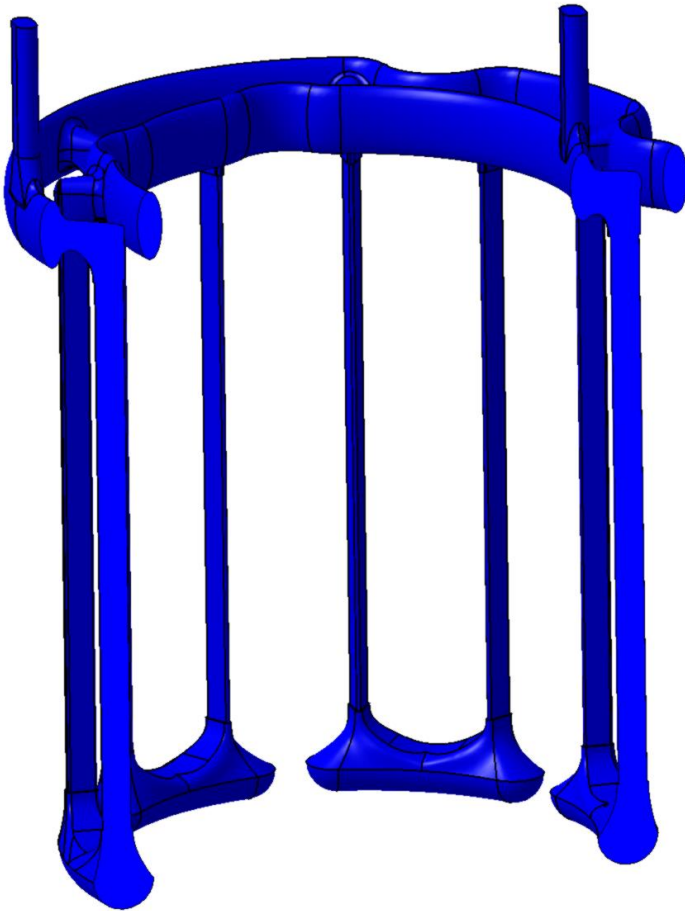


Abbildung 4-6: Unterschiedliche Querschnitte der Übergänge in die Kühlkanäle

In Abbildung 4-7 ist die absolute Verteilung der Volumenströme pro Kühlkanalpaar dargestellt.

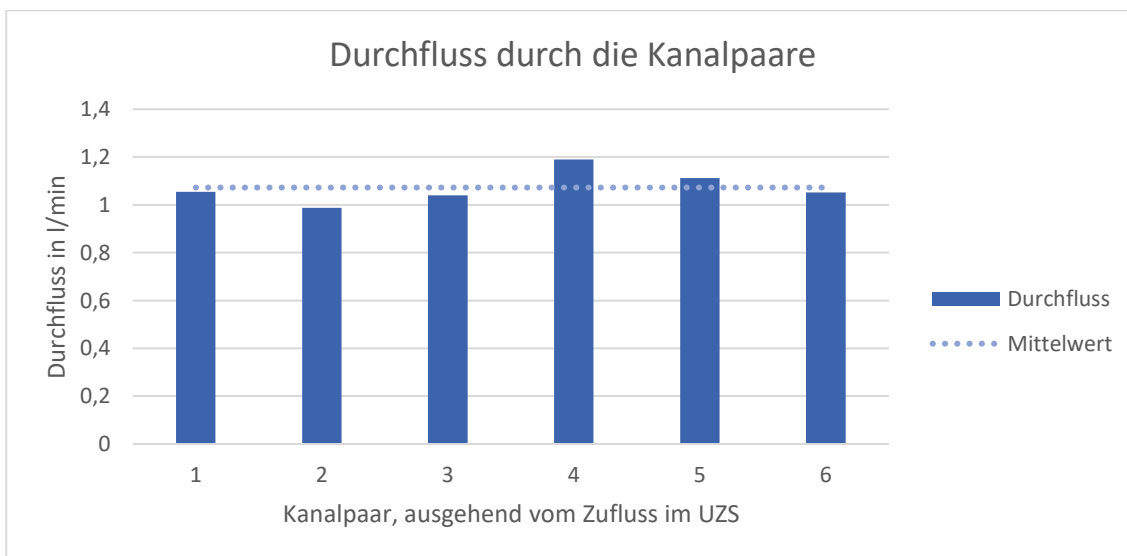


Abbildung 4-7: Durchfluss durch die Kanalpaare

Detailkonstruktion des entwickelten Elektromotors

Die Abweichung vom Mittelwert beträgt +10,9 % und -8,0 %. Durch die unterschiedlichen Massenströme entstehen unterschiedliche Strömungsgeschwindigkeiten in den Kanälen. Dies resultiert in ungleichen Wärmeübergangskoeffizienten und schlussendlich in einer inhomogenen Temperaturverteilung innerhalb des Motors. Durch die erhöhte Temperatur steigt jedoch die übertragene Wärmemenge. Die Abweichung der Temperatur innerhalb des Motors ist deshalb deutlich niedriger als die Abweichung der Masseströme.

Zur Identifikation von Totwassergebieten mit entsprechend möglichen Temperatur-hotspots sind in Abbildung 4-8 die Stromlinien entsprechend ihrer Geschwindigkeit farblich dargestellt.

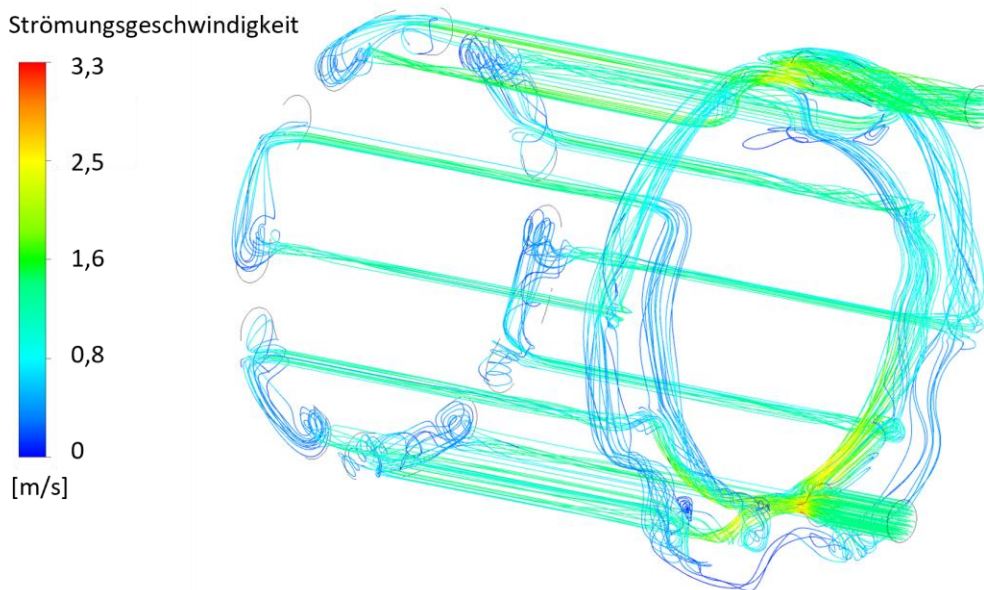


Abbildung 4-8: Stromlinien mit farbiger überlagerter Strömungsgeschwindigkeit

Die höchsten Strömungsgeschwindigkeiten befinden sich neben der Zu- und Abführung in den Kühlkanälen, in diesen Bereichen ist auch der Wärmeübergang am höchsten. In den Bereichen des Ringkanals und der Umlenkung auf der A-Lagerseite ist die Strömungsgeschwindigkeit reduziert, dies verringert tendenziell den Druckverlust. In Letzteren entstehen starke Verwirbelungen mit Bereichen geringer Strömungsgeschwindigkeit. Dies erhöht tendenziell den Druckverlust. Dennoch ist diese Fluidführung vorteilhaft, da die thermische Anbindung der Wickelköpfe verbessert und ein Hotspot vermieden wird. In Abbildung 4-9 ist die Strömungsführung im Bereich der Umlenkung im Detail dargestellt.

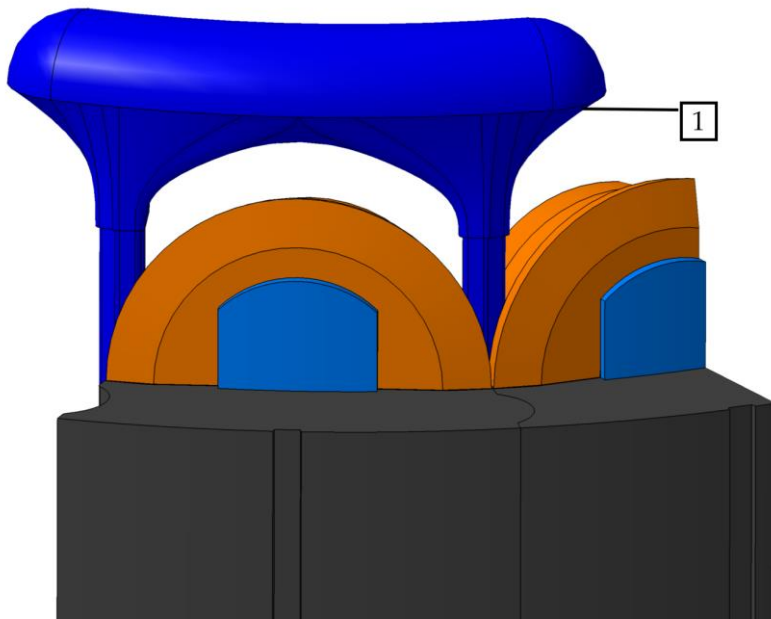


Abbildung 4-9: Führung des Kühlmittels am Wickelkopf der A-Lagerseite

Durch die konturnahe Führung (1) des Kühlmittels kann der thermische Widerstand zur Wicklung reduziert werden. Gleichzeitig kann Kunststoffmaterial eingespart werden, da nur die minimale Schichtdicke zur Wicklung eingehalten wird und keine Materialanhäufung stattfindet.

In Abbildung 4-10 ist der Absolutdruck an der Kühlmitteloberfläche dargestellt.

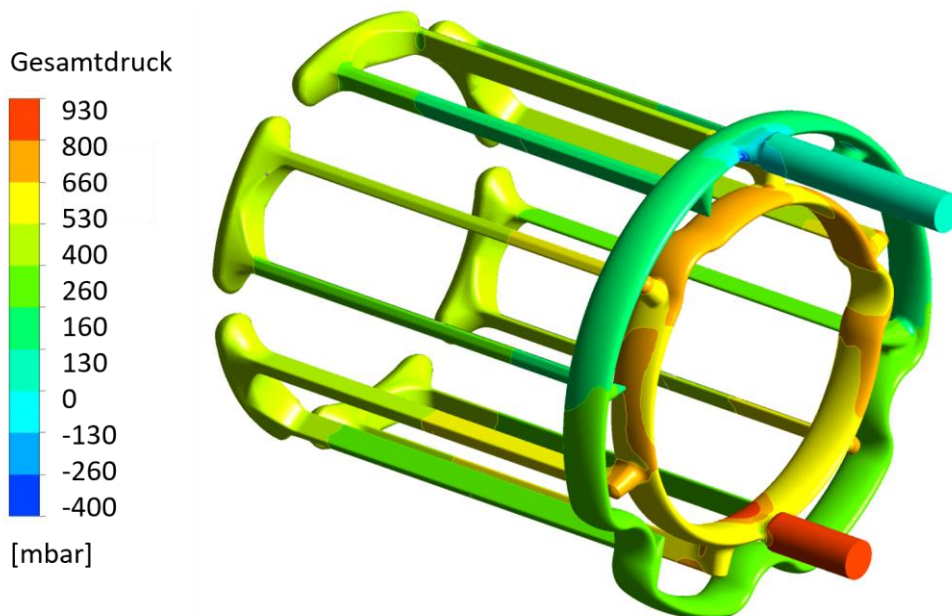


Abbildung 4-10: Absolutdruckverteilung auf der Oberfläche

Mit dieser Darstellung lässt sich der Druckverlust lokal aufgelöst bewerten. Große Druckgradienten befinden sich entlang der Kühlkanäle, diese weisen entsprechend einen hohen

Druckverlust auf. Dieser ergibt sich jedoch durch die Geometrie der Kühlkanäle, eine Veränderung würde zu einer Verschlechterung der Kühlleistung führen. Die Ringkanäle sowie die Umlenkung an der B-Lagerseite weisen nur einen geringen Druckgradienten auf, eine weitere Optimierung würde die Kunststoffmenge erhöhen und zu möglichen Temperatur-hotspots im Wickelkopf führen. Im Bereich des Kühlmittleinlasses, bzw. -auslasses gibt es Potential für eine Reduzierung des Druckverlusts. Aufgrund der Umsetzung als Prototyp muss eine einfache Nachbearbeitung des Gehäuses möglich sein. Die Anschlüsse werden folglich gebohrt und können deshalb wie gezeigt nur rund ausgeführt werden mit entsprechend hohem Druckverlust.

Der Gesamtdruckverlust beläuft sich auf 533 mbar, für einen Durchfluss von 6,5 l/min bei 23 °C. Dies liegt innerhalb der Spezifikationen gängiger Kühlmittelpumpen. Weiterhin wurden keine Hotspots identifiziert und das Kühlmittel wird durch eine Anpassung der einzelnen Kühlkanalabzweigungen homogen verteilt.

4.1.2 Kunststoffumspritzung des Stators – mechanische Auslegung

Entscheidend für die Gestaltung und den Herstellungsprozess der Umspritzung des Stators ist der verwendete wärmeleitfähige Kunststoff. Aus Kapitel 3 ergeben sich die Anforderungen an das Material. Wie in Kapitel 2.8.1 dargelegt, soll ein gefülltes Epoxidharz eingesetzt werden. Unter Berücksichtigung der vorhandenen Maschinen zur Prototypenherstellung und der Vorteile des Spritzpressens bezüglich der Verarbeitbarkeit von niederviskosen Materialien, erläutert in Kapitel 2.8.2, wird dieses Verarbeitungsverfahren eingesetzt. Auf Empfehlung des Herstellers und unter Berücksichtigung der Lieferfähigkeit wurde als Material für die Umspritzung des Stator Sumikon EME-A730E der Firma *Sumitomo Bakelite Co. Ltd.* ausgewählt. In Tabelle 4-2 sind die wichtigsten Materialeigenschaften dargestellt.

Tabelle 4-2: Wichtigste Eigenschaften des EME A730E Statorumspritzmaterial

Eigenschaft	Wert
Zugfestigkeit in N/mm ²	190
Elastizitätsmodul in MPa	30
Dichte in gr/cm ³	2,82
Wärmeleitfähigkeit in W/mK	3,0

Der Kunststoff soll an Stator und Kupferwicklung anhaften, gleichzeitig soll sich das Bauteil nach dem Umspritzen aus dem Stahlwerkzeug lösen. Einige dieser Optimierungsprobleme können konstruktiv gelöst werden. Üblicherweise werden Werkzeugflächen mit einer Entformschräge versehen, sodass das Material beim Entformen nicht nur auf Scherung, sondern auf eine Kombination von Scherung und Zug belastet wird. Die Festigkeit der adhäsiven Verbindung von Umspritzmaterial und Werkzeug ist bei Zugbelastung geringer als bei reiner Scherbelastung. Durch eine Schrägung der Werkzeugwände können somit die Entformkräfte verringert werden. Übliche Entformschraggen für das ausgewählte Epoxidharz liegen zwischen 1° bis 3°.

In Abbildung 4-11 sind Entformschrägen für die Kühlkanäle dargestellt. Bereits ab einer Entformschräge von $0,5^\circ$ ist kein durchgängiger Kanal mehr möglich.

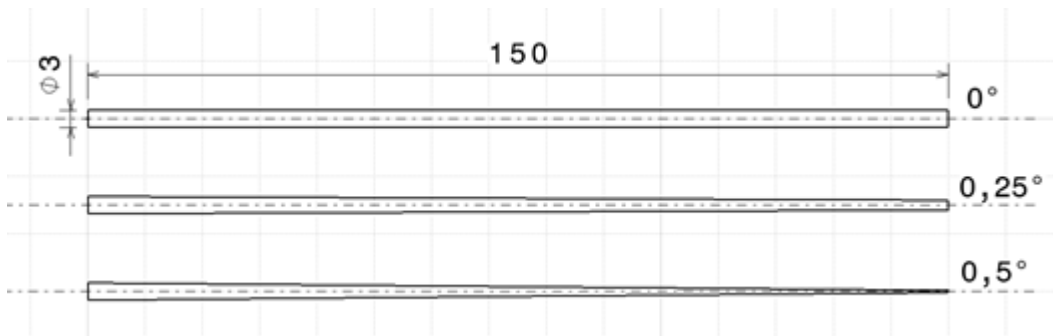


Abbildung 4-11: Verschiedene Entformschrägen der Kühlkanalkerne

Im Bereich des Rotorspalts kann ebenfalls keine Entformschräge realisiert werden, da eine Vergrößerung des Rotorspalts eine Verschlechterung der Leistungseigenschaften verursacht. In diesen Bereichen muss das Werkzeug in späterer Entformungsrichtung poliert sein, um die Anhaftung zu reduzieren.

Um die Entformbarkeit von schlanken Kernen ohne Entformschräge zu bewerten wird eine Versuchsreihe durchgeführt. Aufgrund von Material und Maschinenverfügbarkeit konnten nur mit einem ähnlichen wärmeleitfähigen Epoxidmaterial Versuche durchgeführt werden. Insgesamt wurden 44 runde Auswerferstifte mit unterschiedlichen Durchmessern in einem Platten-Spritzgusswerkzeug mit Epoxidur 3161E der Firma Raschig umspritzt. In Abbildung 4-12 sind die Probekörper, die durch PTFE-Blöcke geführt werden, gezeigt. Diese sind in einem Platten-Spritzgusswerkzeug eingelegt. Durch einen Block auf der Spitze der Auswerferstifte werden diese mittig im Werkzeug zentriert. Die Kerne werden so auf ähnliche Weise wie im späteren Werkzeug beidseitig abgestützt. Um die Anhaftung des Epoxids zu verringern, können für eine Serienfertigung die Werkzeugkerne beschichtet werden. Für die prototypische Umsetzung ist eine Benetzung mit Trennmitteln eine einfache Möglichkeit, um die Auszugskräfte zu verringern. Als Trennmittel wurde für die Versuche PTFE-Spray benutzt. In Abbildung 4-13 ist das Ausziehen der Stifte zur Ermittlung der Auszugskräfte auf einer Universalprüfmaschine abgebildet.



Abbildung 4-12: Fünf Probekörper aufrechtstehend im Umspritzwerkzeug



Abbildung 4-13: Ausziehversuch der Werkzeugkerne

Pro Kerndurchmesser wurden jeweils sechs Kerne umspritzt und die Auszugskräfte gemessen. In Abbildung 4-14 sind die Auszugskräfte der verschiedenen Kerndurchmesser aufgetragen sowie die Spanne der einzelnen Proben.

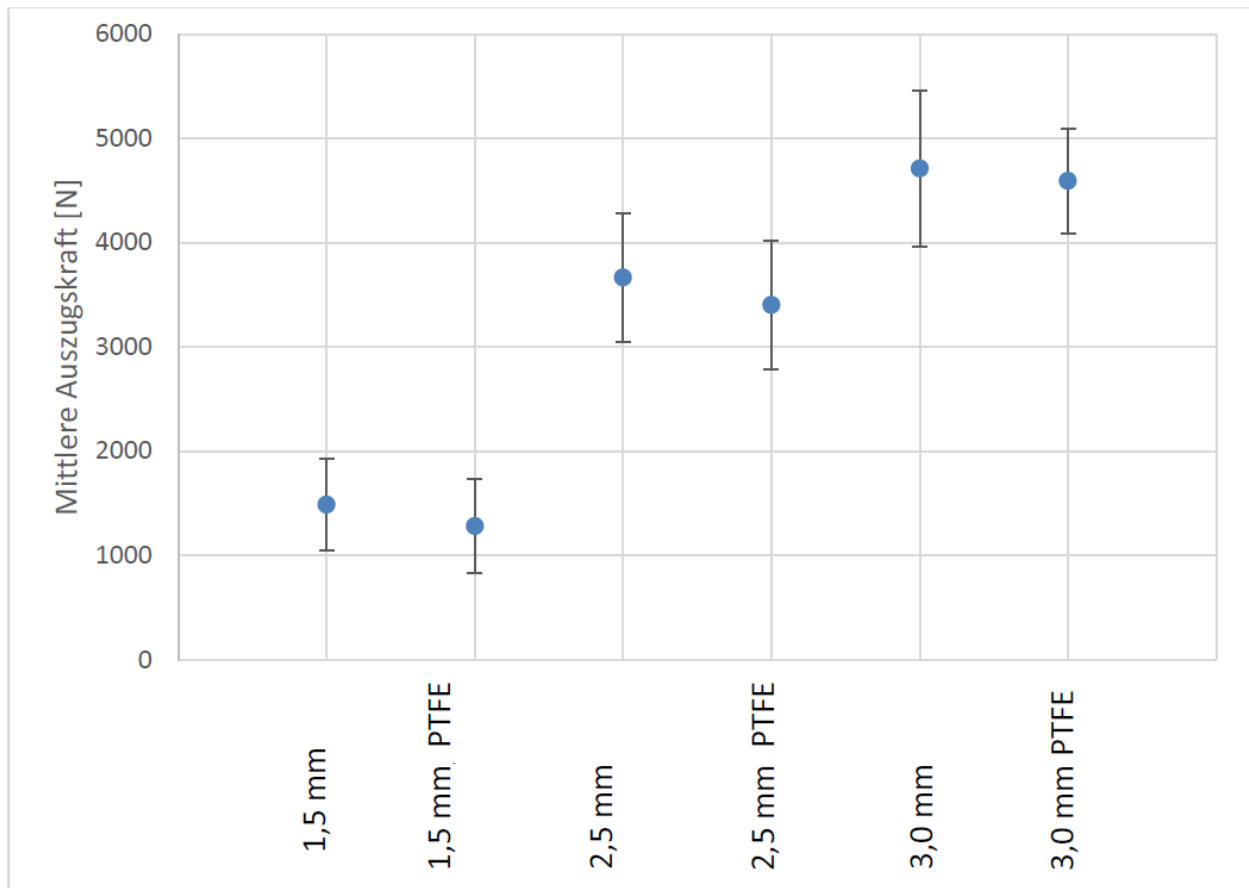


Abbildung 4-14: Ausziehkräfte verschiedener Kerndurchmesser

Ein Benetzen mit Trennmittel verringert die Ausziehkraft um durchschnittlich 8 %. Die Auszugskräfte der Kerndurchmesser korrelierten mit der Oberfläche der Kerne. Die Verringerung der Ausziehkraft liegt im Bereich Streuung der Ergebnisse. PTFE-Spray verringert somit die Auszugskraft nicht signifikant.

Besonders relevant ist der Kerndurchmesser von 3 mm, da dieser von den Abmessungen im gleichen Bereich wie die gewünschten Kühlkanäle liegt. In Abbildung 4-15 ist die Auszugskraft über den Auszugsweg eines 3 mm durchmessenden und 130 mm langen, polierten Auswerfers aufgetragen.

