

Förderprogramm:

Forschung für die Produktion von morgen

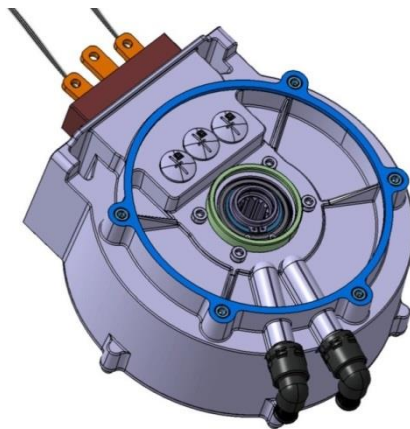
Förderschwerpunkt:

Serienflexible Technologien
für elektrische Antriebe von Fahrzeugen
Elektrische Antriebe

Verbundprojekt:

Großserientaugliches Herstellverfahren
für neuartige elektrische **Axialflussmotoren**
(GroAx)

Gemeinsamer Abschlussbericht
der
Projektpartner



Inhaltsverzeichnis

1	Projektüberblick GroAx	5
1.1	Förderhinweis	5
1.2	Förderprogramm „Innovationen für Produktion, Dienstleistung und Arbeit von morgen“	6
1.3	Themenfeld „Elektromobilität“	6
1.4	Bekanntmachung „Serienflexible Technologien für elektrische Antriebe von Fahrzeugen – Elektrische Antriebe“	7
1.5	Verbundprojekt „Großserientaugliches Herstellverfahren für neuartige elektrische Axialflussmotoren“ – GroAx	7
1.5.1	Problemstellung	7
1.5.2	Projektziele und Vorgehensweise	8
1.5.3	Ergebnisse und Anwendungspotenzial	8
1.6	Ausgangslage	9
1.7	Basisprinzip Transversalfusstechnologie	11
1.8	Projektüberblick	12
1.8.1	Zusammensetzung Projektpartner	12
1.8.2	Compact Dynamics GmbH	13
1.8.3	CirComp GmbH	13
1.8.4	Schwarzpunkt Schwarz GmbH & Co KG	14
1.8.5	MS Schramberg GmbH & Co. KG	14
1.8.6	Hochschule Landshut	15
1.8.7	Institut für Verbundwerkstoffe GmbH	15
1.8.8	TU Chemnitz	16
1.9	Aufgabenstellungen	17
1.9.1	Arbeitspaket 1 – Herstellung einer Tangentialwicklung in einem möglichst durchgängigen Fertigungsprozess (Compact Dynamics GmbH)	17
1.9.2	Arbeitspaket 2 – Herstellung eines Rotors im 3D-Nasswickelverfahren (IVW GmbH / Circomp GmbH)	17
1.9.3	Arbeitspaket 3 – Duroplastische Statorumspritzung (TU Chemnitz)	17
1.9.4	Arbeitspaket 4 – Aufgabenstellung Compact Dynamics GmbH	18
1.9.5	Arbeitspaket 5 – Herstellung eines Magnettrings in Form eines Komplettrings (MS Schramberg GmbH & Co. KG)	20
1.9.6	Arbeitspaket 6 – Projekt SERAX: Sensorlose Regelung (Hochschule Landshut)	20
2	Voraussetzung unter der das Vorhaben durchgeführt wurde (z.B. Ressourcen, Einbindung in die Unternehmensstrategie, Vorarbeiten und Vorkenntnisse, etc.)	21
2.1	Bisherige Arbeiten der Antragsteller	21
2.1.1	Compact Dynamics GmbH	21
2.1.2	CirComp GmbH	21
2.1.3	Institut für Verbundwerkstoffe GmbH	22
2.1.4	Schwarzpunkt Schwarz GmbH & Co. KG	23
2.1.5	TU Chemnitz	23
2.1.6	MS Schramberg GmbH & Co. KG	23
2.1.7	Hochschule Landshut	23
3	Wissenschaftlicher Stand	25
3.1	Wissenschaftlicher und technischer Stand zu Beginn des Vorhabens	25
3.1.1	Genereller Überblick Elektromotoren, insbesondere Transversalfussmotor DYNAX®	25
3.1.2	Arbeitspaket 1 – Herstellung einer Tangentialwicklung	25
3.1.3	Arbeitspaket 2 – Herstellung eines Rotors	25
3.1.4	Arbeitspaket 3 – Umspritzung des Stators	27
3.1.5	Arbeitspaket 4 – Herstellung eines Statorträgers / Statorkühlers	27
3.1.6	Arbeitspaket 5 – Herstellung von Magnetringen	30

	3.1.6.1	Magnete	30
	3.1.6.2	Magnetringe.....	30
	3.1.7	Arbeitspaket 6 – Motorregelung	31
	3.1.7.1	Regelung elektrischer Antriebe generell	31
	3.1.7.2	Sensorlose Motorregelung	32
	3.1.8	Arbeitspaket 7 – Fertigungsplanung.....	32
	3.1.9	Arbeitspaket 8 - Projektmanagement.....	32
	3.2	wissenschaftlicher und technischer Stand zum Ende des Vorhabens	33
4		Planung und Ablauf des Vorhabens (z.B. Planabweichung, Probleme bei der Durchführung, etc.)	34
	4.1	ursprüngliche Planung	34
	4.2	Abweichungen im Zeitplan.....	34
	4.2.1	Arbeitspaket 1: Herstellung und Konfektionierung der Tangentialwicklung möglichst in einem kontinuierlichen Prozess.....	35
	4.2.2	Arbeitspaket 2: Herstellung von Rotor aus GFK-Laminat im 3D-Wickelverfahren ..	35
	4.2.3	Arbeitspaket 3: Umspritzung Stator mittels Duroplast-Spritzgiesswerkzeug.....	35
	4.2.4	Arbeitspaket 4: Kühler aus gerollten Strangpressprofilen.....	38
	4.2.5	Arbeitspaket 5: Rotormagnete als Kompletring, Magnetisierungstechnik, MagFine- Magnete	38
	4.2.6	Arbeitspaket 6: Sensorlose Motorregelung	38
	4.2.7	Arbeitspaket 7: Fertigungsplanung.....	38
	4.2.8	Arbeitspaket 8: Projektmanagement	38
5		Erzielte Ergebnisse	39
	5.1	Arbeitspaket 1 – Herstellung einer Tangentialwicklung	39
	5.1.1	Auswahl des Litzenmaterials / Isolation der Litze	40
	5.1.2	Kontaktierung der Litze	41
	5.1.2.1	Entlacken der Hochfrequenzlitze	41
	5.1.2.2	Ultraschallschweißen	41
	5.1.2.3	Widerstandssschweißen	42
	5.1.2.4	Tauchbadlöten.....	43
	5.1.3	Spezifikation Litze und Stromschienen.....	43
	5.1.4	Konstruktionszeichnungen Wicklung.....	46
	5.2	Arbeitspaket 2 Herstellung eines Rotors im 3D-Nasswickelverfahren	49
	5.2.1	Ergebnisse IVW:	49
	5.2.2	Ergebnisse CirComp GmbH.....	54
	5.2.2.1	Entwicklung des 3D Wickelverfahrens, Herstellung und Verifizierung Funktionsmustern, Erste Entwicklungsschleife	55
	5.2.2.2	Entwicklung des 3D Wickelverfahrens, Herstellung und Verifizierung Funktionsmustern, Optimierungsschleife	57
	5.2.3	Meilenstein: Funktionsmuster Faserverbund Rotorglocke	59
	5.2.3.1	Entwicklung und Fertigung von Fertigungsvorrichtungen für erste Funktionsmuster.....	60
	5.2.3.2	Entwicklung und Fertigung von Fertigungsvorrichtungen für Musterglocken zur Qualifizierung	61
	5.2.3.3	Meilenstein: Musterglocke für Qualifizierung	63
	5.2.3.4	Entwicklung zur Herstellung von Qualifizierungsmustern	63
	5.2.4	Weiterführende Tätigkeiten	67
	5.2.5	Abschluss Bemerkung	67
	5.3	Arbeitspaket 3 – duroplastischer Verguss des Statorträgers.....	68
	5.3.1	Grundlagenuntersuchung zum Umspritzen der Statorgeometrie	68
	5.3.2	Optimierung des derzeitigen Vakuumvergusses	74
	5.4	Arbeitspaket 4 – Herstellung eines Statorträgers mit integrierter Kühlfunktion	82
	5.4.1	Herstellung eines Statorkühlers aus aluplattiertem Ferranblech.....	83

5.4.2	Herstellung einer Lötverbindung zwischen Statorträger und Statorpaket	85
5.4.2.1	Lötversuche in der Dampfphasenlötanlage	88
5.4.2.2	Kontaktlötung.....	89
5.4.2.3	Fluidlötung	91
5.5	Arbeitspaket 5 – Herstellen von Magnetrings als Komplettring	93
5.5.1	Compounds	93
5.5.2	Einstufiges Pressverfahren	94
5.5.3	Zweistufiges Pressverfahren.....	95
5.6	Arbeitspaket 6 – Sensorlose Motorregelung	99
5.6.1	Teilpaket 6.1:	99
	Stabilitätsnachweis für die sensorlose Regelung im oberen Drehzahlbereich	99
5.6.2	Teilpaket 6.2: Untersuchung eines Konzeptes für die sensorlose Regelung im unteren Drehzahlbereich.....	99
5.6.3	Teilpaket 6.3: Implementierung der sensorlosen Regelung für den vollständigen Drehzahlbereich.....	100
5.6.4	Teilpaket 6.4: Test und Optimierung am Prüfstand	101
5.7	Erzieltes Ergebnis.....	102
5.8	Arbeitspaket 7 – Produktionsplanung.....	105
5.8.1	Ergebnis:	105
6	Nutzen für das Unternehmen, insbesondere Verwertbarkeit des Ergebnisses	108
6.1	Compact Dynamics GmbH	108
6.2	CirComp GmbH	109
6.3	Institut für Verbundwerkstoffe	109
6.4	MS Schramberg GmbH & Co. KG.....	109
6.5	TU Chemnitz.....	109
7	Zusammenarbeit mit anderen Stellen oder außerhalb des Verbundprojektes (Schulung, Beratung, Erfahrungsaustausch u. a.).....	111
7.1	Konsortium	111
7.2	Compact Dynamics GmbH	111
7.3	Institut für Verbundwerkstoffe	111
7.4	TU Chemnitz.....	111
8	Darstellung des während des Vorhabens bekannt gewordenen Fortschritts auf diesem Gebiet bei anderen Stellen.....	113
9	Veröffentlichungen, Vorträge, Referate, etc.	114
9.1	Compact Dynamics GmbH	114
9.2	CirComp GmbH	114
9.3	Institut für Verbundwerkstoffe	114
9.4	TU Chemnitz.....	114

1 Projektüberblick GroAx

1.1 Förderhinweis

Dieses Forschungs- und Entwicklungsprojekt wird/ wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) im Rahmenkonzept „Innovationen für die Produktion, Dienstleistung und Arbeit von morgen“ gefördert und vom Projektträger Karlsruhe (PTKA) betreut. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

BETREUT VOM



PTKA
Projektträger Karlsruhe
Karlsruher Institut für Technologie

1.2 Förderprogramm „Innovationen für Produktion, Dienstleistung und Arbeit von morgen“

Eine leistungsfähige Produktion ist und bleibt für eine moderne Volkswirtschaft wie Deutschland unverzichtbar. Das verarbeitende Gewerbe als tragende Säule der deutschen Wirtschaft muss sich deshalb stets neuen Anforderungen stellen, um Deutschlands Spitzenposition auf dem Weltmarkt zu halten.

Das BMBF-Programm "Innovationen für Produktion, Dienstleistung und Arbeit von morgen" unterstützt insbesondere im Produktionsbereich gezielt technologische und organisatorische Spitzenleistungen. Mit der Entwicklung neuer Produktionstechnologien und -systemen werden die Voraussetzungen für die Zukunft der Produktion in Deutschland und den technischen Vorsprung für mehr Kundenindividualität, Ressourcenschonung und Zuverlässigkeit geschaffen.

1.3 Themenfeld „Elektromobilität“

Die größte technologische Herausforderung der Automobilindustrie weltweit ist die langfristige Sicherung einer umweltverträglichen individuellen Mobilität. Elektrofahrzeuge sind hier eine Option, da sie das gesamte Spektrum erneuerbarer Energien nutzen und in erster Linie in urbanen Ballungsräumen die lokalen Schadstoff- und Lärmemissionen senken.

Die deutsche Automobilindustrie hat auf Grund ihrer technologischen Kompetenz die Chance, sich langfristig einen weltweiten Spitzenplatz auf diesem hoch kompetitiven Zukunftsmarkt zu sichern. Jetzt kommt es darauf an, rasch energieeffiziente, ressourcenschonende, leistungsfähige und vor allem wirtschaftliche Technologien zur Herstellung von Komponenten für Elektrofahrzeuge zu entwickeln und diese für eine Einführung in signifikanten Stückzahlen in den Markt vorzubereiten.

1.4 Bekanntmachung „Serienflexible Technologien für elektrische Antriebe von Fahrzeugen – Elektrische Antriebe“

Wegen des steigenden Bedarfs an Lösungen für die Elektromobilität, der wachsenden Ansprüche an elektrische Antriebe sowie der damit einhergehenden Herausforderungen hinsichtlich der Reduzierung von Produktions- und Herstellkosten ergibt sich die Notwendigkeit einer umfassenden Weiterentwicklung und Optimierung der Funktion elektrischer Antriebe und entsprechender Produktionsprozesse. Insbesondere der automobiler Einsatz stellt umfassende Anforderungen an Qualität, Leistungsdichte und Funktionssicherheit elektrischer Antriebe. Dabei müssen auf Grund unterschiedlicher Antriebsvarianten verschiedenste Applikationsbereiche berücksichtigt werden. Deshalb unterstützt das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) die Entwicklung neuer innovativer Antriebe.

Großserienfähige Wickel-, Schneid- und Paketiertechnologien und deren automatisierte Umsetzung für die Herstellung von Elektromotoren stehen in folgenden Projekten im Vordergrund: **ProStar**, **AnStrom**, **HeP-E** und **PriMa3D**. Dabei geht es auch um stückzahlflexible und wirtschaftliche Produktionsprozesse für neue elektrische Antriebe.

Die gesamte Fertigungskette der Motoren wird in den Projekten **SeRiel**, **GroAx**, **ESKAM** und **PriMa3D** untersucht und verbessert, wobei es sich im Projekt PriMa3D und GroAx um spezielle Fertigungsverfahren handelt.

Die großserienfähige Kontaktierungsverfahren und fertigungsgerechte, automatisierbare Mess- und Prüftechnologien werden im Projekt **HeP-E** untersucht.

Die Projekte werden unterstützt durch die Innovationsplattform **Effizienzfabrik - E-Antrieb**. So sollen die Ergebnisse der sieben o. g. Verbundprojekte gebündelt in die Breite der Industrie getragen werden.

Im Ergebnis der Projekte werden produzierende Unternehmen fortan dabei unterstützt, serienfähige, wirtschaftliche Technologien und Ausrüstungen für elektrische Antriebe zu entwickeln. Diese sollen es z. B. erlauben, kleinste Serien von Elektromotoren und Antriebsaggregaten sowie deren Subsysteme auf eine Großserienproduktion hoch zu skalieren oder auch eine Mischproduktion realisieren zu können. Die Leistungsfähigkeit und Produzierbarkeit elektrischer Antriebe und entsprechender Subsysteme für zukünftige Fahrzeuggenerationen wird am Ende der Projekte anhand von Demonstratoren gezeigt.

1.5 Verbundprojekt „Großserientaugliches Herstellverfahren für neuartige elektrische Axialflussmotoren“ – GroAx

Das Verbundprojekt setzt sich zum Ziel die Fertigung eines neuartigen Elektromotors in eine kostengünstige Serienfertigung zu überführen. Der so genannte Axialflußmotor besticht durch seine geringe Betriebsspannung und einen einfachen Aufbau der Kupferwicklungen. Er wird allerdings bisher lediglich in kleinen Stückzahlen mit geringem Automatisierungsgrad aufgebaut. Im Projekt soll der Motor fertigungsgerecht und kostengünstig ausgelegt und die dafür erforderlichen Prozesse und Anlagen bereitgestellt und untersucht werden.

1.5.1 Problemstellung

Ein Kostentreiber bei den bisher angedachten Elektrofahrzeugen sind die Schutzmaßnahmen, die wegen der hohen Batteriespannungen, typischerweise im Bereich von 300-600 Volt, aus Sicherheitsgründen erforderlich sind.

Ein neuartiger, sogenannter Axialflussmotor bietet allerdings durch seine innovative Bauweise und seine hohe Effizienz die Möglichkeit, ihn im Niederspannungsbereich unter 60 Volt zu betreiben, so dass besondere

Schutzmaßnahmen entfallen können. Bei einem Axialflussmotor verläuft der magnetische Fluß, im Gegensatz zu konventionellen Elektromotoren, nicht quer sondern parallel zur Drehachse. Dies ermöglicht gleichzeitig einen einfachen Aufbau der Kupferwicklungen. Komplexität und Kosten lassen sich dadurch erheblich reduzieren. Gleichzeitig ist der Motor relativ kompakt. Prototypen des neuartigen Axialflussmotors sind bislang erfolgreich in verschiedenen Elektrofahrzeugen getestet worden. Zurzeit werden diese Motoren in Kleinserien vorwiegend handgefertigt. Die Fertigungsverfahren sind für größere Stückzahlen und Lose jedoch nicht geeignet.

1.5.2 Projektziele und Vorgehensweise

Im Forschungsprojekt GroAx sollen vorhandene Fertigungsschritte durch solche großseriengerechte Prozesse ersetzt werden, die für eine wirtschaftliche Produktion der Axialflussmotoren notwendig sind. Verbunden sind damit auch neue Möglichkeiten zur Gestaltung von Baugruppen und Komponenten des Motors, deren Funktionsfähigkeit im Projekt getestet wird. Im Projekt werden großseriengerechte Prozesse für die Herstellung von Motorgehäuse, Stator und Rotor entwickelt. Unter anderem wird ein innovatives dreidimensionales Wickelverfahren zur Herstellung der Rotorglocke erarbeitet. Dieses ersetzt das derzeit eingesetzte, arbeitsaufwändige Laminierverfahren, bei dem viele vorgefertigte Bauteile positioniert und unter Druck mit Harz vergossen werden. Darüber hinaus ist der Ersatz der sensorgestützten Regelung durch eine sensorlose vorgesehen. Unter Berücksichtigung der erarbeiteten Fertigungsoptimierungen soll eine Planung für eine Fertigung mit einer Kapazität von 50.000 Stück pro Jahr erstellt werden.

1.5.3 Ergebnisse und Anwendungspotenzial

Die im Projekt GroAx entwickelten Verfahren ermöglichen eine Großserienfertigung des Axialflussmotors und lassen gleichzeitig eine Reduktion der Herstellkosten um über 60 Prozent, bei optimierten technischen Eigenschaften, erwarten. Dadurch wird der angestrebte Einsatz des Axialflussmotors in großen Stückzahlen in leichten Elektrofahrzeugen realistisch. Hierzu gehören beispielsweise PKW, Zweiräder und leichte Lieferfahrzeuge. Ebenso kann er als elektrischer Antrieb für Nebenaggregate bei Bau- und Landmaschinen dienen. Insbesondere für kleinere Versionen besteht eine breite Einsatzmöglichkeit bei vielen, auch nicht mobilen Antriebs- und Stellaufgaben.

Um diese Märkte zu erschließen, arbeitet der Konsortialführer eng mit mehreren deutschen OEM zusammen.

1.6 Ausgangslage

Die Firma Compact Dynamics GmbH hat ein neuartiges elektrisches Antriebssystem entwickelt, bestehend aus einem 3-phasigen permanentenregten Elektromotor auf Basis einer Transversalflussmaschine mit integrierter Leistungselektronik.

Der Produktname dieser Entwicklungsbasis lautet DYNAX® MGi 25-48 (vorher DYNAX® 60i).

Besondere Kennzeichen dieses Motortyps gegenüber den Standardelektromotoren sind die Tangentialwicklung des Stators, damit der Verzicht auf raumfordernde Wickelköpfe bei der elektrischen Verschaltung, eine extrem einfache Bauart sowie die Integration der Leistungselektronik, die aber in diesem Projekt keine Betrachtung findet.

Dies ermöglicht eine sehr kompakte Bauweise. Die existierenden Prototypen erzielen bei einem Gewicht von ca. 12 kg ein maximales Drehmoment von 75 Nm und eine Dauerleistung von 20 kW bei einer Betriebsspannung von 42 V bis 58 V.

Übliche Elektromotoren dieser Leistungsklasse sind mehr als doppelt so schwer und benötigen mindestens das doppelte Bauvolumen.

Bei Abgabe der vollen Leistung wird beim DYNAX® MGi25-48 ein Wirkungsgrad von über 90 % erzielt. Eine weitere Besonderheit ist, dass durch lediglich Veränderung der Wicklung der gleiche Elektromotor auch für die Spannungslage von > 60V umgerüstet werden kann bzw. durch Anpassung von Durchmesser oder aktiver Länge auch andere Leistungsklassen erschließen kann.

Antriebe für leichte Elektrofahrzeuge haben folgende Anforderungen:

- geringes Gewicht
- geringer Bauraum
- hohe Leistung und Drehmoment bei hohem Wirkungsgrad
- gute Entwärmung
- hohe Industrialisierbarkeit

Die Antriebe müssen in verschiedenen Motortopologien eingesetzt werden können.

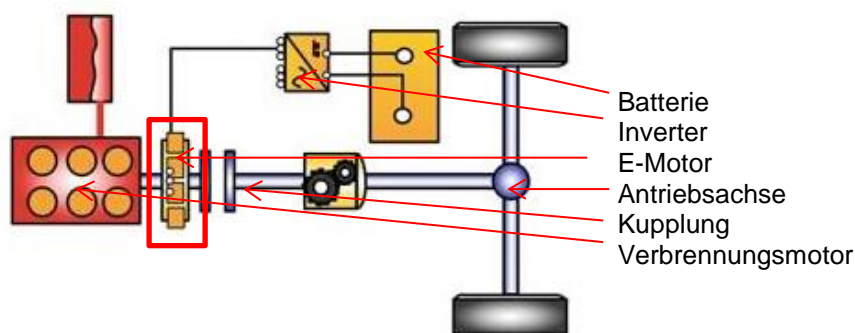


Abbildung 1: P1-Hybrid

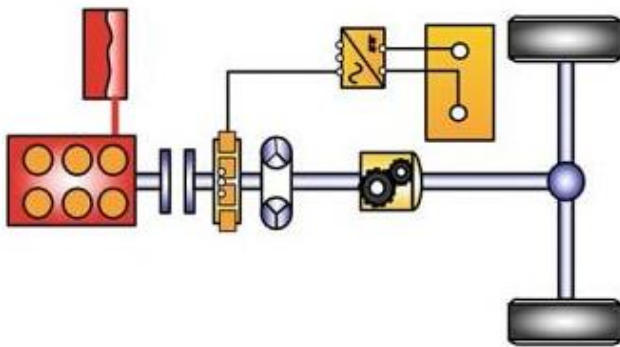


Abbildung 2: P2-Hybrid

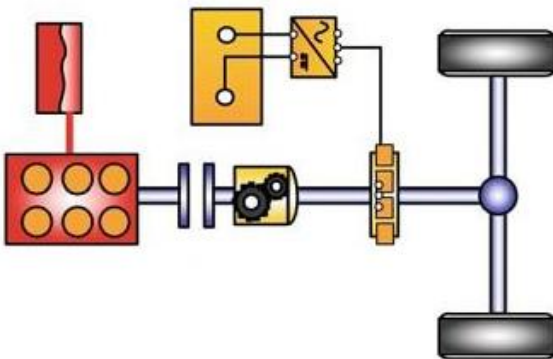


Abbildung 3: P3-Hybrid

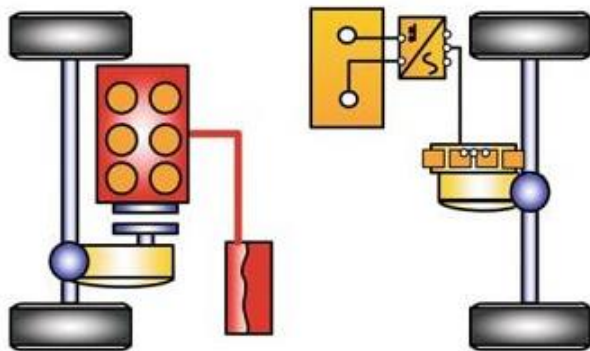


Abbildung 4: P4-Hybrid

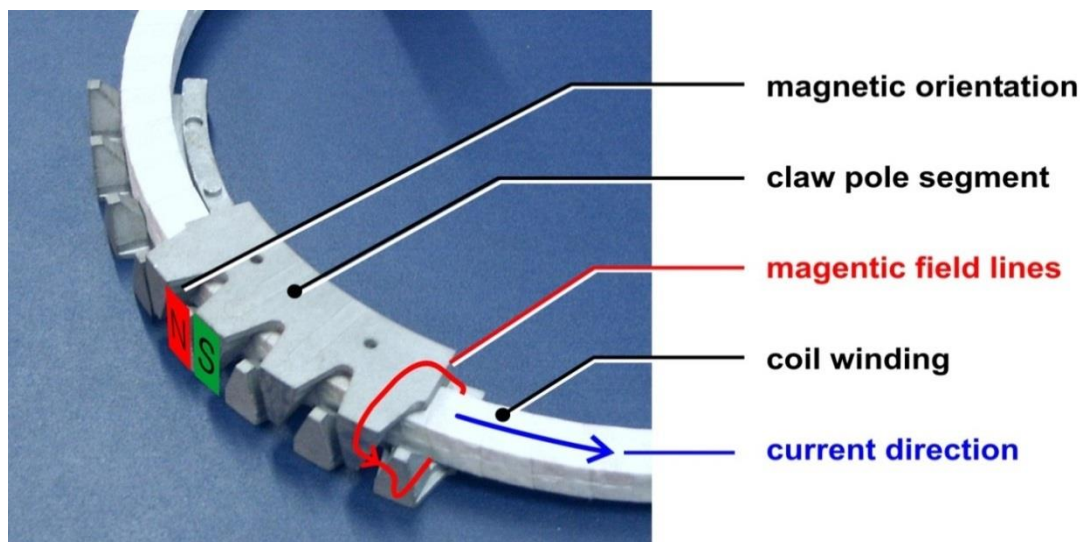
Bezeichnung	Weitere Bezeichnung	Beschreibung	Elektrische Fahrt	Regeneratives Bremsen
Start-Stopp-System	3S	Verstärkter Starter, geeignet für häufigen Start-Stopp-Betrieb	Nein	Nein
P1	BSG, RSG, ISG, Mikro-Hybrid, Mild-Hybrid	Elektrische Maschine am Verbrennungsmotor	Nein	Gering
P2	P2-HEV	Elektrische Maschine zwischen Verbrennungsmotor und Getriebe	Ja	Gut
P3	TS-HEV	Elektrische Maschine am oder hinter dem Getriebe	Ja	Gut
P4	AS-HEV	Elektrische Maschine an der zweiten Achse	Ja	Sehr gut

Abbildung 5: Übersicht Motortopologien

1.7 Basisprinzip Transversalflusstechnologie

Das Basisprinzip des Transversalflusstromotors schien hierbei das am Vielversprechendsten, um die verschiedenen Motortopologien abzubilden. Dieses Prinzip wurde von einer primär langsam drehenden Maschine mit hohem Drehmoment abgeleitet und entscheidend weiter entwickelt.

Diese Entwicklungsschritte sind von Patenten abgesichert.


Abbildung 6: Prinzip Transversalflusstechnologie Compact Dynamics

Unter Einsatz modernster Simulationstools, eigenem Know-how und neuester Werkstoffe kann Compact Dynamics auf dieser Basis leichte und leistungsstarke Elektromotoren entwickeln, die ca. 30% mehr Drehmoment bei gleichem Bauraum erreichen und nur die Hälfte des Gewichtes von Radialflusstromotoren haben.

Das Gesamtziel des Vorhabens „Großserientaugliche Herstellverfahren für neuartige elektrische Axialflusstromotoren“ war, im Rahmen vom Förderschwerpunkt „Serienflexible Technologien für elektrische Antriebe von Fahrzeugen – Elektrische Antriebe“ das vorentwickelte Motorkonzept DYNAX® soweit zu

optimieren, dass am Ende des Verbundprojektes eine serientaugliche, leistungsfähige, prozesssichere, kostengünstige und qualitativ hochwertige Entwicklungsbasis zur Verfügung steht. Hierfür mussten Optimierungen an den Einzelbestandteilen des Motorkonzepts durchgeführt und diese zum Ende des Projektes zusammengeführt werden. Die Arbeit an den Einzelbestandteilen wurde in Arbeitspakete untergliedert.

Compact Dynamics hatte die Projektleitung des Verbundprojekts.

1.8 Projektüberblick

Das Projekt begann am 01.09.2012 und endete nach Verlängerung am 31.05.2015. Die Gesamtprojektsomme betrug ca. 2.2 Mio. €.

Das Projekt wurde durch das BMBF im Rahmen des Programmes „Forschung für die Produktion von morgen“ gefördert.

1.8.1 Zusammensetzung Projektpartner

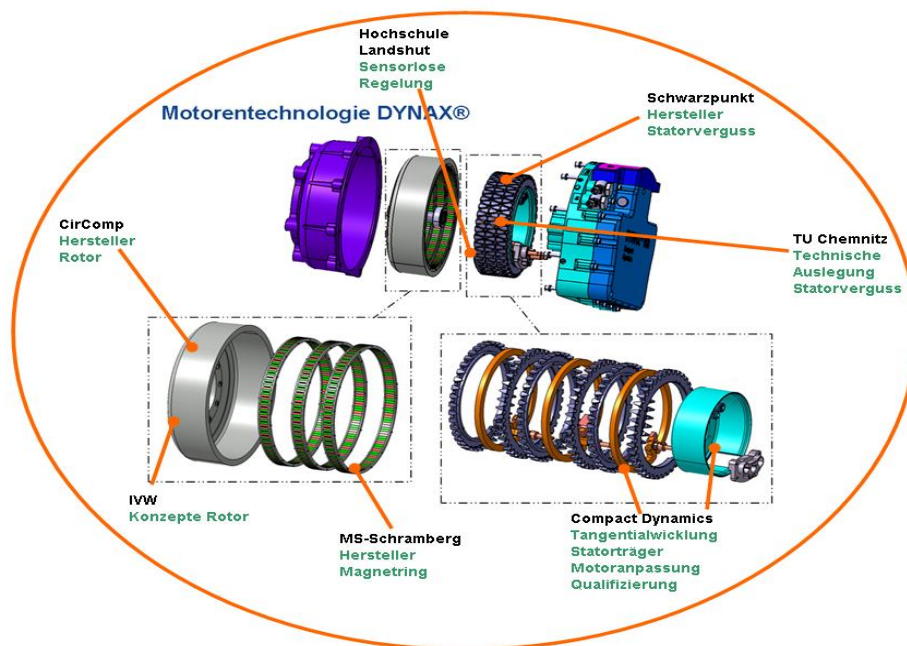


Abbildung 7: Zusammensetzung Projektpartner

Konsortialführer:

- Compact Dynamics GmbH, Starnberg

Projektpartner:

- Circomp GmbH, Kaiserslautern
- Schwarzpunkt Schwarz GmbH, Gilching
- MS Schramberg GmbH & Co. KG, Schramberg-Sulgen

Wissenschaftliche Unterstützung:

- Technische Universität Chemnitz - Professur Kunststoffe, Chemnitz
- Institut für Verbundwerkstoffe GmbH, Kaiserslautern
- Hochschule Landshut, Professur Elektrische Antriebe, Leistungselektronik, Mechatronik

Projekträger:

- PT Karlsruhe, KIT Karlsruhe, Karlsruhe

Im Folgenden erfolgt die Vorstellung der beteiligten Projektpartner, mit deren Kompetenzen das Projekt erfolgreich bearbeitet werden konnte.

1.8.2 **Compact Dynamics GmbH**

Die Compact Dynamics GmbH ist ein Spezialist im Bereich der Entwicklung von individuell zu-geschnittenen kompakten elektrischen Antrieben einschließlich Leistungselektronik und Steuerung. Engagement und Know-How hat Compact Dynamics zu einem Kompetenz-Center für die Automobilindustrie wachsen lassen. Axialflussmotoren von Compact Dynamics basieren auf Torquemotoren in Synchronbauweise. Durch patentierte Weiterentwicklungen werden auch bei hohen Drehzahlen Wirkungsgrade von 85 – 95% erreicht. Diese Permanentmagnetmaschinen sind für den Einsatz als Fahrzeugmotoren oder Servomotoren besonders gut geeignet.

Aufgaben:

- Federführung im Arbeitspaket 1 (Tangentialwicklung)
- Mitarbeit im Arbeitspaket 2 (Rotorherstellung aus GFK-Laminat)
- Mitarbeit im Arbeitspaket 3 (Umspritzung Stator mit Duroplast)
- Federführung im Arbeitspaket 4 (Statorkühler)
- Mitarbeit im Arbeitspaket 5 (Rotormagnete als Komplettring)
- Mitarbeit im Arbeitspaket 6 (Sensorlose Regelung)
- Federführung im Arbeitspaket 7 (Fertigungsplanung)
- Federführung im Arbeitspaket 8 (Projektmanagement)

1.8.3 **CirComp GmbH**

Kern der CirComp Unternehmensphilosophie ist es, auf Basis von Hochleistungs-Faserverbundwerkstoffen leistungsfähige Produkte zu entwickeln, welche exakt auf die Ansprüche der Kunden abgestimmt sind. Unter dieser Prämisse entwickelt und fertigt die CirComp GmbH Faserverbundbauteile. Im CNC gesteuerten Faserwickelverfahren werden Bauteile hergestellt. Die CirComp GmbH setzt hochwertige Kohlenstofffasern (CF), Glasfasern (GF), Aramidfasern (AF) und Basaltfasern (BF) in Kombination mit Duromeren oder thermoplastischen Kunststoffen (CFK, GFK, AFK, BFK) ein. Das CirComp-Team verfügt über langjährige Erfahrung und Know-how auf dem Gebiet der Faserverbundwerkstoffe. Die CirComp GmbH ist zertifiziert nach DIN ISO 9001:2008.

Aufgaben:

- Federführung im Arbeitspaket 2 (Rotorherstellung aus GFK-Laminat)
- Mitarbeit im Arbeitspaket 5 (Rotormagnete als Komplettring)

1.8.4 **Schwarzpunkt Schwarz GmbH & Co KG**

Die Schwarzpunkt Schwarz GmbH & Co ist seit 1949 als Verarbeiter technischer Kunststoffe (Duroplast und Thermoplast) auf dem Markt etabliert und ist Zulieferer für die Automobilindustrie, Elektronikindustrie und Telekommunikation, Medizintechnik und Luftfahrt. Schwarzpunkt produziert technische Formteile im Spritzgieß-, Spritzpress- und Pressverfahren auf modernen Anlagen.

Aufgaben:

- Federführung im Arbeitspaket 3 (Umspritzung Stator mit Duroplast)
- Mitarbeit im Arbeitspaket 1 (Tangentialwicklung)
- Mitarbeit im Arbeitspaket 5 (Rotormagnete als Komplettring)
- Mitarbeit im Arbeitspaket 7 (Fertigungsplanung)
- Mitarbeit im Arbeitspaket 8 (Projektmanagement)

Durch Änderungen im Projektfokus wurde die Zusammenarbeit mit der Firma Schwarzpunkt im Verbundprojekt einvernehmlich beendet.

1.8.5 **MS Schramberg GmbH & Co. KG**

MS-Schramberg ist einer der führenden Hersteller von Dauermagneten und Magnetbaugruppen. Die Produktpalette umfasst die heute wesentlichen Dauermagnetwerkstoffe (Hartferrit, NdFeB, SmCo) in gesinterter und kunststoffgebundener Ausführung. MS-Schramberg verfügt neben modernsten Produktionsanlagen für die industrielle Serienproduktion einen eigenen Werkzeugbau und Automatisierungstechnik. In den Entwicklungsabteilungen werden neben den kundenspezifischen Produktentwicklungen auch neue Werkstoffe und Prozesse entwickelt. Das Unternehmen ist nach TS 16949:2009, ISO 9001:2008 und ISO 14001:2009 zertifiziert.

Aufgaben

- Federführung im Arbeitspaket 5 (Rotormagnete als Komplettring)
- Mitarbeit im Arbeitspaket 2 (Rotorherstellung aus GFK-Laminat)

1.8.6 Hochschule Landshut

Für die Hochschule Landshut steht seit ihrer Gründung im Jahre 1978 die Qualität der Lehre im Vordergrund. Mittlerweile werden rund 3.550 Studenten/innen von über 80 Professoren/innen betreut. In der Fakultät für Elektrotechnik und Wirtschaftsingenieurwesen werden derzeit insgesamt fünf technische Studiengänge in Vollzeit, Teilzeit und berufsbegleitend angeboten. Mit einer hervorragenden Laborausstattung und einem Team von 25 Professoren und Lehrkräften sowie weiteren 20 MitarbeiterInnen bietet die Fakultät ausgezeichnete Bedingungen für Studium und angewandte Forschung zusammen mit den Partnern aus der Industrie.

Die Professur "elektrische Antriebe" wird ab dem WS 2011/12 mit Herrn Dr.-Ing. A. Kleimaier (zuvor Abteilungsleiter Elektronikentwicklung bei der Compact Dynamics GmbH) neu besetzt, so dass hier eine optimale Zusammenarbeit gewährleistet ist. Das im Jahre 2010 neu gegründete Zentrum "Landshut Automotive Competence" (LAC) bündelt die forschungs- und anwendungsbezogenen Kompetenzen der Hochschule Landshut unter interdisziplinärer Zusammenarbeit der technischen Fakultäten. Arbeitsgebiete sind u. a. Hybrid und Elektrostraßenfahrzeuge.

Aufgaben:

- Federführung Arbeitspaket 6 (Sensorlose Regelung)

1.8.7 Institut für Verbundwerkstoffe GmbH

Das Institut für Verbundwerkstoffe GmbH (IVW) ist eine international agierende Forschungseinrichtung des Landes Rheinland-Pfalz für die Erforschung und Weiterentwicklung der Anwendungen und Anwendungsmöglichkeiten von Verbundwerkstoffen auf Basis polymerer Matrixsysteme. Das IVW entwickelt neue Bauweisen, effiziente Verfahren und verbesserte Verbundwerkstoffe mit maßgeschneiderten Eigenschaftsspektren für die jeweiligen industriellen Einsatzgebiete. Die Hauptanwendungen finden sich z.B. in den Bereichen Automobilbau, Luft- und Raumfahrttechnik, Maschinenbau, Bauwesen, Sport- und Freizeitgeräte, Energietechnik und Medizintechnik. Die Kernkompetenzen des IVW liegen in den Bereichen Strukturentwicklung, Prozesssimulation, Crash- und Energieabsorption, Ermüdung und Lebensdaueranalyse, maßgeschneiderte Werkstoffe, Nanocomposites, Tribologie, Smart Structures, Verarbeitung von Fließpressmassen, Verarbeitung unidirektionaler Faser-Kunststoff-Verbunde (FKV) sowie den Prozessketten zur Verarbeitung thermo- und duroplastischer FKV.

Aufgaben:

- Mitarbeit im Arbeitspaket 2 (Rotorherstellung aus GFK-Laminat)

1.8.8 TU Chemnitz

Die TU Chemnitz, Professur Kunststoffe mit über 20 Mitarbeitern, setzt ihren Schwerpunkt in Forschung und Lehre auf dem Gebiet der unverstärkten, diskontinuierlich verstärkten und funktionsorientiert gefüllten Thermo- und Duroplaste mit dem Ansatz, die verarbeitungsinduzierten Eigenschaften im Sinn der Prozess-Struktur-Eigenschaftsbeziehung aufzuklären. Die TU Chemnitz leistet einen wesentlichen Beitrag bei der Materialentwicklung, Bauteilentwicklung, Werkzeugentwicklung sowie Prozessentwicklung bei der Einführung eines duroplastischen Vergussverfahrens in der Statorfertigung. Die TU Chemnitz ist personell und technisch so aufgestellt, dass die gesamte Prozesskette der Kunststoffverarbeitung für F&E-Projekte abgebildet werden kann. Hinzukommt der Bereich der Kunststoffanalytik, der an der TU Chemnitz exzellent ausgestattet ist und die wissenschaftliche Basis für die technisch-technologische Herangehensweise zur Projektbearbeitung sowie Ergebnisbewertung darstellt. Der Bereich umfasst u.a. die mechanische Prüfung, thermische Prüfung, Mikroskopie und die rheologische Prüfung. Auf den im geplanten Projekt relevanten Gebieten laufen derzeit mehrere geförderte Vorhaben (BMBF, AiF (PRO-INNO, ZIM)). Des Weiteren bestehen mehrere Industriekooperationen.

Aufgaben:

- Mitarbeit im Arbeitspaket 1 (Tangentialwicklung)
- Mitarbeit im Arbeitspaket 3 (Umspritzung Stator mit Duroplast)
- Mitarbeit im Arbeitspaket 5 (Rotormagnete als Komplettring)

1.9 Aufgabenstellungen

1.9.1 Arbeitspaket 1 – Herstellung einer Tangentialwicklung in einem möglichst durchgängigen Fertigungsprozess (Compact Dynamics GmbH)

Ein weitgehend manueller Prozess ohne vergleichbare Prozesse aus Maschinenbau oder Elektrotechnik sollte einer industrialisierbaren Prozesskette zugeführt werden.

Folgende Aufgaben wurden betrachtet:

- Auswahl des Litzenmaterials
- Design der Stromschienen
- Untersuchungen zu Kontaktierung von Litze und Stromschienen

1.9.2 Arbeitspaket 2 – Herstellung eines Rotors im 3D-Nasswickelverfahren (IVW GmbH / Circomp GmbH)

Innerhalb des Arbeitspaketes 2 war die Entwicklung der Rotorglocke aus Glasfaser-Kunststoff (GFK) Laminat im 3D Wickelverfahren die Aufgabe.

Dabei wurden als Hauptaufgaben identifiziert:

- Faser- und Prozessgerechte Auslegung der Glockenstruktur, insbesondere hinsichtlich der strukturellen Steifigkeit. Die Aufweitung der Glocke unter den im Betrieb auftretenden Fliehkräften muss begrenzt werden und eine Querkraft am Glockenrand darf eine definierte Verformung nicht überschreiten. Des Weiteren muss die Lastübertragung zwischen der GFK-Glocke und der daran anschließenden metallischen Welle gewährleistet werden, hierfür sind großserientaugliche Wege zu finden. Auch die Übertragung des Drehmomentes von den Magnetringsen in die Glockenstruktur muss gewährleistet sein.
- Der Fertigungsprozess muss derart gestaltet werden, dass eine hohe Ausbringungsmenge durch kurze Zykluszeiten bei hoher gleichbleibender Qualität gewährleistet werden kann. Hierfür sollen auch die Materialsysteme betrachtet werden.

1.9.3 Arbeitspaket 3 – Duroplastische Statorumspritzung (TU Chemnitz)

Die Problemlage für die Technische Universität Chemnitz bestand hauptsächlich in der Umsetzung des Statorvergusses (AP3) im Spritzgussprozess. Hierfür müssen Vergusswerkstoffe, Werkzeuge und Prozessmesstechnik an die im Zusammenwirken für den Spritzguss ungünstigen Voraussetzungen der Bauteil-Einlegeteil-Situation und die dadurch hervorgerufenen prozesstechnischen Schwierigkeiten speziell angepasst werden. Die Hauptzielstellung bestand in dem zuverlässigen Umspritzen der Statorbaugruppe in einem Spritzgusswerkzeug mit angepasstem Vergusswerkstoff. Die zu bewältigende Herausforderung bestand in der Verwendung eines geeigneten Spritzgusswerkstoffes in Verbindung mit der Entwicklung eines prozess- und werkstoffgerechten Spritzgießwerkzeuges.

Durch das Umspritzen der Statorbauteile könnte die Prozesszeit enorm reduziert und ein reproduzierbarer sowie kostengünstiger Prozess ermöglicht werden. Des Weiteren könnte im Vergleich zu der bisherigen Lösung eine Verbesserung der technischen Eigenschaften realisiert werden:

- Mechanischer Schutz aller Bauteile und gute thermische Anbindung der verlustbehafteten Bauteile
- Schallentkoppelung zwischen Stator und Befestigungsflansch
- Durch Wegfall von Stahlteilen werden Wirbelstromeffekte reduziert, somit geringere thermische Beanspruchungen generiert und eine höhere Effizienz herbeiführt

- Wegfall einer nachträglichen Zerspannung durch Toleranzausgleich mit dem Kunststoff zwischen Statorträger und Flansch
- Deutliche Gewichtsreduzierung durch Einsparung von Stahlteilen und Substitution durch Kunststoff
- Verringerung der Gefahr von thermischen Spannungen zwischen einem Stahlgehäuse und einem Aluminiumgehäuse durch ein Kunststoffumspritzen der Bauteile
- Verringerung der Korrosionsgefahr
- Energieeffizientere Fertigung durch geringe Prozesstemperaturen der duroplastischen Kunststoffe sowie eine Steigerung der Temperaturfestigkeit durch den hohen Glasübergang der duroplastischen Formmassen (im Vergleich zu Thermoplasten und duroplastischen Gießharzen)
- Isolation der stromführenden Teile durch den Kunststoff und dadurch Wegfall zusätzlicher Isolationsteile

Des Weiteren arbeitet die Technische Universität Chemnitz in unterstützender in dem Arbeitspakt 1 „Phasenwicklung/Tangentialwicklung“ und dem Arbeitspaket 5 „Magnetring für Rotor“ unterstützend mit. Hierbei lagen die Schwerpunkte insbesondere in der Beratung bzgl. konstruktiver Details und der Werkstoffuntersuchung an Trägermaterialien kunststoffgebundener Dauermagnete.

1.9.4 Arbeitspaket 4 – Aufgabenstellung Compact Dynamics GmbH

Ziel war die Entwicklung und Industrialisierung eines Statorträgers mit integrierter Kühlfunktion, inklusive der mechanischen und thermischen Anbindung des Statorträgers an das Statorsystem.

Die Leistungsfähigkeit des Motors ist von seiner Entwärmung und vom thermischen Widerstand zwischen den verlustbehafteten Stator-Bauteilen und dem Kühlwasserkreislauf abhängig. Deshalb war neben einem effizienten Kühler eine Verbindungstechnik mit sehr gutem thermischem Leitwert erforderlich. Zudem war auf die Anpassung der Bauteilausdehnung und einen reproduzierbaren Verbindungsprozess zu achten.

Statorträger

Die Statorträgerteile sollten aus tiefgezogenen- bzw. gedrückten Blechen gefertigt werden. Der Statorträger war als Zylinder auszuführen. Der Außendurchmesser bildet die Kontaktfläche zum Statorsystem. Die Bleche sind einseitig aluplattiert. Die Plattierung zeigt zur Wasserseite, somit sind die Stahlbleche zum Kühlkreis abgedeckt. Zusätzliche Bauteile, die nicht zu thermischen Ausdehnungsdifferenzen beitragen, werden aus Aluminium gefertigt. Hierbei sollten Standard-Kühlerbauteile wie Turbulatorbleche und Fittings verwendet werden. Die Bauteile sollten mit in der Kühlerfertigung verwendeten, neuartigen Lötprozessen gefertigt werden (z.B. „Nocolock“). Durch den Einsatz dieses Flussmittels war eine kontinuierliche Lötung im Tunnelofen möglich. Die Bleche sollten mit zwei unterschiedlichen Alu-Plattierungen beschichtet werden:

- Schicht 1: Hochschmelzendes Alu (Grundbeschichtung)
- Schicht 2: Niederschmelzendes Alu, dient als Lotzusatzwerkstoff

Vorteile:

- Ersatz der teuren Drehteile durch seriengerechte, werkzeugfallende Bauteile
- Korrosionsschutz im Kühlkreis durch die Aluplattierung
- Deutliche Gewichtsreduzierung durch wanddickenoptimierte Stahlblechteile und Aluteile
- Sehr gute thermische Anbindung des Kühlers an den Stator
- Innovative Serienprozesse beim Verlöten der Kühlerbauteile
- Kostensenkung im Vergleich zur Vakuumlötlung

Herausforderungen:

- Prozess- und fertigungsgerechtes Design der Kühlerbauteile.
- Prozessentwicklung Löten:
- Befluxung der Bauteile (z.B. Nocolock, Spray oder elektrostatisch) zur Durchbrechung der Oxidationsschicht
- Lötprofil für Bauteile mit unterschiedlichen Ausdehnungen und Wärmekapazitäten
- Walzplattieren des Halbzeuges (Tiefziehblech) mit hoch- und niedrighschmelzender Alu-Beschichtung
- Auswahl des Prozesses zur Fertigung der Kühlerbauteile (Tiefziehen, Hydroforming, Drücken)
- Prozessuntersuchung mit Aluplattierten Blechen (Abrieb, Abplatzungen, Risse, Verunreinigungen)

Lötverbindung Statorträger – Statorringe:

Die Verbindung zwischen Stator und Statorträger soll neben einer guten mechanischen Festigkeit eine gute thermische Leitfähigkeit besitzen, da diese eine Barriere zwischen den verlustbehafteten Statorbauteilen (Statorringe mit Wicklungen) und dem Kühler darstellt. Der zurzeit eingesetzte Klebstoff mit seinem geringen Leitwert führt zu einem erheblichen Temperaturgradienten zwischen Statorträger und Stator. Trotz des gleichen Wärmeausdehnungskoeffizienten beider Teile führt dies zu unterschiedlichen Dehnungen der Bauteile, was zur Schädigung der Klebstoffschicht und damit dem Kontaktverlust zwischen Statorringen und Statorträger führen kann.