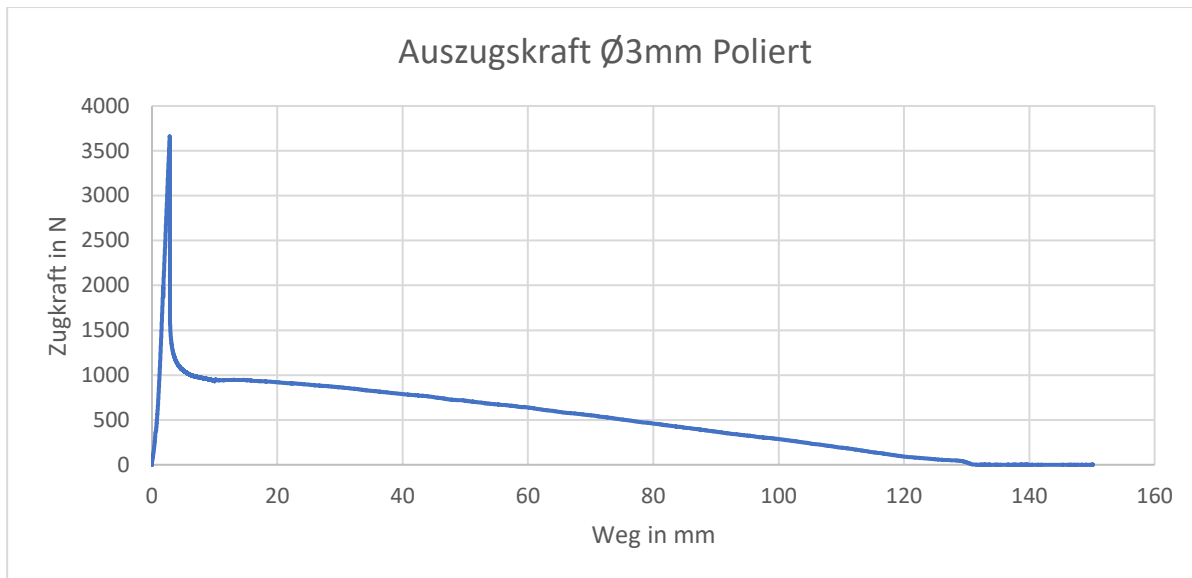


Abbildung 4-15: Auszugskraft eines 3mm Auswerfers

Zu Beginn des Ausziehens steigt die Kraft stark an, bis sich die adhäsive Verbindung bei 3.660 N ruckartig löst. Aufgrund der fehlenden Entformschräge sinkt danach die Auszugskraft nicht vollständig, sondern nur auf ca. 1.000 N, ab. Mit abnehmender Kontaktfläche reduziert sich beim weiteren Herausziehen auch die Ausziehkraft linear. Diese wird nach dem Losbrechen durch die Gleitreibung zwischen dem Auswerferstift und dem Kunststoff hervorgerufen. Die Zugspannung in den 3 mm durchmessenden Auswerferstiften ergibt sich zu $\sigma_{\text{Zug}} = F/A = 663 \text{ N/mm}^2$. Dieser Wert liegt im Bereich höherwertiger Stähle und deutlich unter der Streckgrenze des verwendeten Warmarbeitsstahls (X40CrMoV5-1) von $R_{p0,2} = 1.250 \text{ N/mm}^2$, ab der sich der Werkstoff plastisch verformt. Die Scherfestigkeit der Anhaftung lässt sich mit $\sigma_{\text{scher}} = F/A = \pi \cdot D \cdot l = 3,3 \text{ N/mm}^2$ berechnen und entspricht einem gängigen Montagekleber.

Für die Umspritzung muss folglich die Gesamtoberfläche des Werkzeugs zur Ermittlung der Auswerferkraft bedacht werden und die Gestaltung der Kerne der Festigkeit des Materials angepasst werden, um ein Abreißen zu verhindern. Das Durchmesser-Längen-Verhältnis der Kühlkanäle wird durch die Zugfestigkeit des Materials beschränkt und lässt sich aus dem Gleichsetzen der Formeln für die Zugspannung im Kern und der Scherspannung im Material zu folgender Formel zusammenfassen:

$$\frac{l}{D} = \frac{R_m}{\sigma} \quad 4-1$$

Neben den Kräften, die bei der Herstellung, insbesondere bei der Entformung auftreten, müssen auch die Kräfte im Betrieb auf den Kunststoff untersucht werden. Durch den Aufbau aus Einzelzähnen fehlt das durchgängige Joch, um die zyklischen Kräfte auf die einzelnen Zähne gleichmäßig zu verteilen. Aufgrund der einzelnen Bestromung der drei Phasen wirkt die drehmoment-erzeugende Kraft jeweils nur auf einen Teil des Blechpakets. Durch den Einsatz

des Kunststoffgehäuses fehlt eine weitere metallische Komponente, die hohe Kräfte aufnehmen kann. In Abbildung 4-16 ist ein Ausschnitt des Motors mit einem Zahn und zwei halben Zähnen dargestellt. Auf den mittleren Zahn wird das volle Motordrehmoment aufgebracht, die Abstützung erfolgt durch das Kunststoffgehäuse. Zur besseren Visualisierung ist die Umspritzung nicht dargestellt, für die Berechnung ist diese vorhanden.

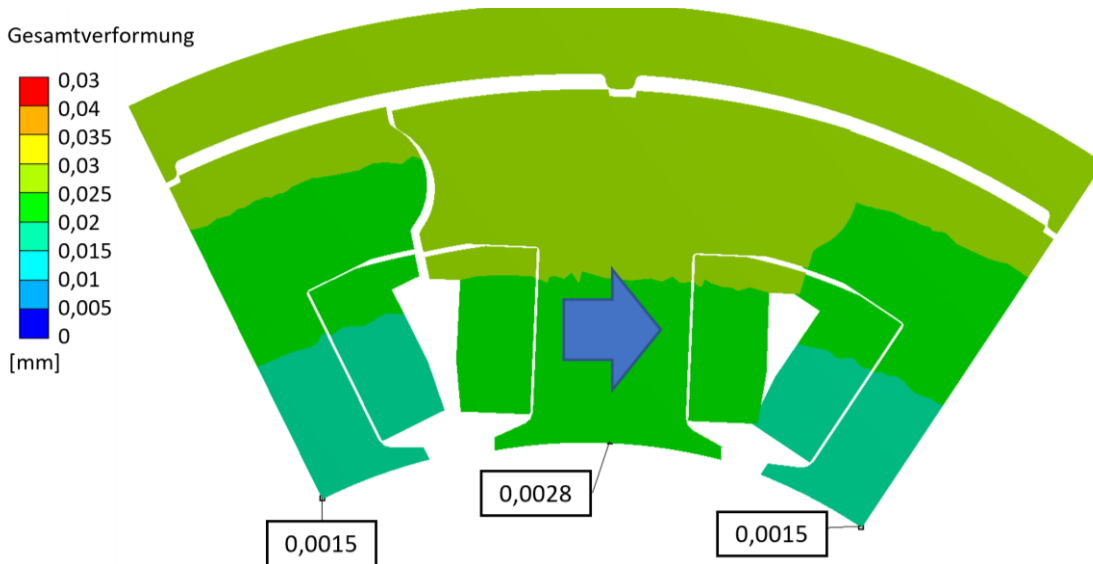


Abbildung 4-16: Verschiebung unter Drehmomenteinfluss

Mit Hilfe der stark vergrößerten Verschiebung ist zu erkennen, dass sich das Gehäuse leicht weitet und zwischen den Zähnen ein Spalt entsteht. Über die Geometrie der Kontaktstellen der Zähne zueinander wird ein Herausdrehen des drehmoment-erzeugenden Zahns verhindert. Es bildet sich ein kleiner Spalt auf der kraftabgewandten Seite. Dies kann zu erhöhten Geräuschen und Vibrationen führen. [70]

4.1.3 Kunststoffumspritzung des Stators – elektrische Auslegung

Für einen sicheren Betrieb des Motors muss ein ausreichend großer Isolationswiderstand zwischen dem Kühlmittel und den spannungsführenden Teilen gegeben sein. Für klassische Kühlsysteme wird im Bereich des Blechpakets die Isolierung mittels Isolationspapier sichergestellt, das aufgrund seines Aufbaus einen hohen Isolationswiderstand von $10^{16} \Omega\text{cm}$ aufweist. Durch das innenliegende Kühlsystem liegt zwischen Kühlmittel und Wicklung nur eine dünne Schicht wärmeleitfähiger Kunststoff.

Zur Bestimmung des Isolationswiderstands muss der Abstand vom Leiter zum Fluid und der sich ergebende Widerstand berechnet werden. Aufgrund der wechselnden Geometrie muss das Modell in homogene Bereiche aufgeteilt werden. Der Isolationswiderstand ergibt sich aus der parallelen Schaltung der einzelnen Widerstände. Zur Vereinfachung können Bereiche mit sehr hohem Widerstand vernachlässigt werden. Der Volumenwiderstand nimmt mit der Materialdicke linear zu. Im Bereich der Kühlkanäle beträgt die Dicke der Kunststoffschicht mit

0,5 mm ein Fünftel der übrigen Wandstärken, weshalb für die Abschätzung der Volumenisolationsleistung der Bereich der Kühlkanäle ausreichend ist. Der eingesetzte Kunststoff weist einen spezifischen Widerstand von $10^{12} \Omega\text{cm}$ bei 150°C auf. Die Fläche pro Kühlkanal zur Wicklung entspricht 497 mm^2 . Bei zwölf Kühlkanälen entspricht das einer Fläche von insgesamt 5.964 mm^2 . Durch die mittlere Wandstärke von 0,5 mm ergibt sich ein Volumenwiderstand von $R_{\text{Volumen}} = 10^{12} \Omega\text{cm} / 59,64 \text{ cm}^2 \cdot 0,05 \text{ cm} = 800 \text{ M}\Omega$. Dies liegt deutlich oberhalb der in der 43-2000 - IEEE empfohlenen Isolationsfestigkeit. [71]

4.1.4 Kunststoffumspritzung des Stators – Werkzeugauslegung

Der Stator soll im Spritzpressverfahren umspritzt werden. Die Verarbeitungsdrücke sind ähnlich der Viskosität des Materials niedrig. Dennoch muss der Stator als Einleger im Werkzeug sicher aufgenommen und ausgerichtet werden. Ein Verschieben oder Aufschwimmen muss verhindert werden, da ansonsten der Stator die Werkzeugwand berühren könnte und damit keine Kunststoffschicht zwischen Kühlmedium und Einleger vorhanden wäre.

Der Stator besteht aus zwölf gleichen Zähnen, die elektrisch zueinander mit den Phasenringen verbunden sind. Eine feste mechanische Verbindung besteht vor dem Umspritzen jedoch nicht. Folglich muss im Werkzeug eine Aufnahme bzw. eine Funktion zur Zentrierung der einzelnen Zähne vorhanden sein. Um einer ungünstigen Verkettung der Toleranzen der Zähne entgegenzuwirken, wird jeder Zahn einzeln zentriert und im Werkzeug positioniert. In Abbildung 4-17 ist die Zentrierung eines Zahns durch das Werkzeug zu sehen.

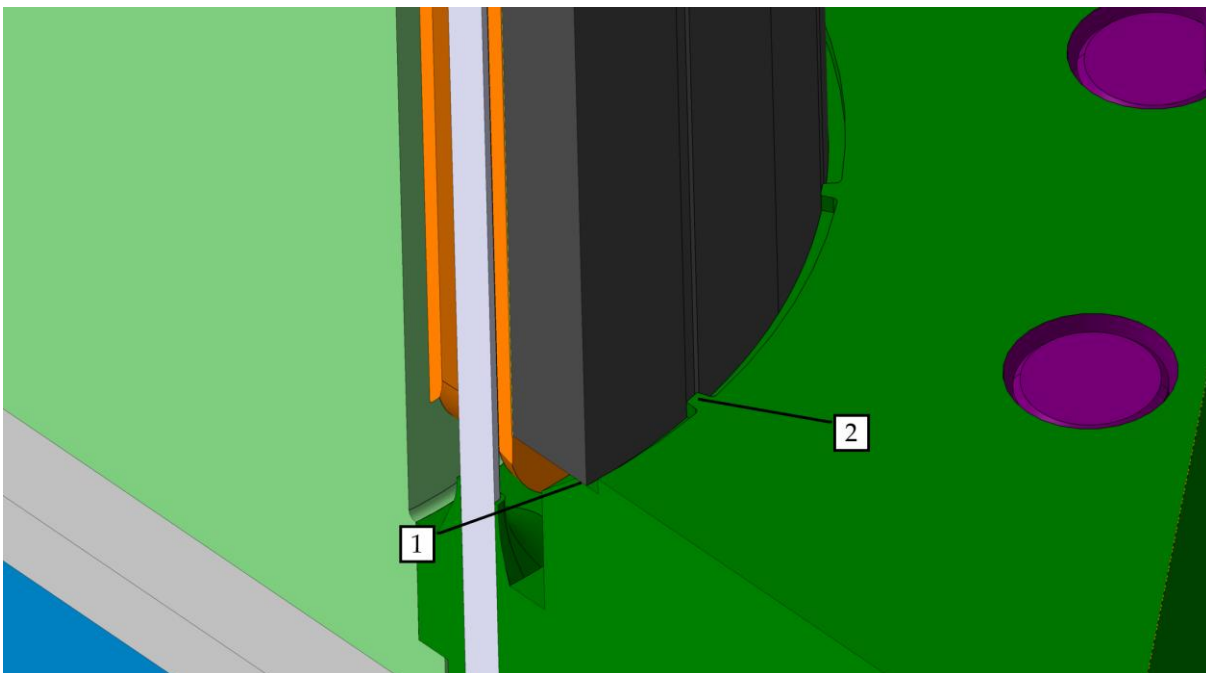


Abbildung 4-17: Zentrierung des Stators im Werkzeug

Mit Hilfe der Auflage (1) im Werkzeug wird die Position des Stators axial bestimmt. Die Kontaktfläche zwischen Stator und Werkzeug wird nicht mit Kunststoff umschlossen. Diese liegt in einem Bereich, der kein Kühlmittel führt. Durch den Eingriff in die Nut (2) am Zahn wird die

rotatorische Position des Stators bestimmt. Durch die enge Tolerierung der Einzelzähne wird ein Verkippen der Zähne nach außen verhindert.

Das Werkzeug teilt sich in eine Düsen- und eine Auswerferseite. Durch das Verhältnis der Oberflächen beider Werkzeugseiten sowie die Anzahl und Größe der Entformschräge kann gesteuert werden, auf welcher Seite das Bauteil beim Öffnen des Werkzeugs verbleibt. Auf dieser Seite müssen die Auswerferstifte, die von hinten das Bauteil aus dem Werkzeug drücken, liegen. Auf der Unterseite ist eine plane Fläche vorhanden, auf der die Auswerfer untergebracht werden können. Aufgrund der kleinen Spalte zwischen den beweglichen Teilen entstehen auf dem fertigen Bauteil Grate. Dies muss bei der Positionierung der Dichtung beachtet werden, da übliche Verfahren zum Entfernen der Grate keine glatte Oberfläche hinterlassen. Abbildung 4-18 zeigt das Werkzeug im Schnitt ohne untere Werkzeughälfte. Die Position der zwölf Auswerferstifte ist als (1) markiert.

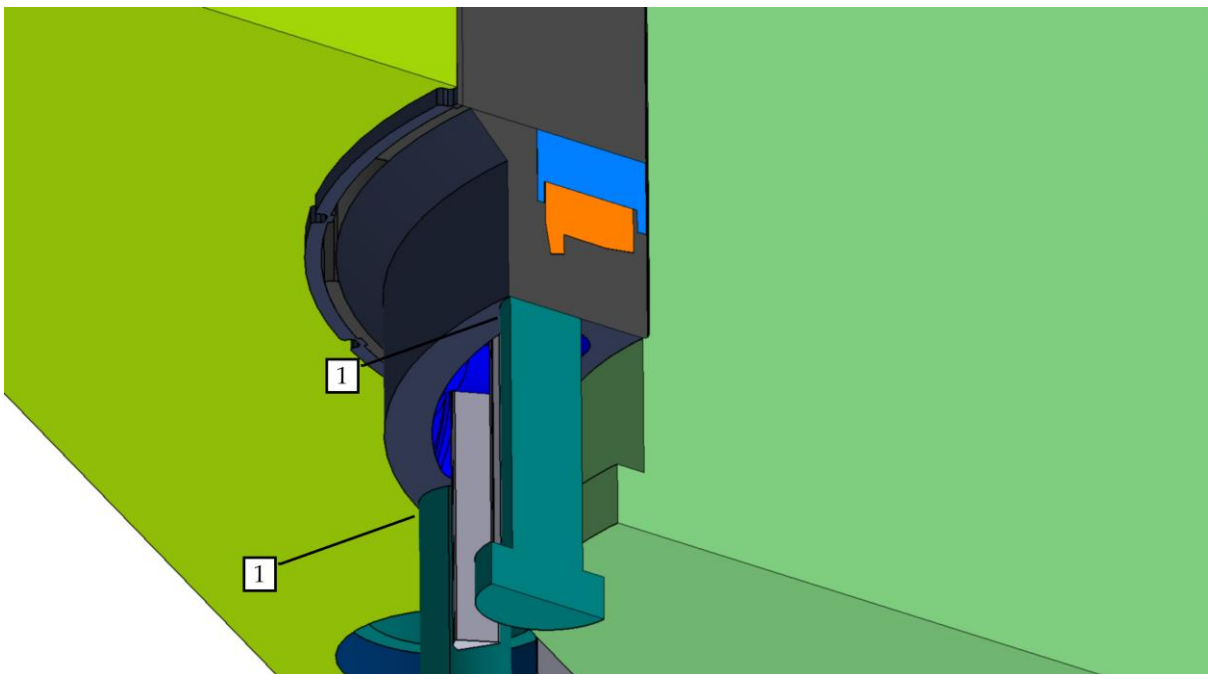


Abbildung 4-18: Schnittdarstellung der Auswerferpositionen

4.2 Stator im Gehäuse

In diesem Kapitel wird, neben dem Gehäuse selbst, auch das Zusammenspiel von Gehäuse und umspritztem Stator beschrieben.

Die Materialauswahl für das Gehäuse ist nicht Teil der Arbeit. Entsprechende Vorgehen sind in der Literatur beschrieben, z.B. in [72].

Für das Gehäuse wird als Material Vyncolit BXE 7530 eingesetzt. In Tabelle 4-3 sind die wichtigsten Eigenschaften aufgelistet.

Tabelle 4-3: Materialeigenschaften Vyncolit BXE 7530

Eigenschaft	Wert
Zugfestigkeit in N/mm ²	111
Druckfestigkeit in N/mm ²	276
Elastizitätsmodul in GPa	17
Dichte in gr/cm ³	1,73

In Abbildung 4-19 sind Gehäuse und umspritzter Stator bereits zusammengebaut und im Schnitt dargestellt.

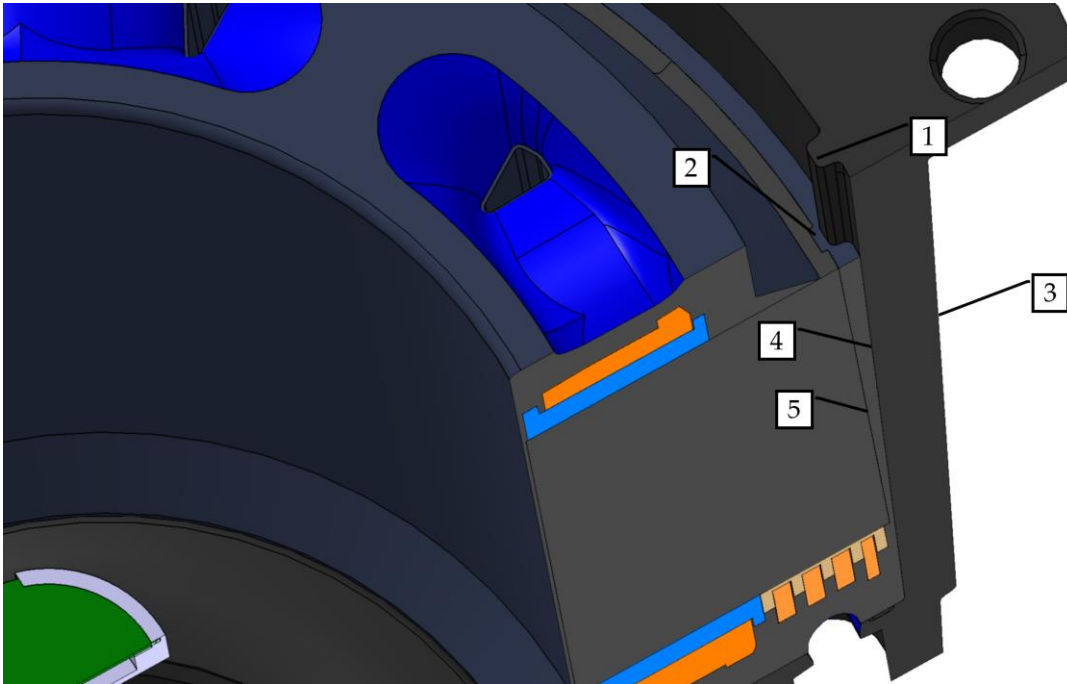


Abbildung 4-19: Drehmomentübertragung zwischen Stator und Gehäuse

Das Gehäuse weist Zähne (1) auf, die in die entsprechenden Nuten (2) im umspritzten Stator greifen. Zur besseren Entformung ist das Gehäuse an der Außenseite (3) mit einer Entformschräge von 2° versehen. Die Innenseite folgt dem umspritzten Stator mit einer Entformschräge von 1° (4). Der Außendurchmesser des Stators (5) weist keine Entformschräge auf. Durch die unterschiedlichen Entformschragen des Gehäuses entsteht eine konische Form. Die Wandstärke steigt zum B-Lagerschild hin an. Auch das abzustützendes Drehmoment und die Biegespannung nehmen zum B-Lagerschild hin zu. Die konische Gestaltung verringert somit die Bauteilspannung im Gehäuse.

Umspritzter Stator und Gehäuse können einfach ineinandergeschoben werden. Durch den konischen Sitz zwischen umspritztem Stator und Gehäuse kommt es zu hohen radialen Kräften, die bei der Drehmomentübertragung vom Stator in das Gehäuse unterstützen. Zusätzlich zur radialen Verspannung von Gehäuse und Stator ist eine formschlüssige Verbindung als Keilwelle eingebracht.

Der Lagersitz des Rotors im Gehäuse muss zum umspritzten Stator zentriert werden. Relevant ist vor allem die Konzentrität der Rotor-Drehachse zum Innendurchmesser der Einzelzähne. Dafür entscheidend ist, neben der Zentrierung von Gehäuse und umspritztem Stator, vor allem die Zentrierung der Einzelzähne im Umspritzwerkzeug, beschrieben im vorangegangenen Kapitel 4.1.4.

In Abbildung 4-20 ist der Motor im Schnitt dargestellt. Die Bauteilschnittstellen, die die Toleranz der Rotorlagerung bestimmen, sind rot eingezeichnet.