Vorteile:

- Ersatz der thermischen Barriere (Klebstoff ~ 1,5 W/mk) durch eine sehr gut leitende Schicht (Zinnlot ~ 70W/mk)
- Vorbeschichten der Bauteile
 - erleichtert die Montage
 - ermöglicht eine gute industrielle Aktivierung

Herausforderungen

- Auswahl des Lotmaterials (Verfügbarkeit, Kosten, Schmelztemperatur, Loteignung)
- Galvanisches Aufbringen der Lotbeschichtung auf Statorträger und Statorringe
- Abdecken (maskieren) der Statorringe (Vermeidung von Wirbelstromverlusten)
- Ermitteln des erforderlichen Lotdepots
- Prozessauswahl zur Erwärmung der Lotstelle
 - Wicklungen dürfen nicht geschädigt werden.
- Qualifizierung des Prozesses hinsichtlich
 - Lunkerbildung
 - Benetzung
 - Flußmittel / -reste
 - Vollflächige Verlötung
- Anlagentechnik
 - Aufbau einer Laboranlage
 - Auswahl eines Wärmeträgermediums
 - Auswahl der Aggregate (Pumpen, Erhitzer, Ventile, usw.) für Hochtemperaturanwendung
 - Vorgaben für Industrieanlagen in Abstimmung mit Anlagenhersteller
- Aufbau und Vermessung von Musterstatoren

1.9.5 **Arbeitspaket 5 – Herstellung eines Magnetings in Form eines Kompletrings (MS Schramberg GmbH & Co. KG)**

Die Entwicklung und Anfertigung eines hochpoligen Magnetings aus anisotropem kunststoffgebundenem Material.

Hierzu galt es folgende Aufgaben zu untersuchen:

Simulation des Einflusses des neuen Magnetmaterials (Prozessentwicklung/ Compoundierung)

- Lastenheft Compound für anisotropes pressen
- Compound-Optimierung für den Pressprozess
Auswahl Harze, Additive, Magnetpulver, Compoundversuche
- FEM-Magnetfeldsimulation u. mech. Auslegung Versuchswerkzeug
- Ermitteln der Prozessparameter und Fertigung von Probekörper
- Simulation und Einfluss des neuen Magnetmaterials (bei CD)

Überarbeitung der Konstruktion des DYNAX Motors (Anordnung in Glocke)

- Festlegung der möglichen Magnetvarianten
- Erstellen von Prototypen mit den in 5.1 gefertigten Probekörper
- Überarbeitung/ Konstruktion des Motors (Anordnung in Glocke)

Entwicklung/Fertigung der Presswerkzeuge und Magnetisierungsrichtungen (Herstellung Glocke)

- FEM-Simulation Werkzeug / Magnetisiererspulen
- Werkzeugkonstruktion
- Anlagen- und Automatisierungskonzept erarbeiten
- Werkzeugerstellung

Herstellung der Qualifizierungsmustern (Fertigungssteuerung / Variantenkonzepte)

- Erstfallenden Teile
- Ermitteln der Prozessparametern
- Herstellen von Prototypen u. Grenzmuster mit möglichen Compounds
- Charakterisierung der Prototypen

Durchführung der Qualifizierung

- Ermitteln der möglichen Einsatzbedingungen / Temperatur, Salzsprüh- Schocktest usw.
- magn. Qualifikation / Dokumentation

1.9.6 **Arbeitspaket 6 – Projekt SERAX: Sensorlose Regelung (Hochschule Landshut)**

Zur Reduktion der Herstellkosten der Maschine DYNAX und zur Verbesserung der Ausfallsicherheit soll der bisher eingesetzte, in die Maschine integrierte Pollagesensor entfallen. Neben dem eigentlichen Sensor entfällt

auch die gesamte analoge und digitale Auswerteelektronik des Systems sowie dessen Kommunikation mit dem Controller, in welchem die Maschinenregelung implementiert ist.

Da zur Regelung der Maschine DYNAX, wie grundsätzlich bei Synchronmaschinen, die Information der Pollage bzw. der Magnetposition benötigt wird, um mit einem Stromfluss in den Statorwicklungen ein definiertes Drehmoment zu erzeugen, muss bei Wegfall des Pollagesensors ein Algorithmus zur sensorlosen Pollageschätzung, basierend auf den ohnehin vorhandenen gemessenen Stromsignalen, eingesetzt werden.

Der zu entwickelnde Algorithmus zur sensorlosen Pollageschätzung sollte mit geeigneten Konzepten zur Stromregelung kombiniert werden und im Gesamtpaket, der „sensorlosen Regelung“, die Maschine DYNAX im vollen Betriebsbereich von Traktionsantrieben betreiben. Dies umfasst das Anfahren aus dem Stillstand sowie das Erreichen der Maximalgeschwindigkeit des Fahrzeuges.

Das Einsatzgebiet der Serienanwendungen stellt weitere Anforderungen an die sensorlose Regelung. Günstige Systemkosten werden nur mit einem Minimum an Kalibrieraufwand erreicht. Stückabhängige Parameter der Algorithmen müssen entweder adaptiv im Betrieb oder vollautomatisch bei der Inbetriebnahme am Ende der Produktionslinie erfolgen. Außerdem muss die sensorlose Regelung mit den ohnehin vorhandenen Stromsensoren kompatibel sein und darf keine zusätzlichen Anforderungen an die Qualität der Messsignale stellen. Ebenso dürfen keine Modifikationen an der Leistungselektronik, wie sie bisher mit sensorbasierter Regelung verwendet wurde, notwendig werden.

2 Voraussetzung unter der das Vorhaben durchgeführt wurde (z.B. Ressourcen, Einbindung in die Unternehmensstrategie, Vorarbeiten und Vorkenntnisse, etc.)

2.1 Bisherige Arbeiten der Antragsteller

2.1.1 Compact Dynamics GmbH

Das Kernteam von Compact Dynamics hat ca. 30 Jahre Erfahrung im Bereich Entwicklung und Bau elektrischer Antriebssysteme. Der Entwicklungsschwerpunkt stellt dabei der Motorsport dar, hier werden höchste Leistungsdichten bei geringstem Gewicht und Bauraum benötigt.

Ein weiterer Schwerpunkt ist der Automotive-Sektor, hierfür wurden die Anforderungen an Elektromotoren auf Basis einer internen Recherche zusammengestellt.

Diese Anforderungen unterscheiden sich von denen des industriellen und meist stationären Bereiches deutlich in Bezug auf Arbeitsdrehzahlbereich, Dynamik, Wirkungsgrad, Gewichts- und Bauraumanforderungen. Compact Dynamics hat daraufhin die bekannten Typen und Konzepte von Elektromotoren auf ihre Eignung untersucht und bewertet.

2.1.2 CirComp GmbH

Die Fa. CirComp hat ca. 19 Jahre Erfahrung im Bereich Entwicklung und Herstellung von Bauteilen aus Faserverbundwerkstoffen im Faserwickelverfahren. Kern der CirComp Unternehmensphilosophie ist es, auf Basis von Hochleistungsfaserverbundwerkstoffen leistungsfähige Produkte zu entwickeln, welche exakt auf die Ansprüche der Kunden abgestimmt sind.

Unter dieser Prämisse entwickelt und fertigt die CirComp GmbH Faserverbundbauteile. Im CNC gesteuerten Faserwickelverfahren werden Bauteile hergestellt. Die CirComp GmbH setzt dabei hochwertige Kohlenstofffasern (CF), Glasfasern (GF), Aramidfasern (AF) und Basaltfasern (BF) in Kombination mit Duromeren oder thermoplastischen Kunststoffen ein. Das CirComp-Team verfügt über langjährige Erfahrung und Know-how auf dem Gebiet der Faserverbundwerkstoffe.

Als Ressourcen stehen 4 Wickelmaschinen, Abzüge, Diverse Öfen sowie eine komplett ausgestattete mechanische Fertigung mit mehreren Dreh- und Fräsmaschinen zur Verfügung.

Zahlreiche Veröffentlichungen dokumentieren die langjährige Erfahrung und das Know-how auf dem Gebiet der Faserverbundwerkstoffe zu Beginn des Vorhabens.

2.1.3 Institut für Verbundwerkstoffe GmbH

Das Institut für Verbundwerkstoffe GmbH (IVW) ist eine international agierende Forschungseinrichtung des Landes Rheinland-Pfalz für die Erforschung und Weiterentwicklung der Anwendungen und Anwendungsmöglichkeiten von Verbundwerkstoffen auf Basis polymerer Matrixsysteme. Das IVW entwickelt neue Bauweisen, effiziente Verfahren und verbesserte Verbundwerkstoffe mit maßgeschneiderten Eigenschaftsspektren für die jeweiligen industriellen Einsatzgebiete. Die Hauptanwendungen finden sich z.B. in den Bereichen Automobilbau, Luft- und Raumfahrttechnik, Maschinenbau, Bauwesen, Sport- und Freizeitgeräte, Energietechnik und Medizintechnik. Die Kernkompetenzen des IVW liegen in den Bereichen Bauweisenentwicklung, Prozesssimulation, Crash- und Energieabsorption, Ermüdung und Lebensdaueranalyse, massgeschneiderte Werkstoffe, Nanocomposites, Tribologie, Smart Structures, Verarbeitung von Fließpressmassen, Verarbeitung unidirektionaler Faser-Kunststoff-Verbunde (FKV) sowie den Prozessketten zur Verarbeitung thermo- und duroplastischer FKV.

Das IVW hat eine breite Expertise im Bereich Wickeltechnik. Diese erstreckt sich über die gesamte Entwicklungskette von der Konstruktion und Auslegung über die Verfahrensentwicklung bis zur Fertigung ganzer Prototypen. Diese können über die vorhandene Anlagentechnik komplett abgebildet werden. Das IVW ist im Bereich der Entwicklung von Fertigungsverfahren sehr stark aufgestellt.

Beispielsweise wurden in den letzten Jahren im Bereich der Wickeltechnik mit dem 8- und 12-Arm-Wickelauger verbunden mit der Syphon-Imprägniereinheit Verfahrensverbesserungen entwickelt, die zu einer effizienteren und kostengünstigeren Fertigung beitragen können.

Im Rahmen der beiden über die EU geförderten Kooperationsprojekte StorHy (Hydrogen Storage Systems for Automotive Application – 6th EU Framework Programme) und H2SusBuild (Development of a clean and energy self-sustained building in the vision of integrating H2 economy with renewable energy sources – 7th EU Framework Programme) wurden weitreichende Erfahrungen auf diesem Gebiet gesammelt und die Grundlagen für weitere Entwicklungsprojekte gelegt. Flankiert wurden diese Entwicklungen von zahlreichen bilateralen Entwicklungsprojekten auf dem Gebiet der Wickeltechnik.

Im Bereich der Bauweisenentwicklung im Bezug auf Auslegung, Berechnung und Konstruktion besitzt das IVW weitreichendes Know-how. Auf diesem Gebiet werden Leichtbau-Strukturen aus faserverstärkten Kunststoffen entwickelt und bestehende Designs aus anderen Materialien substituiert. Beispiele für durchgeführte Entwicklungen sind Rumpf- und Leitwerksstrukturen für die Luftfahrt, Karosserieteile aus dem Automobilbereich und hochbeschleunigte Maschinenelemente. Ergänzend hierzu werden Materialdaten experimentell ermittelt und strukturelle Tests von Komponenten durchgeführt um insgesamt die komplette Entwicklungskette für Verbundwerkstoffstrukturen aus einer Hand anzubieten. Hierzu werden sowohl marktgängige Tools für FEM und CAD wie ProEngineer, SolidWorks, ANSA, Ansys und Patran/Nastran verwendet als auch selbstentwickelte Subroutinen für die Modellierung und Beschreibung von Festigkeits- und Versagensmechanismen von Verbundwerkstoffen.

Ausgewählte Projekte zur Entwicklung von Bauteilen aus faserverstärkten Kunststoffen:

- Entwicklung einer ultraleichten CFK-Sensorschale für den Atlas-Pixeldetektor im CERN in Genf
- BMWi – LuFo IV 2nd Call – Modellierung des Verhaltens strukturell 3D-verstärkter Multiaxialgelege-Laminat unter Mode-I-Lastung für Hochauftriebskomponenten (HIGHER-G1R)
- BMWi – AiF – ZIM-KOOP – Entwicklung metallfreier Krafteinleitungselemente in hoch belasteten Faserverbund-Zug/Druckstäben für Anwendungen in Luft- und Raumfahrt (ZD-Kraft)
- BMBF – Verbundprojekt: LightGrip – Effizienter Auslegersystemgreifer mit hohem Integrationspotenzial

- BMBF – Verbundprojekt: Entwicklung von innovativen Faser-Kunststoff-Verbund-Walzen in ultraleichter Sandwich-Bauweise
- Unterauftrag Airbus Deutschland GmbH - EMIR - Analyse der Versagenswahrscheinlichkeit ausgewählter textiler Hochleistungsfaser-Verbundstrukturen
- BMWi – AiF – PRO INNO II – Entwicklung eines neuen Fertigungsverfahrens mit Preform-RTM-Technologie zur Herstellung von Teilen mit extrem komplexen Formen (Hohlkörper) am Beispiel einer Sicherheitsnackenstütze
- EU – Manufacturing, Simulation and Design-technologies for Carbon Fiber reinforced modular Automotive Body Structures (TECABS)
- EU – Flexible Composite Production Riser for Deep Water Oil Fields
- EU – New Track integrated Electrical Single Flap Drive System (NEFS)

2.1.4 **Schwarzpunkt Schwarz GmbH & Co. KG**

Die Schwarzpunkt Schwarz GmbH & Co ist seit 1949 als Verarbeiter technischer Kunststoffe (Duroplast und Thermoplast) auf dem Markt etabliert und ist Zulieferer für die Automobilindustrie, Elektroindustrie und Telekommunikation, Medizintechnik und Luftfahrt. Schwarzpunkt produziert technische Formteile im Spritzgieß-, Spritzpress- und Pressverfahren auf modernen Anlagen.

Besonders bei der Entwicklung duroplastischer Bauteile verfügt Schwarzpunkt über langjährige Erfahrungen bezüglich werkstoffgerechter Konstruktion, Füllsimulation, Werkzeugbau und Verarbeitung. Es werden sowohl rieselfähige als auch teigförmige (pastöse) Duroplaste verarbeitet. Dabei können Einlegetechniken und Veredelungen ebenso realisiert werden.

2.1.5 **TU Chemnitz**

Die Professur Kunststoffe setzt ihren Schwerpunkt in Forschung und Lehre auf dem Gebiet der unverstärkten, diskontinuierlich verstärkten und funktionsorientiert gefüllten Thermo- und Duroplaste mit dem Ansatz, die verarbeitungsinduzierten Eigenschaften im Sinn der Prozess-Struktur-Eigenschaftsbeziehung aufzuklären. Dazu ist die apparative Ausstattung so angelegt, dass die gesamte Prozesskette von der Compoundierung über die Verarbeitung in Ur-, Umform- und Fügeverfahren bis hin zur werkstoff- und anwendungsorientierten Prüfung abgebildet werden kann.

Die Kunststoffanalytik und Strukturaufklärung stellt dabei das wesentliche Bindeglied zum Verständnis der verarbeitungsinduzierten Eigenschaften dar.

Die Professur Polymerchemie ist auf die Synthese und Charakterisierung komplexer anorganisch/organischer und organisch/organischer Hybridmaterialien und makromolekularer Architekturen ausgerichtet. Die analytische Ausstattung ist auf die Charakterisierung von makromolekularen Werkstoffen spezialisiert.

2.1.6 **MS Schramberg GmbH & Co. KG**

MS-Schramberg ist einer der führenden Hersteller von Dauermagneten und Magnetbaugruppen. Die Produktpalette umfasst Dauermagnetwerkstoffe (Hartferrit, NdFeB, SmCo) in gesinterter und kunststoffgebundener Ausführung.

MS-Schramberg verfügt neben modernsten Produktionsanlagen für die industrielle Serienproduktion über eigenen Werkzeugbau und Automatisierungstechnik. In den Entwicklungsabteilungen werden neben den kundenspezifischen Produktentwicklungen auch neue Werkstoffe und Prozesse entwickelt. Das Unternehmen ist nach TS 16949:2009, ISO 9001:2008 und ISO 14001:2009 zertifiziert.

2.1.7 **Hochschule Landshut**

Für die Hochschule Landshut steht seit ihrer Gründung im Jahre 1978 die Qualität der Lehre im Vordergrund. Mittlerweile werden rund 3.550 Studenten/innen von über 80 Professoren/innen betreut. In der Fakultät für Elektrotechnik und Wirtschaftsingenieurwesen werden derzeit insgesamt fünf technische Studiengänge in Vollzeit, Teilzeit und berufsbegleitend angeboten. Mit einer hervorragenden Laborausstattung und einem Team von 25 Professoren und Lehrkräften sowie weiteren 20 MitarbeiterInnen bietet die Fakultät ausgezeichnete Bedingungen für Studium und angewandte Forschung zusammen mit den Partnern aus der Industrie.

Die Professur "Elektrische Antriebe" ist seit dem WS 2011/12 mit Herrn Dr.-Ing. A. Kleimaier (zuvor Abteilungsleiter Elektronikentwicklung bei der Compact Dynamics GmbH) neu besetzt, so dass hier eine optimale Zusammenarbeit gewährleistet ist. Das im Jahre 2010 neu gegründete Zentrum "Landshut Automotive Competence" (LAC) bündelt die forschungs- und anwendungsbezogenen Kompetenzen der Hochschule Landshut unter interdisziplinärer Zusammenarbeit der technischen Fakultäten. Arbeitsgebiete sind u. a. Hybrid und Elektrostraßenfahrzeuge.

3 Wissenschaftlicher Stand

3.1 Wissenschaftlicher und technischer Stand zu Beginn des Vorhabens

3.1.1 Genereller Überblick Elektromotoren, insbesondere Transversalflussmotor DYNAX®

Gegenwärtiger Stand in Forschung und Industrie ist der Einsatz unterschiedlicher Varianten von permanent erregten Synchronmaschinen. Dazu gehören Kleinantriebe mit BLDC-Motoren (Brushless DC Motoren), Standardmaschinen mit herkömmlicher Drehfeldwicklung sowie diverse Maschinenkonzepte mit Einzelzahnwicklung, z.B. für Starter-Generatorsysteme oder Pedelecs.

Darüber hinaus werden in der Forschung seit längerem Transversalflussmaschinen mit besonders hohem Flächenschub untersucht. Zu dieser Gruppe zählt auch die DYNAX® Motorentechnologie.

Die Ausführung als Axialflussmaschine mit Klauenpolstator ist jedoch ein Alleinstellungsmerkmal, welches durch Patente abgesichert ist [2], [3] und teilweise bereits in Veröffentlichungen vorgestellt wurde [4], [5].

3.1.2 Arbeitspaket 1 – Herstellung einer Tangentialwicklung



Abbildung 8: Beispiel Kontaktierung Litze - Stromschiene

Die Tangentialwicklung wurde zu Beginn des Projekts in einem aufwändigen, manuellen Verfahren hergestellt.

Folgende Arbeitsschritte waren notwendig:

- Ablängen der Litze auf das erforderliche Maß
- Entfernen des Isolationslackes der Litze
- Umwickeln der Litze mit Isolationspapier
- Profilieren der Litze für das Wickelfenster
- Kontaktierung der Litze mit den Stromschienen
- Isolationsprüfung

Diese Schritte sind für eine Fertigung geringer Stückzahlen vertretbar, im Hinblick auf größere Stückzahlen sind zwingend großserientaugliche Produktionsschritte zu erarbeiten.

3.1.3 Arbeitspaket 2 – Herstellung eines Rotors

Rotorglocken aus Kunststoff bestehen i.d.R. aus einem Wickelrohr (GFK od. CFK) und einem Rotorboden aus Metall (Alu oder Titan).

Die Permanentmagnete werden anschließend in die fertige Rotorglocke eingeklebt. Die vorwiegend tangential verlaufende Faser des Wickelrohres sorgt für ausreichende Festigkeit gegenüber der Fliehkraftbeanspruchung. Das hohe E-Modul des metallischen Rotorbodens sorgt für eine hohe radiale Steifigkeit der Glocke. Zur Reduzierung der Rotorträgheit wird der Rotorboden meist aus Alu ausgeführt. Aufgrund der unterschiedlichen Wärmeausdehnungen ist Aluminium für größere Rotoren nicht geeignet. Lediglich Titan zeigt bei niedriger Ausdehnung und geringen Gewicht eine Alternative, ist aber aufgrund der hohen Kosten zu verwerfen.

Zu Beginn des Projekts wurden die Rotoren im Prepreg-Verfahren hergestellt, d. h. es wurden vorgefertigte Laminatzuschnitte in eine Fertigungsvorrichtung eingelegt und dort im Vakuumverfahren mit Harz imprägniert. Nach dem Aushärten des Harzes gingen die Rotoren zur Nachbearbeitung (Fräsen, Bohren etc.)

Diese Herstellungsweise ist für Prototypsysteme geeignet, für die Herstellung größerer Stückzahlen ineffizient und zu langsam.

Beim 3D-Wickelverfahren wird die komplette Rotorglocke in einem kontinuierlichen Arbeitsprozess gefertigt. Diese Fertigungstechnologie ist gegenüber anderen Laminier Verfahren deutlich reproduzierbarer und sehr gut industrialisierbar.

Allgemein hat das Faserwickelverfahren zentrale Bedeutung für die Herstellung rotationssymmetrischer Bauteile wie Behälter, Rohre und Wellen. Beim Wickelverfahren werden mit Matrix getränkte Fasern auf einen rotierenden Kern lagenweise, geometrisch geordnet aufgewickelt. Die Wahl der Fasern, der Matrix und des Wickelwinkels haben dabei entscheidenden Einfluss auf die Eigenschaften des gewickelten Bauteils [6].

Die Wickeltechnik ist eines der am weitesten verbreiteten Verarbeitungsverfahren für Faser-Kunststoff-Verbunde. Die ersten Wickelanlagen wurden bereits in den späten 1960er Jahren entworfen und dienten in der Militärtechnik der Herstellung von Raketenstrukturen. In den 1990er Jahren etablierte sich die Wickeltechnik zu einem vollständig automatisierten Prozess zur Herstellung von Druckbehältern. Heutzutage findet man die Wickeltechnik nicht nur im klassischen Gebiet der Luft- und Raumfahrt sondern auch in allen anderen Einsatzfeldern, angefangen vom Automotivbereich, über den Bau- und Konstruktionssektor bis hin zu Sport- und Freizeitapplikationen. Zur weiterführenden Information sei hier exemplarisch auf [6], [7], [8] verwiesen. Der Entwurf von Bauteilen aus Faser-Kunststoff-Verbundbauteilen (FKV) beinhaltet die Konstruktion und die rechnerisch-analytische Auslegung.

Eine Auslegung des Verformungs- und Versagens Verhaltens von FKV für geometrisch einfach und dünnwandige Schalenstrukturen erfolgt mittels der klassischen Laminattheorie oder der Netztheorie, bei geometrisch komplexeren oder dickwandigeren Strukturen erfolgt die Auslegung computergestützt mittels der Finite-Elemente-Methode (FEM) [9]. Das komplexe Versagensverhalten von FKV mit Haftungstrennungen zwischen Fasern und Matrix sowie Faserbrüchen kann nur mit Hilfe von physikalisch basierten Versagensbedingungen abgebildet werden [10], diese sind zum Teil noch Gegenstand der Forschung. Insbesondere kombinierte mechanisch-thermisch Belastungen erfordern bei FKV eine detaillierte Betrachtung der Änderungen von Werkstoffkennwerten und des resultierenden Bauteilverhaltens [11].

Technischer Stand der Fertigung der Rotorglocke war zu Beginn ein Preform-RTM-Verfahren, welches für die Großserie nicht geeignet ist und keine optimale lastgerechte Bauweise darstellt.

3.1.4 Arbeitspaket 3 – Umspritzung des Stators

Der Stator besteht aus Statorpaket mit integrierten Wicklungen und dem Statorträger. Statorpaket und Wicklungen sind zum mechanischen Schutz, zur Verbesserung von Isolation und thermischer Anbindung mit Verguss bzw. Tränkharz beschichtet. Der Statorträger ist zur Verlustabführung mit einer Kühlfunktion ausgeführt.

Der Vergussprozess inklusive der Aushärtung dauert ca. 24 Stunden. Die lange Prozesszeit ist durch die Verwendung warmhärtenden Vergussmassen bedingt. Der Vorteil eines spritzgusstechnisch umgesetzten Vergusses liegt in der Verwendung von reaktionsaktivierten Harzen. Die schnelle Härtung hat aber auch Risiken, die im Projekt durch neue prozesstechnische und evtl. werkstofftechnische Lösungen untersucht und abgestellt werden müssen. Zu nennen sind beispielhaft die Entstehungen von Lunkern, unvollständige Füllung der Kavität oder die Entstehung von Spannungen im Werkstoff durch die thermischen Verhältnisse während der Verarbeitung oder im Betrieb.

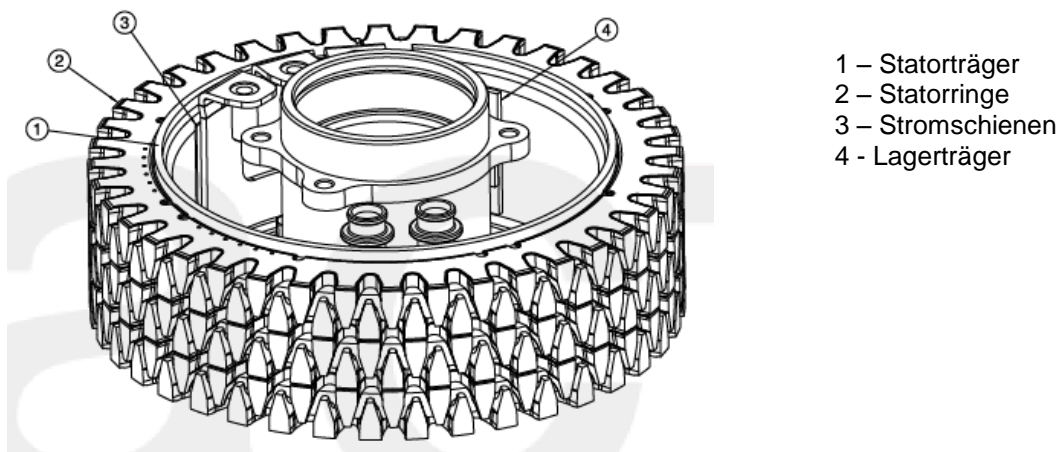


Abbildung 9: Stator vor Verguss

Die in den ersten Mustersystemen verwendeten Statorring-Segmente waren sehr anfällig für mechanische Beanspruchung, daher wurde der Stator mit einem mineralienhaltigen Verguß umhüllt. Der hohe Mineralienanteil ist notwendig, um die Entwärmung der Wicklung und des Stators sicherzustellen.

Das verwendete Vakuumvergussverfahren ist von der Prozesszeit weiter optimierbar, durch Erweiterung der Anlage kann die Vergusskapazität erhöht werden, für hohe Stückzahlen ist zwingend ein massentauglicher Prozess notwendig.

3.1.5 Arbeitspaket 4 – Herstellung eines Statorträgers / Statorkühlers

Zur Generierung einer möglichst effizienten Kühlung der Statorverluste ist der Statorträger mit Flüssigkeitskühlung ausgeführt, die möglichst gut an die verlustbehafteten Bauteile (Stator, Wicklungen) gekoppelt ist.

Bisher wurde der Statorträger aus zwei Drehteilen gefertigt, die nach Assemblierung der notwendigen weiteren Komponenten miteinander verlötet wurden. Anschließend wurde der Statorträger aufwändig überarbeitet.

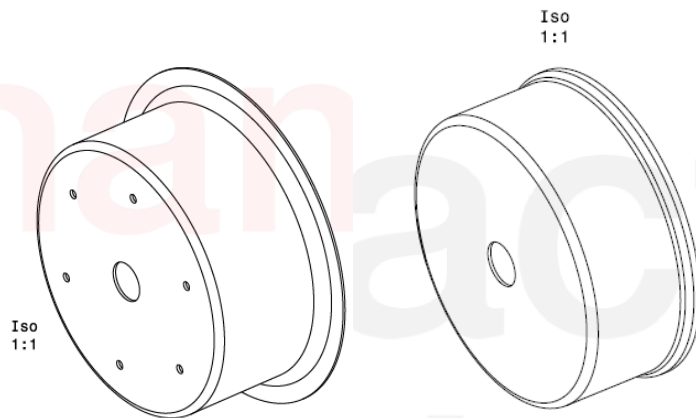


Abbildung 10: Statorträger – Rohteile (Drückteile) innen und aussen

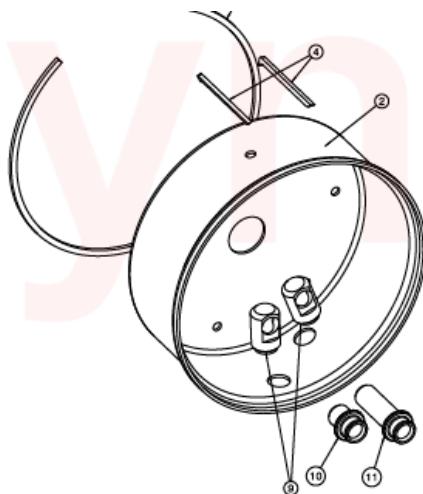


Abbildung 11: Zusammenbau Statorträger für Lötprozess

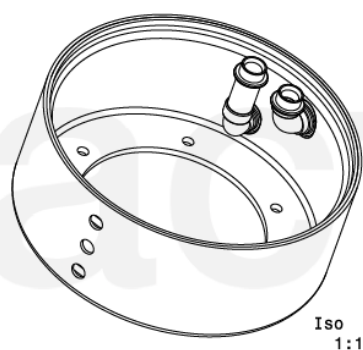


Abbildung 12: Statorträger bearbeitet

Dieser Fertigungsprozess war nicht für größere Stückzahlen geeignet.

Aufgrund der großen Temperaturspreizung zwischen Kühler und Stator ist der Kühler aus Stahl gefertigt, um ein unterschiedliches Ausdehnungsverhalten zu vermeiden, wie es bei Materialien mit unterschiedlichen Wärmeausdehnungskoeffizienten auftreten würde.

Im Anschluss daran wurden die Statorringe mit der Wicklung versehen und auf den Statorträger aufgeklebt.

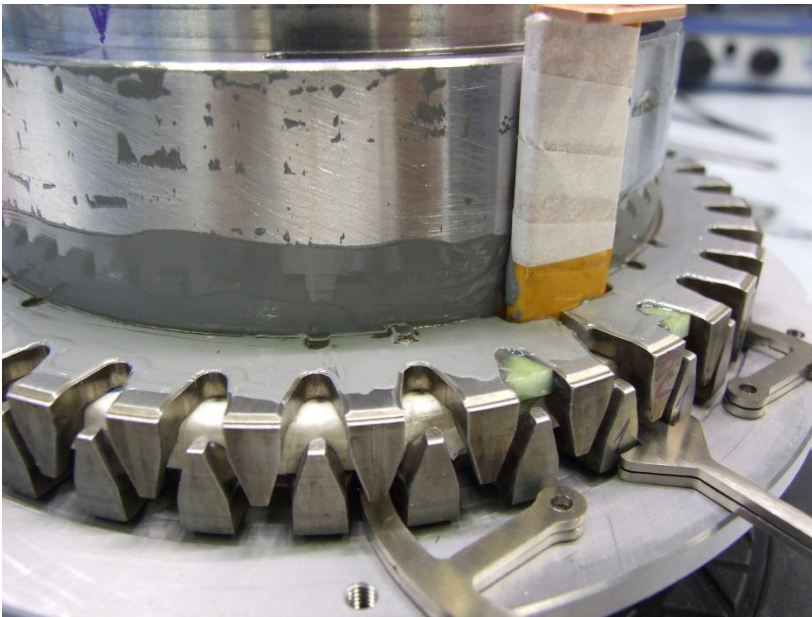


Abbildung 13: Verkleben der Statorringe mit dem Stator

Die thermische Ankoppelung der Statorringe an den Stator erfolgte mittels Wärmeleitkleber. Hierbei besteht die Gefahr von einer Ablösung oder Zerrüttung des Klebers, was zu einer Statorablösung und in der Folge zu einer Überhitzung des Motors führen würde.

3.1.6 Arbeitspaket 5 – Herstellung von Magnetringen

3.1.6.1 Magnete

Magnetpulver für kunststoffgebundene anisotrope Magnete, welches den industriellen Anforderungen bezüglich Umgebungsbedingungen und Verarbeitbarkeit entspricht, ist erst seit wenigen Jahren am Markt verfügbar.

Dementsprechend gibt es zu diesen Produkten noch sehr wenig Know-how in Hinblick auf Verarbeitung und wirtschaftlicher Fertigung. Patentrecherchen haben ergeben, dass es seitens des japanischen Pulverherstellers Aichi bereits Patente für die Herstellung von anisotropen gepressten NdFeB-Magneten unter Verwendung ihres eigenen produzierten Magnetpulvers gibt. Die Patente sind allerdings sehr stark auf die Verarbeitung des Aichi-Pulvers und auf bestimmte Magnetgeometrien eingeschränkt. Die bei MS-Schramberg angedachten Fertigungstechnologien werden diese Patente nicht verletzen. Weiterhin ist Aichi nicht an der Produktion von Magneten selbst interessiert, sondern vielmehr an der Vermarktung ihres Magnetpulvers.

Derzeit ist die Fertigung von kunststoffgebundenen isotropen NdFeB-Magneten Stand der Technik und wird in hohem Maße industriell eingesetzt. Alternativ zu den kunststoffgebunden isotropen NdFeB-Magneten werden gesinterte Magnete verwendet. Vor allem in der Antriebstechnik werden heute die gesinterten NdFeB-Magnete wegen ihren höheren Leistungsdichten bevorzugt. Die Nachteile „eingeschränkte Formgebungsmöglichkeiten und hohe Produktionskosten aufgrund vieler Fertigungsstufen“ werden dabei bewusst in Kauf genommen.

Die Fertigung von gesinterten NdFeB-Magneten erfolgt heute wegen der aufwendigen und schlecht automatisierbaren Fertigungstechniken, sowie der Rohstoffvorkommen fast ausschließlich in China.

3.1.6.2 Magnetringe

Der zu Beginn des Projekts vorherrschende Prozess ist eine Einzelbestückung der Magnetringe mit den Einzelmagneten. Die Magnete werden von einem Bestückungsroboter ausgerichtet, auf eine Vorrichtung aufgeschoben und dort verklebt. Anschließend erfolgt die Verklebung von 3 Einzelringen zu einem Ringpaket mit zueinander versetzten Magnetringen.

Prinzipbedingt, benötigt ein DYNAX®-Motor sehr wenig Magnetmaterial und kann ohne Eisenrückschluss betrieben werden. Diese Eigenschaften werden durch die "Hochpoligkeit" der Maschine ermöglicht. Um die hohe Polzahl am Rotor abbilden zu können ist jedoch eine große Anzahl an Einzelmagneten notwendig, die über den Stator anzuordnen sind.

Aufgrund der Leitfähigkeit der Magnete können diese nicht zu größeren Segmenten zusammengefasst werden, da dies zu erhöhten Wirbelstromverlusten führen würde. Derzeit werden die Einzelmagnete aus einen gesinterten Block geschnitten, beschichtet und magnetisiert.

Die "scharfen" Magnete werden pro Phase zu einem Ring zusammengeklebt und in die Rotorglocke eingebracht.

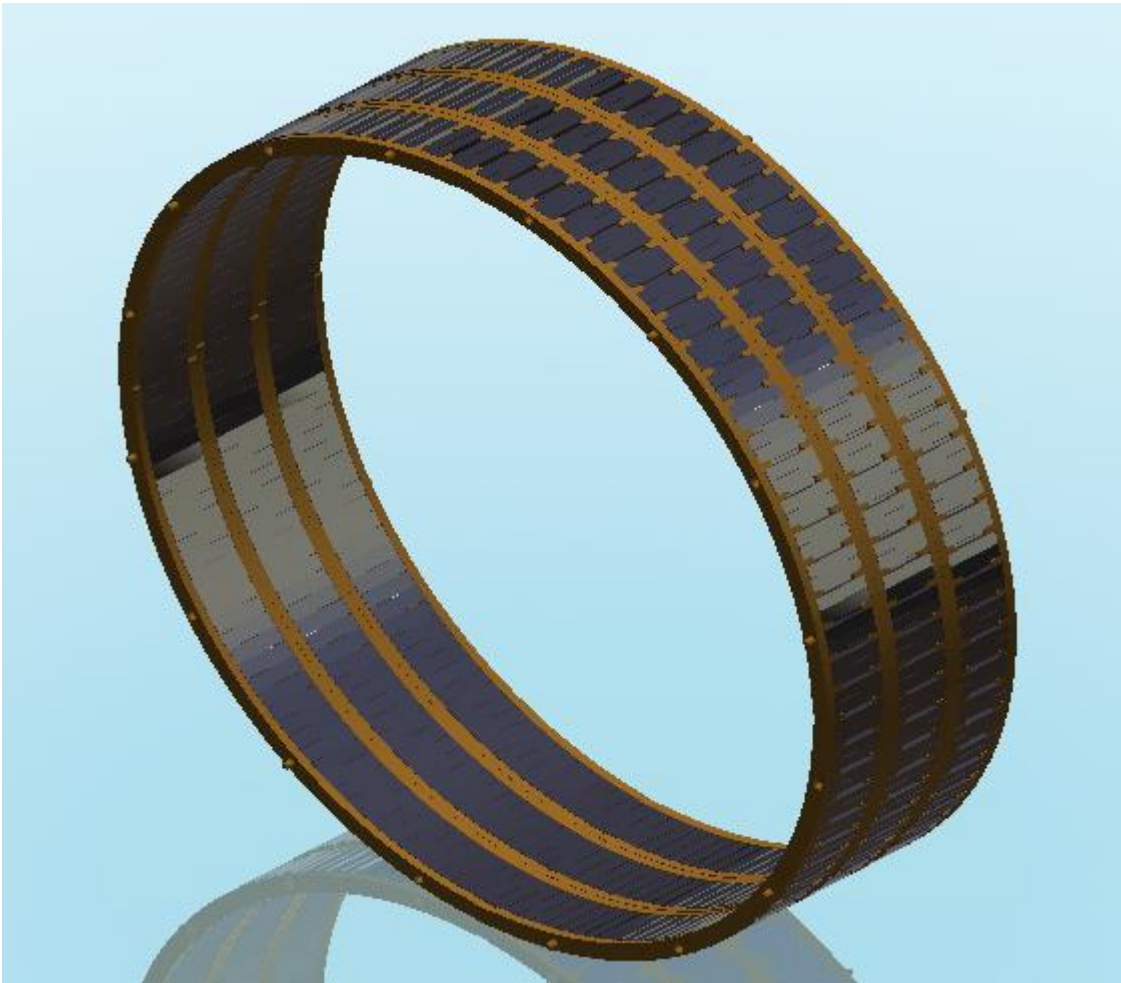


Abbildung 14: CAD-Modell Dreifach-Magnetring

Bei dieser Montage sind neben der großen Anzahl an Teilen besonders das Handeln der vormagnetisierten Bauteile, der Klebprozess und die Orientierung der Pollage eine große Herausforderung.

3.1.7 Arbeitspaket 6 – Motorregelung

3.1.7.1 Regelung elektrischer Antriebe generell

Seit Jahrzehnten sind Verfahren zur sensorlosen Regelung konventioneller Synchronmaschinen ein beliebtes Forschungsgebiet mit stetigen Veröffentlichungszahlen. Die etablierten Verfahren lassen sich in zwei Gruppen einteilen. Zum einen gibt es diejenigen, welche auf der Phasenlage der induzierte Spannung (EMK) basieren. Zum anderen sind Verfahren üblich, die Anisotropien im Magnetkreis mit der Auswertung eines Anregungssignals erfassen.

Die erste Gruppe der EMK-Verfahren [2] ist im Stillstand prinzipbedingt instabil, da in diesem Arbeitspunkt von den Rotormagneten keine Spannung in die Statorwicklungen induziert wird. Die Verfahren sind jedoch robust im mittleren und hohen Drehzahlbereich. Außerdem sind mit EMK-basierten Algorithmen beliebige Modulationsverfahren und auch Feldschwächung möglich, so dass es oberhalb einer Mindestdrehzahl von ca. 200 Upm (für den DYNAX) keine Einschränkungen im stationären Betriebsbereich der Maschine gibt.

Die zweite Gruppe der Verfahren richten das Winkelsystem an rotorwinkelabhängigen Anisotropien im Magnetkreis aus [3][4]. Zur Auswertung wird ein Trägersignal in Form einer Spannung an den Stator angelegt. Entsprechend der Induktivitäten sind Stromantworten in allen drei Phasen messbar. Die Auswertung der

Stromantworten erlaubt eine Schätzung der Pollage des Rotors. Voraussetzung für ein stabiles Verhalten der Algorithmen ist eine ausreichende, pollageabhängige Induktivitätsmodulation. Diese hängt stark von der Maschinenauslegung ab. Bei Maschinen mit geometrisch ausgeprägter Anisotropie im Rotor ist die Modulation sehr groß und somit leicht auszuwerten. Bei Maschinen mit geometrisch isotropem Rotor basiert die Induktivitätsmodulation lediglich auf lokalen Sättigungseffekten im Statormaterial durch die Permanentmagnete. Bei diesen Ausführungen sind die winkelabhängigen Effekte deutlich kleiner. Mit leistungsfähigen Algorithmen kann aber auch die Pollage dieser Maschinen geschätzt werden.

Die Maschine DYNAX verfügt über keinen Eisenrückschluss im Rotor und ist somit geometrisch isotrop aufgebaut. Die winkelabhängige Induktivitätsmodulation ist rein auf Sättigungseffekte im Stator zurückzuführen. Die Verhältnisse im Magnetkreis der Maschine modellieren jedoch die Anisotropie und setzen diese in manchen Arbeitspunkten auf null und verursachen u.U. eine Drehung der Anisotropie. Erschwerend hinzu kommt die asymmetrische Kopplung der Streuflüsse zwischen den Phasenscheiben.

3.1.7.2 Sensorlose Motorregelung

Bis zum Projektende sind von dritter Seite keine Algorithmen bekannt, mit denen eine sensorlose Winkelbestimmung mit den beschriebenen Effekten möglich ist.

Die bisherige Motorregelung basierte zum Projektstart auf einer sensorgeführten Regelung. Hierbei ist ein sogenannter Pollage- oder Rotorlagesensor notwendig, um die Position der Magnete des Rotors relativ zum Stator zu messen.

Die meisten Elektromotoren benötigen eine mehr oder minder genaue Pollageerfassung, um einen Betrieb zu ermöglichen.

Ein Entfall des Rotorlagesensors und die Nutzung einer sensorlosen Regelung wäre für Elektrofahrzeuge ein Mittel zur Kostensenkung und dient im Fehlerfall als „limp home“-Funktion, um das Erreichen der nächsten Werkstatt zu ermöglichen.

3.1.8 Arbeitspaket 7 – Fertigungsplanung

Die Planung einer Fertigungslinie ist notwendig, um einen effizienten Waren- und Prozessfluss innerhalb der Fertigungsanlage zu ermöglichen. Oftmals müssen neue Fertigungslinien in bestehende Infrastrukturen integriert werden, hier ist ein besonderes Augenmerk auf die optimale Nutzung der verfügbaren Ressourcen zu legen. Üblicherweise finden bei großen Fertigungsanlagen eine „Planung auf der grünen Wiese“ statt, bei der keine Rücksicht auf bestehende Infrastruktur gelegt wird, sondern eine komplett neue Planung mit bestmöglicher Anordnung von Logistik, Lager, Vorbereitung, Arbeits- und Prüfflächen.

3.1.9 Arbeitspaket 8 - Projektmanagement

Das Projektmanagement innerhalb eines Förderprojekts ist notwendig, um die Anstrengungen der Projektpartner untereinander abzustimmen und mit effizientem Einsatz der verfügbaren Ressourcen ein gemeinsames Ziel zu erreichen.

3.2 wissenschaftlicher und technischer Stand zum Ende des Vorhabens

Nach eigenen Recherchen bei Automobilherstellern ist die Transversalflusstechnologie eine sehr interessante Technologie, um Hybridtopologien zu implementieren.

Bei Betrachtung des Neuen Europäischen Fahrzyklus **NEFZ** sind ca. 15 kW Hybridleistung ausreichend, um CO2-Flottenziele zu erreichen. Diese Leistung kann derzeit auch von Asynchronmotoren im Spannungsbereich 48V erreicht werden. Eine Leistungssteigerung von Asynchronmotoren ist jedoch nicht mehr ohne weiteres möglich.

Durch den Wechsel der OEM auf den neuen Zyklus WLTP werden deutlich erhöhte Anforderungen an Hybridkomponenten gestellt, um die Flottenziele zu erreichen [12].

Damit entsteht ein völlig neues Potenzial für den Einsatz des DYNAX®-Antriebs, da die erhöhten Anforderungen dem Leistungspotenzial dieses Elektromotors deutlich entgegenkommen.