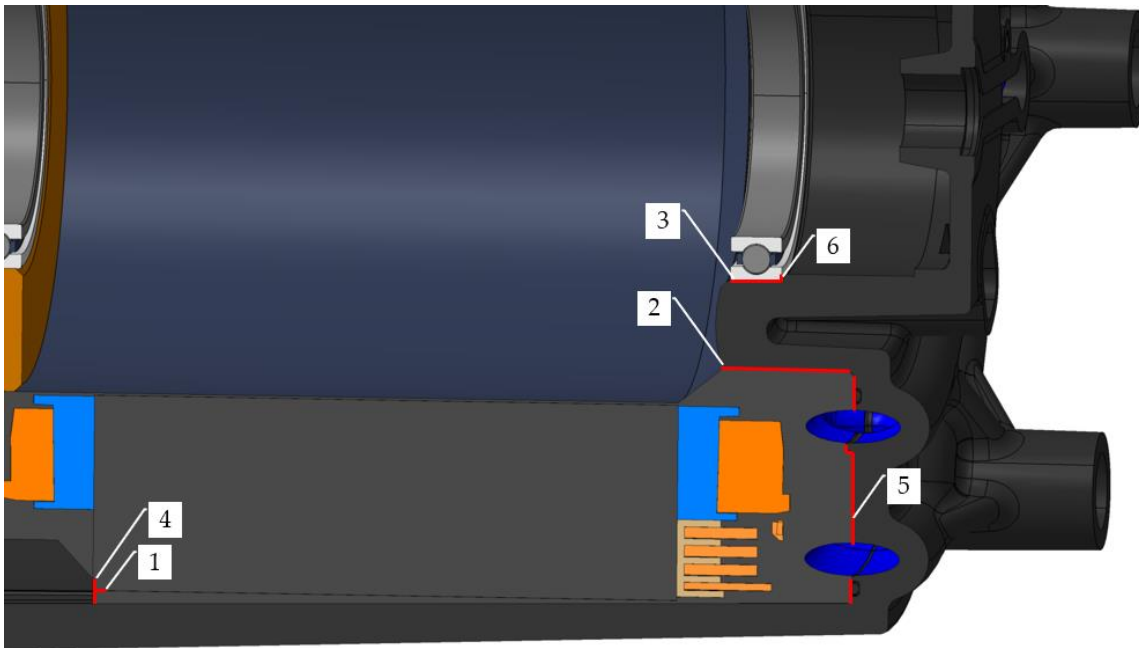


Abbildung 4-20: Toleranzen der Rotorausrichtung

Bei Position (1) wird im Prozess des Umspritzens die **radiale Position** zwischen den Einzelzähnen und der Zentrierfläche (2) des Gehäuses festgelegt. Die Passung zwischen Stator und Gehäuse ist dabei als leichte Presspassung ausgeführt. Durch das geringere Elastizitätsmodul im Vergleich zu Stahl erzeugt eine vorgegebene Dehnung im Kunststoff geringere mechanische Spannungen. Dadurch ist es möglich, die Presspassung ohne spanende Nachbearbeitung auszuführen. Durch die Presspassung erhöht sich die Genauigkeit, mit der die Einzelzähne und das Gehäuse zueinander ausgerichtet werden. Die Toleranz im Gehäuse zwischen der Zentrierfläche (2) und dem Lagersitz (3) wird durch die spanende Fertigbearbeitung des Lagersitzes erzeugt.

Die **axiale Position** des Lagers wird durch die Position der Zähne im Werkzeug (4) und die Toleranz der Umspritzung (4-5) sowie die Toleranz des Gehäuses (5-6) bestimmt. Die radiale Position des Lagers wird ausgehend von der Position der Zähne im Werkzeug (1) über die Toleranz der Umspritzung (1-2) sowie die Bearbeitungstoleranz (2-3) des Gehäuses und des Lagersitzes (3) bestimmt.

In Tabelle 4-4 sind die Toleranzketten der radialen und axialen Position zwischen Stator-Blechkpaket und Rotor aufgetragen und zusammenaddiert.

Tabelle 4-4: Toleranzkettenberechnung der Lagerung

Toleranzverkettung radial	1	1-2	2-3	3	1-3
Art der Toleranz	Positionierung	Bauteil	Bearbeitung	Passung	Gesamt
Größe in mm	0,04	0,04	0,005	0,00	0,085
Toleranzverkettung axial	4	4-5	5-6	6	4-6
Art der Toleranz	Positionierung	Bauteil	Bearbeitung	Passung	Gesamt
Größe in mm	0,00	0,1	0,005	0,00	0,105

Die radiale Toleranz von unter einem zehntel Millimeter liegt unter der zu erwartenden Toleranz eines Motors mit konventioneller Kühnhülse. Das bedeutet, dass durch die geänderte Zentrierung des Rotors der Rotorspalt verkleinert werden kann. Ungenauigkeiten im Blechkpaket werden durch die Umspritzung des Stators egalisiert. Durch die Zentrierung nahe dem Rotorspalt wird die Distanz zwischen Blechkpaket und Rotor sowie die Anzahl an Übergangsstellen zur Zentrierung reduziert.

Die geringere Steifigkeit des Kunststoffes verhindert eine konventionelle Abstützung des Lagers über das Lagerschild auf das Gehäuse. Durch die Anbindung mittels einer massiven Struktur um das Lager kann dies kompensiert werden. Das Lager stützt sich auf direktem Weg auf den umspritzten Stator ab.

Durch den Zusammenbau von Gehäuse und umspritztem Stator entstehen auch die Ring-Kühlkanäle. Diese werden zum Rotor und zum Außendurchmesser mittels eines O-Rings der Schnurstärke 1,5 mm abgedichtet, in Abbildung 4-21 in Türkis dargestellt. Da zwischen den Ringkanälen, an den Stellen der axial laufenden Kühlkanäle, wenig radialer Bauraum zur Verfügung steht, wird hier eine Labyrinth-Spaltdichtung realisiert, in Gelb dargestellt. Diese Kontur benötigt mit 1,5 mm den halben Bauraum gegenüber einem O-Ring. Die Labyrinth-Spaltdichtung dichtet die beiden Kanäle nicht vollständig gegeneinander ab. Da lediglich der Raum zwischen den Ringkanälen mittels der Labyrinth-Spaltdichtung gedichtet wird, entsteht keine äußere Leckage zur Umgebung oder Richtung Rotorspalt.

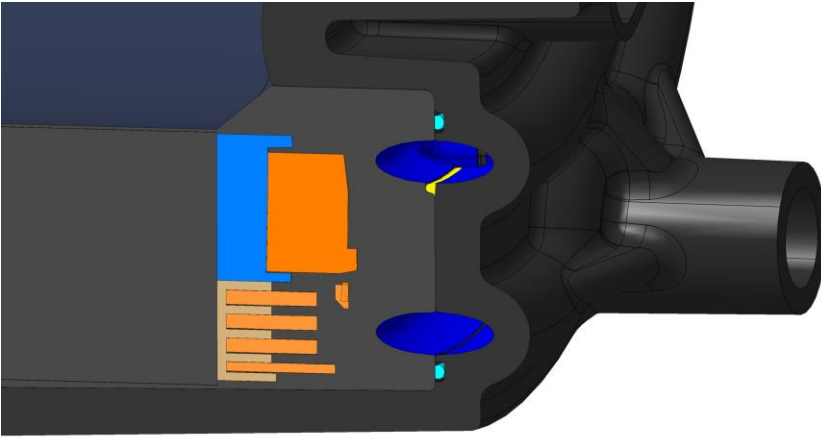


Abbildung 4-21: Dichtungsfunktionen zwischen Gehäuse und umspritztem Stator

Um den Motor zu kontaktieren stehen aus dem umspritzten Stator die drei Phasen als rechteckiges Profil hervor. Zur Kontaktierung steht eine Fläche von 75 mm^2 zur Verfügung. Um den Effektivstrom von 250 A zu übertragen, muss eine Kontaktkraft von 50 N erreicht werden. Da das Gehäuse aus nichtleitendem Kunststoff besteht, kann die Funktion des Gehäuses für die Phasenanschlüsse in das Bauteil integriert werden. [73]

In Abbildung 4-22 ist der Aufbau des Phasensteckers dargestellt.

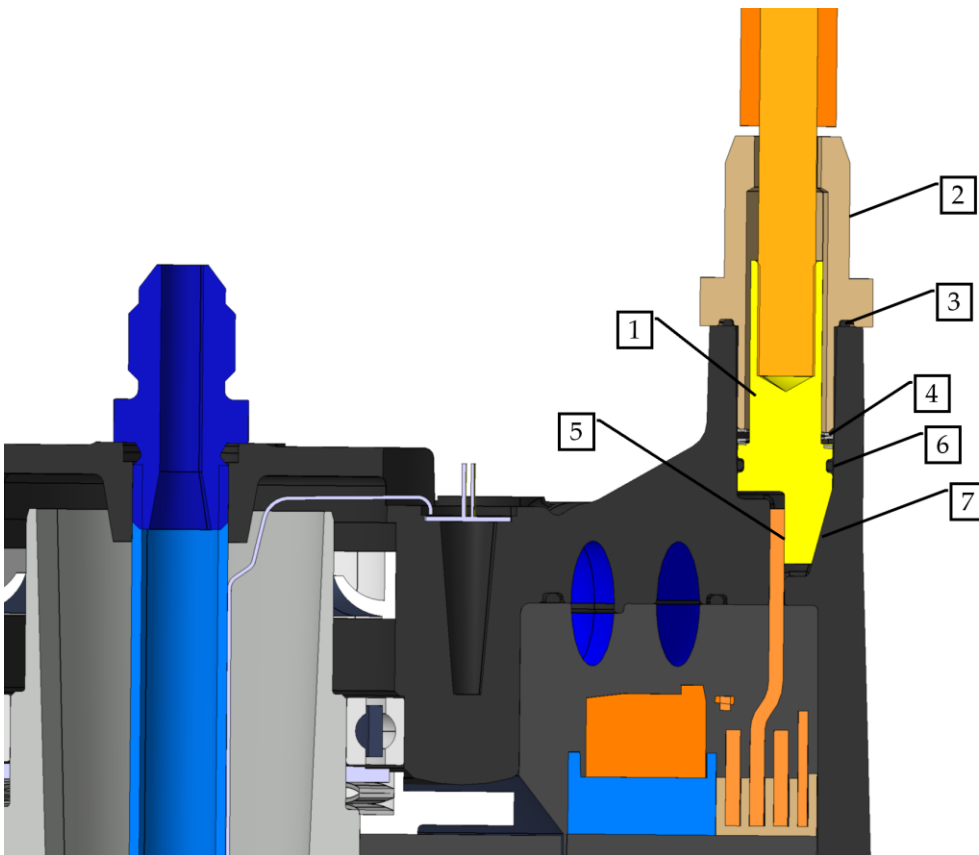


Abbildung 4-22: Schnittdarstellung des Phasensteckers

Die Kontaktierung (5) erfolgt mittels eines Kupferpins (1), der über eine Rampe (7) im Gehäuse gegen den Phasenringkontakt gedrückt wird. Durch die Rampe im 15°-Winkel kann eine Übersetzung der Anpresskraft von 1:5 geschaffen werden. Aufgrund des Übergangswiderstands und der Stromdichte im Bereich des Steckers erwärmt sich dieser. Trotz der unterschiedlichen Wärmeausdehnungskoeffizienten muss eine Vorspannung des Steckers sichergestellt werden. Mit einer Überwurfmutter (2) wird durch eine Wellenfeder (4) der Stecker vorgespannt. Über weite Bereiche der thermischen Ausdehnung kann somit eine ausreichend hohe Anpresskraft gewährleistet werden. Durch die O-Ringe (3 und 6) wird der Stecker gegen Umwelteinflüsse abgedichtet.

4.3 Rotor

Der Rotor samt Lagerung wird als separate Baugruppe ausgeführt. Aufgrund der schlechten Zugänglichkeit bei montiertem Rotor soll die Baugruppe als Ganzes montiert werden können. Wegen des hohen Anteils an Verlusten im Rotor ist eine Rotorkühlung mittels Innenkühlung der Rotorwelle vorgesehen.

In Abbildung 4-23 ist die gesamte vormontierte Rotorbaugruppe im Schnitt dargestellt.

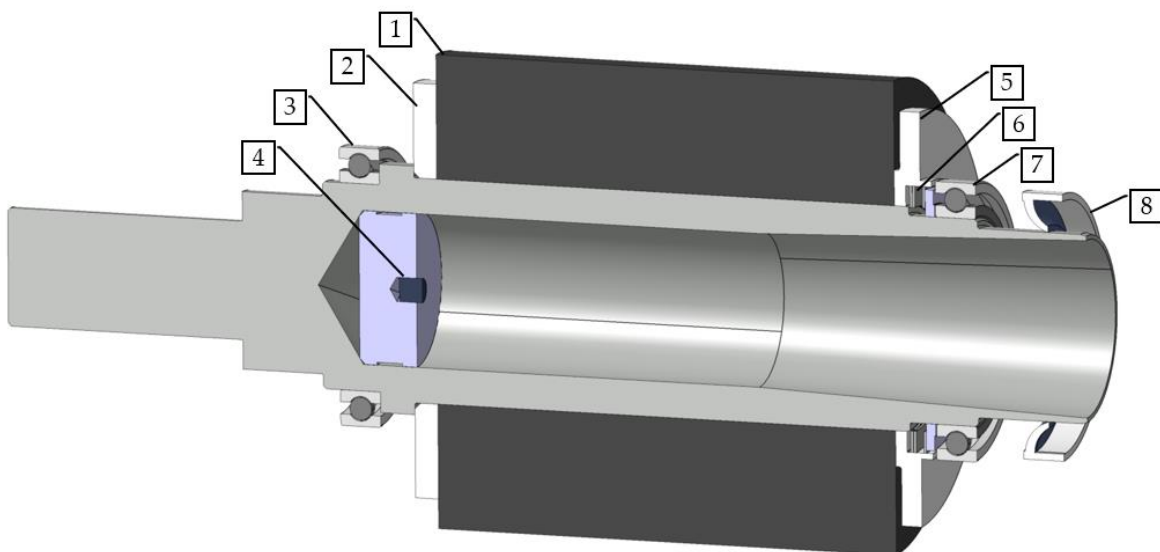


Abbildung 4-23: Schnittdarstellung der Rotorbaugruppe

Neben dem Blechpaket mit den vergrabenen Magneten (1), ist links (2) und rechts (5) jeweils eine Stahlscheibe montiert, die zum dynamischen Auswuchten angebohrt werden kann. Die rechte Wuchtscheibe (5) wird mit einer Aussparung am Blechpaket versehen, um die großen Längentoleranzen der vergrabenen Magnete auszugleichen. Der Rotor wird mit zwei baugleichen C-6202 C3 Radialrillenkugellagern geführt. Das Lager an der Abtriebsseite, B-Lager, dient als Festlager (3). Das gegenüberliegende dient als vorgespanntes Loslager (7). Die

Detailkonstruktion des entwickelten Elektromotors

Vorspannung erfolgt durch eine Wellenfeder (6). Diese bietet gegenüber klassischen Schraubenfedern eine bessere Raumausnutzung. Die Vorspannung mittels weicher Feder wird zur Kompensation der Temperaturexpansion der Rotorwelle benötigt. Besonders bei großen Leistungsgradienten, aber auch bei niedrigen Drehzahlen und hohen Drehmomenten, können sich Stator und Rotor unterschiedlich erwärmen und entsprechend unterschiedlich ausdehnen.

Zur Abdichtung der Rotorkühlung ist ein Radialwellendichtring (8) aus mit Grafit gefülltem PTFE verbaut. Im Inneren der Hohlwelle ist ein diametral magnetisierter Magnet (4) für den Drehgeber integriert. Mit diesem wird der Rotordrehwinkel für die Steuerung des Motors gemessen.

In Abbildung 4-24 ist die Funktionsweise der Rotorkühlung dargestellt.

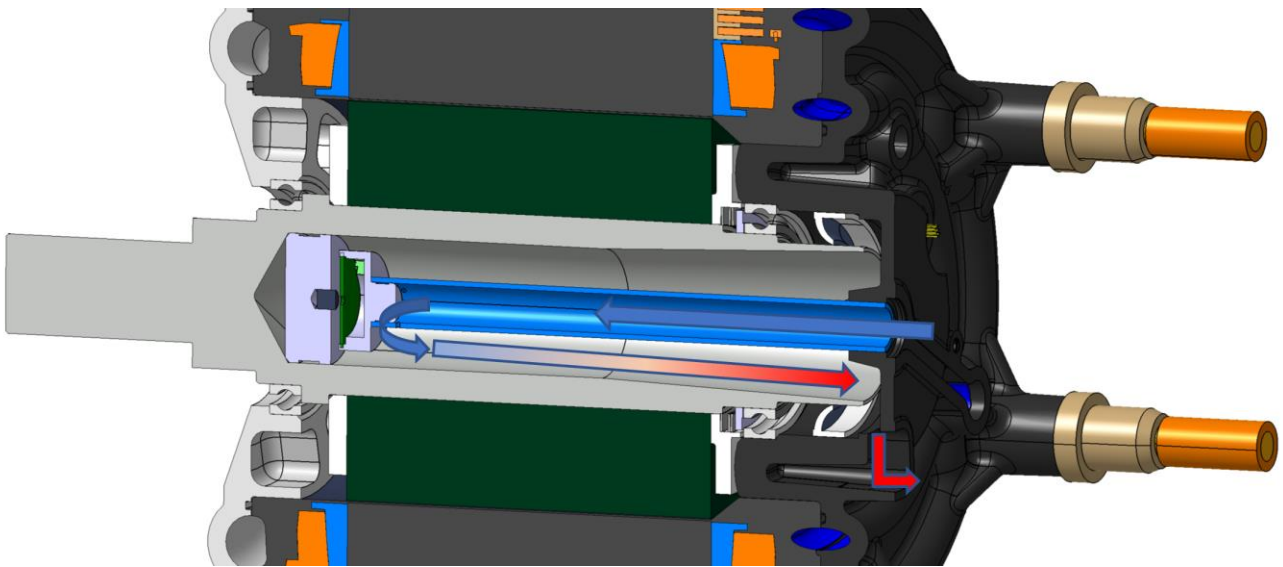


Abbildung 4-24: Funktionsweise der Rotorkühlung

Das Kühlmittel wird mittig über die Lanze eingespeist, verlässt diese am Ende über radiale Bohrungen und fließt in die hohle Rotorwelle. Die Innenkontur ist zum Ende der Rotorwelle konisch ausgeführt. Dies verstärkt den Fluidtransport in der Rotorwelle. Es stellt sich eine Pumpwirkung ein, die proportional zur Drehzahl ist. Zur Abdichtung des Rotorspalts muss eine rotatorische Dichtung eingesetzt werden. Typischerweise begrenzen die Umfangsgeschwindigkeit an der Dichtlippe und die Wärmeleitfähigkeit der Gegenauflfläche die maximale Einsatzdrehzahl. Bei einem Wellendurchmesser von 32 mm ergibt sich eine Umfangsgeschwindigkeit von 25 m/s bei 15.000 1/min. Übliche Wellendichtringe können nur für Umfangsgeschwindigkeiten von bis zu 15 m/s eingesetzt werden. Es werden deshalb Wellendichtringe aus gefülltem PTFE verwendet, die Umfangsgeschwindigkeiten bis zu 100 m/s ertragen. Weiterhin sind die verringerten Verluste dieses Typs vorteilhaft. Es lässt sich nach den Herstellerangaben eine Verlustleistung von 150 W bei 12.000 1/min berechnen. [74]

Um zu ermitteln, ob eine Rotorkühlung tatsächlich benötigt wird, wird eine einfache 1D-Simulation durchgeführt. Der Modellaufbau ist in Abbildung 4-25 dargestellt.

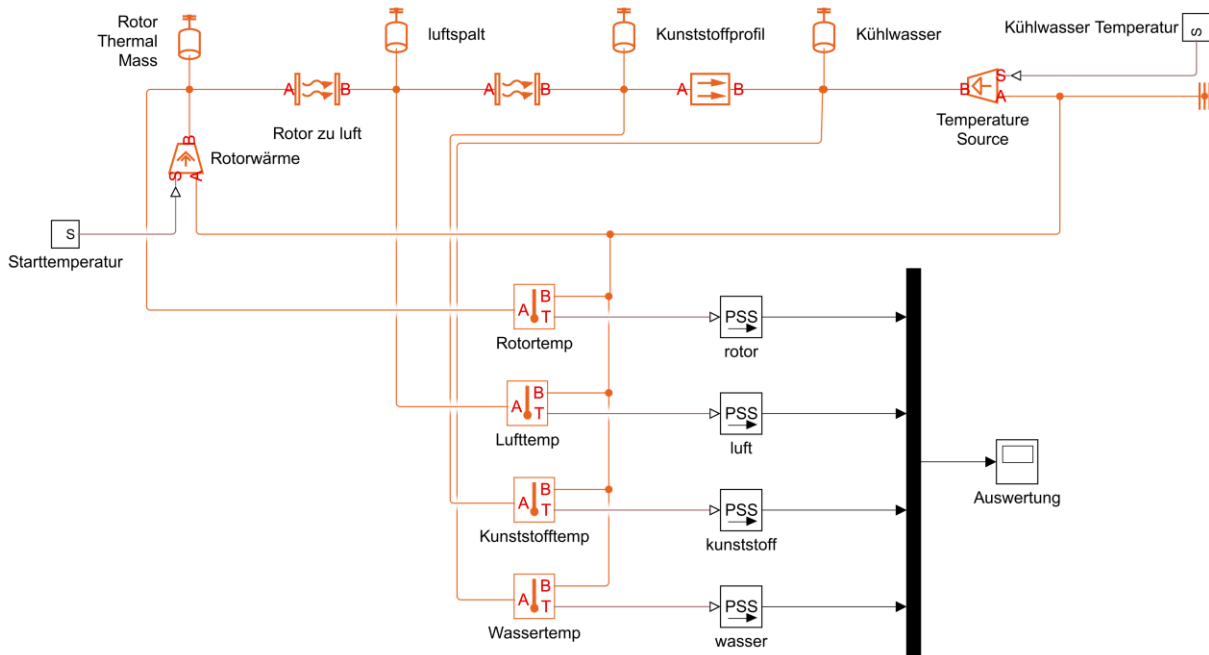


Abbildung 4-25: Modell zur Abschätzung der Rotortemperatur

Die thermische Rotormasse ist an eine Wärmequelle gekoppelt. Über die entsprechenden thermischen Widerstände, den Luftspalt, die Wärmeleitung in der Umspritzung und den Wärmeübergang ins Kühlwasser wird jeweils die Temperatur ausgewertet. Simuliert wird hohe Last bei hoher Drehzahl mit entsprechend gutem Wärmeübergang zwischen Rotor und Luft sowie Stator und Luft.

Die transiente Simulation läuft über 30 Minuten, in denen sich ein stationärer Zustand einstellt. Die stationären Endtemperaturen sind in Tabelle 4-5 aufgetragen.

Tabelle 4-5: Stationäre Temperaturen der 1-D Rotorsimulation

Bauteil	Temperatur in °C
Rotor	185
Luftspalt	132
Umspritzung	62
Kühlmittel	60

Die Rotortemperatur ist außerhalb der zulässigen Magnettemperatur von 120 °C. Die hohe Temperaturdifferenz zwischen Rotor, Luftspalt und Umspritzung bildet die hohen Wärmewiderstände ab. Die Begrenzung der Kühlleistung liegt somit nicht im Wärmeübergang zwischen Kühlmittel und Umspritzung oder der Wärmeleitfähigkeit des Kunststoffs. Die Wärmeübergänge von Rotor und Stator zur Luft im Rotorspalt lassen sich nicht ohne Verschlechterung anderer Eigenschaften verbessern. Eine Rotorkühlung ist für die Erreichung einer hohen Dauerleistung somit notwendig.

4.4 Montagekonzept

Die Montage des entwickelten Elektromotors soll auch für große Stückzahlen umsetzbar sein. Deshalb wird eine Montage in Baugruppen angestrebt.

Die Lanze wird in das Gehäuse geklebt. An deren Spitze sitzt der Drehgeber zur Auswertung der Rotorposition. Die Anschlusskabel werden durch das Gehäuse nach außen geführt und die Durchgangsstellen zum Kühlsystem mittels eines Epoxidklebstoffs (Loctite EA 9497) abgedichtet. In die entsprechenden Nuten des Gehäuses werden die zwei O-Ringe für die Abdichtung der Ringkanäle montiert sowie der Radialwellendichtring der Rotorkühlung. Der umspritzte Stator kann anschließend in das Gehäuse eingeschoben werden. Durch das Feder-Nut-System an der Kontaktstelle werden Stator und Gehäuse zueinander ausgerichtet. In Abbildung 4-26 ist sowohl das vorbereitete Gehäuse als auch der umspritzte Stator vor dem Zusammenschieben dargestellt.