Neuer Zyklus WLTP

	WLTP	NEFZ
Starttemperatur	kalt	kalt
Zykluszeit	30 min	20 min
Standzeitanteil	13 %	25 %
Zykluslänge	23,25 km	11 km
Geschwindigkeit	mittel: 46,6 km/h - maximal: 131 km/h	mittel: 34 km/h - maximal: 120 km/h
Antriebsleistung	mittel: 7kW - maximal: 47 kW	mittel: 4 kW - maximal: 34 kW
Einfluss Sonderausstattung und Klimatisierung	Sonderausstattungen werden für Gewicht, Aerodynamik und Bordnetz-Bedarf (Ruhestrom) berücksichtigt. Keine Klimaanlage.	Wird gegenwärtig nicht berücksichtigt.
		Quelle: VDA

Abbildung 15: Vergleich WLTP – NEFZ

4 Planung und Ablauf des Vorhabens (z.B. Planabweichung, Probleme bei der Durchführung, etc.)

4.1 ursprüngliche Planung

Projektdauer	Projektjahr 1				Projektjahr 2				Projektjahr 3		
	I	II	III	IV	I	II	III	IV	I	II	III
AP 1 Herstellung und Konfektionierung der Tangentialwicklung möglichst in einem kontinuierlichen Prozess (CD, SP, TUC)											(10/35,24)
AP 1.10 Entwicklung und Fertigung von Qualifizierungsmustern		M1					M4	(7/20,24)			
AP 1.20 Entwicklung und Fertigung von Fertigungsvorrichtungen									(4/8,5)		
AP 1.30 Durchführung der Qualifizierung											(3/6,5)
AP 2 Herstellung von Rotor aus GFK-Laminat im 3D Wickelverfahren (CC, IWW, MS, CD)											(10/107)
AP 2.1 Faserkunststoffgerechte Auslegung, Berechnung + Konstruktion + Glocke		M1							(8/27)		
AP 2.2 Entwicklung des 3D Wickelverfahrens, Herstellung + Verifizierung Funktionsmustern						(4/34)					
AP 2.3 Entwicklung und Fertigung von Fertigungsvorrichtungen							(5/20)				
AP 2.4 Herstellung von Qualifizierungsmustern									M6	(5/17)	
AP 2.5 Durchführung der Qualifizierung											(3/9)
AP 3 Umspritzung Stator mittels Duroplast-Spritzgusswerkzeug (SP, CD, TUC)											(10/58,79)
AP 3.10 Überarbeitung der Konstruktion des DYNAX-Motors		M1	M2	(3/14,39)							
AP 3.20 Entwicklung und Fertigung von Werkzeugen (Vergusshersteller)								(7/10,06)			
AP 3.30 Herstellung von Qualifizierungsmustern									M6	(5/15,52)	
AP 3.40 Durchführung der Qualifizierung											(5/18,82)
AP 4.00 Kühler aus gerollten Strangpressprofilen (CD, Unterauftragnehmer)									(8/9,75)		
AP 4.10 Überarbeitung der Konstruktion des DYNAX [®] -Motors		M1		(3/3,75)							
AP 4.20 Auswahl und Untersuchung von Wärmeleitmedien, Simulation und Bauteilkonstruktion, Entwicklung und Fertigung von Werkzeugen				M3		(4/1,5)					
AP 4.30 Herstellung von Qualifizierungsmustern							M4	(4/0)			
AP 4.40 Durchführung der Qualifizierung									(3/4,5)		
AP 5.00 Rotormagnete als Komplettling, Magnetisierungstechnik, Magline Magnete (MS, CD, SP, IWW, TUC, CC)											(10/92,04)
AP 5.10 Simulation Magnetmaterial-Einflüsse, Musterfertigung		M1		(3/30,44)							
AP 5.20 Überarbeitung der Konstruktion des DYNAX-Motors					(2/9,5)						
AP 5.30 Entwicklung und Fertigung der Presswerkzeuge und Magnetisierungsvorrichtungen								(5/24,1)			
AP 5.40 Herstellung der Qualifizierungsmuster									M6	(3/14,5)	
AP 5.50 Durchführung der Qualifizierung											(3/13,5)
AP 6.00 Sensorlose Motorregelung (HL, CD)											(10/35)
AP 6.10 Stabilitätsnachweis für die sensorlose Regelung im oberen Drehzahlbereich			(2/4)								
AP 6.20 Entwicklung eines Konzeptes für die sensorlose Regelung im unteren Drehzahlbereich unter Berücksichtigung des Lastenheftes		M1						M5	(7/20)		
AP 6.30 Implementierung der sensorlosen Regelung für den vollständigen Drehzahlbereich										(3/6)	
AP 6.40 Test und Optimierung am Prüfstand											(2/5)
AP 7.00 Fertigungsplanung (CD, SP)											(10/5,58)
AP 7.10 Ziel- und Eckwertplanung			(2/0,58)								
AP 7.20 Grobplanung										(8/3,5)	
AP 7.30 Detailplanung										M7	(3/1,5)
AP 8.00 Projektmanagement (CD, SP, IWW, TUC)											(10/18,97)
											(10/18,97)

Tabelle 1: ursprüngliche Projektplanung

Meilensteine	Projektjahr 1				Projektjahr 2				Projektjahr 3	
	I	II	III	IV	I	II	III	IV	I	II
M1: Lastenhefte erstellt		M1								
M2: Entscheidung Vergussmaterial/Spritzgussmaterial Stator			M2							
M3: Musterfertigung abgeschlossen				M3						
M4: Fertigung Qualifizierungsmuster Tangentialwicklung + Kühler							M4			
M5: Konzeptspezifikation sensorlose Regelung								M5		
M6: QM-Muster Rotor und Stator									M6	
M7: Durchlaufoptimierung mittels Simulation										M7

Tabelle 2: ursprüngliche Meilensteinplanung

4.2 Abweichungen im Zeitplan

Da zu den meisten Aufgabenstellungen in den Arbeitspaketen keine bekannten oder vergleichbaren Fertigungsprozesse aus Elektrotechnik oder Maschinenbau existierten, haben mehrere Verzögerungen in verschiedenen Arbeitspaketen zu leichten Verschiebungen im Plan geführt. Nach Rücksprache mit dem

Fördergeber konnte durch eine Verlängerung um 3 Monate erreicht werden, um diese Verschiebungen zu kompensieren und die Dokumentation im Rahmen der Projektzeit zu ermöglichen.

Weiterhin musste die Verlängerung des Förderprojekts um 3 Monate ebenfalls in die Planungen eingearbeitet werden.

4.2.1 Arbeitspaket 1:

Herstellung und Konfektionierung der Tangentialwicklung möglichst in einem kontinuierlichen Prozess

Die Auslegung und Auswahl des Litzenmaterials für das Arbeitspaket 1 „Herstellung und Konfektionierung einer Tangentialwicklung“ stellte keine Probleme dar.

Herausfordernd war die Verarbeitung des Litzenmaterials, insbesondere die prozessangepasste Abisolierung der Litzenenden in Verbindung mit einem großserientauglichen Prozess zur Kontaktierung des Anschlussbereiches.

Problematisch war die Auswahl und Qualifizierung eines Lieferanten, da diese meist auf die Produktion hoher Stückzahlen ausgerichtet sind. Niedrigen Stückzahlen oder komplexen Herausforderungen stehen diese Serien-Lieferanten meist ablehnend gegenüber, so dass der Arbeitspunkt AP 1.30 – Qualifizierung der Muster zunächst erfolglos abgebrochen werden musste.

4.2.2 Arbeitspaket 2:

Herstellung von Rotor aus GFK-Laminat im 3D-Wickelfverfahren

Während des Vorhabens traten im Bereich der Auslegung der Rotorstruktur zwei wesentliche Probleme auf. Organisatorisch problematisch war, dass die Leistungsdaten des Motors vom erzielbaren Erfolg des Vorhabens abhängig waren. So beeinflusst beispielsweise die Remanenz der Magnete, deren Steigerung ebenfalls Ziel des Vorhabens war, die Leistung des Motors.

Insofern konnten die für die Auslegung maßgeblichen Kennwerte der auftretenden Lasten im Vorhinein nur geschätzt werden. Eine genaue Auslegung der Struktur war damit nicht möglich.

Wesentlich war jedoch die technologische Machbarkeit sowie die Einschätzung der Vor- und Nachteile der im Vorhaben untersuchten Technologien. Dies war auch ohne endgültiges Lastenheft möglich.

Als zweites Problem trat während der Auslegung der Struktur die eingeschränkte Nutzbarkeit der kommerziellen Software für die Fertigungssimulation auf. Die am IVW vorhandene Software „CADWIND“ ist nicht in der Lage mehrschichtige Wickelsimulationen an nicht rotationssymmetrischen Bauteilen so zu erstellen, dass daraus die notwendigen Laminataufbauten für die Finite Elemente Simulation exportiert werden können. Um dies zu erreichen musste selbst ein Algorithmus geschrieben werden, der dies zumindest in guter Näherung erreicht.

4.2.3 Arbeitspaket 3:

Umspritzung Stator mittels Duroplast-Spritzgiesswerkzeug

Das Arbeitspaket 3 wurde in enger Abstimmung mit den projektbegleitenden Partnern und dem Projektträger abgeändert.

Es wurde im Laufe der Entwicklungsarbeiten erkannt, dass die erforderlichen Toleranzen von teilweise 0,01mm an der vorbereiteten Baugruppe Stator nicht umsetzbar sind. Es bestand die Gefahr, dass die Baugruppe, die zum Zeitpunkt des Vergießens bereits zu 80% fertiggestellt ist, beim Verschliessen des

Spritzgusswerkzeugs zerstört wird, wenn sie außerhalb der genannten Toleranz liegt. Daher wurde seitens des Projektpartners Schwarzpunkt GmbH & Co. KG eine Untersuchung vorgenommen, welche Verarbeitungsschritte notwendig sind, um die Positioniergenauigkeit sicherzustellen:

Zusätzliche Bearbeitung
des Teiles

1. Vorwärmen der Einlegeteile in zu beschaffendem Wärmeofen
(manuell oder automatisch – abhängig von der Menge)
2. Einsetzen der vorgewärmten Einlegeteile in das Spritzgußwerkzeug
(manuell oder automatisch – abhängig von der Menge)
3. Umspritzen des Einlegeteils (automatisch)
4. Entnahme der umspritzten Baugruppe (manuell mit „?“ – eigentlich
automatisch)
5. Abkühlen der Baugruppe
6. Entgraten der Baugruppe
(manuell oder automatisch – abhängig von der Menge)
7. Prüfen (visuell) des entgrateten Bauteils
(manuell)
8. Ablage in bereitgestellte Verpackungen
(manuell)

Hierfür würde ein enormer Werkzeugpark notwendig, um die Positioniergenauigkeit des bereits hochtemperierten Bauteils sicherzustellen. Die **Investitionskosten** für diesen Werkzeugpark wurden wie folgt abgeschätzt:

Vorwärmen der Einlegeteile:	ca. 85.000 Euro
Einsetzen des Bauteils in die Spritzgussanlage:	ca. 160.000 Euro
Sensorik zur Sicherstellung der korrekten Position:	ca. 20.000 Euro
Spritzgusswerkzeug	ca. 100.000 Euro
Entnahme der Teile / Abkühlstation:	ca. 45.000 Euro
Beschriften / Codieren der Bauteile	ca. 50.000 Euro
Entgraten der Bauteile	ca. 45.000 Euro
Summe:	ca. 500.000 Euro

Weiterhin wurde ermittelt, dass die zu erwartenden **Herstellkosten** für die Umspritzung des Bauteils deutlich von den zu Projektbeginn angenommenen Herstellkosten abweichen:

War man zu Projektbeginn von einer Summe von wenigen Euro je Spritzgussvorgang ausgegangen, stellte sich aufgrund der komplexen Bauteilstruktur heraus, dass die Kosten **ohne Berücksichtigung der oben genannten Investitionen** stückzahlabhängig im Bereich von 55 Euro / Stück (bei 1.000 St.) bis zu 31 Euro / Stück (bei 25.000 Stück) liegen könnten.

Die eventuell notwendigen Designänderungen zur Einhaltung der notwendigen Fertigungstoleranzen im Spritzguss stehen in keinem Verhältnis zum Nutzen. Vielmehr führen die Anpassungen zu signifikanten Einschränkungen bei der Performance.

Zudem ist für die Einrichtung und das Einschwingen des Spritzgussprozesses eine hohe Vorlaufstückzahl von fertigen Statorpaketen oder Spritzgussdummys notwendig (600 – 800 Einheiten). Der

produktionsbegleitende Ausschuss von bis zu 200 Einheiten für das Anfahren der Anlage zu Produktionsbeginn zeigte in der wirtschaftlichen Betrachtung keinen signifikanten Vorteil gegenüber dem derzeitigen Vergussprozess.

Daher wurde 2013 seitens Compact Dynamics entschieden, die Umfänge des Arbeitspaketes 3 zu überdenken, es wurden Technologierecherchen durch Compact Dynamics (siehe Abbildung 16: Ergebnis Technologierecherche AP3) vorgenommen, um Alternativen zum Spritzguss zu identifizieren. Der Projektträger wurde über die Überlegungen informiert und hat einer Änderung der Inhalte des Arbeitspaketes zugestimmt.

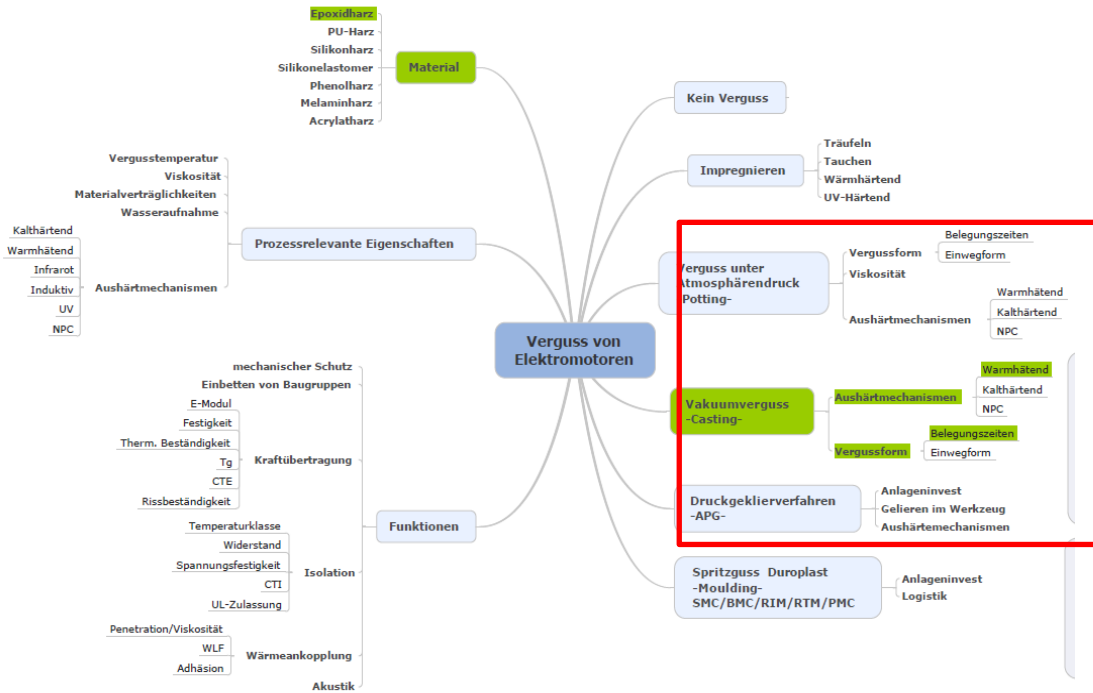


Abbildung 16: Ergebnis Technologierecherche AP3

Mit der Firma Schwarzpunkt wurde daher einvernehmlich festgelegt, die Umstellung auf einen Spritzgussähnlichen Prozess erst bei Erreichen einer Stückzahl von mindestens 5.000 Einheiten in Erwägung zu ziehen (siehe Abbildung 17: AP3 - Übersicht Stückzahlenszenarien).

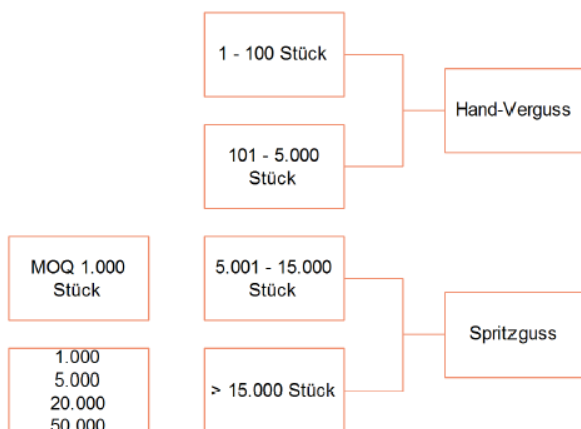


Abbildung 17: AP3 - Übersicht Stückzahlenszenarien

In Abstimmung mit der TU Chemnitz wurde der Fokus auf die dem derzeitigen Prozess ähnlichen Technologien, unter Berücksichtigung von Spritzguss als Zieltechnologie bei großen Stückzahlen, gelegt.

Die Zusammenarbeit mit der Schwarzpunkt Schwarz GmbH & Co. KG wurde nach dem Approval durch den Projektträger Mitte 2014 beendet, die Kooperation mit der TU Chemnitz wurde verändert weitergeführt.

4.2.4 Arbeitspaket 4: Kühler aus gerollten Strangpressprofilen

Im Arbeitspaket 4 wurden Mittel in Abstimmung mit dem Projektträger umgewidmet, um die Entwicklung eines optimierten Statorträgers / - kühlers in eigener Regie vorzunehmen. Die Untersuchungen zu wasserseitig aluplattierten Feranblechen waren erfolgreich, bedürfen aber weiterer Entwicklung, die im Rahmen eigener Arbeiten fortgeführt werden.

4.2.5 Arbeitspaket 5: Rotormagnete als Komplettring, Magnetisierungstechnik, MagFine-Magnete

Das Arbeitspaket 5 konnte innerhalb des Projektrahmens nicht abgeschlossen werden, da bei der Entwicklung und Herstellung einer Vorrichtung zum Pressen / Aufmagnetisieren der Magnetringe nicht erwartete technische Herausforderungen auftraten.

Die Arbeiten werden von der Firma MS Schramberg im Rahmen eigener Forschung beendet.

4.2.6 Arbeitspaket 6: Sensorlose Motorregelung

Das Arbeitspaket 6 wurde planabweichend später begonnen, konnte jedoch plangemäß erfolgreich beendet werden.

4.2.7 Arbeitspaket 7: Fertigungsplanung

Die Arbeiten wurden plangemäß abgeschlossen.

4.2.8 Arbeitspaket 8: Projektmanagement

Die Arbeiten wurden plangemäß abgeschlossen.

5 Erzielte Ergebnisse

Nachfolgend wird über die Ergebnisse der Arbeitspakete berichtet.

5.1 Arbeitspaket 1 – Herstellung einer Tangentialwicklung

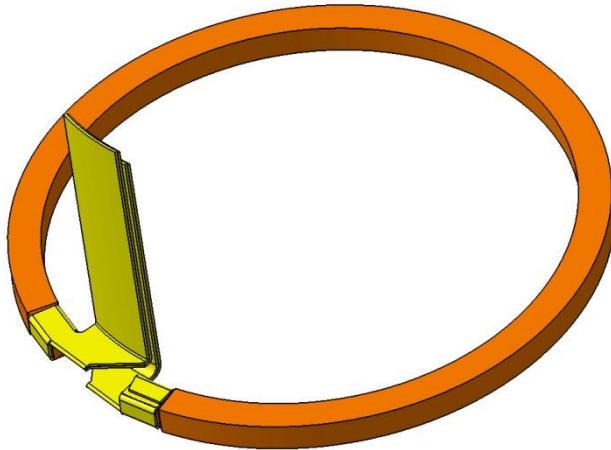


Abbildung 18: CAD-Modell Tangentialwicklung

Der prinzipbedingte Aufbau des DYNAX® - Axialflussmotors ermöglicht einerseits und fordert andererseits den Einbau einer Tangentialwicklung.

Diese Wicklung hat keine Wickelköpfe, so dass nahezu 100% des eingesetzten Kupfers zur Erzeugung des magnetischen Feldes dienen und somit einen hohen Wirkungsgrad ermöglichen.

Ein großer Vorteil der hier vorgesehenen Tangentialwicklung besteht auch darin, dass man Wicklungen mit einer Windung realisieren kann. Dies ermöglicht große Kupferquerschnitte, hohe Ströme und den Betrieb mit niedriger Spannung. Im vorliegenden Projekt kann dadurch eine Betriebsspannung von unter 60 V umgesetzt werden; somit ist der Antrieb laut Norm berührsicher, es gibt keine gesetzlichen Vorschriften an Isolation und an die Qualifikation des Wartungspersonals.

Die kompakte Bauweise des DYNAX® wird unter anderem durch das feinpolige Design erreicht. Dieses bedeutet jedoch bei hohen Drehzahlen auch hohe Polwechselfrequenzen. Für die Wicklung ist daher eine HF-Litze einzusetzen, die aus einer Vielzahl von einzeln isolierten Drähtchen besteht. Diese sind mit einem hochtemperaturbeständigen Isolationslack überzogen. Durch Wirbelströme, Skin-Effekte und Proximity-Effekte würden sonst hohe Wicklungsverluste auftreten.

Die Konfektionierung der Wicklungsenden ist eine besondere Herausforderung. So ist durch geeignete Verfahren sicher zu stellen, dass jeder Draht einzeln abisoliert und an der Wicklungsverschaltung zuverlässig kontaktiert ist. Der aktuelle Prozess ist, dass die Wicklungen aus HF-Kordeln von Hand profiliert, isoliert und konfektioniert werden. Die Kontaktierung der Einzeldrähte wird durch Erhitzen beim Weichlöten realisiert.

Ziel war, dass die Wicklung in einem kontinuierlichen Prozess gebündelt, kompaktiert und isoliert werden soll. Anschließend soll die Wicklung abgelängt und die Wicklungsenden werden durch Widerstands- oder Ultraschallschweißen kontaktiert. Es existiert dazu bislang aber kein bekannter Prozess aus dem Elektromaschinenbau.

Im Arbeitspaket 1 wurden folgende Untersuchungen vorgenommen:

- Auswahl der Litze / Isolation der Litze
- Kontaktierung der Litze
- Industrialisierung

5.1.1 Auswahl des Litzenmaterials / Isolation der Litze

Da die Betriebstemperaturen im Stator und an der Wicklung auf über 160° C steigen können, war eine HF-Litze mit einem zulässigen Temperaturbereich bis 250° C notwendig.

Die HF-Litze musste zu den Statorringen und die Stromschiene zum Statorträger und zu den Statorringen elektrisch isoliert werden.

Die Isolation musste mindestens der Temperaturklasse H entsprechen und kurzzeitig 250°C standhalten ohne die Isolationseigenschaften zu verlieren. Um die Verlustleistung aus der Wicklung in die Statorringe und anschließend in den Stator Kühler zu leiten, musste eine gute Wärmeanbindung zu den Statorringen gegeben sein. Dazu war die Isolation möglichst dünn zu gestalten (<0,2mm) und parallel eine möglichst hohe Wärmeleitfähigkeit zu erreichen.

Eine besondere Bedeutung kam hierbei dem Isolationslack der Litzendrähte zu, weil der Lack zur Kontaktierung möglichst einfach zu entfernen sein sollte, ohne die Kontaktfläche zu beeinträchtigen. Da die Statortemperatur bis zu 160° C erreichen kann, muss die Isolierung auf diese Temperatur ausgelegt sein, um im Dauerbetrieb keine Schädigung zu erleiden.

Nachfolgende Lacktypen wurden betrachtet:

Bezeichnung	Lacktyp	Festkörpergehalt	Kunststoff
Firma Pack:			
V155	Voltatex 6125	25%	Imid-modifiziertes Polyurethan
V180	Voltatex 6325	25%	Imid-modifiziertes Polyurethan
	Voltatex 6335	35%	
WV180			Polyesterimid
W 210			THEIC-modifiziertes (Tris-2-Hydroxyethyl Isocyanurate) Polyesterimid + Polyamidimid
W 240			Polyimid

Der Festkörpergehalt gibt die Menge von Polymeren im Lösungsmittel an. Das Lösungsmittel wird anschließend bei hoher Temperatur verdampft und katalytisch verbrannt.

Firma Heermann:

W 215			Polyamidimid
-------	--	--	--------------

Firma Kaltenbach:

WO 210			THEIC-modifiziertes Polyesterimid
--------	--	--	-----------------------------------

Firma Synflex:

W 210			Grundlack (75% der Gesamtdicke) Polyesterimid Decklack (25%) Polyamidimid
-------	--	--	--

Tabelle 3: Übersicht Isolationsmaterialien Feindrähtlitzen

5.1.2 Kontaktierung der Litze

Es wurden Untersuchungen zur Kontaktierung der Litzen mit dem Anschlussbereich vorgenommen, um die bestmögliche, prozesstaugliche Verbindungsart zu identifizieren.

- Entlacken der Hochfrequenzlitze
- Ultraschallschweißen
- Widerstandsschweißen
- Tauchbadlöten

5.1.2.1 Entlacken der Hochfrequenzlitze

Um eine gute Kontaktierung zu ermöglichen, darf kein Lack an den Drähten der HF-Litze verbleiben. Daher wurden verschiedene Möglichkeiten untersucht, den Lack zu entfernen. Erste Versuche wurden mit Heißbadentlacker Rhobapex HA der Firma Rhoba Chemie durchgeführt, welche sehr erfolgversprechend waren.



Abbildung 19: Ergebnis nach Entlackung

5.1.2.2 Ultraschallschweißen

Das Ultraschallschweißen ist ein Verfahren zum Fügen von thermoplastischen Kunststoffen und metallischen Werkstoffen. Die Verschweißung wird durch eine hochfrequente mechanische Schwingung erreicht, welche zwischen den Bauteilen zu Erwärmung durch Molekular- und Grenzflächenreibung, bei Metallen auch zur Verzahnung und Verhakung der Fügepartner führt. Somit gehört das Ultraschallschweißen zur Gruppe der Reibschweißungen.

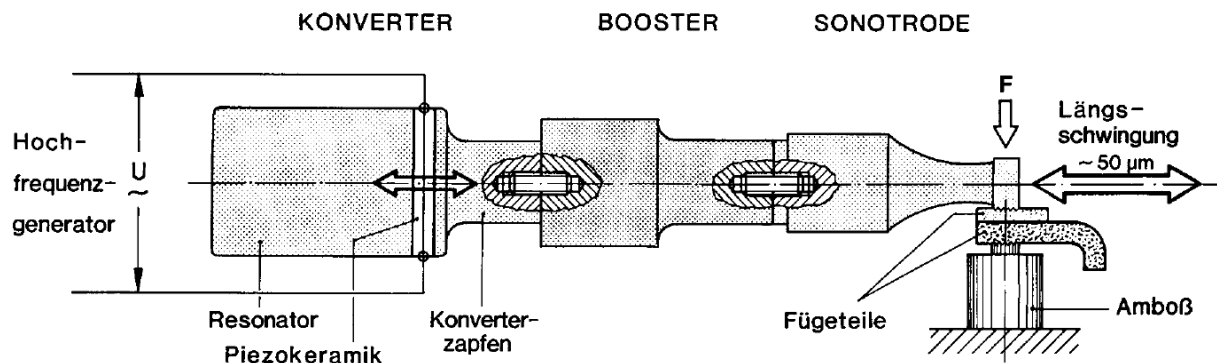


Abbildung 20: Prinzipskizze Ultraschallschweißen

Das Ultraschallschweißen eignet sich gut zum Entfernen der Isolierung, die Kontaktierung von Litzenmaterial mit großem Durchmesser ist jedoch nicht ausreichend, zudem erfolgt durch den mechanischen Andruck eine Geometrieänderung am Kabelschuh.



Abbildung 21: Kabelschuh nach erfolgtem Ultraschallschweißen

Fazit:

Die Kontaktstellen weisen eine unzureichende Geometrietreue auf. Die Kontaktierungen entsprechen nicht den Anforderungen.

5.1.2.3 Widerstandsschweißen

Widerstandsschweißen ist ein Schweißverfahren für elektrisch leitfähige Werkstoffe auf Basis der jouleschen Stromwärme eines durch die Verbindungsstelle fließenden elektrischen Stromes. Die Verbindungspartner werden bis zum Erreichen der Schweißtemperatur erhitzt und an der Berührungsstelle unter der Wirkung einer Kraft durch Erstarren von Schmelze, durch Diffusion oder auch in fester Phase verschweißt.

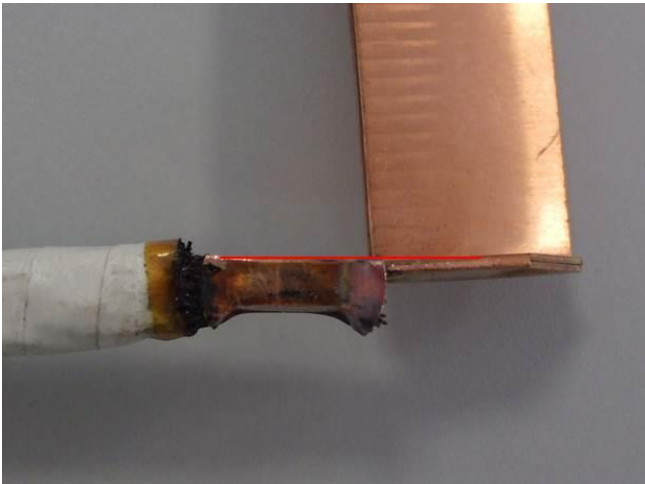


Abbildung 22: Kontaktierung mittels Widerstandsschweißen

Zugversuche ergaben, dass der Kontaktbereich erst bei einer Belastung von ca. 3.500 N zerstört wurde.

Dieses Schweißverfahren ist daher für große Stückzahlen sehr gut geeignet, entsprechende Werkzeuge und Vorrichtungen sind erforderlich.

5.1.2.4 Tauchbadlöten

Beim Tauchbadlöten wird das Werkstück ganz oder teilweise in das flüssige Lot eingetaucht.



Abbildung 23: Kontaktierung mittels Tauchbadlöten

Dieses Verfahren wird aktuell manuell durchgeführt, kann aber leicht automatisiert werden. Dabei wird die profilierte HF-Litze im Tauchbad gelötet und die Kontaktschienen anschließend angelötet.

5.1.3 Spezifikation Litze und Stromschienen

Im Zuge der Entwicklung und Diskussion mit potenziellen Partnern wurde folgende Spezifikation für die Tangentialwicklung erarbeitet:

Spezifikation des Litzenmaterials:

- HF-Litze Temperaturklasse H, kurzzeitig 240°C
- Schlaglänge ≥ 125 mm
- Drahtdurchmesser 0,3 bis 0,355mm
- Gesamtquerschnitt ≥ 40 mm²
- möglichst wenig verseilt

Herstellerbezeichnung (exemplarisch):

- Rupalit Profil 400 x 0,355 mm WV180
- 10,5 x 8,5 mm
- 3 Lagen Nomex

Abmessungen:

- Profilgeometrie: 10,5 x 8,5 mm
- Die Profilgeometrie muss kein exaktes Rechteck sein, sie kann etwas bauchig ausgeführt sein.
- Schlaglänge 125 mm; ohne mittleres Litzenpaket (alle Einzeldrähte müssen die gleiche Länge aufweisen)

Isolation Litze:

- 3 lagig (66%) mit Nomex umwickelt
- Nomexband Typ 410
- 15 mm breit, 0,05 mm dick
- Das Nomexband darf keine Risse aufweisen.

Isolation Einzeldrähte:

- lackiert mit modifiziertem Polyesterimid
- WV 180 (Temperaturklasse H; 180°C)
- Grad I

Stromschiene

- Kupferquerschnitt ≥ 35 mm²
- Temperaturklasse H, kurzzeitig 240°C
- Isolationsprüfung mit 500V

Die Kontaktierung zwischen Stromschiene und Litze muss innerhalb der Ringnut sein. Die elektrische Isolation zum Statorring muss auch an der Verbindungstelle gewährleistet sein.

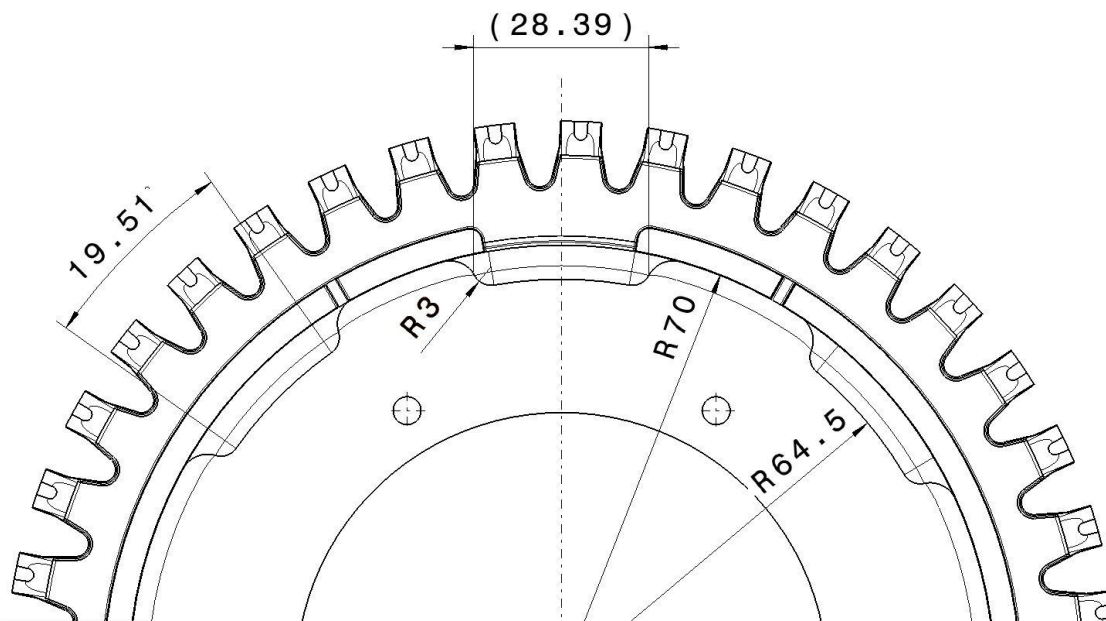


Abbildung 24: verfügbarer Bauraum Stromschiene

Elektrische Werte

- $R_{dc} < 0,25 \text{ m}\Omega$ (Wicklung ohne Stromschienen)
- $R_{666\text{Hz}} < 0,53 \text{ m}\Omega$; Ziel $< 0,4 \text{ m}\Omega$ (Tests bei CD)
- Isolationwiderstand bei 500V $> 1 \text{ G}\Omega$ (Test im eingebauten Zustand, fertigungsbegleitend evtl. im Dummy)

5.1.4 Konstruktionszeichnungen Wicklung

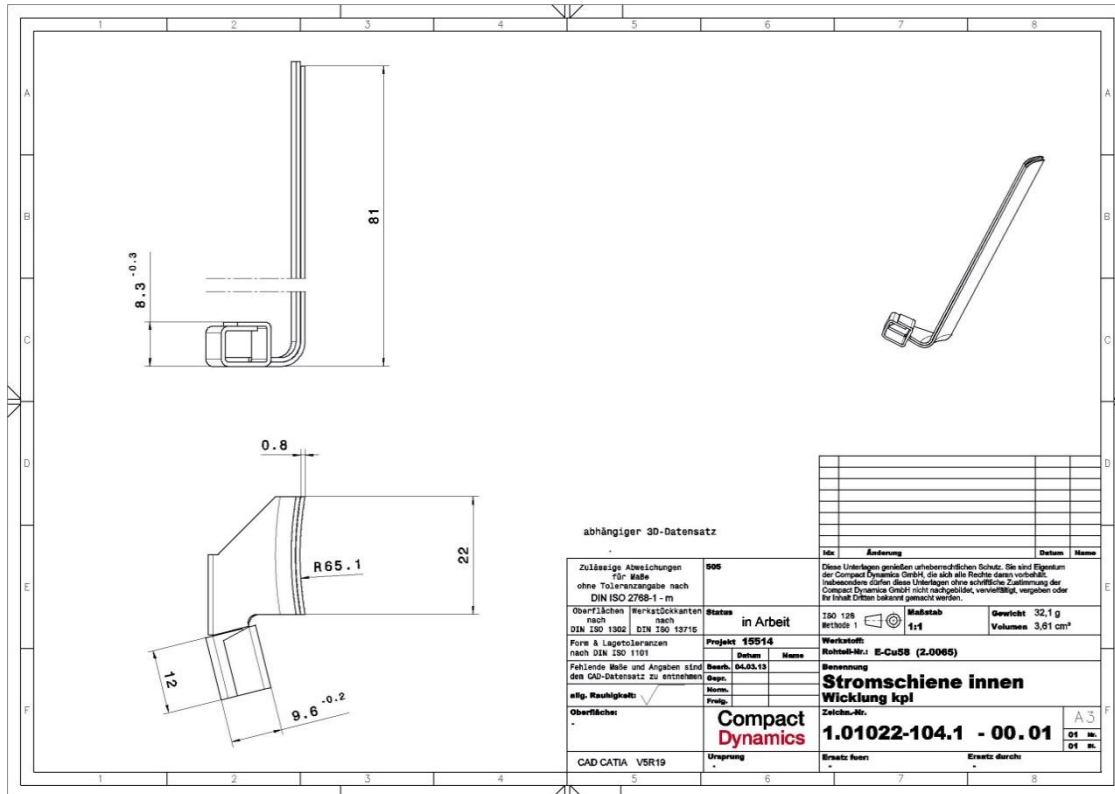


Abbildung 25: Konstruktionszeichnung Stromschiene innen

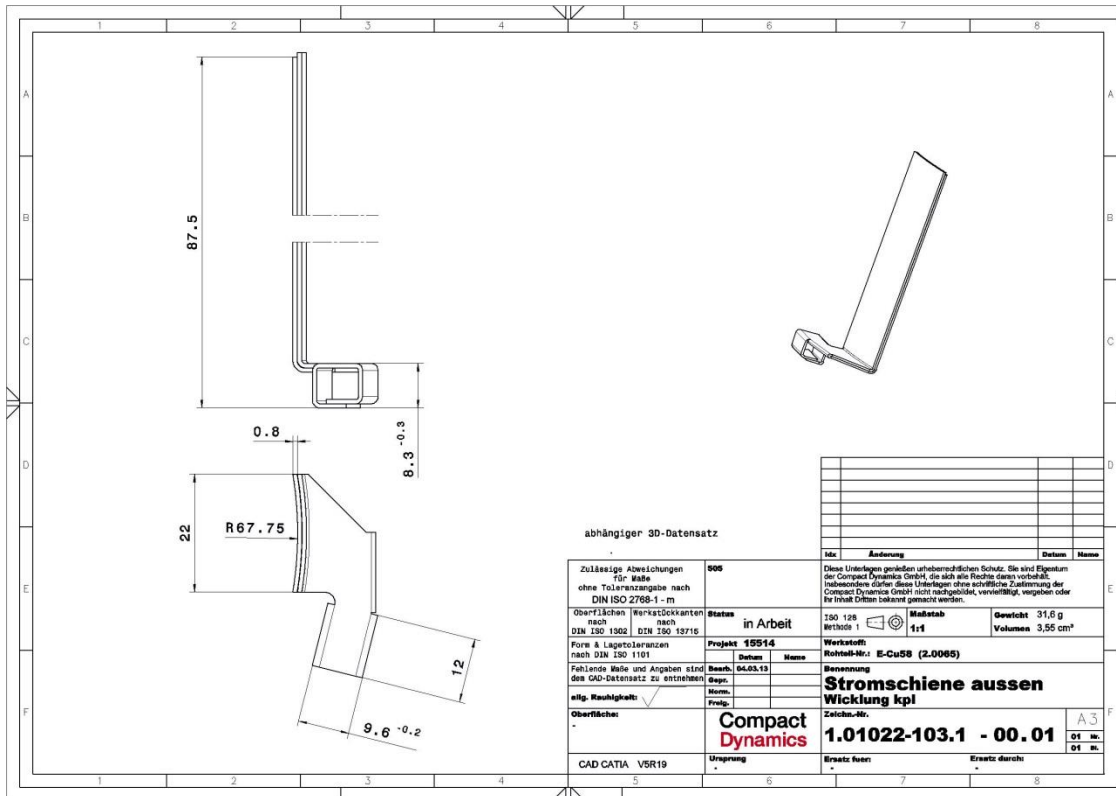


Abbildung 26: Konstruktionszeichnung Stromschiene aussen

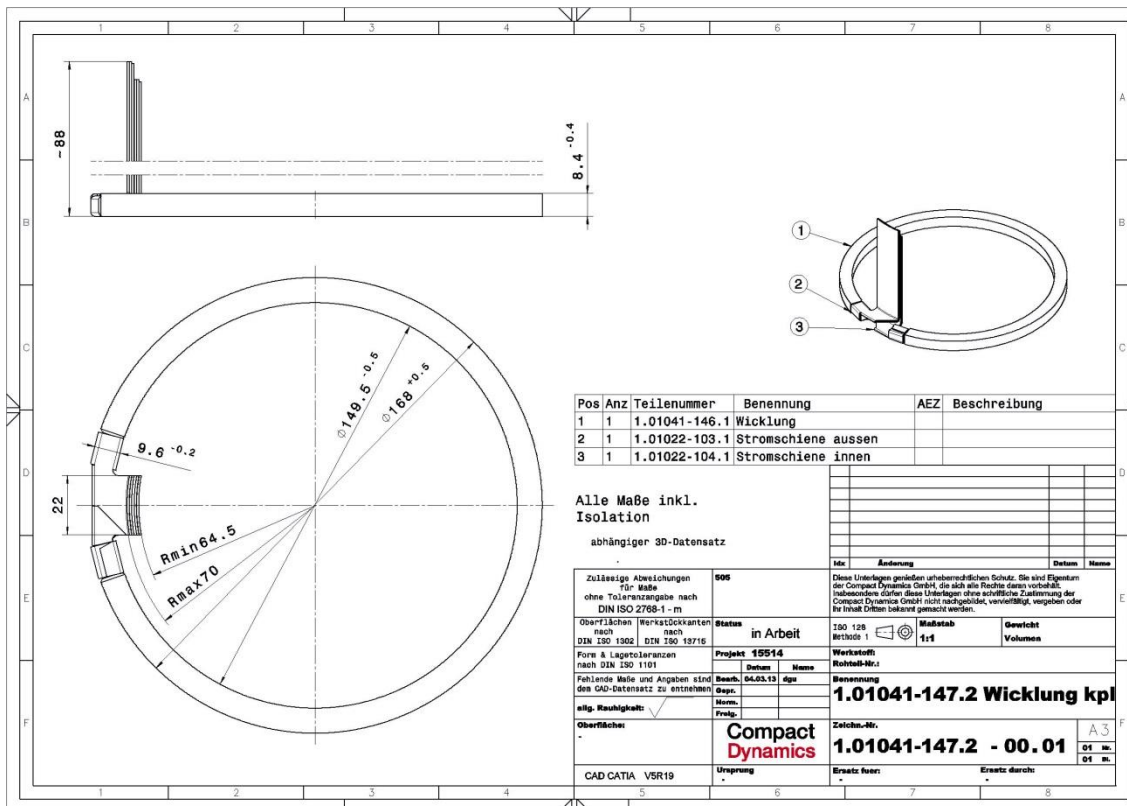


Abbildung 27: Konstruktionszeichnung Wicklung kpl.

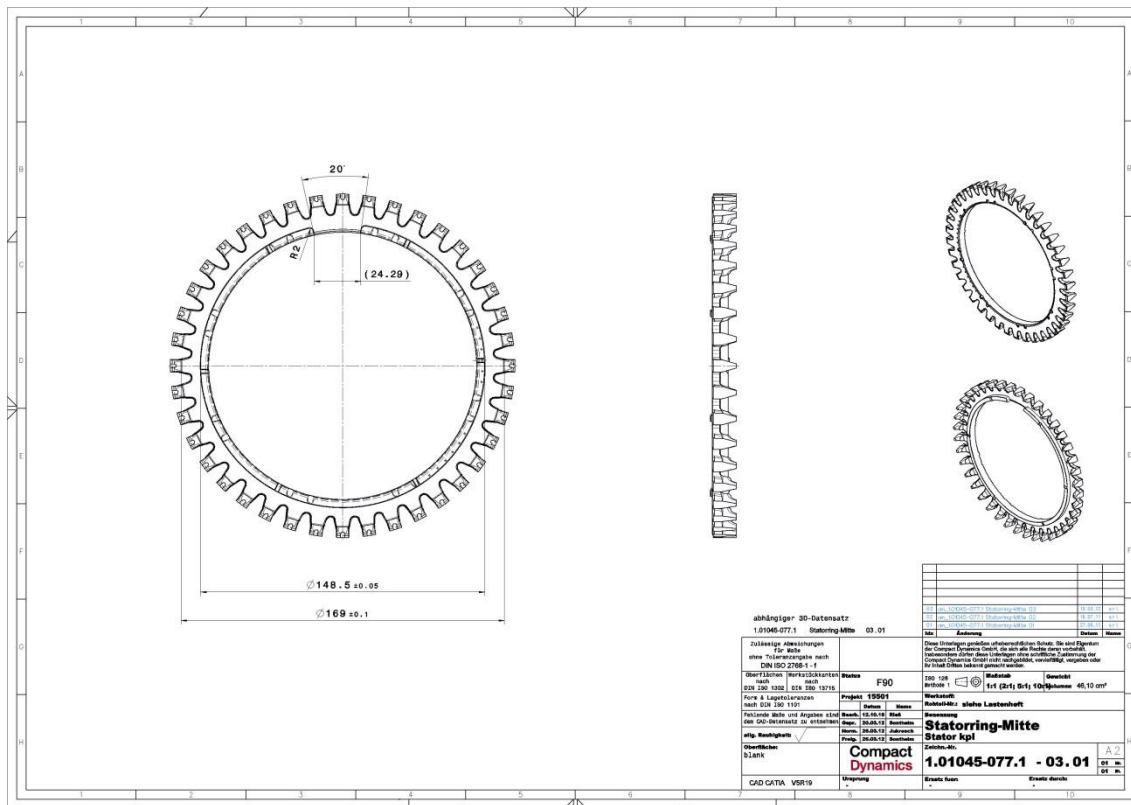


Abbildung 28: verfügbarer Bauraum Wicklung

Mit den vorliegenden Zeichnungen und Spezifikationen ist es für Dienstleister möglich, die Anforderungen zu bewerten und die gewünschten Stückzahlen anzubieten.

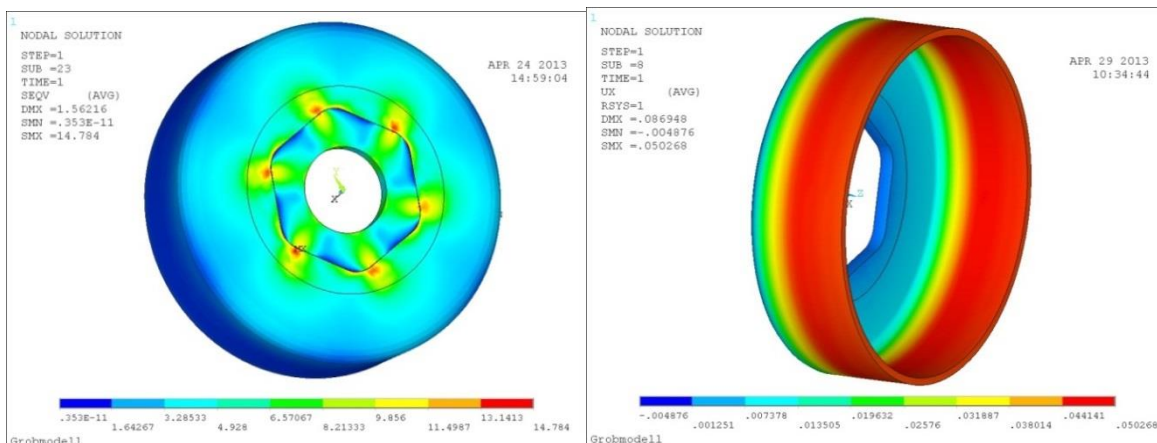


Abbildung 30: Vergleichsspannungen unter Drehmoment (links) und Radiale Aufweitung unter Fliehkraft (rechts)

Als zweite Alternative der Lastübertragung zwischen GFK-Glocke und der mit ihr verbundenen metallischen Welle wurde eine Verschraubung betrachtet.

Um die Fertigungskosten zu senken, wurde untersucht, ob es möglich ist die Gewinde in der GFK-Glocke, wie sie beim bisherigen Prototypen eingesetzt werden, durch ein innovatives Verfahren zu erzeugen. Hier sollen die Gewindgänge im noch nicht ausgehärteten Zustand durch das eindrehen einer angespitzten Schraube „geformt“ werden. Erst nach dem Formen soll die Matrix der Glocke ausgehärtet werden. Vorteile für die Fertigung wäre, dass dieser Vorgang direkt auf dem Wickelwerkzeug erfolgen könnte, umspannen der Glocke auf ein weiteres Werkzeug zum Vorbohren und Schneiden der Gewinde ist nicht notwendig. Die Kosten, die durch das regelmäßige ersetzen der Bohr- und Schneidwerkzeuge mit bekannt geringer Standzeit bei Faserkunststoffverbunden entstehen, würden so ebenfalls vermieden werden.

Um das innovative Herstellverfahren zu qualifizieren, wurden mehrere Versuchsreihen durchgeführt. Es wurden Pull-out-Versuche durchgeführt, bei dem die quasistatische Festigkeit des Gewindenganges in Längsrichtung zur Schraube gemessen wurde und Bearing-Response-Versuche, bei dem die quasistatische Festigkeit des Laminates bei einem ein- und zweischnittigen Zugversuch von Platten- GFK mit Gewinde und Stahl - gemessen wurde. Verglichen wurden dabei jeweils konventionell geschnittene mit geformten Gewinden.

Dabei wurde festgestellt, dass die geformten Gewinde bei dem hier vorliegenden M8-Gewinde den geschnittenen Gewinden in etwa gleichwertig sind. Die Ergebnisse des quasistatischen Vergleiches, welches eine verbesserte Festigkeit des geformten Gewindes bei einem Kreuzverbund bei Querbelastung aufweist, wurden auf der 16. internationalen Konferenz „European Conference on Composite Materials (ECCM)“ in Sevilla, Spanien, vorgestellt.

Darüber hinaus wurde im Vorhaben mit der experimentellen Ermittlung des Schwingermüdungsverhaltens und einer weiteren Gewindeform – ST8 – begonnen. Diese Arbeiten konnten im Zeitraum des Vorhabens nicht abgeschlossen werden, werden aber im Rahmen eines Dissertationsvorhabens weitergeführt.

Parallel zu den Experimenten wurden entsprechende Finite-Elemente-Modelle aufgebaut, um beide Versuchsarten und Herstellungsverfahren simulativ abzubilden. In Abbildung 31 ist exemplarisch der Pull-out-Versuch dargestellt.

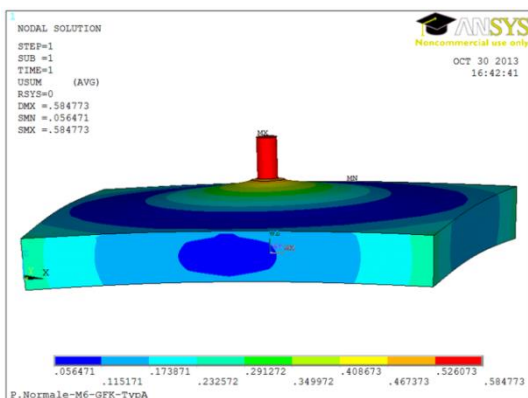


Abbildung 31: FE-Simulation des Pull-Out-Versuches

Die Ergebnisse der Simulation wurden mittels der oberflächlichen Verformung mit den Experimentellen Ergebnissen abgeglichen. Abbildung 32 vergleicht die oberflächliche Dehnung in Y-Richtung einmal eines Experimentes (linker Teil) und der Simulation (rechter Teil) im einschnittigen Scherversuch bei identischer Last.