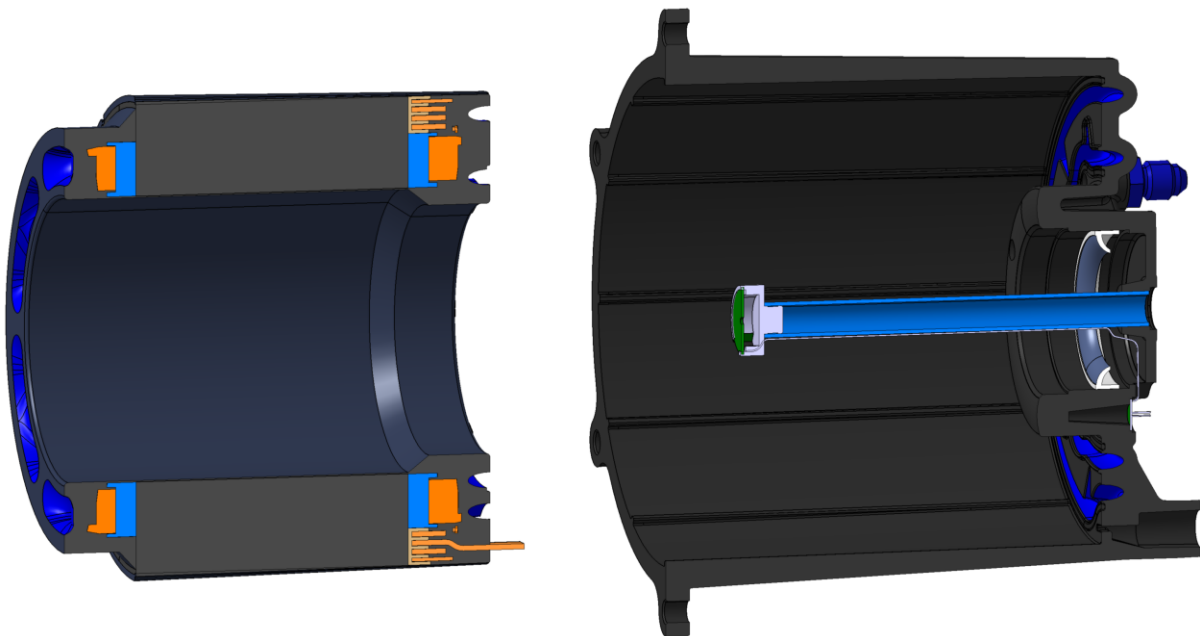


Abbildung 4-26: Stator und Gehäuse bereit zum Zusammenbau

Auf die Rotorwelle werden die in Kapitel 4.3 beschriebenen Bauteile als Längspressverband montiert. Der Rotor kann anschließend als komplettes Paket in den Stator eingeschoben werden. Durch das starke Magnetfeld des Rotors zieht sich dieser beim Eintauchen in den Stator an die Statorwand an. Durch die Kunststoffschicht im Rotorspalt gleitet der Stator ohne verkanten oder verhaken in das Gehäuse. Es ist keine zusätzliche Führung des Rotors notwendig. In Abbildung 4-27 sind der Rotor und das vormontierte Gehäuse vor dem Zusammenbau im Schnitt dargestellt.

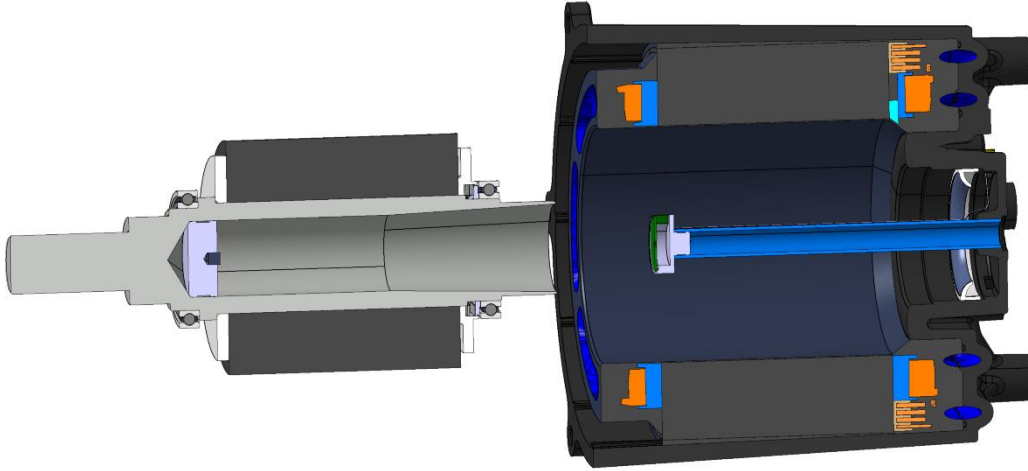


Abbildung 4-27: Rotor und Gehäuse bereit zum Zusammenbau

Die vormontierte Baugruppe kann durch das Aufsetzen des Lagerschilds, welches mit zwei O-Ringen zur Abdichtung bestückt ist, verschlossen werden.

Auf der Rückseite des Motors werden die Anschlüsse für die Kühlung verschraubt sowie die Phasenanschlüsse durch Einstecken und Festziehen der Überwurfmuttern montiert. Dieser Vorgang ist in Abbildung 4-28 dargestellt.

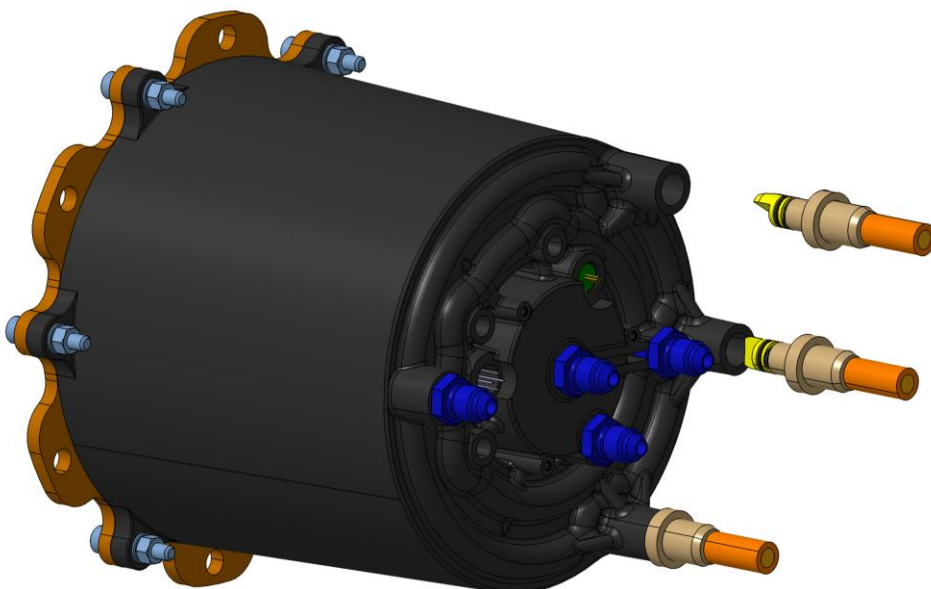


Abbildung 4-28: Kompletierter Motor mit teilweise montierten Phasensteckern

5 Prototypenfertigung

Neben der theoretischen Auslegung und dem simulativen Nachweis ist die Umsetzung und Bewertung eines Prototyps essenziell, um die erarbeiteten Vorteile zu verifizieren und das Konzept zu validieren.

In diesem Kapitel werden der Aufbau des Prototyps, die Abweichungen zur Auslegung und die durchgeführten Schritte und Erkenntnisse beschrieben, die zum erfolgreichen Aufbau geführt haben.

5.1 Stator

Die Herstellung des Statorrohlings besteht aus dem Vorbereiten der Zähne, der Wicklung, der Montage der Zusatzbauteile und dem Verschalten.

Die ausgestanzten und mit Backlack paketierte Einzelzähne werden mit einem Kapton-Nomex-Kapton-Isolationspapier sowie den beiden Wickelkopfformern beklebt. Dies dient dem besseren Handling während der weiteren Montage. Die Zähne werden einzeln im Linearwickelverfahren bewickelt. Durch die händische bzw. halbautomatische Bewicklung konnte während des Wickelns nicht genügend Spannung auf den Draht ausgeübt werden, um ein Ausbauchen der Wicklung vollständig zu verhindern. In Abbildung 5-1 ist das Ausbauchen der Wicklung stark verstärkt dargestellt. Durch den elastischen Anteil der Drahtverformung biegt sich dieser nach dem Entlasten teilweise wieder zurück (englisch *spring-back-effect*). Folglich muss der Draht „überbogen“ werden, sodass nach dem Zurückfedern des elastischen Anteils die gewünschte Verformung erhalten bleibt. Aufgrund der Wicklung direkt auf den Zahn kann die Wicklung nicht „überbogen“ werden.

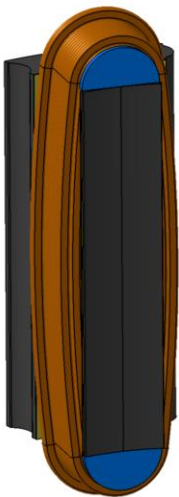


Abbildung 5-1: Zahn mit ausgebauchter Wicklung

Eine Möglichkeit, die Ausbauchung der Wicklung zu verhindern und ihre Geometrie zu kalibrieren, ist das Verpressen der Wicklung. Für den Prototypen wurde eine einfachere

Möglichkeit gewählt. Mittels Pressbacken aus Stahl werden die Wicklungen in die gewünschte Position gedrückt. Diese Position wird anschließend mittels eines wärmeleitfähigen Klebstoffs (Loctite EA 9497) fixiert. In Abbildung 5-2 ist ein einzelner Zahn mit montierten Pressbacken während des Aushärtens abgebildet.

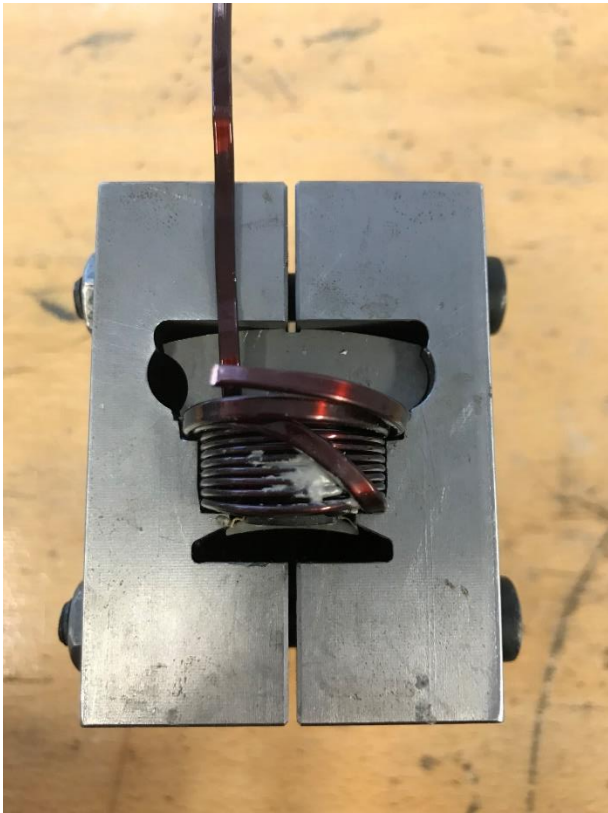


Abbildung 5-2: Pressvorrichtung für die Einzelzähne

Anschließend werden die Drähte der Einzelzähne abgelängt und abisoliert. Die zwölf Einzelzähne werden ringförmig zusammengesetzt. Durch die Geometrie der Trennstellen zwischen den Zähnen richten sich diese bei einer gleichmäßigen radialen Umfangskraft gegeneinander aus. Durch eine Rohrschelle wird ein einfacheres Handling des Statorrohlings erreicht.

Zur Verschaltung der Wicklung wird der Kunststoffträger mit den vier Kupferringen auf die montierten Einzelzähne gesetzt. Durch die Wickelkopfformer wird der Kunststoffträger zentriert. Die Wickeldrähte werden händisch an die Phasenringe angeformt. Für eine Serienfertigung können die Verbindungen mittels Laserschweißen oder Hartlöten hergestellt werden. Für den Prototypen wurden die Verbindungen im Wolfram-Inert-Gas (WIG) Verfahren verschweißt. Mit diesem Verfahren können mit kleinen Einschränkungen bezüglich des Wärmeeintrags und der Wiederholgenauigkeit ähnliche Ergebnisse erreicht werden. In Abbildung 5-3 ist exemplarisch ein Bereich mit Schweißverbindungen dargestellt.

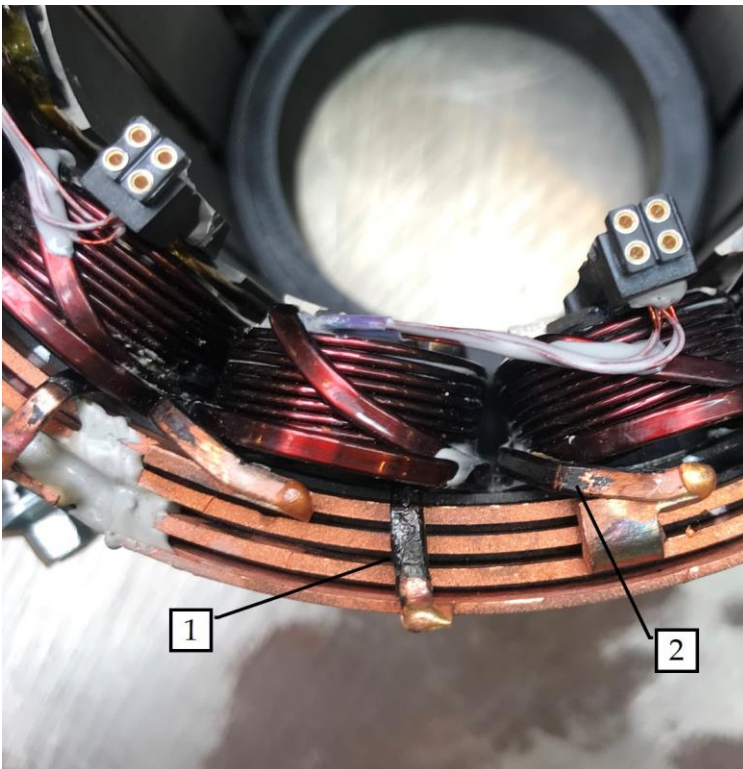


Abbildung 5-3: Statorverschaltung und Fehlstellen der Verschweißung

Aufgrund der hohen Wärmeleitfähigkeit von Kupfer erwärmt sich der Draht auch 30 mm hinter der Schweißstelle innerhalb von Sekunden auf Temperaturen, die den Isolationslack zerstören und zur Verkohlung führen (1 und 2). In diesen Bereichen ist die Isolation des Kupferlackdrahts nicht mehr gegeben. Für die gefertigten Prototypen ist eine teilweise Zerstörung der Primärisolation im Bereich der Anschlussstellen der Drähte zulässig, da durch die spätere Umspritzung eine sichere Isolierung gegeben ist.

5.2 Spritzpressen – Stator

Kernprozess der Herstellung der Prototypen ist das Umspritzen des Stators. In Abbildung 5-4 ist der untere Teil des Werkzeugs inklusive der kühlkanalerzeugenden Kerne gezeigt.



Abbildung 5-4: Unterteil des Werkzeugs zur Statorumspritzung

Für die prototypische Herstellung wird der Statorrohling, Abbildung 5-5 in das nicht vorgeheizte Werkzeug eingelegt und mittels der integrierten Heizpatronen auf 160 °C aufgeheizt. Nach Erreichen der notwendigen Werkzeugtemperatur wird das Rohmaterial in Form von Tabletten mittels eines Hochfrequenz-Ofens auf 90 °C vorgewärmt. Die Tabletten werden dann in den Zylinder des Werkzeugs eingelegt und mithilfe eines Kolbens in die Kavität gepresst. Nach etwa fünf Sekunden hat das Material die Kavität vollständig gefüllt und härtet anschließend für zwei Minuten aus. Anschließend wird das Werkzeug geöffnet und der umspritzte Stator (Abbildung 5-6) kann entformt werden.

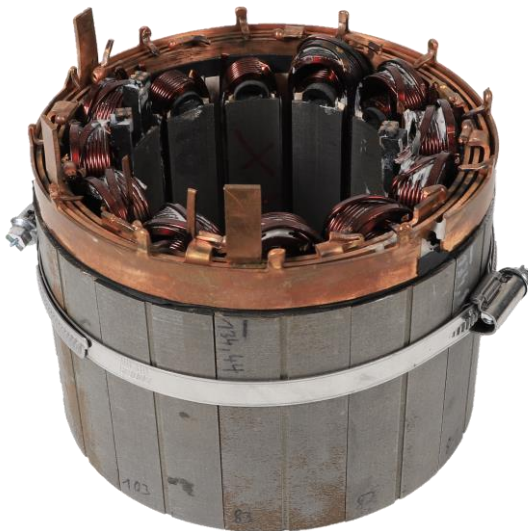


Abbildung 5-5: Stator vor dem Umspritzen



Abbildung 5-6: Fertig umspritzter Stator

Als größtes Problem der Prototypenfertigung stellte sich die Entformung des Stators heraus. Der Außendurchmesser des Stators löst sich durch die Entformschräge von 1° gut aus dem Werkzeug. Der Innenkern des Werkzeugs löst sich aufgrund der fehlenden Entformschräge jedoch nur mit erheblichem Kraftaufwand. Die Kühlkanäle, ebenfalls ohne Entformschräge und mit einem deutlich kleineren Verhältnis von Querschnitt zu Oberfläche, ließen sich gar nicht entformen. Bei weiter erhöhtem Krafteinsatz schnürten die Kerne an Querbohrungen zur Befestigung zuerst ein und rissen dann ab. In Abbildung 5-7 sind der entformte Innenkern sowie die abgerissenen Kühlkanalkerne zu sehen. Die abgerissenen Enden der Kühlkanäle stecken im unteren Teil des Werkzeugs.



Abbildung 5-7: Abgerissene Kerne und feststeckender Stator im Werkzeug

Durch eine Änderung der Befestigung der Kühlkanalkerne und ein Wechsel auf hochfesten Stahl konnten die Kerne erfolgreich und zuverlässig entformt werden.

Nach dem Umspritzen erfolgt als letzter Arbeitsschritt der Statorfertigung das Entgraten. Aufgrund der geringen Viskosität des Materials fließt dieses auch im begrenzten Maße in Trennstellen des Werkzeugs und erzeugt einen Grat im fertigen Stator. Dieser kann im Serienprozess durch ein Strahlen mit Granulat entfernt werden. Für die prototypische Herstellung wurden die Grate und der Anguss händisch entfernt.

5.3 Spritzgießen – Gehäuse

Das Gehäuse wird im Duroplast-Spritzgussverfahren hergestellt. Das rieselfähige Granulat wird in der Schnecke aufdosiert, vorgewärmt und anschließend in das Werkzeug eingespritzt. In Abbildung 5-8 ist die bewegliche Auswerferseite des Werkzeugs abgebildet. Diese Seite formt die Innenkontur des Gehäuses ab.

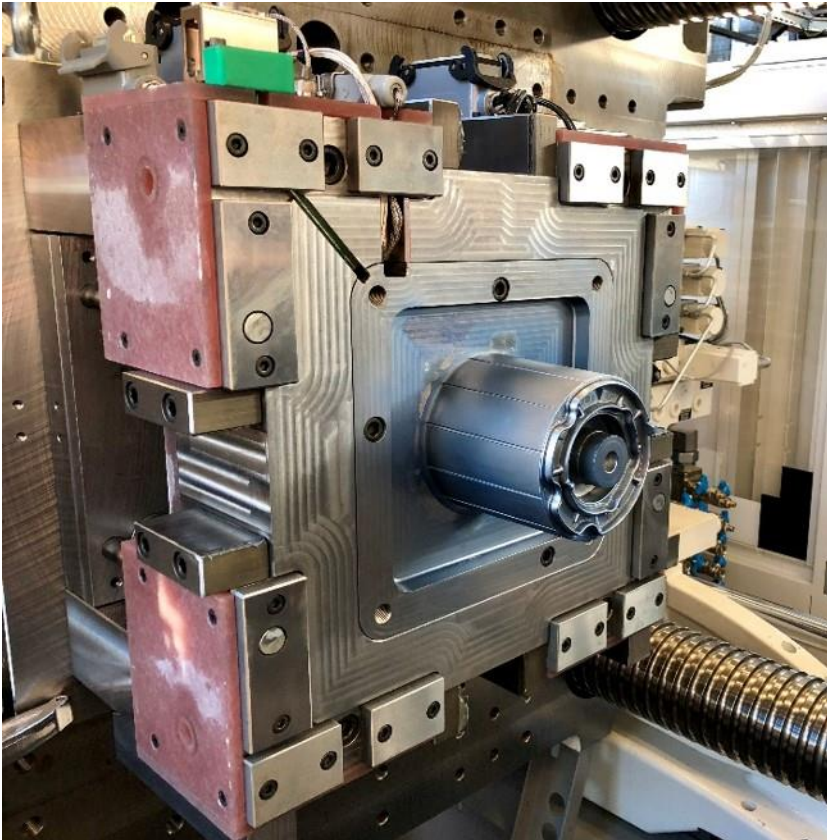


Abbildung 5-8: Auswerferseite des Spritzgusswerkzeugs für das Gehäuse

Aufgrund des höherviskosen Materials sind höhere Werkzeuginnendrucke, im Vergleich zum Spritzpressen des Stators, von 750 bar notwendig. Durch die Entformschräge auf der Innenseite von 1° und Außenseite von 2° ließen sich die Bauteile problemlos entformen.

Ähnlich dem Spritzpressen der Statorumspritzung entstanden auch beim Gehäuse an Werkzeugtrennstellen Grate, welche ebenfalls händisch entfernt wurden.

Für eine Serienfertigung können durch Iterationsschleifen Toleranzen im Bereich von IT7 erreicht werden. Diese Genauigkeit genügt, um Lager oder Rotorzentrierungen werkzeugfallend herzustellen. Für die prototypische Umsetzung musste auf diese Werkzeugänderungen verzichtet werden, weshalb an diesen Stellen ein Durchmessermaß von 1 mm vorgesehen ist. Die endgültige Geometrie wird an diesen Stellen durch mechanisches Nachbearbeiten (Fräsen) hergestellt. Der Sitz für die Lanze der Rotorkühlung wird ebenfalls spanend hergestellt. In diesem Prozessschritt wird auch gleichzeitig der Anguss entfernt. Die Gewinde des Gehäuses können für eine Serienfertigung mittels ausdrehbarer Kerne erzeugt werden. Für die prototypische Umsetzung wurden lediglich die Kernlöcher im Spritzguss erzeugt und die Gewinde anschließend gefräst. Aufgrund des spröden Materialcharakters ist eine Fertigung von Normgewinden mittels Gewindefurchen oder -schneiden nicht möglich.

5.4 Zusammenbau

Der Zusammenbau des Prototyps verlief ohne größere Abweichungen zu den bereits vorgestellten, geplanten Schritten. Abweichend zur Planung musste das Lager im Gehäuse verklebt werden. Das Kunststoffgehäuse konnte mit der vorher festgelegten Übermaßpassung nicht genügend Vorspannung aufbauen, um eine unerwünschte Bewegung des Außenrings im Gehäuse zu verhindern.

Die Lanze der Rotorkühlung und der darauf aufgesetzte Drehgeber wurden, wie die Kabeldurchführung des Drehgebers, mit Loctite EA 9497 verklebt und abgedichtet.

Durch die Magnete im Rotor zieht sich dieser immer an die Innenkontur des Stators. Die Einführschräge für das Kugellager im A-Lagerschild musste aufgrund dessen vergrößert werden. Beim Aufsetzen zentriert sich so der Rotor in der Mitte des Stators.

6 Designverifikation und Ergebnisse

Bei dem entwickelten Elektromotor sind zahlreiche Neuheiten umgesetzt worden. Aufgrund des komplexen Zusammenspiels der einzelnen Teile werden diese zuerst getrennt voneinander untersucht und bewertet. Abschließend wird das Gesamtsystem auf dem Prüfstand vermessen und mit einem aktuellen Kühlsystems des Stands der Technik verglichen.

6.1 Teiluntersuchungen

Der Motor lässt sich äquivalent den Unterkapiteln 4 in Teilsysteme zerlegen. Diese werden zum besseren Verständnis der erarbeiteten Lösungen und aufgetretenen Probleme separat betrachtet.

6.1.1 Verifizierung der Statorumspritzung mechanisch

Im Folgenden werden die mechanischen Eigenschaften des entwickelten Elektromotors untersucht.

In der Abbildung 6-1 ist ein Ausschnitt des Stators im Querschnitt dargestellt.

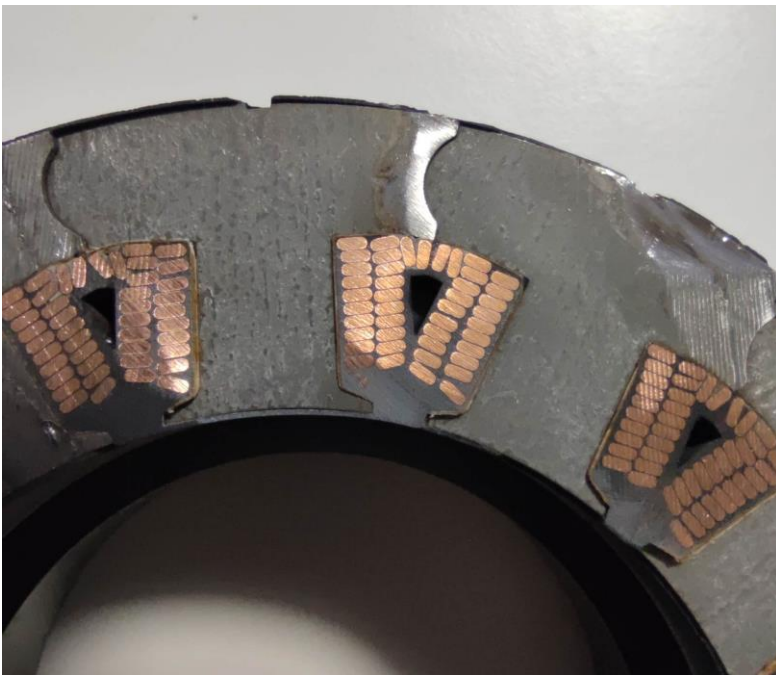


Abbildung 6-1: Kunststoffschicht im Luftspalt zwischen Rotor und Stator

Im Kapitel 4.1.4 wurde die Zentrierung des Stators im Umspritzwerkzeug vorgestellt. Zur Verifizierung der Funktion wird die Kunststoffdicke zwischen Zahn und Rotorspalt gemessen. Die Ergebnisse sind Tabelle 4-4 aufgelistet.

Tabelle 6-1: Dickenmessung im Rotorspalt

Zahn		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Kunststoffdicke mm	in	0,55	0,44	0,61	0,61	0,65	0,66	0,45	0,47	0,45	0,63	0,64	0,6

Die Abweichungen der Dicke der Kunststoffschicht zwischen Einzelzahn und Luftspalt ist größer als die zu erwartenden Toleranzen der Blechpakete. Folglich ist eine einseitige Fixierung der Zähne im Werkzeug nicht ausreichend. Dennoch ist eine geschlossene, fest anhaftende Kunststoffschicht am Innendurchmesser vorhanden. Die erhöhten Abweichungen bzw. Verschiebungen der Einzelzähne werden durch die Kunststoffschicht für den mechanischen Aufbau egalisiert.

Durch die Verschiebung der einzelnen Zähne, entsteht jedoch eine Lücke zwischen den Zähnen. Diese liegt wie auch der Rotor/Stator-Spalt im magnetischen Kreis und verringert bei gleichbleibendem Strom das resultierende Drehmoment sowie die Effizienz des Motors. Zur Abschätzung des entstehenden Spalts wurde der Statorring in Teilsegmente zerbrochen. In Abbildung 6-2 ist ein so entstandenes Statorsegment dargestellt. Im linken Bereich haftet eine dünne Schicht von durchgehend 0,25 mm an der Verbindungsfläche zum nächsten Zahn. Das bedeutet, dass zwischen den Zähnen im Bereich des Jochs ein zusätzlicher Luftspalt (der Kunststoff verhält sich elektromagnetisch wie Luft) entsteht.



Abbildung 6-2: Zahnsegment mit Kunststoff zwischen den Einzelzähnen

Zur Abschätzung des Einflusses wurde eine 2D-Simulation durchgeführt, bei der ein gerader Spalt im Joch kontinuierlich vergrößert wurde. In Abbildung 6-3 ist der Verlauf des Drehmoments über den vergrößerten zusätzlichen Luftspalt aufgetragen. Gegenüber keinem Luftspalt verringert sich das Drehmoment von 60 Nm auf 57,9 Nm was einer Reduktion von 3,5 % entspricht. Durch eine verbesserte Fixierung im Werkzeug kann folglich die Leistungsdichte weiter gesteigert werden.

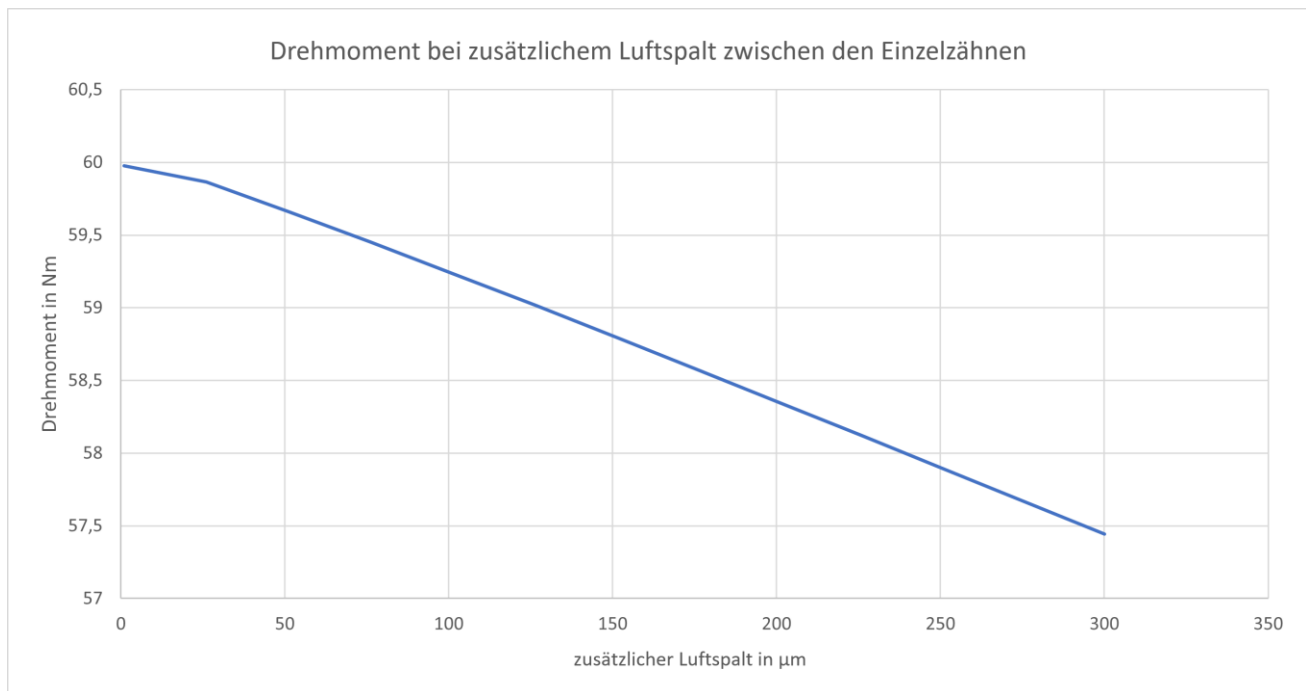


Abbildung 6-3: Drehmomentreduktion durch zusätzlichen Luftspalt im Bereich des Jochs

Als wichtige Forderung kann die Dichtigkeit des Kühlsystems gesehen werden. In Abbildung 6-4 ist der Motor im Querschnitt dargestellt und die Dichtstellen zwischen Stator und Gehäuse wurden nummeriert.

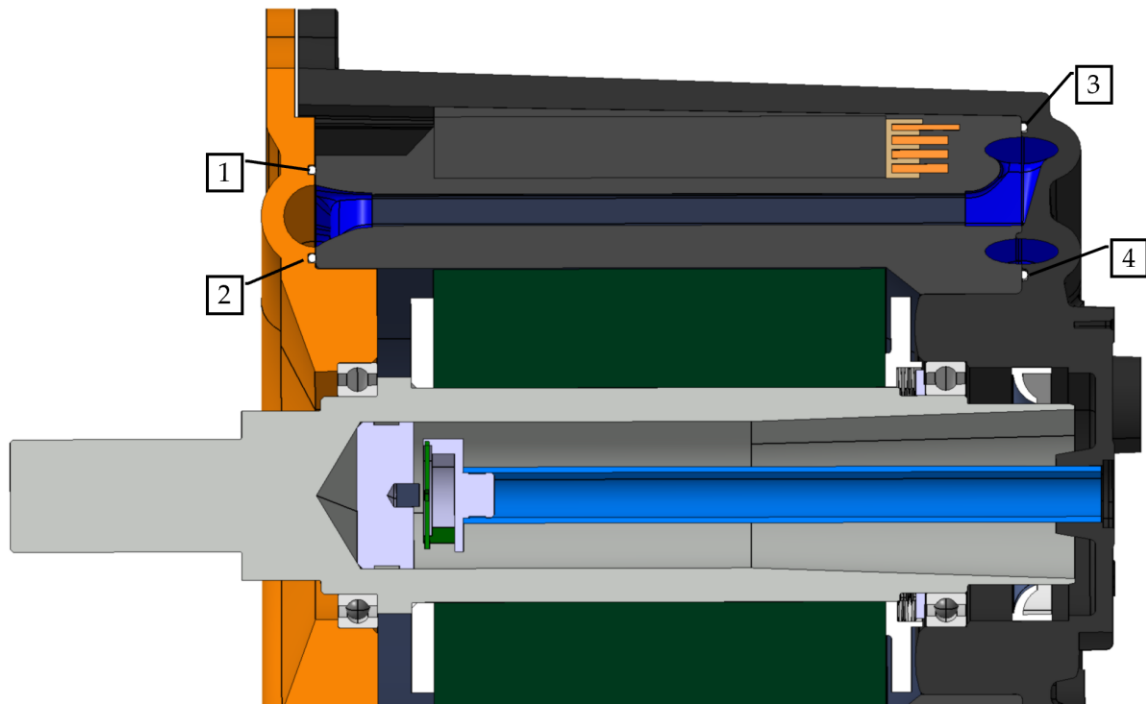


Abbildung 6-4: Dichtungspositionen im Gesamtmotor

Um die Dichtigkeit zu verifizieren, wurde der aufgebaute Motor mit Druckluft beaufschlagt und der Druckabfall gemessen. Zusätzlich wurde Leckagespray zur genauen Lokalisierung der Undichtigkeit eingesetzt. Es zeigte sich, dass selbst bei mehrmaligen Montagen der innere O-Ring (4) zum Rotorspalt hin nicht zuverlässig dichtete. Im Folgenden wird anhand der Funktionsweise des O-Rings die Ursache der Undichtigkeit ermittelt.

Die Dichtwirkung von O-Ringen beruht auf einem durchgängigen Kontakt des O-Rings zu beiden zu dichtenden Bauteilen. Die Dichtwirkung skaliert mit dem Kontaktdruck. Aufgrund der Schnurstärke von 1,5 mm und einer notwendigen Verpressung von 10-30 % der O-Ring-Schnurstärke dürfen die Bauteile eine Abweichung von 0,3 mm nicht überschreiten.

Die Abweichungen zwischen Gehäuse bzw. umspritztem Stator und CAD-Konstruktion wurde mittels optischem Vermessungsverfahren kontrolliert. In Abbildung 6-5 und Abbildung 6-6 sind die Abweichungen zur Sollgeometrie abgebildet.

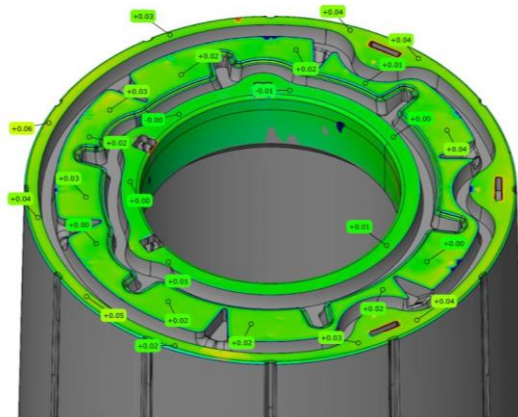


Abbildung 6-5: Abweichung zur Sollgeometrie des Stators

Abweichung vom Sollmaß
0,4
0,3
0,2
0,1
0,0
-0,1
-0,2
-0,3
-0,4
[mm]

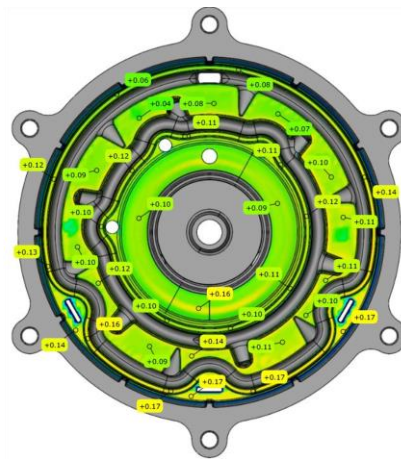


Abbildung 6-6: Abweichung zur Sollgeometrie des Gehäuses

Die Abweichungen im Stator sind kleiner als die des Gehäuses. Ursache ist die geringere Schwindung des wärmeleitfähigen Epoxidkunststoffs für die Statorumspritzung sowie die dünnere Kunststoffschicht durch den Stator als Einleger. Die Abweichungen im Gehäuse sind im Bereich der Dichtkontur bei 0,15 mm. Die Abweichungen im Stator liegen in diesen Bereichen bei 0,05 mm. Es ergibt sich eine rechnerische Abweichung von bis zu 0,2 mm. Die zusammenaddierten Abweichungen von der Sollgeometrie erklären somit nicht die vorhandene Undichtigkeit.

Weiter wird die Veränderung der Geometrie im Zusammenbau betrachtet. In Abbildung 6-7 ist die Verformung durch 1,5 bar Kühlmitteldruck und Vorspannung der Schrauben für das Lagerschild dargestellt. Zur besseren Sichtbarkeit sind die Verformungen um den Faktor 15 erhöht.

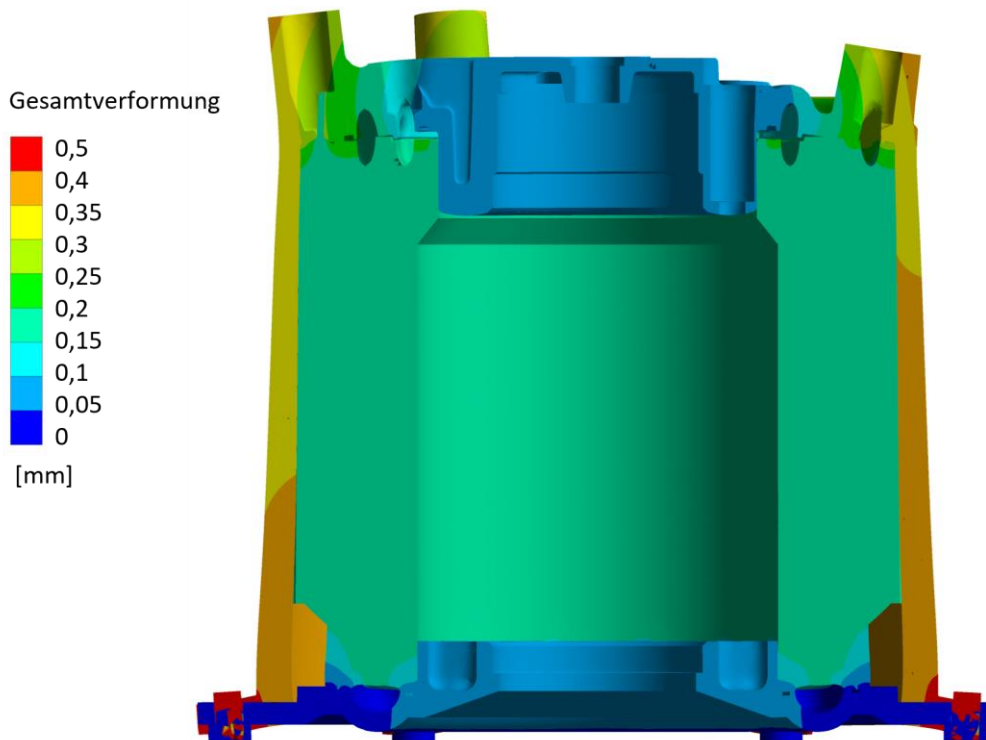


Abbildung 6-7: Verformung unter Druckbeaufschlagung und Verschraubung – vergrößert dargestellt

Es öffnet sich ein Spalt von 0,25 mm zwischen Gehäuse und Stator im Bereich des undichten, inneren O-Rings. Durch die zusätzliche Fertigungstoleranz von 0,2 mm ergibt sich ein Spalt, der durch den O-Ring nicht ausreichend ausgeglichen werden kann. Dies erklärt die fehlende Dichtwirkung am inneren O-Ring.

Durch eine Versteifung des Gehäuses im entsprechenden Bereich kann die Verformung reduziert und das Problem behoben werden. Für die prototypische Untersuchung des Motors wurde der Bereich mit zusätzlichem Silikon gedichtet, das durch die Anhaftung an beiden Bauteilen größere Spalte als der O-Ring überbrücken und dichten kann.

6.1.2 Verifizierung der Statorumspritzung elektrisch

Die Prüfung der Spannungsfestigkeit erfolgte nach der IEC 60034-1 mit der doppelten Nennspannung zuzüglich 1000 V als AC-Spannung für 30 Sekunden [75]. Zusätzlich wurden der Phasenwiderstand, die Impedanz und die Gleichspannungsisolationsfestigkeit gemessen. Die erzielten Messwerte sind in Tabelle 6-2 aufgelistet.

Tabelle 6-2: Gemessene elektrische Kennwerte

Test/Phase	U-V	U-W	V-W
Widerstand in $m\Omega$	17,114	17,181	17,082
Induktivität (50Hz) in μH	152,278	155,204	153,403
Impedanz der Phase in $m\Omega$	51,491	51,754	50,913
Kapazität (alle Phasen) gegen Erde in nF	2,8		

Durch den Vergleich der Phasen zueinander können Fehler in einzelnen Wicklungen erkannt werden. Die Induktivität des Motors reagiert empfindlich auf einzelnen Wicklungsschlüsse, also den Kurzschluss innerhalb einer Wicklung. Die geringen Abweichungen zueinander lassen auf unbeschädigte Wicklungen schließen.

Die Isolationsfestigkeit zum Statorblechpaket konnte mit einer AC-Prüfung für eine Minute mit 2000 V geprüft und bestanden werden.

Um die Wickelqualität und die Drahtverschiebung nach dem Umspritzen zu beurteilen, wurden mehrere Querschnitte eines umspritzten Stators angefertigt. Durch die händische Bewicklung und die anschließende Verpressung legen sich die Drähte der Wicklung zufällig an den Kern an. In Abbildung 6-8 sind neben der Referenzgeometrie, mit der der Motor ausgelegt wurde, die Fälle „most likely“, „worst case“ und „best case“ dargestellt. Die Fälle wurden mittels FEM-Analyse untersucht und die Wirksamkeit der Kühlung qualitativ gegeneinander verglichen. Bei einer konstanten Kühlwassertemperatur von 60 °C als Wärmesenke und einer drahtspezifisch aufgeprägten Verlustleistung als Wärmequelle stellen sich unterschiedliche Windungstemperaturen ein. Besonders relevant ist die höchste Wicklungstemperatur, da diese die Dauerleistung des Motors begrenzt.

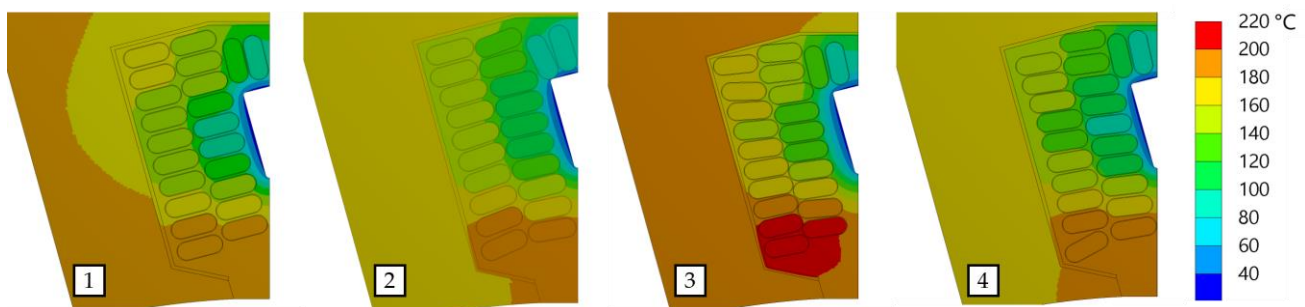


Abbildung 6-8: Wickelqualitäten im Vergleich (1) Referenzgeometrie (2) most likely (3) worst case) (4) best case

In Tabelle 6-3 ist die jeweilige Maximaltemperatur und die Temperaturdifferenz zur Referenz dargestellt. Der Abstand von Wicklung zu Kühlkanal in der Referenzgeometrie liegt bei 0,3 mm. Im Szenario „worst case“ beträgt dieser 0,9 mm. Die Effektivität der Kühlung wird maßgeblich vom Abstand zwischen Wicklung und Kühlkanal beeinflusst. Die Verschachtelung der Wicklung, wie im „worst case“ Szenario, ergibt die höchsten Temperaturen, da aufgrund der dichteren Packung der Wicklung die dickste Schicht Kunststoff zum Kühlkanal vorliegt. Für eine

Serienentwicklung mit automatischer Wicklung ergibt sich folglich noch Potential zur Verbesserung der Kühlung durch eine Anhebung der Wickelqualität.

Tabelle 6-3: Temperaturunterschied für unterschiedliche Wickelqualitäten

Fall	Referenz	Most likely	Worst case	Best case
Maximaltemperatur in °C	190	195	212	199
Temperaturdifferenz in K	130	135	152	139
Prozentual	100	104	117	107

6.1.3 Verifikation der Phasenstecker

Zur Funktionskontrolle der Phasenstecker wurde ein Gehäuse seitlich geöffnet, zu sehen in Abbildung 6-9.



Abbildung 6-9: Geschnittener Phasenstecker

Durch die Öffnung konnte der korrekte Sitz des O-Rings zur Abdichtung des Steckers festgestellt und die Kontaktfläche zwischen den stromleitenden Kupferbauteilen gemessen werden. Diese lag im spezifizierten Bereich von 75 mm².

Neben der Verifikation der geometrischen Auslegung wurde zusätzlich ein Temperatursensor direkt unterhalb der Kontaktfläche des Steckers an den Phasenring montiert. Die Temperatur wurde kontinuierlich während der Versuche gemessen. Diese lag im Dauerlauf unter 60 °C und damit deutlich unterhalb der maximalen Einsatztemperatur des Kunststoffes von 200 °C. Eine erhöhte Temperatur der Kontaktverbindung konnte nicht gemessen und die Funktion der integrierten Steckverbindung dadurch nachgewiesen werden.

6.1.4 Verifikation des Kühlsystems

Zur Homogenisierung der Kühlwasserkanäle ist die Übergangsstelle vom Ringkanal in die Kühlkanäle einzeln angepasst worden. Zur Verifizierung der Strömungsverteilung in den Kühlkanälen wird ein extra Lagerschild genutzt. Bei diesem sind die Umlenkungen innerhalb des Lagerschilds gesperrt und das Kühlmittel wird pro Kühlkanal aus dem Lagerschild durch einen

Durchflusssensor und wieder zurück in den Kühlkanal geleitet. Der Versuchsaufbau ist in Abbildung 6-10 dargestellt.