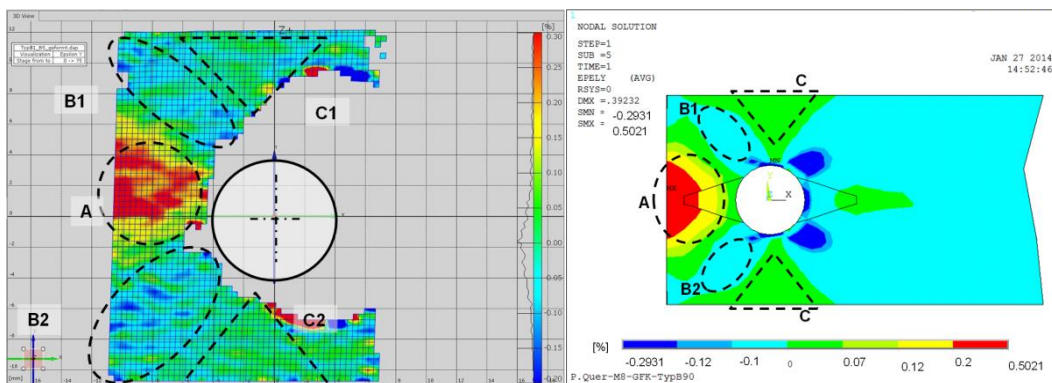


Abbildung 32: Vergleich Y-Dehnung in Experiment (links) und Simulation (rechts) des Scherversuches

Hier zeigt sich eine sehr gute Übereinstimmung der qualitativen Dehnungsverteilung als auch der quantitativen Dehnungswerte. Die Simulation bildet im linearelastischen Bereich die Verformung sehr gut ab. Im Vorhaben wurde begonnen die Simulation so zu erweitern, dass sie das Verhalten der Verbindung auch über den linearelastischen Bereich hinaus abbilden kann. Dazu werden Bruchkriterien und die damit verbundenen Steifigkeitsdegradationen in das Modell eingebunden.

Für die Gewährleistung der strukturellen Steifigkeit wurden zwei Ansätze verfolgt. Als erste konventionelle Lösung wurde der Lagenaufbau der Bewicklung so optimiert, dass die Struktur eine ausreichend hohe Steifigkeit bei minimalem Gewicht aufweist. Dazu wurde für die FE-Simulation die genaue Fadenablage im Wickelprozess mittels der Prozesssimulationssoftware CADWIND ermittelt.

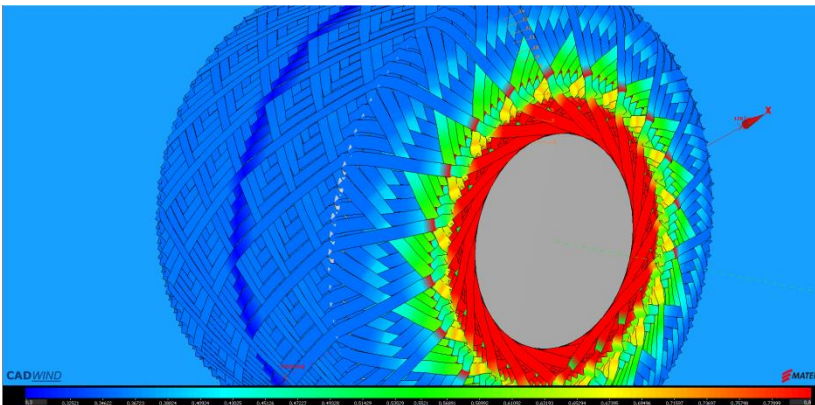


Abbildung 33: Simulation einer Kreuzlage in CADWIND

Die sich ergebenden Lagendicken und –winkel konnten allerdings nur über den Umweg eines selbst geschriebenen Konvertierungsprogrammes in die Skriptsprache des FEM-Programmes übertragen werden, was einen erhöhten Aufwand bedeutete. Wie in Abbildung 30 (rechts) bereits gezeigt, konnten die Verformungen unter Last so auf die geforderten Werte begrenzt werden.

Als zweite unkonventionelle Lösung zur Begrenzung der radialen Aufweitung unter Fliehkraft wurde die Möglichkeit der adaptiven Steuerung der radialen Aufweitung der GFK-Glocke mittels Smart-Material-Alloy (SMA) untersucht.

Diese können über Erwärmung, beispielsweise mittels Strom, zur Kontraktion gebracht werden. Bei geschickter Anordnung auf der Glocke könnte so der Aufweitung kontrolliert entgegen gewirkt werden.

Dazu wurden Experimente mit Drähten aus SMA durchgeführt. In einem ersten Schritt wurden 3 verschiedene Anbindungsmöglichkeiten untersucht, ob sie geeignet sind die durch den SMA-Draht erzeugten Kräfte in die Glocke einzuleiten.

Dabei hat sich eine Kombination aus form- und stoffschlüssiger Verbindung mit einer umschlauteten Schraube als am besten für den Anwendungsfall geeignet erwiesen. Daraufhin wurden die Eigenschaften des Drahtes bestimmt, insbesondere welche Kraft er bei welcher Temperatur erzeugt. Dabei wurde auch unterschieden, ob die Aufheizung über eine Joules'sche Erwärmung mittels aufgebrachtener elektrischer Spannung oder über Konvektion erfolgt ist.

Wie in Abbildung 34 zu sehen, stellt sich eine Art bilinearer Kraftverlauf über der Temperatur ein. Anfangs steigt die Kraft nur um ca. $0,4 \text{ N/}^\circ\text{C}$ an, um dann ab ca. 55°C stärker mit ca. $1,6 \text{ N/}^\circ\text{C}$ anzusteigen.

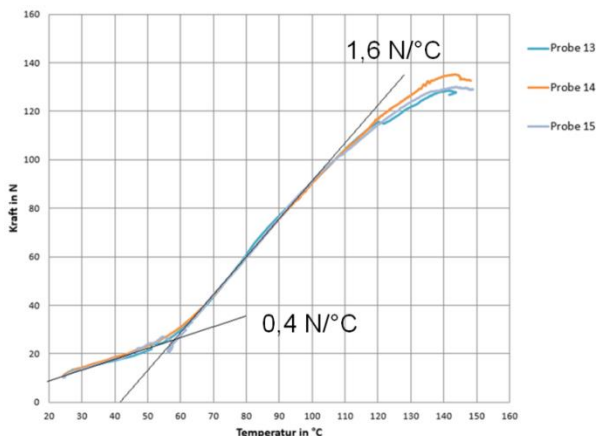


Abbildung 34: Kraft über Temperatur (durch elektrische Aufheizung) dreier SMA-Drähte

Dieses Aufheizverhalten ist für die Anwendung als positiv zu bewerten, da der Draht bei niedrigeren Temperaturen, wie sie auch über die Verlustleistung des Motors auftreten können, nur wenig Effekt zeigt. Die nutzbare Kraft, welche der Draht erzeugen kann, liegt bis ca. 100 N. Darüber hinaus flacht die Kurve ab, was zu vermeiden ist, da durch eine Belastung in diesem Bereich die Wirkung des Drahtes zerstört werden kann und der Effekt nicht mehr reversibel ist.

Im Bereich der Fertigungstechnik wurden im Wesentlichen die Prozessparameter für die Maschinensteuerung sowie die Fertigung mit unkonventionellen Matrixwerkstoffen untersucht. Als erstes Ergebnis wurden die Prozessparameter für die Fertigung ermittelt:

- Bestimmung der wickelbaren Winkel
- Reduzierung der Aufdickung im Bereich der Polwicklung
- Einwickeln eines 6-Kant Polygons für die spätere Momenteinleitung durch zusätzliche Umschlingung
- CNC Programmerstellung (CADWIND)

Die Versuche wurden mit 6 x 2400 tex Glasfaserrovings durchgeführt. Es wurden zuerst Vorversuche mit trockener Faser durchgeführt. Anschließend wurde eine Doppelglocke mit dem Harz Araldite LY564 / Aradur 3486 von Huntsmann hergestellt.



Abbildung 35: Nasswickeln der Rotorglocke

Als Ergebnis der Wickelversuche kann festgehalten werden, dass ein sinnvoller Wickelwinkel zwischen 30° (maximale Polaufdickung) und 50° (Rutschgrenze) liegt. Eine Reduzierung der Aufdickung am Pol wurde durch unterschiedliche Wickelwinkel, Verteilung der Wendezone und Erhöhung der Bandbreite um die Pole ermöglicht.

Für das Einbinden des bei der Bauweisenuntersuchung betrachteten 6-Kant-Polygons hat sich ein 6er Muster mit zweimal 15° Dwell als geeignet erwiesen.

Problematisch war zu diesem Zeitpunkt eine unzureichende Kompaktierung der Bewicklung im Bereich der Polygonanschlüsse. Um diese zu erhöhen wurden, wie in Abbildung 36: Links: Anpressscheiben; rechts: Anwendung der Anpressscheiben an Rotorglocke dargestellt, Anpressscheiben entworfen, die nach dem Wickeln an den Polen angebracht und mit Hilfe von Gewindestangen zusammengezogen werden können.

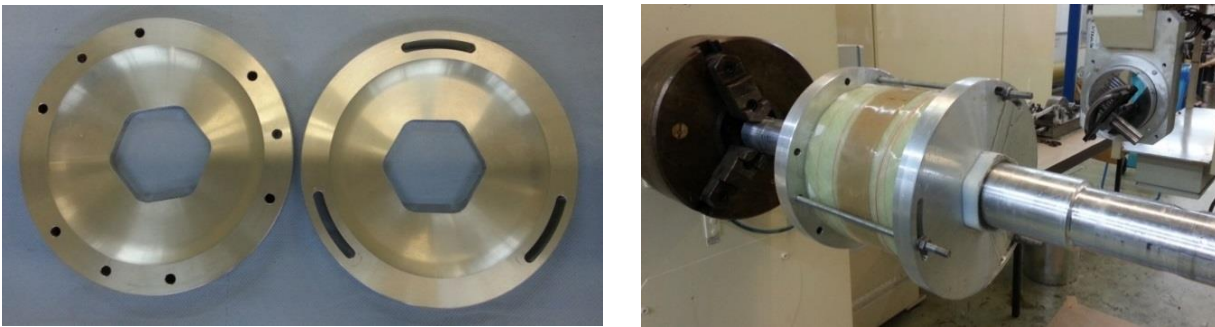


Abbildung 36: Links: Anpressscheiben; rechts: Anwendung der Anpressscheiben an Rotorglocke

Die Anpressscheiben vergrößern die Kompaktierung des Laminats im Polbereich und führen zu einer genau definierten Außenkontur. Zusätzlich werden dadurch in diesem Bereich Porengehalt und Harzanhäufungen verringert und es kann ein höherer Faservolumengehalt erreicht werden.

Zur wirtschaftlichen Betrachtung des Fertigungsverfahrens der Rotorglocke wurde eine Marktstudie angefertigt, in der das Wickelverfahren alternativen Herstellmethoden gegenübergestellt wird. Dabei wurde das Wickelverfahren, in Abhängigkeit der angestrebten Stückzahl pro Jahr, als geeignetster Herstellprozess identifiziert. Zudem wurde ein detailliertes Wirtschaftlichkeitstool erstellt, um die Herstellkosten im Wickelverfahren, abhängig von Prozessparametern sowie Material-, Personal- und Anlagekosten, berechnen zu können.

Der Auswahlprozess geeigneter Harzsysteme zeigt besonders für Polyurethanharze (PU) aufgrund guter thermischer Eigenschaften, der sehr guten Haftung auf fast allen Werkstoffen, dem niedrigen Preis sowie der geringen Aushärtezeit, die zu deutlich kürzeren Zykluszeiten führen, großes Potential. Die Verarbeitung von PU im Wickelverfahren gehört jedoch nicht zum Stand der Technik und bringt einige Herausforderungen mit sich: Verarbeitung mittels konventionellen Harzbads durch kurze Topfzeiten nicht möglich, Reaktion des unausgehärteten Reaktionsgemischs mit Wasser führt zu starker Schaumentwicklung.

Es wurde daher eine erste Machbarkeitsstudie zur Verarbeitung von PU im Wickelverfahren durchgeführt. Hierzu wurde unter anderem ein Versuchstand, entsprechend Abbildung 2, mit einer geschlossenen Siphon-Imprägniereinheit aufgebaut, mit dem erste Testrohre gewickelt wurden. Dabei konnte beim Aushärten im Autoklav das Schäumen des Harzes vollständig unterdrückt und gleichzeitig eine hohe Laminatgüte (siehe Schliffbilder Abbildung 37) erreicht werden. Bei der Aushärtung im Ofen konnte, durch diverse Optimierungen bei der Verarbeitung, das Schäumen bereits deutlich verringert, aber nicht gänzlich verhindert werden.

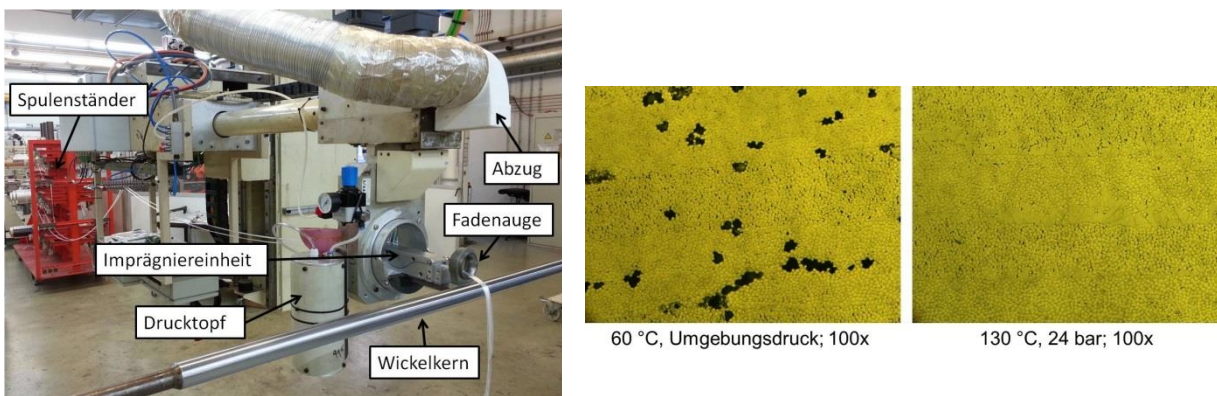


Abbildung 37: Links: Versuchstand zum Wickeln mit PU; rechts: Schliffbilder gewickelter PU-GF-Rohre

5.2.2 Ergebnisse CirComp GmbH

5.2.2.1 Entwicklung des 3D Wickelverfahrens, Herstellung und Verifizierung Funktionsmustern, Erste Entwicklungsschleife

Es wurde planmäßig die Entwicklung eines 3D Wickelverfahrens durchgeführt. Hierzu wurden empirische Wickelversuche bei CirComp durchgeführt, bei denen ein Wickelprogramm (NC-Programm) mit Hilfe einer NC-Editor-Software geschrieben wurde und anschließend manuell verfeinert wurde.

Dies geschah während diverser Wickelversuche auf einem eigens hergestellten Wickelkern. Dessen Kontur zusammen mit den aufgesetzten Magnetrings und Sondenringen bildete die Innenkontur der im RTM-Verfahren hergestellten Glocken ab.

Die Außenkontur wird nicht durch ein Werkzeug vorgegeben, sondern ergibt sich durch die beim Wickeln aufgebrauchte Wandstärke.

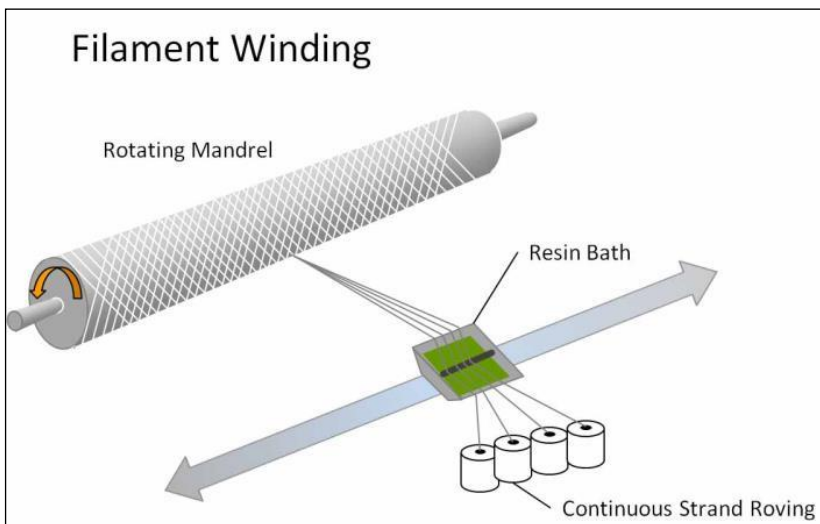


Abbildung 38 - Schematische Darstellung des Nasswickelverfahrens

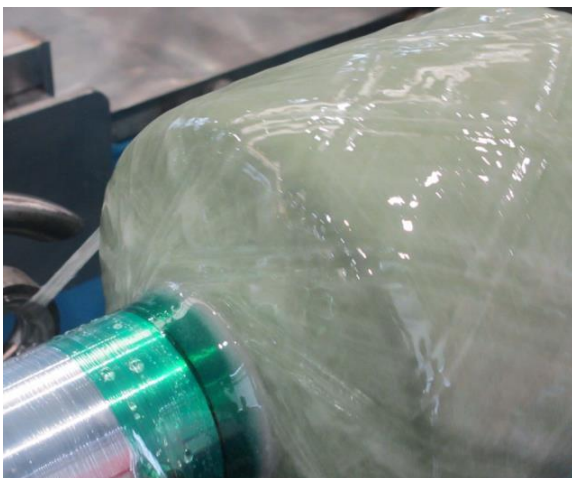


Abbildung 39 - Erstes Funktionsmuster auf der Wickelmaschine

Hierbei entstanden erste Musterbauteile, welche anschließend außen CNC zerspant wurden, um die Wandstärke der RTM-Glocken zu erhalten. Somit ergaben sich 1:1 Nachbildungen der RTM-Glocke, jedoch im Wickelverfahren hergestellt.



Abbildung 40 - Musterglocken, hergestellt mit unterschiedlichen Prozessparametern

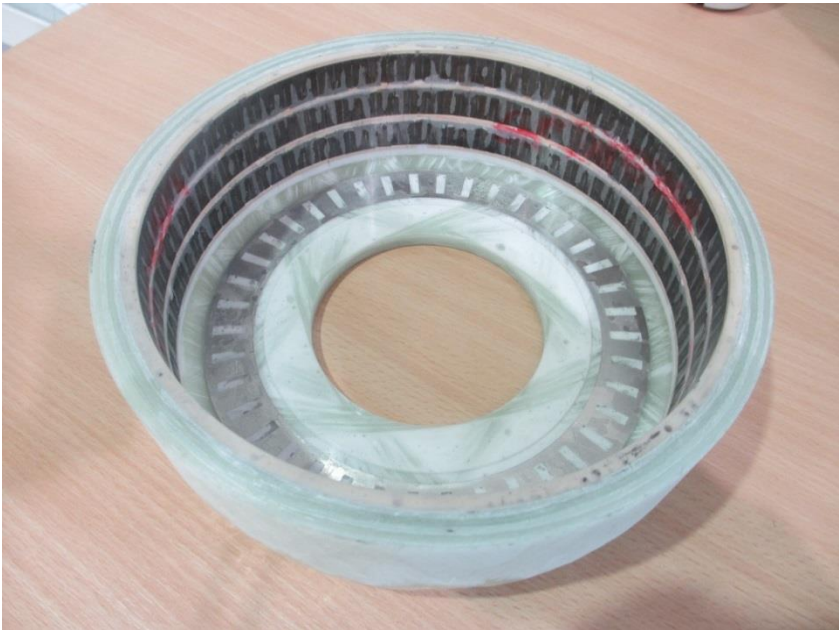
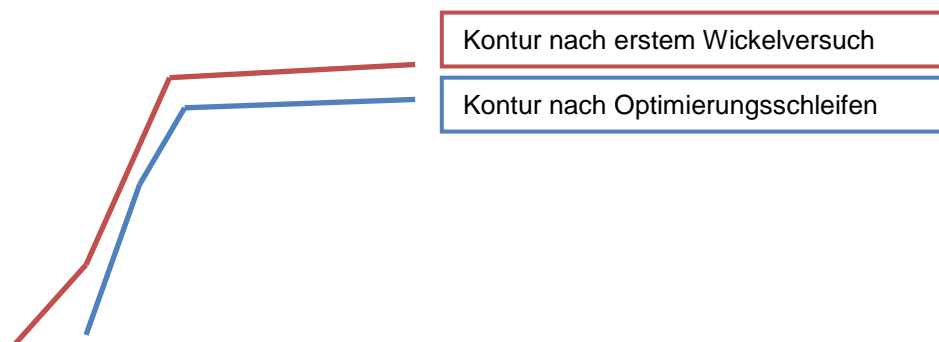


Abbildung 41 - Musterglocke nach der Entformung (Wickel mit Magnetring u. Sondenring)

5.2.2.2 Entwicklung des 3D Wickelverfahrens, Herstellung und Verifizierung Funktionsmustern, Optimierungsschleife

In einer folgenden Optimierungsschleife wurde versucht, durch Anpassung des NC-Wickelprogrammes die Wandstärke des Bauteils nach dem Wickeln dem RTM-Bauteil anzugleichen und somit eine nachträgliche CNC Bearbeitung auf ein Minimum zu reduzieren.

Hierzu wurde die Wendezone an den Polkappen radial schrittweise je Lage nach außen verschoben, um einen übermäßigen Wandstärkenaufbau am kleinsten Durchmesser der Polkappe zu minimieren. Des Weiteren wurden die Anzahl der Lagen reduziert, um im Zylindrischen Teil die Wandstärke der RTM-Version zu erhalten und somit auf die Bearbeitung der Zylinderfläche verzichten zu können.



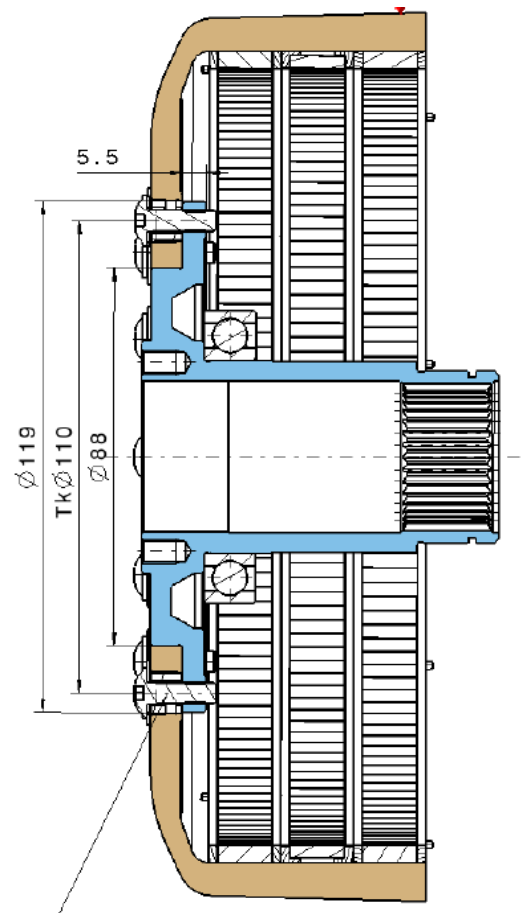


Abbildung 42 - Schematische Darstellung der Wickelkontur im Vergleich zum CAD-Model der RTM-Glocke

Um weiterhin die Bearbeitung der Stirnfläche einzusparen, wurde in einem weiteren Iterationsschritt das Werkzeug modifiziert, so dass die Polkappen (Stirnflächen) mittels Andrückscheiben kompaktiert werden können und somit die Außenkontur der Stirnflächen Formfallend ist.