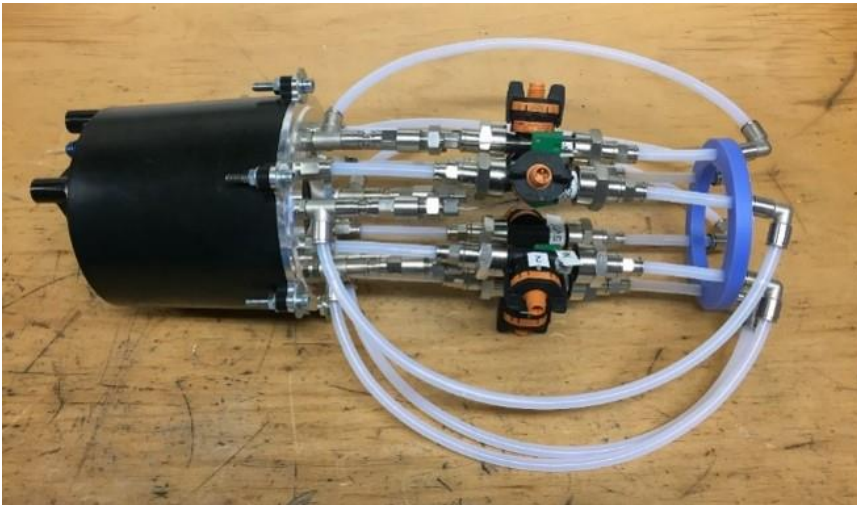


Abbildung 6-10: Messaufbau der Kühlmittelverteilung

Die Auswertung der Verteilung der Masseströme, Abbildung 6-11, zeigt eine gute Übereinstimmung mit der Simulation und sogar eine gleichmäßigere Durchströmung aller zwölf Kühlkanäle.

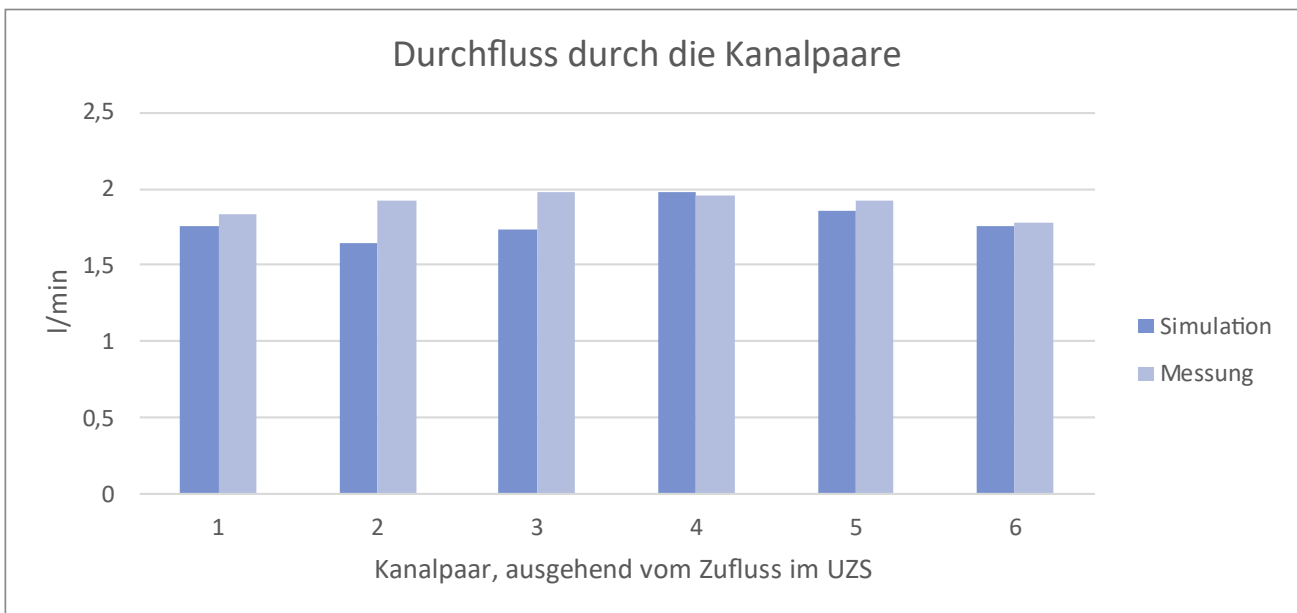


Abbildung 6-11: Vergleich der Kühlmittelverteilung

Der Gesamtdruckverlust ergibt sich zu 296 mbar bei 5,34 l/min Durchfluss. Sowohl Druckverlust wie auch Durchfluss sind im Bereich von marktüblichen Kühlwasserpumpen. Die Auslegung der Statorkühlung konnte somit erfolgreich nachgewiesen werden.

Zur Vermessung der Rotorkühlung wurden der Eingangsdruck sowie der Durchfluss bei unterschiedlichen Drehzahlen untersucht. Die Vermessung der Rotorkühlung ergab einen

Durchfluss von 1,56 l/min bei einem Druckverlust von 800 mbar, bei stehender Welle. Durch die konische Innenform der Rotorwelle, deren Ende im Durchmesser aufgeht, entsteht eine Pumpwirkung bei drehender Welle. In Abbildung 6-12 ist der gemessene Zusammenhang zwischen Drehzahl und Pumpwirkung dargestellt. Aufgrund der erhöhten Rotorverluste bei erhöhter Drehzahl und damit auch erhöhtem Kühlbedarf ist die erhöhte Kühlwirkung als positiv zu betrachten. Die Funktion der Rotorkühlung, insbesondere die drehzahlabhängige Erhöhung der Kühlleistung, konnte nachgewiesen werden.

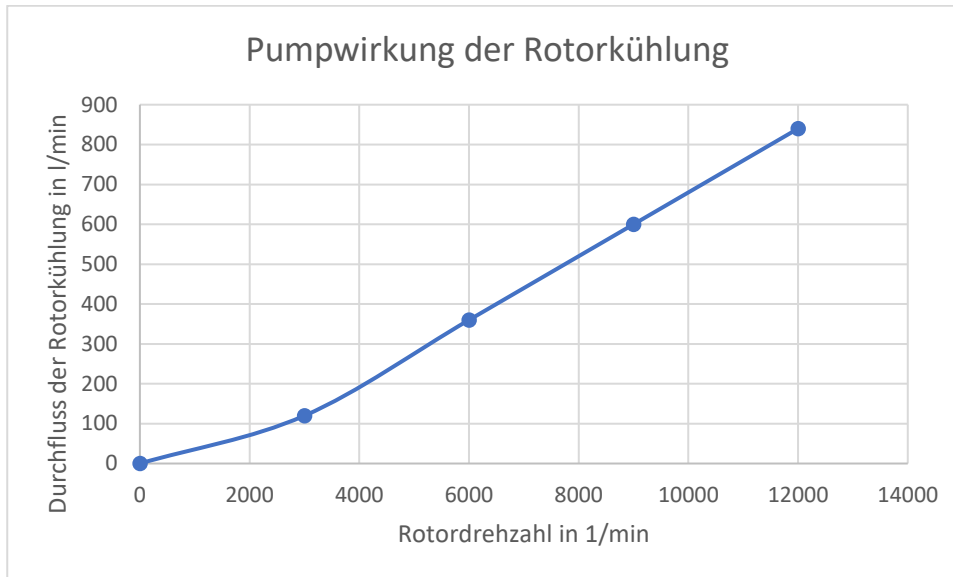


Abbildung 6-12: Pumpwirkung der Rotorkühlung über der Rotordrehzahl

6.2 Vorbereitung der Prüfstandsuntersuchungen

Um ganzheitlich das Potential des entwickelten Elektromotors nachzuweisen, wird dieser auf dem Prüfstand vermessen. Nachfolgend sind der Versuchsaufbau sowie der Aufbau des Referenzmotors dargestellt. Letzterer dient zur besseren Einordnung der Ergebnisse. Er stellt den Stand der Technik bei gleichen Abmessungen und selbem Rotor dar.

In Abbildung 6-13 ist der Elektromotor mit Prüfstandsperipherie schematisch aufgetragen. Temperaturmessstellen sind mit T gekennzeichnet, Durchflussmessungen mit m , die Drehmomentmessung mit M sowie die Drehzahlmessung n .

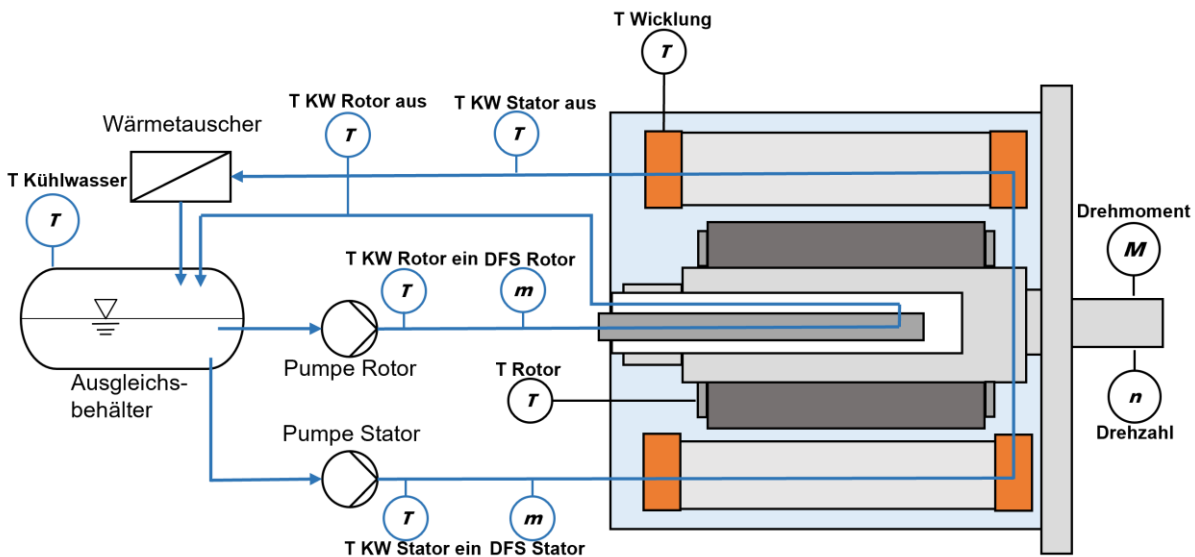


Abbildung 6-13: Schematischer Aufbau des Elektromotors mit entsprechenden Messstellen

Zur besseren Kontrolle des Kühlsystems wird der Elektromotor nicht direkt mit einem großen Kühlkreislauf verbunden. Stattdessen wird über einen großen Wärmetauscher ein kleinerer motornaher Kühlkreislauf konditioniert. Dies ermöglicht auch den Einsatz von reinem Wasser zum Abgleich der Simulationen, die ebenfalls mit reinem Wasser durchgeführt wurden. Sowohl der Stator-Kühlkreislauf wie auch der Rotorkühlkreislauf verfügen über eine regelbare Pumpe, um den Kühlmitteldurchfluss gegebenenfalls zu reduzieren. Für die Temperaturmessung des Kühlwassers werden Thermoelemente Typ K benutzt. Die Temperaturen im Motor werden mittels PT100 Sensoren gemessen. Diese können über einfachere Stecker angeschlossen werden. Die Kopplung zwischen Motor und Drehmomentmesswelle des Prüfstands erfolgt über eine Klauenkupplung, um kleinere Winkel- und Achsversatzfehler auszugleichen.

Zur Einordnung der Messergebnisse und als Vergleich zum Stand der Technik wird ein zusätzlicher Referenzmotor mit einer Mantelkühlung aber ohne innenliegende Kühlung aufgebaut. In Abbildung 6-14 ist der innere Teil der zweiteiligen Kühlhülse abgebildet. Die Spirale weist einen Querschnitt von 60 mm^2 auf ($6 \times 15,7 \text{ mm}^2 = 94,7 \text{ mm}^2$ bei der innenliegenden Kühlung).

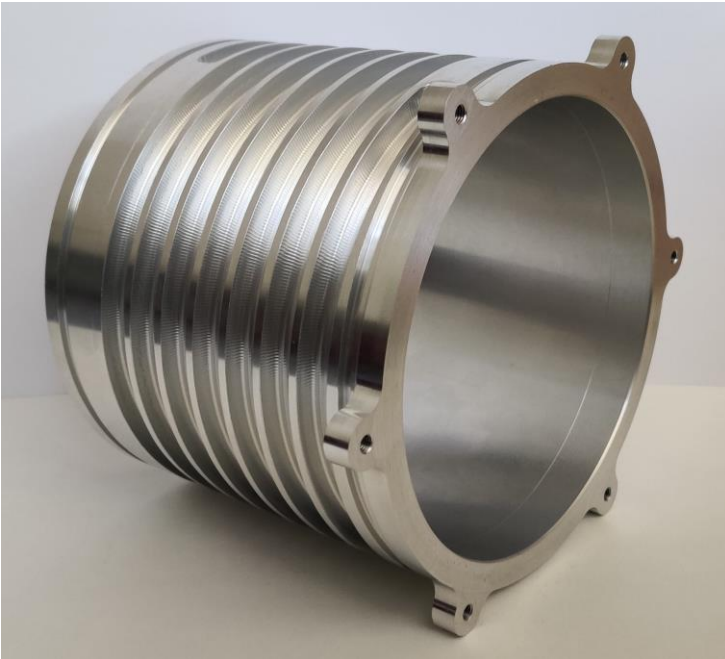


Abbildung 6-14: Inneres Gehäuse des Referenzmotors mit Mantelkühlung

In der Tabelle 6-4 sind die Ergebnisse der Druckverlustmessungen beider Elektromotoren aufgelistet.

Tabelle 6-4: Vergleich der Kühlsysteme

Motor	Druckverlust in mbar (%)	Stator Kühlung	Durchfluss in l/min (%)	Rotorkühlung
Kunststoffmotor	296 (100 %)		5,34 (100 %)	Identisch
Referenzmotor	314 (106 %)		4,98 (93 %)	Identisch

Die Messung bestätigt, dass sowohl der Druckverlust wie auch der Durchfluss in einem Bereich liegen, der einen Vergleich beider Konzepte miteinander erlaubt.

Da der gleiche Stator verwendet wird, der allerdings nicht umspritzt wird, sind die Isolationsabstände im Stator zu gering. In Abbildung 6-15 ist dargestellt, wie der Elektromotor zusätzlich an kritischen Engstellen isoliert wird. Als elektrische Isolation wird wärmeleitfähiger Epoxidklebstoff (Loctite EA9497) mit einer Wärmeleitfähigkeit von $\lambda=1,4 \text{ W/mK}$ verwendet.

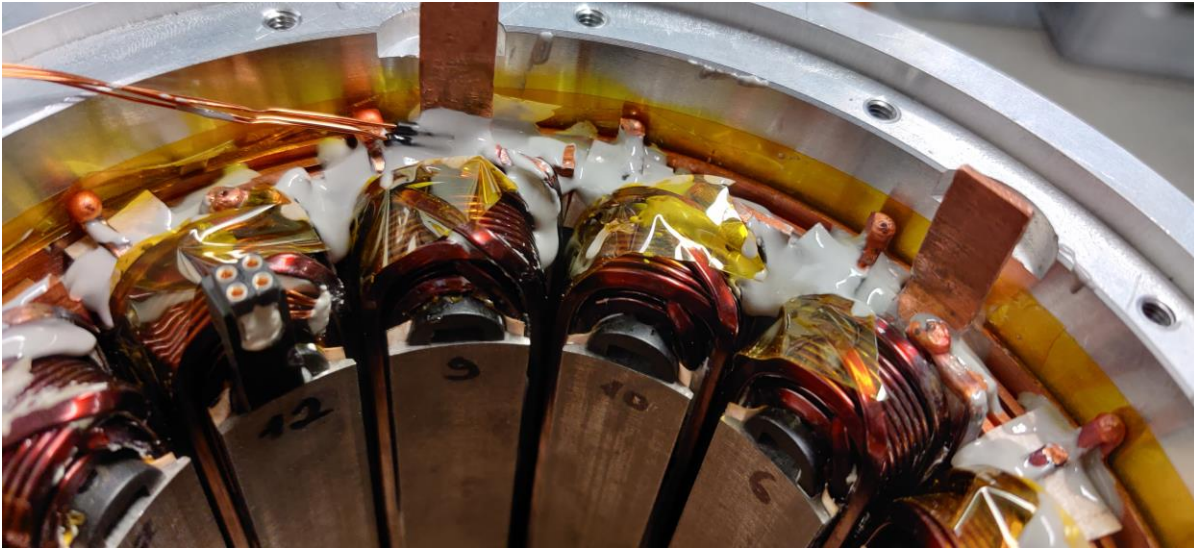


Abbildung 6-15: Zusatzisolierung aus Kapton im Referenzmotor

Über die innere Kühnhülse wird mit zwei O-Ringen zur Abdichtung eine Außenhülle gepresst. Zur Montage der Phasenstecker werden diese aus einem Kunststoffgehäuse entfernt und in das Alugehäuse eingepresst. Um möglichst wenige Änderungen gegenüber dem Vergleichsmotor zu haben, wird derselbe Rotor verwendet. Das A-Lagerschild, welches nicht mehr in das Gehäuse integriert ist, wird als separates Aluminiumbauteil angeschraubt. In Abbildung 6-16 ist der fertig montierte Referenzmotor abgebildet.

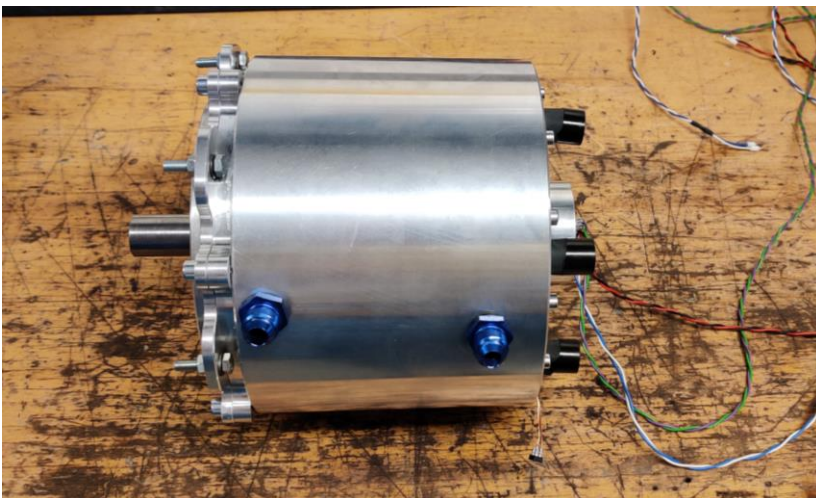


Abbildung 6-16: Komplettierter Referenzmotor

6.3 Validierung auf dem Prüfstand

Neben dem Erreichen der einzelnen Kennwerte sind das Zusammenspiel der Komponenten und schlussendlich die Eigenschaften des gesamten Motors von Interesse.

Um die Kühlung des entwickelten Elektromotors zu bewerten, wurden beide Motoren mit jeweils drei PT100 Temperatursensoren ausgestattet. In Abbildung 6-17 sind die Positionen im Detail dargestellt.



Abbildung 6-17: Position der Temperatursensoren innerhalb des Motors

Die Temperatur $T_{\text{Wickelkopf-innen}}$ (1) ist an der Wicklung, die am nächsten zum Rotorspalt verläuft, befestigt. In diesem Leiter treten die höchsten Verluste auf. Klassischerweise ist der Wickelkopf die thermisch begrenzende Stelle bei Mantelkühlungen, weshalb der Sensor an dieser Stelle platziert ist. Der zweite Sensor T_{Nut} (2) ist ebenfalls am Kupferleiter, der am nächsten zum Rotorspalt liegt, befestigt. Axial ist dieser mittig im Elektromotor verbaut. Extern durchgeführte Simulationen zeigen, dass an dieser Stelle der Motor die höchste Temperatur bei allen simulierten Betriebspunkten aufweist und dieser Punkt die Thermik des Motors beschränkt. Der dritte Sensor $T_{\text{Wickelkopf}}$ (3) sitzt auf der äußersten Wicklung oben auf dem Wickelkopf. An dieser Position sind die Stromverdrängungseffekte durch den Rotor minimal, gleichzeitig verläuft ein Kühlkanal direkt oberhalb des Wickelkopfs, weshalb an dieser Stelle der kühlsche Punkt der Wicklung vermutet wird.

Bei sämtlichen Versuchen auf dem Prüfstand mussten Einschränkungen hingenommen werden. Bei Drehzahlen über 9.000 1/min kam es zu laut hörbaren Schwingungen, ansteigend mit steigender Drehzahl. Da das Geräuschniveau auch bei Drehzahlsprüngen direkt zur maximalen Drehzahl von 15.000 1/min nicht sank, wurden alle Versuche nur bis 12.000 1/min gefahren. Das Problem trat verstärkt bei dem Referenzmotor auf, weshalb dieser lediglich bis 9.000 1/min gefahren werden konnte. Der verwendete Prüfstand misst den Phasenstrom mittels einer von der Firma SciMo GmbH entwickelten Messelektronik. Zum Zeitpunkt der Messung befand sich das Gerät noch in der Entwicklung und es konnten nur bis zu einer Drehzahl von 9.000 1/min valide Messwerte aufgezeichnet werden. Der Bereich oberhalb ist deshalb zur Vollständigkeit vorhanden, jedoch ausgegraut.

In Abbildung 6-18 ist das gemessene Wirkungsgradkennfeld des Motors aufgetragen. Zur Messung des Wirkungsgrads wird an mehreren Punkten über das Kennfeld der Strom in der d- und q-Komponente variiert. Das jeweils effizienteste Verhältnis dient als Stützpunkt für das Steuerkennfeld. Zwischen den gemessenen Punkten kann das Kennfeld interpoliert werden. Der Spitzenwirkungsgrad im validen Bereich liegt bei über 96 %.

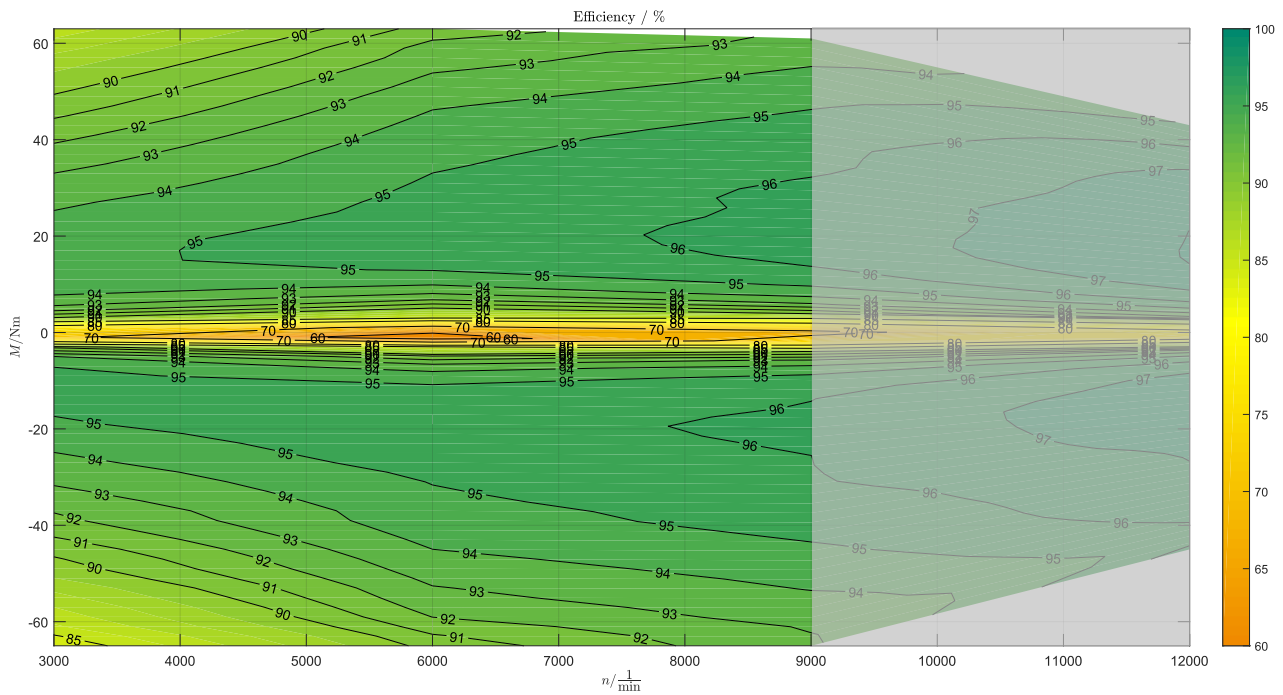


Abbildung 6-18: Gemessenes Wirkungsgrad Kennfeld des entwickelten Motors

Zur Ermittlung der Dauerleistung wurde der Motor mit konstanter Drehzahl und konstantem Moment betrieben, und das Erwärmungsverhalten über 20 Minuten aufgezeichnet. In Abbildung 6-19 sind die Kurven der drei Temperatursensoren des Stators sowie die Rotortemperatur aufgetragen. Der Motor dreht im Betriebspunkt mit 12.000 1/min bei einem Abtriebsmoment von 47 Nm. Dies entspricht einer mechanischen Dauerleistung von 59 kW. Nach 22 Minuten wurde der Motor abgeschaltet und die Abkühlung bei weiterhin eingeschaltetem Kühlsystem aufgezeichnet. Innerhalb von 20 Minuten kehrte die Motortemperatur auf das Anfangsniveau zurück. Die Kühlmitteltemperatur betrug 30 °C.

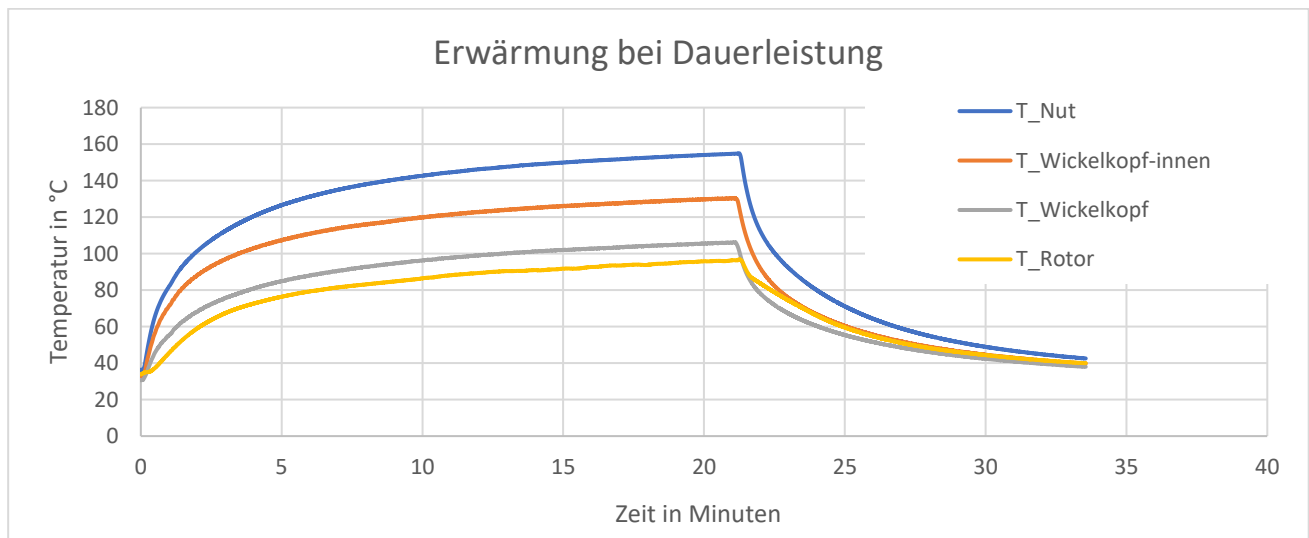


Abbildung 6-19: Temperaturkurve bei Dauerleistung und Abkühlung

Aufgrund des prototypischen Aufbaus wurden die Betriebsgrenzen konservativ angesetzt. Die Temperaturgrenze für die Wicklung wurde auf 160 °C festgelegt. Die Differenz zur maximalen zulässigen Temperatur der Isolationsklasse H von dauerhaft 180 °C dient als zusätzlicher Sicherheitspuffer. Durch den prototypischen Aufbau und die drei Temperatursensoren können im Motor lokal höhere Temperaturen auftreten als die gemessenen.

Durch die erhöhten Verluste der Leitern in den Nuten erwärmen sich diese trotz der besseren thermischen Anbindung an das Kühlsystem stärker als der Wickelkopf. Durch starke Erwärmung kommt es zu Temperaturgradienten innerhalb der Wicklung und innerhalb des Motors. Nach 20 Minuten erreicht der Temperaturgradient ein Maximum von 50 K. Trotz der inhomogenen Temperaturverteilung und der starken Erwärmung des Motors, zeigten sich im Betrieb keine Undichtigkeiten oder Risse in den Kunststoffbauteilen.

In Abbildung 6-20 ist das Diagramm für die Dauerleistung des Motors mit Referenzkühlsystem dargestellt. Durch eine stufenweise Erhöhung des Drehmoments auf 29 Nm bei einer Drehzahl von 9.000 1/min konnte eine Dauerleistung von 27,3 kW erreicht werden. Durch die niedrigere Drehzahl und das geringere Moment sind die Stromverdrängungseffekte weniger stark ausgeprägt und die Verluste fallen gleichmäßiger über die Wicklung an. Durch die geringere Kühlung verteilt sich die entstehende Wärme gleichmäßiger und es stellt sich zwischen den Temperatursensoren im Stator kein nennenswerter Temperaturunterschied ein. Durch die geringere Drehzahl und geringere Leistung entstehen auch im Rotor weniger Verluste. Dieser bleibt etwa 25 K kühler. Das Kühlkonzept des Rotors ist bei beiden Motoren gleich.

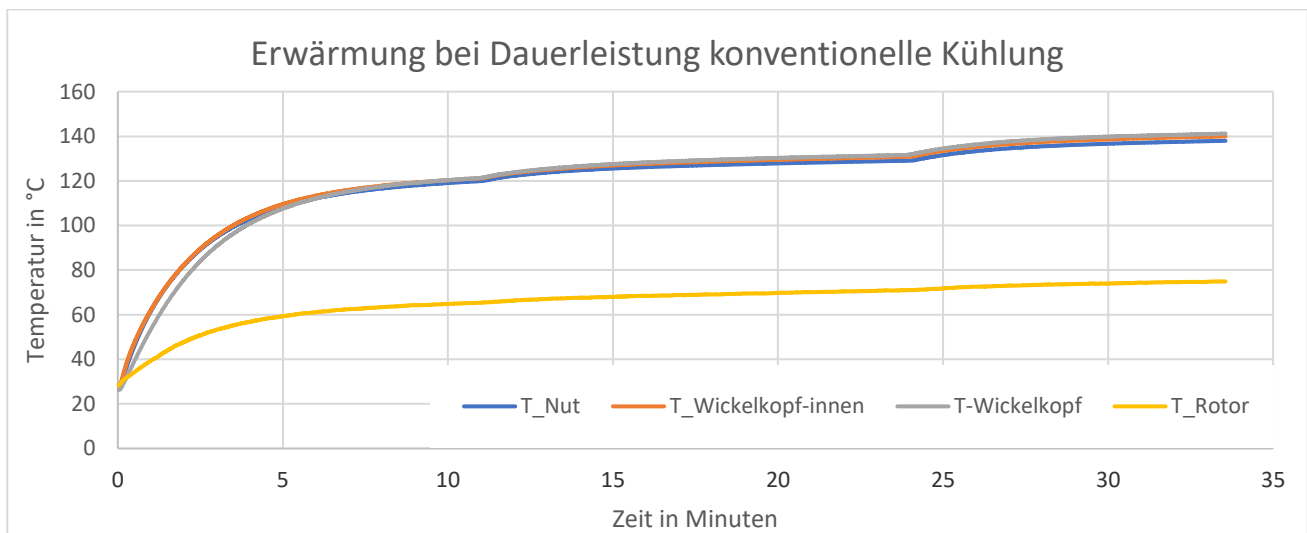


Abbildung 6-20: Erwärmung des Referenzmotors mit konventioneller Kühlung bei Dauerleistung

In der Abbildung 6-21 wird die Erwärmung beider Kühlkonzepte miteinander verglichen. Beide Motoren wurden bei 9.000 1/min und 37 Nm betrieben und die entsprechende Erwärmung aufgezeichnet. Der Stator des Motors mit Kühllülse erwärmt sich deutlich stärker. Nach ca. vier Minuten erreichte der Referenzmotor die Sicherheitsschwelle von 160 °C und wurde

abgeschaltet. Der ausgewählte Betriebspunkt befindet sich für den Referenzmotor also im Überlastbereich. Trotz gleicher Rotorkühlung und selbem Rotor ist eine deutlich erhöhte Rotortemperatur im Referenzmotor bei gleicher Leistungsabgabe feststellbar. Die erhöhte Erwärmung des Rotors ist auf die Wärmeübertragung des Stators auf den Rotor zurückzuführen. Somit bietet das Kühlkonzept des neuentwickelten Elektromotors auch einen Vorteil bezüglich der Rotortemperatur.

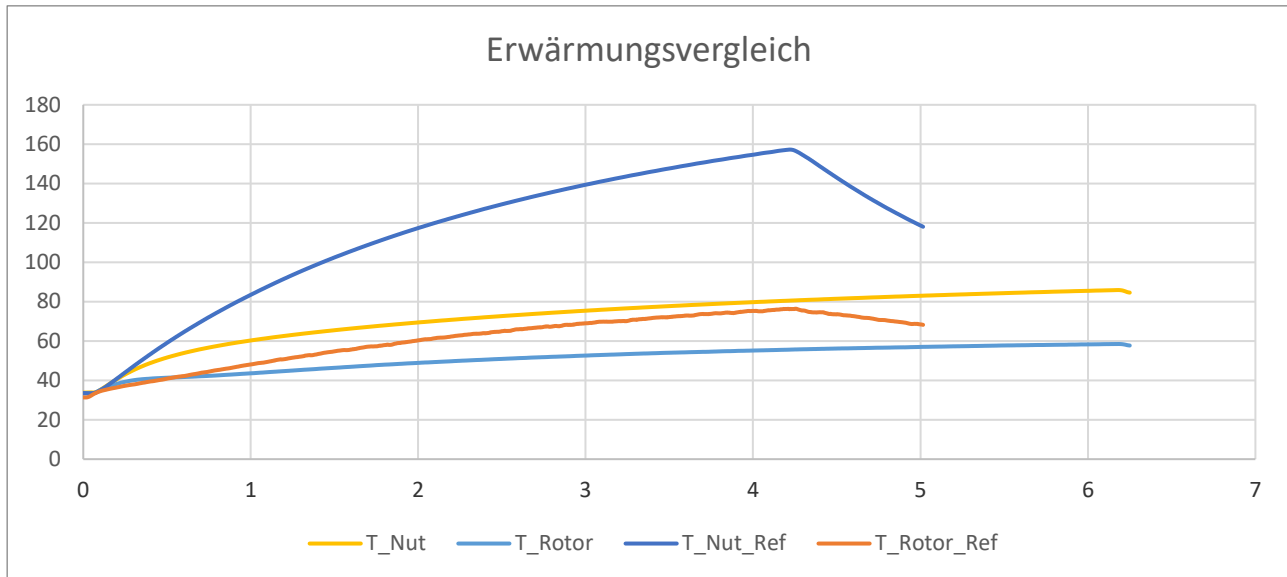


Abbildung 6-21: Erwärmung beider Motorkonzepte bei gleicher Leistungsabgabe

Bezüglich einer Verbesserung der Kühlung wird häufig auf den degressiven Verlauf der Kupferleitfähigkeit bei Erwärmung verwiesen. Jedoch ergeben sich vor allem durch die geringeren Rotortemperaturen Möglichkeiten zum Einsatz von weniger temperaturstabilen Magneten, die einen Kostenvorteil besitzen. Alternativ dazu könnte der Einsatz von stärkeren Magneten, die jedoch nur mit einer geringeren Temperaurbeständigkeit verfügbar sind, in Betracht gezogen werden.

Der direkte Vergleich zu anderen Elektromotoren nach dem Stand der Technik ist aufgrund der beschränkten Datenlage schwierig, durch Kombination verschiedener Quellen können trotzdem Kennzahlen, wie die Dauerleistungsdichte, ermittelt werden. In der Tabelle 6-5 werden sowohl der entwickelte Motor wie auch die Referenzmaschine und zwei kommerziell verfügbare Motoren aufgelistet.

Tabelle 6-5: Vergleich der Entwicklungen zu kommerziell erhältlichen Motoren (Gesamtgewicht inkl. Rotorwelle, Lager und Gehäuse)

	Neuentwickelter Elektromotor	Referenzmotor	Tesla Model 3 [8]	BMW i3 [8]
Gewicht in kg	10,5	12,1	42	35,5
Dauerleistung in kW	58	26	88	75
Dauerleistungsdichte in kW/kg	5,5	2,1	2,1	2,1

Designverifikation und Ergebnisse

Sowohl der neuentwickelte Elektromotor wie auch der Referenzmotor konnten mit Einschränkungen am Prüfstand validiert werden und die Leistungsfähigkeit nachweisen. Der Vergleich mit anderen Antriebselektromotoren zeigt, dass der Referenzmotor eine durchschnittliche Dauerleistungsdichte aufweist, der Neuentwickelte Motor mit innenliegender Kühlung hat eine um den Faktor 2,6 erhöhte Dauerleistung, bei gleichzeitigem Gewichtsvorteil gegenüber dem Referenzmotor. Zusätzlich konnte die Teileanzahl durch Integration des Lagerschildes und der Phasenanschlüsse in das Gehäuse reduziert werden.

7 Zusammenfassung und Ausblick

Ziel der vorliegenden Arbeit ist die Entwicklung eines Motors mit innenliegendem Kühlkonzept, das sich durch den Einsatz von Kunststoff auch in Großserie herstellen lässt. Durch eine Analyse des aktuellen Stands der Technik wurden Potentiale identifiziert, die sich durch den Einsatz von Kunststoffen nutzen lassen.

Der in dieser Arbeit entwickelte Motor basiert auf einer elektrischen Auslegung mit innenliegender Kühlung. Der aus Einzelzähnen aufgebaute Elektromotor wird im Spritzpressverfahren mit wärmeleitfähigem Epoxidharz umspritzt. Hierbei werden die Kühlkanäle direkt im Kunststoff geformt. Weiterhin entstehen Funktionsintegrationen, wie die Anbindung von Temperatursensoren, der Kühlwasserverteilung und der Drehmomentabstützung. Durch die geänderte Wärmeabfuhr aus dem Motor kann auch das Gehäuse aus Kunststoff gefertigt werden. Als Spritzgussbauteil werden Funktionen zur Drehmomentübertragung, Kühlwasserverteilung und der Phasenstecker integriert. Durch eine Anpassung des klassischen Aufbaus des Gehäuses und einer geänderten Zentrierung kann auch das Rotorlager und die Rotorkühlung direkt in das Gehäuse aus faserverstärktem Phenolharz integriert werden. Der Aufbau des Motors wird dabei dokumentiert und auftretende Probleme analysiert und Lösungsvorschläge erarbeitet.

Durch den Aufbau von Prototypen sowie der detaillierten Verifizierung der Teilentwicklungen lassen sich folgende Ergebnisse festhalten:

- Der entwickelte Motor ist mit großserientauglichen Fertigungstechnologien herstellbar.
- schlanke Kühlkanäle ohne Entformschräge sind entformbar
- Durch den Zusammenbau von Gehäuse und umspritztem Stator können im Motor innenliegende Kühlkanäle gebildet werden ohne zusätzliche Bauteile
- Die Integration eines Rotorlagers direkt in das Kunststoffgehäuse ist möglich

Weiterhin konnte durch den Aufbau und Vermessung eines Referenzmotors mit einer Mantelkühlung nach Stand der Technik insbesondere folgendes gezeigt werden:

- Die Dauerleistungsdichte lässt sich um den Faktor 2,6 steigern
- Das Gesamtgewicht des Motors lässt sich durch das Kunststoffgehäuse um 15 % senken
- Bei gleicher Last erwärmt sich der Rotor des Referenzmotors um bis zu 25 K mehr

Maßgeblich für die Relevanz dieser Verbesserungen ist die Fertigbarkeit mit Großserienfähigen Prozessen. Die Erhöhung der spezifischen Kennwerte bietet dabei die Möglichkeit den Zielkonflikt von Kosten und Leistung gleichermaßen zu lösen, ermöglicht es doch die Reduktion von CO²-intensiven Werkstoffen wie seltener Erdmagnete. Durch diese Verschiebung der Wertschöpfung vom Rohstoff hin zur Entwicklung und Fertigung kann die Transformation der lokalen Automobilindustrie unterstützt werden.

In der Abbildung 7-1 ist eins von 6 Schnittmodellen des entwickelten Elektromotors gezeigt, das auf unterschiedlichen Messen und Konferenzen ausgestellt wurde.



Abbildung 7-1: Schnittmodell des entwickelten Elektromotors

Nicht abschließend geklärt bleiben in dieser Arbeit die folgenden Punkte, zu denen jeweils eine Einschätzung gegeben wird:

- Dauerhafte Dichtigkeit des Motors
 - Das Material zum Umspritzen des Motors wird für die Umspritzung von Getriebesteuergeräten bereits in der Serie eingesetzt und bietet grundsätzlich das Potential für die Dauerverwendung.
- Schwingungen bei hohen Drehzahlen

- Durch eine steifere Verbindung der Zähne zueinander, z.B. als Schwalbenschwanz, kann die Steifigkeit und damit das Auftreten der Schwingungen in höhere Drehzahlbereiche geschoben werden.
- Beschränkung auf konzentrierte Wicklung
 - Durch eine Anpassung der elektromagnetischen Auslegung kann in der Nut einer verteilten Wicklung Platz geschaffen werden für einen Kühlkanal

Diese Arbeit zeigt einen Weg für moderne elektrische Antriebsmotoren, die durch neue Konzepte und Produktionsprozesse und nicht durch teure Materialien erhebliche Vorteile in der Leistungsfähigkeit aufweisen.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1: Aufbau eines Elektromotors mit Mantel- und Rotorkühlung.....	2
Abbildung 2-2: Slinky Statorblechpaket eines Außenläufers [5]	4
Abbildung 2-3: Prinzip des Linearwickelns nach [12]	6
Abbildung 2-4: Prinzip des Flyerwickelns nach [14]	7
Abbildung 2-5: Kinematisches Prinzip des Nadelwickelns einer Zahnspulenwicklung nach [12]	7
Abbildung 2-6: Prinzip des Einziehens der Wicklung [16].....	8
Abbildung 2-7: Stator mit Hairpinwicklung [17].....	9
Abbildung 2-8: Imprägnierung eines Stators [22]	11
Abbildung 2-9: Bandagierter Wickelkopf mit Phasentrennern [24]	12
Abbildung 2-10: Vereinfachte Darstellung des Skin-Effekts nach [25]	13
Abbildung 2-11: Konturplot der Stromdichte durch inhomogenes äußeres Magnetfeld nach [25]	13
Abbildung 2-12: Vergleich der Stromverteilung bei parallelliegenden Drähten nach [25].....	14
Abbildung 2-13: Hystereseschleifen von hart- und weichmagnetischen Werkstoffen nach [27]	15
Abbildung 2-14: Bandbreite der Wärmeleitfähigkeiten verschiedener Stoffklassen [31, 32] ...	17
Abbildung 2-15: Grenzschichtströmung längs einer ebenen Wand. Geschwindigkeitsprofil W und Temperaturprofil T [35].....	18
Abbildung 2-16: Grenzschichtverlauf längs einer ebenen Wand [35]	19
Abbildung 2-17: Schnittdarstellung eines Elektromotors mit Mantelkühlung.....	22
Abbildung 2-18: Cold water plate des Stators [41].....	23
Abbildung 2-19: Innenliegendes Kühlkonzept [42]	24
Abbildung 2-20: Innenliegendes Kühlkonzept am Zahnfuß [44].....	25
Abbildung 2-21: Innenliegendes Kühlkonzept mit Microwärmetauschern [45]	25
Abbildung 2-22: Fluiddurchströmte Hohlleiter, exemplarisch in einer Nut [48]	26
Abbildung 2-23: Aufgetrennte Wickellitze mit mittiger Edelstahlleitung [49]	27
Abbildung 2-24: Gegossene Spule mit integrierten Kühlkanälen [52].....	27
Abbildung 2-25: Aufgeschnittener Stator des Tesla Model 3 [54].....	28
Abbildung 2-26: Statorkühlsystem des Lucid Air [54]	28
Abbildung 2-27: Molekülketten verschiedener Kunststoffarten [62]	31
Abbildung 2-28: Ablaufdiagramm des Statorumspritzens	33
Abbildung 2-29: Prinzipsskizze Spritzpressen.....	34
Abbildung 3-1: Querschnitt des Konzepts.....	38
Abbildung 3-2: Einzelteile und vormontierter Einzelzahn	39
Abbildung 3-3: Bauteile des Stators und fertig vormontierter Stator.....	40

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 3-4: Schnittdarstellung des umspritzen Stators im Werkzeug.....	40
Abbildung 3-5: Stator vor der Montage in das geschnittene Gehäuse.....	41
Abbildung 3-6: Stator mit montiertem Rotor.....	41
Abbildung 3-7: Komplettierter Motor im Schnitt.....	42
Abbildung 4-1: Geometrie der Einzelzähne zur Ausrichtung zueinander.....	43
Abbildung 4-2: Wickelkopfformteile mit und ohne Buchsenhalter.....	44
Abbildung 4-3: Schaltung des Stators im Detail.....	44
Abbildung 4-4: Kühlmittel des Stator Kühlsystems.....	47
Abbildung 4-5: Schnitt durch das vernetzte Kühlmittel.....	48
Abbildung 4-6: Unterschiedliche Querschnitte der Übergänge in die Kühlkanäle.....	49
Abbildung 4-7: Durchfluss durch die Kanalpaare.....	49
Abbildung 4-8: Stromlinien mit farbig überlagerter Strömungsgeschwindigkeit.....	50
Abbildung 4-9: Führung des Kühlmittels am Wickelkopf der A-Lagerseite.....	51
Abbildung 4-10: Absolutdruckverteilung auf der Oberfläche.....	51
Abbildung 4-11: Verschiedene Entformschrägen der Kühlkanalkerne.....	53
Abbildung 4-12: Fünf Probekörper aufrechtstehend im Umspritzwerkzeug.....	54
Abbildung 4-13: Ausziehversuch der Werkzeugkerne.....	54
Abbildung 4-14: Ausziehkräfte verschiedener Kerndurchmesser.....	55
Abbildung 4-15: Auszugskraft eines 3mm Auswerfers.....	56
Abbildung 4-16: Verschiebung unter Drehmomenteinfluss.....	57
Abbildung 4-17: Zentrierung des Stators im Werkzeug.....	58
Abbildung 4-18: Schnittdarstellung der Auswerferpositionen.....	59
Abbildung 4-19: Drehmomentübertragung zwischen Stator und Gehäuse.....	60
Abbildung 4-20: Toleranzen der Rotorausrichtung.....	61
Abbildung 4-21: Dichtungsfunktionen zwischen Gehäuse und umspritztem Stator.....	63
Abbildung 4-22: Schnittdarstellung des Phasensteckers.....	63
Abbildung 4-23: Schnittdarstellung der Rotorbaugruppe.....	64
Abbildung 4-24: Funktionsweise der Rotorkühlung.....	65
Abbildung 4-25: Modell zur Abschätzung der Rotortemperatur.....	66
Abbildung 4-26: Stator und Gehäuse bereit zum Zusammenbau.....	67
Abbildung 4-27: Rotor und Gehäuse bereit zum Zusammenbau.....	68
Abbildung 4-28: Komplettierter Motor mit teilweise montierten Phasensteckern.....	68
Abbildung 5-1: Zahn mit ausgebauchter Wicklung.....	69
Abbildung 5-2: Pressvorrichtung für die Einzelzähne.....	70
Abbildung 5-3: Statorverschaltung und Fehlstellen der Verschweißung.....	71
Abbildung 5-4: Unterteil des Werkzeugs zur Statorumspritzung.....	72
Abbildung 5-5: Stator vor dem Umspritzen.....	72
Abbildung 5-6: Fertig umspritzter Stator.....	72
Abbildung 5-7: Abgerissene Kerne und feststeckender Stator im Werkzeug.....	73

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 5-8: Auswerferseite des Spritzgusswerkzeugs für das Gehäuse	74
Abbildung 6-1: Kunststoffschicht im Luftspalt zwischen Rotor und Stator	76
Abbildung 6-2: Zahnsegment mit Kunststoff zwischen den Einzelzähnen	77
Abbildung 6-3: Drehmomentreduktion durch zusätzlichen Luftspalt im Bereich des Jochs	78
Abbildung 6-4: Dichtungspositionen im Gesamtmotor	79
Abbildung 6-5: Abweichung zur Sollgeometrie des Stators	80
Abbildung 6-6: Abweichung zur Sollgeometrie des Gehäuses	80
Abbildung 6-7: Verformung unter Druckbeaufschlagung und Verschraubung – vergrößert dargestellt	81
Abbildung 6-8: Wickelqualitäten im Vergleich (1) Referenzgeometrie (2) most likely (3) worst case) (4) best case	82
Abbildung 6-9: Geschnittener Phasenstecker	83
Abbildung 6-10: Messaufbau der Kühlmittelverteilung	84
Abbildung 6-11: Vergleich der Kühlmittelverteilung	84
Abbildung 6-12: Pumpwirkung der Rotorkühlung über der Rotordrehzahl	85
Abbildung 6-13: Schematischer Aufbau des Elektromotors mit entsprechenden Messstellen ..	86
Abbildung 6-14: Inneres Gehäuse des Referenzmotors mit Mantelkühlung	87
Abbildung 6-15: Zusatzisolierung aus Kapton im Referenzmotor	88
Abbildung 6-16: Komplettierter Referenzmotor	88
Abbildung 6-17: Position der Temperatursensoren innerhalb des Motors	89
Abbildung 6-18: Gemessenes Wirkungsgrad Kennfeld des entwickelten Motors	90
Abbildung 6-19: Temperaturkurve bei Dauerleistung und Abkühlung	90
Abbildung 6-20: Erwärmung des Referenzmotors mit konventioneller Kühlung bei Dauerleistung	91
Abbildung 6-21: Erwärmung beider Motorkonzepte bei gleicher Leistungsabgabe	92
Abbildung 7-1: Schnittmodell des entwickelten Elektromotors	95

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1: Wärmeleitfähigkeit verschiedener Imprägnierungsharze	10
Tabelle 2-2: Typische Werte für α in verschiedenen Wärmeübergangssituationen	20
Tabelle 2-3: Isolierstoffklassen nach DIN EN 60085.....	21
Tabelle 2-4: Eigenschaften verschiedener Kühlmedien.....	29
Tabelle 2-5: Bewertung möglicher Kunststoff-Matrixmaterialien zur Umspritzung	31
Tabelle 2-6: Bewertung der Stand-der-Technik-Technologien	35
Tabelle 3-1:Hauptabmessungen und Kennwerte	42
Tabelle 4-1: Übersicht und Bewertung der Verschaltungsmöglichkeiten der Stator Kühlkanäle	46
Tabelle 4-2: Wichtigste Eigenschaften des EME A730E Statorumspritzmaterial.....	52
Tabelle 4-3: Materialeigenschaften Vyncolit BXE 7530	60
Tabelle 4-4: Toleranzkettenberechnung der Lagerung.....	62
Tabelle 4-5: Stationäre Temperaturen der 1-D Rotorsimulation.....	66
Tabelle 6-1: Dickenmessung im Rotorspalt	77
Tabelle 6-2: Gemessene elektrische Kennwerte	82
Tabelle 6-3: Temperaturunterschied für unterschiedliche Wickelqualitäten.....	83
Tabelle 6-4: Vergleich der Kühlsysteme.....	87
Tabelle 6-5: Vergleich der Entwicklungen zu kommerziell erhältlichen Motoren (Gesamtgewicht inkl. Rotorwelle, Lager und Gehäuse)	92

Literaturverzeichnis

- [1] Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz, *Elektromobilität in Deutschland*. [Online]. verfügbar unter: <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Dossier/elektromobilitaet.html> (accessed: Feb. 26 2023).
- [2] H. Fischer, *Werkstoffe in der Elektrotechnik: Aufbau, Eigenschaften, Prüfung, Anwendung*, 2nd ed. München: Hanser, 1982.
- [3] J. Rudolph, F. Lorenz, and R. Werner, "Herstellung elektrischer Motoren mittels 3D-Multimaterialdruck," *awIC*, vol. 3, 2018, doi: 10.14464/awic.v3i0.275.
- [4] M. E. Youssef *et al.*, "Slinky stator: The impact of manufacturing process on the magnetic properties," in *2017 IEEE International Electric Machines and Drives Conference (IEMDC)*, 2017, pp. 1–8.
- [5] UNITECH METALFORMING TECHNOLOGIES TAIWAN CO., LTD., *Slinky Stator*. [Online]. verfügbar unter: <http://www.umtt.com.tw/en/product-623153/Slinky-Lines-for-automotive-Generators-Cores.html>
- [6] C.-W. Chen, *Magnetism and metallurgy of soft magnetic materials*. Amsterdam: North-Holland Publ, 1977.
- [7] J. Bas, J. Calero, and M. Dougan, "Sintered soft magnetic materials. Properties and applications," *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 254-255, pp. 391–398, 2003, doi: 10.1016/S0304-8853(02)00934-4.
- [8] Munro & Associates Inc., "Twelve Motor Teardown and Benchmark Study,"
- [9] M. Doppelbauer, *Grundlagen der Elektromobilität*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2020.
- [10] E. Bolte, *Elektrische Maschinen: Grundlagen · Magnetfelder · Erwärmung · Funktionsprinzipien · Betriebsarten · Einsatz · Entwurf · Wirtschaftlichkeit*, 2nd ed. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2018. [Online]. verfügbar unter: <http://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:bsz:31-epflicht-1579646>
- [11] A. Binder, *Elektrische Maschinen und Antriebe*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2017.
- [12] A. Dobroschke, *Flexible Automatisierungslösungen für die Fertigung wickeltechnischer Produkte*. Zugl.: Erlangen-Nürnberg, Univ., Diss., 2011. Bamberg: Meisenbach, 2011.
- [13] J. Hagedorn, F. Sell-Le Blanc, and J. Fleischer, *Handbuch der Wickeltechnik für hocheffiziente Spulen und Motoren*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2016.
- [14] G. Spur, *Handbuch Fügen, Handhaben und Montieren*, 1st ed. s.l.: Carl Hanser Fachbuchverlag, 2013. [Online]. verfügbar unter: <http://www.hanser-elibrary.com/action/showBook?doi=10.3139/9783446436565>

- [15] P. Stenzel, "Großserientaugliche Nadelwickeltechnik für verteilte Wicklungen im Anwendungsfall der E-Traktionsantriebe," Dissertation, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg; Meisenbach KG.
- [16] R. Tzscheuschler, H. Olbrisch, and W. Jordan, *Technologie des Elektromaschinenbaus*, 1st ed. Berlin: Verl. Technik, 1990.
- [17] BMW Group, *BMW iX3- Stator mit Hairpins (07/2020)*. 08.07.2020 | ID: P90392882. [Online]. verfügbar unter: <https://www.press.bmwgroup.com/deutschland/photo/detail/P90392882/BMW-iX3-Stator-mit-Hairpins-07-2020> (accessed: Feb. 26 2023).
- [18] Electrolube Deutschland, "Übersichtstabellen zur Produktauswahl," Accessed: Feb. 26 2023. [Online]. verfügbar unter: https://pdf.directindustry.de/pdf/electrolube/uebersichtstabellen-zur-produktauswahl/6210-624039-_4.html
- [19] Dr. Werner Hollstein, "Thermosetting resin systems for stator encapsulation in electromobility and industrial motors,"
- [20] copaltec GmbH, "Datenblatt PUR LE26/30,"
- [21] S. Walter *et al.*, "Umweltverträgliche Harzimprägnierung elektrischer Maschinen mittels Stromwärme," Accessed: Feb. 26 2023. [Online]. verfügbar unter: https://nachhaltigwirtschaften.at/resources/fdz_pdf/endbericht_0662_harzimpraegnung.pdf
- [22] bdtronics, *Statorimprägnierung*. [Online]. verfügbar unter: <https://magneticmag.com/bdtronic-tech-center-helps-define-production-process-for-ev-manufacturer/>
- [23] S. Nategh, A. Boglietti, D. Barber, Y. Liu, and R. Brammer, "Thermal and Manufacturing Aspects of Traction Motors Potting: A Deep Experimental Evaluation," *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 35, no. 2, pp. 1026–1035, 2020, doi: 10.1109/TEC.2020.2966606.
- [24] Hans Mayer Elektrotechnik GmbH, *Bandagierter Wickelkopf*. [Online]. verfügbar unter: <https://www.mayer-elektromotoren.de/wickelei> (accessed: Feb. 26 2023).
- [25] D. Bauer, *Verlustanalyse bei elektrischen Maschinen für Elektro- und Hybridfahrzeuge zur Weiterverarbeitung in thermischen Netzwerkmodellen*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2019.
- [26] T. Dordea, I. Torac, G. Madescu, V. Proca, M. Mot, and L. Ocolisan, "The current distribution on the elementary conductors of the Roebel bar," in *2010 XIX International Conference on Electrical Machines (ICEM 2010): Rome, Italy, 6 - 8 September 2010*, Rom, It, 2010, pp. 1–5.
- [27] R. Fischer, *Elektrische Maschinen: Mit 449 Bildern, 78 Beispielen, 60 Aufgaben mit Lösungen*, 17th ed. München: Hanser, 2017. [Online]. verfügbar unter: <http://www.hanser-fachbuch.de/9783446452183>
- [28] G. Niemann, H. Winter, B.-R. Höhn, and K. Stahl, *Maschinenelemente 1: Konstruktion und Berechnung von Verbindungen, Lagern, Wellen*, 5th ed. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2019. [Online]. verfügbar unter: <http://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:bsz:31-epflicht-1496362>

- [29] E. Hering, R. Martin, M. Stohrer, H. Käß, G. Kurz, and W. Schulz, *Physik für Ingenieure*, 12th ed. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2017. [Online]. verfügbar unter: <http://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:bsz:31-epflicht-1585628>
- [30] D. Schröder, *Elektrische Antriebe*, 4th ed. Berlin: Springer, 2009.
- [31] A. R. Huber, *Rotorkühlung in hermetisch abgedichteten elektrischen Antriebsmaschinen für die Fahrzeugtechnik*. Zugl.: München, Univ. der Bundeswehr, Diss., 2015. München: Verl. Dr. Hut, 2015.
- [32] T. L. Bergman, *Introduction to heat transfer*, 6th ed. Hoboken NJ: Wiley, 2011.
- [33] BORIVOJE B. MIKIC and WARREN M. ROHSENOW, "THERMAL CONTACT RESISTANCE,"
- [34] H. Fenech and W. M. Rohsenow, "Prediction of Thermal Conductance of Metallic Surfaces in Contact," *Journal of Heat Transfer*, vol. 85, no. 1, pp. 15–24, 1963, doi: 10.1115/1.3686003.
- [35] P. Jany, G. Thieleke, and K. Langeheinecke, *Thermodynamik für Ingenieure: Ein Lehr- und Arbeitsbuch für das Studium: mit 58 Tabellen*, 8th ed. Wiesbaden: Vieweg + Teubner, 2011.
- [36] *Technische Physik*, 4th ed. Erscheinungsort nicht ermittelbar, 2006.
- [37] G. Cerbe and H.-J. Hoffmann, *Einführung in die Thermodynamik: Von den Grundlagen zur technischen Anwendung; mit 38 Tafeln, 130 Beispielen, 135 Aufgaben und 175 Kontrollfragen*, 13th ed. München, Wien: Hanser, 2002.
- [38] VDI-Gesellschaft Verfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen, *VDI-Wärmeatlas: Mit 320 Tabellen*, 11th ed. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, 2013.
- [39] VACUUMSCHMELZE GmbH & Co. KG, *Magnetsysteme / VAC*. [Online]. verfügbar unter: <https://vacuumschmelze.de/Produkte/Dauermagnete/Magnetsysteme> (accessed: Feb. 26 2023).
- [40] H. Ucar, D. S. Parker, I. C. Nlebedim, R. W. McCallum, S. K. McCall, and M. Parans Paranthaman, "Strategic coating of NdFeB magnets with Dy to improve the coercivity of permanent magnets," *Advances in materials Research*, vol. 4, no. 4, pp. 227–233, 2015, doi: 10.12989/amr.2015.4.4.227.
- [41] X. Fan, D. Li, R. Qu, C. Wang, and H. Fang, "Water Cold Plates for Efficient Cooling: Verified on a Permanent-Magnet Machine With Concentrated Winding," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 67, no. 7, pp. 5325–5336, 2020, doi: 10.1109/TIE.2019.2927181.
- [42] M. Schiefer, *Indirekte Wicklungskühlung hochausgenutzter permanenterregter Synchronmaschinen mit Zahnspulenwicklung*. Zugl.: Karlsruhe, KIT, Diss., 2017: Karlsruher Institut für Technologie (KIT). [Online]. verfügbar unter: <https://publikationen.bibliothek.kit.edu/1000076110>
- [43] A. Acquaviva, S. Skoog, and T. Thiringer, "Design and Verification of In-Slot Oil-Cooled Tooth Coil Winding PM Machine for Traction Application," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 68, no. 5, pp. 3719–3727, 2021, doi: 10.1109/TIE.2020.2985009.
- [44] C. Rhebergen, B. Bilgin, A. Emadi, E. Rowan, and J. Lo, "Enhancement of electric motor thermal management through axial cooling methods: A materials approach," in *2015 IEEE*

- Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, Montreal, CAN, Sep. 2015 - Sep. 2015, pp. 5682–5688.
- [45] S. A. Semidey and J. R. Mayor, "Experimentation of an Electric Machine Technology Demonstrator Incorporating Direct Winding Heat Exchangers," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 61, no. 10, pp. 5771–5778, 2014, doi: 10.1109/TIE.2014.2303779.
- [46] S. Andrew Semidey, "Thermal design and optimization of high torque density electric machines," Phd. Thesis, G. W. Woodruff School of Mechanical Engineering.
- [47] W. Sixel, M. Liu, G. Nellis, and B. Sarlioglu, "Cooling of Windings in Electric Machines via 3-D Printed Heat Exchanger," *IEEE Trans. on Ind. Applicat.*, vol. 56, no. 5, pp. 4718–4726, 2020, doi: 10.1109/TIA.2020.2997902.
- [48] Prof. Dr. Dipl.-Ing. Edmund Nitsche and Mag. Michael Naderer, "Innengekühlte Hohldrähte: Verdopplung der Leistungsdichte von E-Motoren," *ATZ elektronik*, vol. 12, pp. 44–49, Mrz. 2017.
- [49] I. Petrov, P. Lindh, M. Niemela, E. Scherman, O. Wallmark, and J. Pyrhonen, "Investigation of a Direct Liquid Cooling System in a Permanent Magnet Synchronous Machine," *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 35, no. 2, pp. 808–817, 2020, doi: 10.1109/TEC.2019.2952431.
- [50] P. Lindh, I. Petrov, J. Pyrhonen, E. Scherman, M. Niemela, and P. Immonen, "Direct Liquid Cooling Method Verified With a Permanent-Magnet Traction Motor in a Bus," *IEEE Trans. on Ind. Applicat.*, vol. 55, no. 4, pp. 4183–4191, 2019, doi: 10.1109/TIA.2019.2908801.
- [51] Rheinmetall Automotiv, "Kühlmittelpumpen," Accessed: Feb. 26 2023. [Online]. verfügbar unter: <https://www.rheinmetall-automotive.com/systeme-produkte/pkw/pumpen/kuehlmittelpumpen/#c80450>
- [52] C. Wohlers, P. Juris, S. Kabelac, and B. Ponick, "Design and direct liquid cooling of tooth-coil windings," (in En;en), *Electr Eng*, vol. 100, no. 4, pp. 2299–2308, 2018, doi: 10.1007/s00202-018-0704-x.
- [53] T. Davin, J. Pellè, S. Harmand, and R. Yu, "Experimental study of oil cooling systems for electric motors," *Applied Thermal Engineering*, vol. 71, no. 1, p. 607, 2014, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2014.05.021.
- [54] Lucid Motors AG, "Tech Talks Drive Unit: Motor," [Online]. verfügbar unter: <https://www.youtube.com/watch?v=U7IHZxNC6hc&t=2141s>
- [55] Z. Liu, T. Winter, and M. Schier, "Direct Coil Cooling of a High Performance Switched Reluctance Machine (SRM) for EV/HEV Applications," *SAE Int. J. Alt. Power.*, vol. 4, no. 1, pp. 162–169, 2015, doi: 10.4271/2015-01-1209.
- [56] Z. Xu *et al.*, "A semi-flooded cooling for a high speed machine: Concept, design and practice of an oil sleeve," in *A semi-flooded cooling for a high speed machine: Concept, design and practice of an oil sleeve: China National Convention Center, Beijing, China, 29 October-01 November, 2017*, Beijing, 2017, pp. 8557–8562.

- [57] P. Zhou, N. R. Kalayjian, G. D. Cutler, and P. K. Augenbergs, "Liquid cooled rotor assembly," US7489057B2.
- [58] A. M. EL-Refaié *et al.*, "Advanced High-Power-Density Interior Permanent Magnet Motor for Traction Applications," *IEEE Trans. on Ind. Applicat.*, vol. 50, no. 5, pp. 3235–3248, 2014, doi: 10.1109/TIA.2014.2305804.
- [59] Wikipedia, *Eigenschaften des Wassers*. [Online]. verfügbar unter: https://de.wikipedia.org/wiki/Eigenschaften_des_Wassers (accessed: Feb. 26 2023).
- [60] pro KÜHLSOLE GmbH, "Glykosol_N_Datenblatt_D_04_21,"
- [61] 3M Deutschland GmbH, "3M_Novec_7300_Datenblatt_0919,"
- [62] G. Erhard, *Konstruieren mit Kunststoffen*, 4th ed. München: Hanser Verlag, 2008. [Online]. verfügbar unter: <http://www.hanser-elibrary.com/isbn/9783446416468>
- [63] *Konstruieren mit Faser-Kunststoff-Verbunden* | SpringerLink. [Online]. verfügbar unter: <https://link.springer.com/book/10.1007%2F978-3-540-72190-1> (accessed: Feb. 20 2021).
- [64] F. Henning and E. Moeller, *Handbuch Leichtbau: Methoden, Werkstoffe, Fertigung*, 2nd ed. München, Wien: Hanser, 2020.
- [65] P. Eyerer, Ed., *Polymer Engineering: Technologien und Praxis ; mit 155 Tabellen*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2008. [Online]. verfügbar unter: http://digitale-objekte.hbz-nrw.de/webclient/DeliveryManager?pid=2841995&custom_att_2=simple_viewer
- [66] K. C. Yung and H. Liem, "Enhanced thermal conductivity of boron nitride epoxy-matrix composite through multi-modal particle size mixing," *J. Appl. Polym. Sci.*, vol. 106, no. 6, pp. 3587–3591, 2007, doi: 10.1002/app.27027.
- [67] Martin Schößler, "Composite eAxle – Efficiency increase through smart materials," Nov. 24 2021.
- [68] B. Ellis, *Chemistry and Technology of Epoxy Resins*, 1st ed. Dordrecht: Springer Netherlands; Imprint Springer, 1993.
- [69] L. M. McGrath, R. S. Parnas, S. H. King, J. L. Schroeder, D. A. Fischer, and J. L. Lenhart, "Investigation of the thermal, mechanical, and fracture properties of alumina–epoxy composites," *Polymer*, vol. 49, no. 4, pp. 999–1014, 2008, doi: 10.1016/j.polymer.2007.12.014.
- [70] V. D. ETG, Ed., *Influence of lightweight plastic stator housing on the NVH behavior of high-performance electric machines: Electromechanical Drive Systems 2021 9.– 10. November 2021, München*. Berlin: VDE Verlag, 2021. [Online]. verfügbar unter: http://www.content-select.com/index.php?id=bib_view&ean=9783800756872
- [71] *IEEE Recommended Practice for Testing Insulation Resistance of Rotating Machinery*, 43-2000, IEEE Industrial Electronics Society.
- [72] F. D'Errico, *Material Selections by a Hybrid Multi-Criteria Approach*. Cham: Springer International Publishing, 2015.

- [73] DODUCO GmbH, *Faustregeln für die Kontaktdimensionierung*. [Online]. verfügbar unter: https://www.electrical-contacts-wiki.com/index.php/Faustregeln_f%C3%BCr_die_Kontaktdimensionierung (accessed: Feb. 26 2023).
- [74] Trelleborg Sealing SoluTionS, "Turcon® Varilip® PDR,"
- [75] *Drehende elektrische Maschinen: Teil 1: Bemessung und Betriebsverhalten*, 0530-1:2011-02, VDE.

Eigene Veröffentlichungen

- [76] A. Langheck, C. Digel, J. Liebertseder, S. Reuter, and M. Doppelbauer, "Vibration Optimization in High Power Electric Machines with Lightweight Plastic Stator Housing," in *2022 International Conference on Electrical Machines (ICEM): 5-8 Sept. 2022*, Valencia, Spain, 2022, pp. 2214–2220.
- [77] A. Langheck *et al.*, "Evaluation of an Integral Injection Molded Housing for High Power Density Synchronous Machines with Concentrated Single-Tooth Winding," in *2018 8th International Electric Drives Production Conference (EDPC)*, Schweinfurt, Germany, 2018, pp. 1–6.
- [78] S. Reuter, H. de Keyser, and M. Doppelbauer, "Performance study of a PMSM with molded stator and composite housing With internal slot cooling – resulting in high continuous power," in *VDI-Berichte*, vol. 2373, *Dritev - Drivetrain for Vehicles 2020: 24. und 25. Juni 2020*, 1st ed., Düsseldorf: VDI Verlag, 2020, II-17-II-32.
- [79] S. Reuter, L. F. Berg, and M. Doppelbauer, "Performance evaluation of a high-performance motor with thermoset molded internal cooling," in *2021 11th International Electric Drives Production Conference (EDPC)*, Erlangen, Germany, Dez. 2021 - Dez. 2021, pp. 1–5.
- [80] S. Reuter, A. Langheck, J. Liebertseder, and M. Doppelbauer, "Influence of lightweight plastic stator housing on the NVH behavior of high-performance electric machines," in *ETG-Fachbericht*, 164, CD-ROM, *Elektromechanische Antriebssysteme 2021: Beiträge der ETG-Fachtagung 9.-10. November 2021, Electromechanical Drive Systems 2021*, A. Binder, M. Doppelbauer, and H. Neudorfer, Eds., Berlin, Offenbach: VDE VERLAG GMBH, 2021.
- [81] S. Reuter, T. Sorg, J. Liebertseder, and M. Doppelbauer, "Design and Evaluation of a Houseless High-Performance Machine with Thermoset Molded Internal Cooling," in *2021 11th International Electric Drives Production Conference (EDPC)*, Erlangen, Germany, Dez. 2021 - Dez. 2021, pp. 1–6.

Betreute studentische Arbeiten

- [82] T. Sorg, "Konzeptionierung eines gehäuselosen Elektromotors mit innenliegender Kühlung," Masterarbeit, 2020.
- [83] C. Stemmler, "Designverifikation eines innovativen Elektromotors mit innenliegender Kühlung und integralem Kunststoffgehäuse mit Hilfe eines Funktionsprototypen," Masterarbeit 2020.
- [84] L. John, "Entwicklung eines Kunststoffumspritzten Elektromotors mit additiv gefertigten Kühlkanälen," Masterarbeit, 2022.