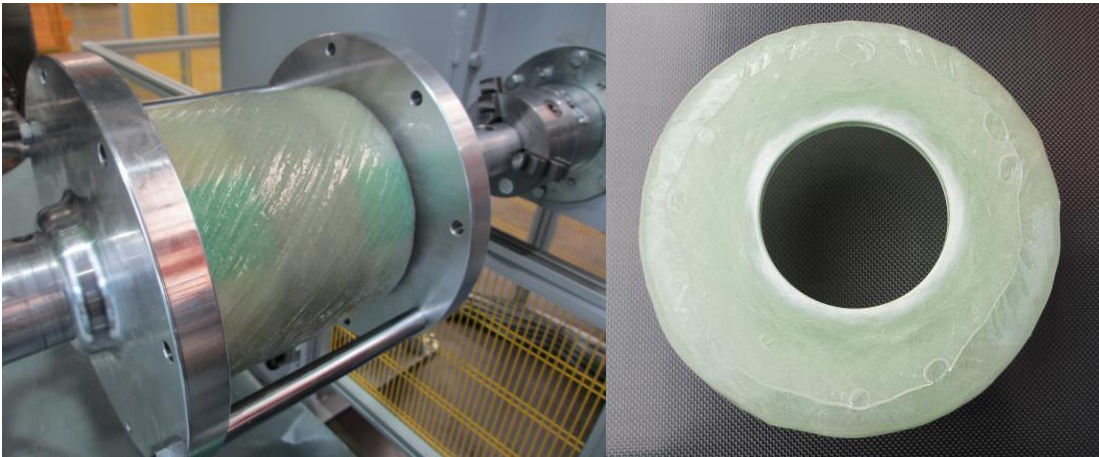


Abbildung 43 - Wickel mit Andrückscheiben, vor und nach Entformung

Es zeigte sich, dass bis zum vollständigen Verzicht einer Bearbeitung der Außenkontur weitere Optimierungen am Wickelprogramm sowie an den Werkzeugen nötig sind.

Daher wurde das Werkzeug dem Institut für Verbundwerkstoffe (IVW) zur weiteren Optimierung überlassen.

5.2.3 Meilenstein: Funktionsmuster Faserverbund Rotorglocke

Wie oben dargelegt, wurde termingerecht ein erstes Funktionsmuster erstellt.

Die Innen- und Außenkontur entsprechen den Vorgaben. Die Kraftübertragung zur Welle (Anschlussmaße) ist identisch dem RTM-Bauteil.

Somit ist das Funktionsmuster ein „drop-in-Replacement“ zur RTM-Glocke.

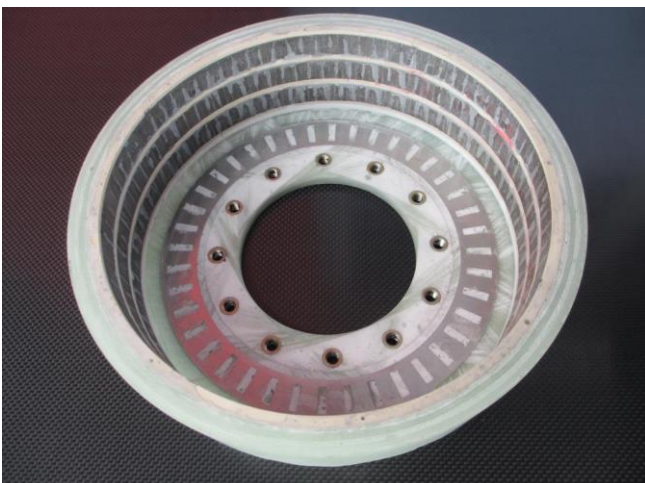


Abbildung 44 - Funktionsmuster, Rückseite

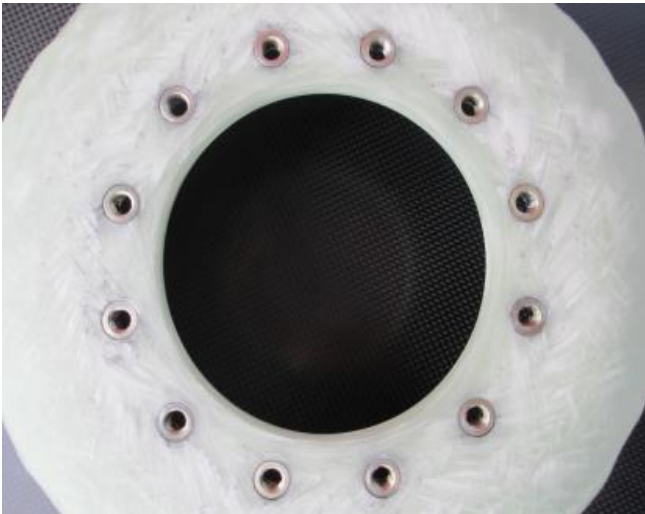


Abbildung 45 - Funktionsmuster, Frontseite

5.2.3.1 Entwicklung und Fertigung von Fertigungsvorrichtungen für erste Funktionsmuster

Termingerecht wurden Fertigungsvorrichtungen zur Herstellung des Funktionsmusters hergestellt.

Hierzu zählt vor allem der dafür benötigte Wickelkern. In einem ersten Schritt bildete dieser die Innenkontur des GFK-Bauteils ab, ohne Magnete und Sensorring. Somit konnten erste Wickelversuche gemacht werden, ohne dass dafür ein Magnetring oder Sensorring montiert werden musste.

Für die Herstellung des Funktionsmusters wurde anschließend der Wickelkern entsprechend nachgearbeitet, so dass Sensorring und Magnetring montiert werden können.

Zudem wurde im Zuge der Optimierung der Funktionsmuster das Wickelwerkzeug um zwei Andrückscheiben erweitert.

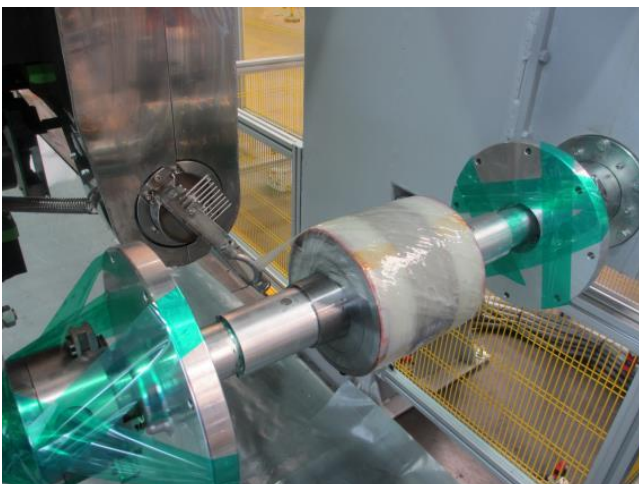


Abbildung 46 - Andrückscheiben und Wickelkern

5.2.3.2 Entwicklung und Fertigung von Fertigungsvorrichtungen für Musterglocken zur Qualifizierung

Ziel der weiteren Entwicklung war es, auf das nachträgliche CNC-Zerspanen der Außenkontur verzichten zu können.

Hierzu wurden am IVW neue Anpressplatten gefertigt und das Wickelwerkzeug entsprechend modifiziert. Hierdurch soll, zusammen mit einer weiteren Optimierung des NC-Wickelprogrammes, erreicht werden, dass die gesamte Stirnfläche inkl. Dem Übergang in den zylindrischen Bereich formfallend ist.



Abbildung 47 - Optimierte Andrückscheiben

Zudem wurde die Kraftübertragung (Glocke/Welle) konstruktiv an das Fertigungsverfahren angepasst. Hierzu wurde die bisherige Verbindungstechnik (Lochbild mit Gewindeeinsätzen) welches ein nachträgliches Bearbeiten voraussetzt, durch eine Vieleckverbindung ersetzt.

In einem ersten Schritt wurde hierzu ein im Rapid-Prototyping hergestellter Aufsatz aus das Wickelwerkzeug aufgeschoben.

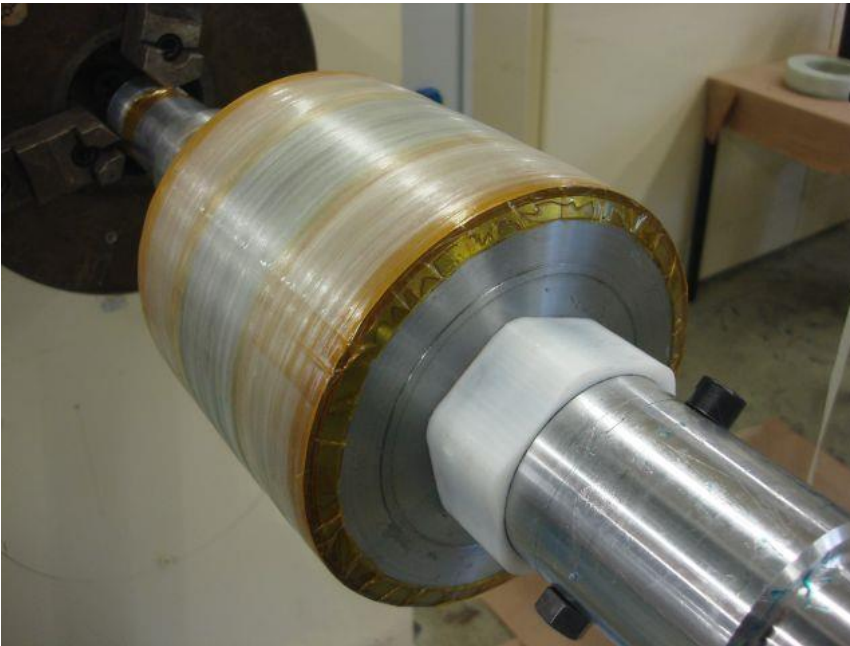


Abbildung 48 - Vieleck-Aufsatz (Rapid-Prototyping)

Nachfolgend wurde der Wickelkern um ein entsprechendes metallisches Vieleck erweitert:

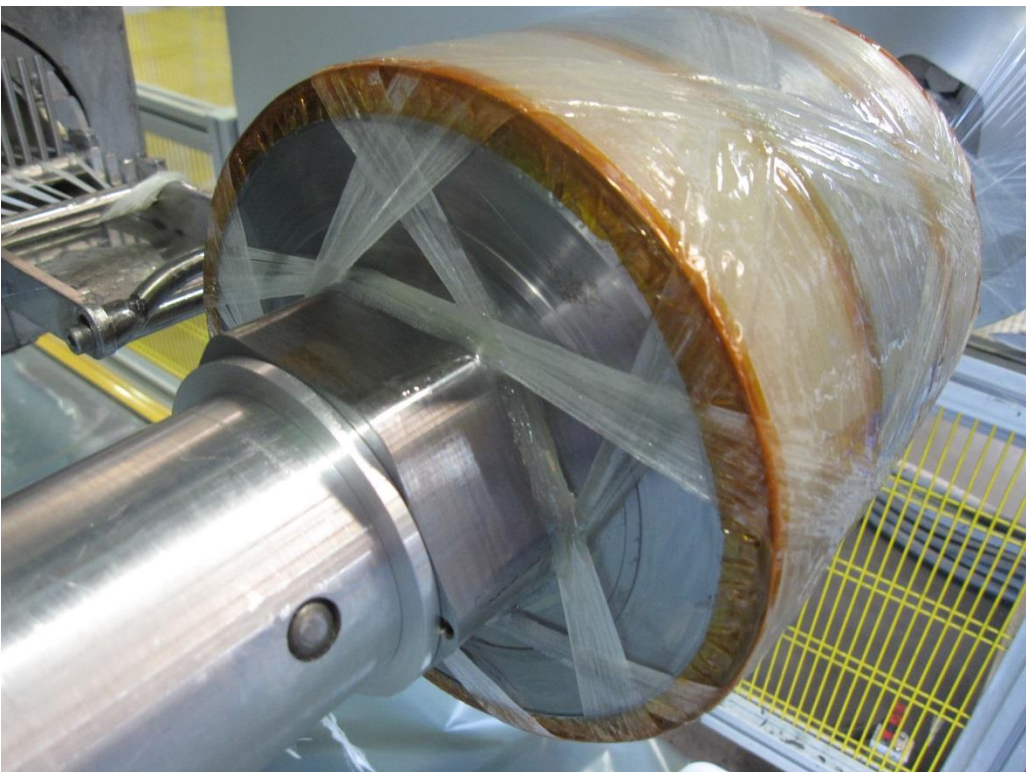


Abbildung 49 - Metallisches Vieleck auf Wickelkern bei Wickelversuchen

AP 2.3 / Lfd. Nummer 06

5.2.3.3 Meilenstein: Musterglocke für Qualifizierung

Wie nachfolgend beschrieben wird, wurden abschließend der CirComp Arbeiten Qualifikationsmuster hergestellt. Diese sollen zur Erprobung der Glocken dienen.

5.2.3.4 Entwicklung zur Herstellung von Qualifizierungsmustern

Mit Hilfe der unter AP 2.3 / Lfd. Nummer 05 beschriebenen, optimierten Fertigungsmittel wurden weitere Fertigungsversuche durchgeführt. Ziel war es, auf eine spanende Bearbeitung der Stirnflächen verzichten zu können sowie die Drehmomentübertragung faserverbundgerecht über ein Vieleck (Sechseck) zu realisieren.

Wie sich jedoch nach einigen Fertigungsversuchen herausstellte, lässt sich das Verpressen mittels Andrückscheiben nicht prozesssicher realisieren.

Auch haben durchgeführte Aufwandsbetrachtungen zu dem Schluss geführt, dass der Arbeitsaufwand des Montierens der Andrückscheiben sowie das Verpressen des Laminates ähnlich hoch ist wie der Arbeitsaufwand des CNC Zerspanens der Außenkontur. Das CNC Zerspanen verspricht demnach deutlich maßhaltigere Glocken und eine Prozesssicherere Fertigung bei vergleichbarem Aufwand.

Aus diesen Gründen wurde beschlossen, die Qualifizierungsmuster ohne Andrückscheiben zu fertigen und stattdessen die Außenkontur durch CNC Drehen zu generieren. Auch wurde, um eine Erprobung der Qualifizierungsmuster ohne Anpassung der restlichen Konstruktion des Motors realisieren zu können, wieder die gleiche Kraftübertragung wie bei den im RTM Verfahren hergestellten Glocken gewählt und auf eine Vieleck- Welle-Nabe-Verbindung verzichtet.

Um eine einheitliche Außenoberfläche zu ermöglichen sowie eine bessere Auswuchtung der Glocken zu erzielen wurde bei der folgenden Bauteilentwicklung darauf Wert gelegt, dass der im Wickelverfahren ohne Andrückscheiben hergestellte Glocken-Rohling überall genug Wandstärke aufweist. So sollte sichergestellt werden, dass genug Bearbeitungsaufmaß vorhanden ist für die CNC-zerspanung der Außenkontur.

Frühere Fertigungsversuche wiesen vor allem im Übergangsbereich zwischen Stirnfläche und Zylinder eine geringere Wandstärke auf als am übrigen Bauteil. Daher wurde das CNC Wickelprogramm dahingehend optimiert in allen Bereichen der Glocke genügend Wandstärke aufzuweisen.

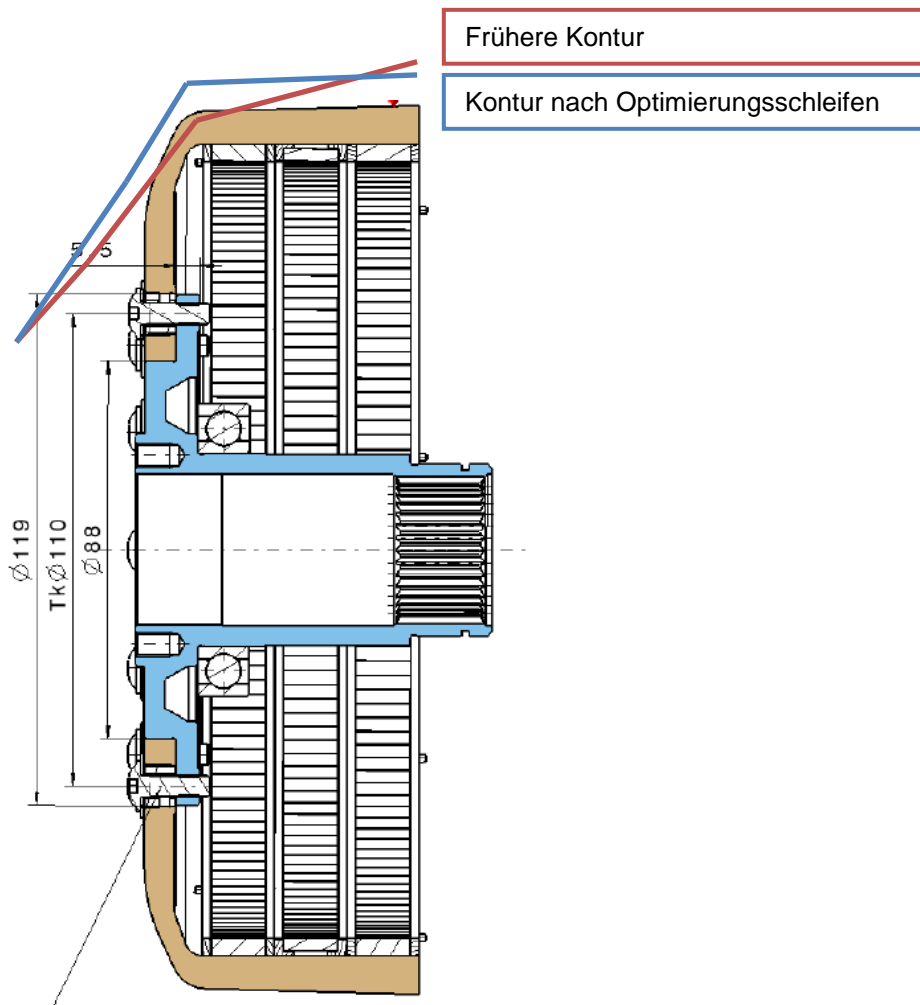


Abbildung 50 - Schematische Darstellung der Wickelkontur

AP 2.4 / Lfd. Nummer 08

Herstellung von Qualifizierungsmustern

Auf Basis der unter „AP 2.4 / Lfd. Nummer 07“ Entwicklung zur Herstellung von Qualifizierungsmustern“ durchgeführten Entwicklungen wurden abschließend Qualifizierungsmuster hergestellt.

Um das optische Erscheinungsbild zu verbessern wurde für die Fertigung der Qualifizierungsmuster das Epoxydharz rot eingefärbt. Dadurch ergibt sich ein homogeneres Erscheinungsbild. Technisch hat diese Maßnahme keinen Einfluss auf die Glocke.



Abbildung 51 – Qualifizierungsmuster mit rot eingefärbtem Harz nach dem Entformen

Die so entstandenen Glocken wurden anschließend entsprechend der aktuellsten Zeichnungen (1.02001-106.2 Rotor kpl_00.01) CNC-zerspan.

Beim Zerspanen von Faserverbundwerkstoffen werden an der Bauteiloberfläche Fasern freigelegt. Hierdurch entsteht eine raue Oberfläche mit evtl. frei abstehenden Fasern welche die Gefahr von Verletzungen bei der Montage birgt.

Um dieser Gefahr entgegenzuwirken sowie eine ansprechendere Optik der Glocke zu erzeugen wurden die Qualifizierungsmuster rot lackiert.



Abbildung 52 – Qualifizierungsmuster rot lackiert, einbaufertig



Abbildung 53 – Qualifizierungsmuster rot lackiert, einbaufertig

Von den Abgebildeten Qualifizierungsmustern wurde eine Glocke der Firma Compact Dynamics zur Verfügung gestellt.

Somit wurden alle Arbeitspakete innerhalb des Projektes durchgeführt und Abgeschlossen.

5.2.4 Weiterführende Tätigkeiten

Nach Abschluss der im Forschungsvorhaben beschriebenen Arbeitspakete (siehe Oben) wurde das Projekt verlängert.

Dies wurde seitens CirComp dazu genutzt, den Wickelprozess weiter zu optimieren sowie den Prozessschritt „Tränken der Fasern“ weiterzuentwickeln. Dazu wurden weitere Versuchsbauteile gefertigt mit dem Ziel, die Bauteilqualität voranzutreiben.

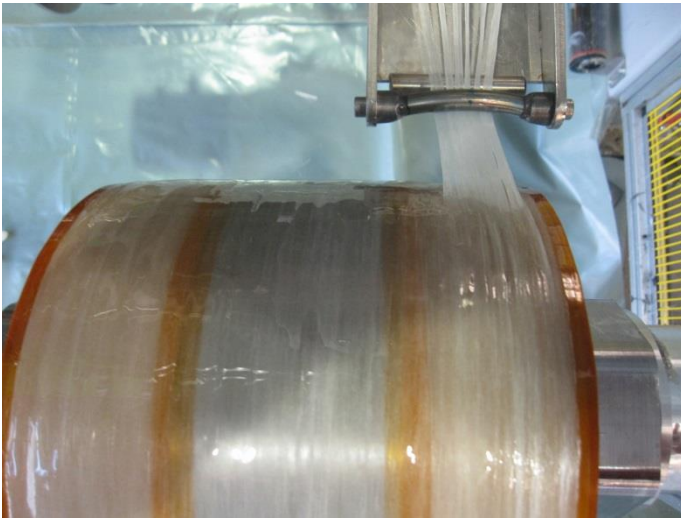


Abbildung 54 – Weiterführende Wickelversuche

Die Abbildung zeigt ein zu vorherigen Wickelversuchen deutlich transparenteres Laminat. Dies lässt auf einen geringeren Porengehalt und eine bessere Imprägnierung der Fasern schließen.

5.2.5 Abschluss Bemerkung

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Fertigung von Rotorglocken im Wickelverfahren wirtschaftlich möglich ist. Einer Weiterentwicklung des Fertigungsverfahrens zur Serienreife steht seitens CirComp nichts im Wege.

5.3 Arbeitspaket 3 – duroplastischer Verguss des Statorträgers

5.3.1 Grundlagenuntersuchung zum Umspritzen der Statorgeometrie

Im Rahmen des Arbeitspaketes 3 wurde ein umfangreiches Lastenheft in Verbindung Partnern Compact Dynamics und Schwarzpunkt für den Stator abgestimmt.

Die wesentlichen technischen Anforderungen an das Vergussmaterial sind in Abbildung 55 dargestellt. Im Lastenheft sind weitere technologische Anforderungen aufgeführt.

Anforderungen Lastenheft				
Eigenschaft	Norm	Wert	Einheit	Bemerkungen
Dauereinsatztemperatur	IEC 60085	-40 bis 180	°C	
Durchschlagfestigkeit	IEC 60243-1	18 bis 22	kV/mm	
Kriechwegbildung	IEC 60112	600	V	
Wärmeleitfähigkeit	ISO 8894-1	0,8	W/mK	
E-Modul	ISO 527	10	Gpa	
Zugfestigkeit	ISO 527	80	Mpa	
Wärmeausdehnung	ISO 11359-2	12 bis 18	10 ⁻⁶ /K	
Tg	ISO 11357-2	150	°C	
Wasseraufnahme	ISO 62	0,2	%	(10d @ 25°C o. 60min @ 100°C)
Brennbarkeit	UL94	V-0		
Elektrochem. Korrosionswirkung	IEC60426	A-1		
Schrumpfverhalten		geringes Schrumpfverhalten und hohe Formbeständigkeit		
Viskosität		Prozessbedingt, niederviskose Bestandteile		
Kritisches Merkmal		keine Risse, keine Ablösungen vom Bauteil bei TWT -40 bis + 150°C		
Medienbeständigkeit		Vergleichbare Eigenschaften wie Epoxidharze		

Abbildung 55: Lastenheft für Vergussmaterialien

Auf Basis des erstellten Lastenheftes wurde ein Materialscreening durchgeführt und hierfür alle am europäischen Markt erhältlichen EP-Formmassen in einer Datenbank bezüglich derer technischen Eigenschaften kollektiviert. Nach Abgleich der technisch/technologischen Anforderungen konnten drei Materialien (EP-Formmassen) der Firma Raschig ausgewählt werden.

Diese Materialien wurden hinsichtlich thermisch-rheologischer Eigenschaften charakterisiert, somit Materialkarten für die Simulation erstellt und die Eignung für die im Lastenheft spezifizierten Einsatzbereiche untersucht.

Materialdaten (Auszüge aus Datenblättern)															
Hersteller	Handelsname	Zugfestigk. min [MPa]	Zugfestigk. max [MPa]	E-Modul min [GPa]	E-Modul max [GPa]	Brennbarkeit	Wärmeausd. min [10 ⁻⁶ /K]	Wärmeausd. max [10 ⁻⁶ /K]	Wärmeleitf. min [W/mK]	Wärmeleitf. max [W/mK]	Kriechwegb. [V]	Durchschlagsf. min [kV/mm]	Durchschlagsf. max [kV/mm]	Wasseraufn. (24h/23°C) [%]	Wasseraufn. (48h/50°C) [%]
Raschig	EP 3505	60	70	7	9	V-0	15	20	0,6	0,8	250	25	35	0,1	
Raschig	EP 3535	60	70	7	9	V-0	15	20	0,6	0,6	250	25	35	0,1	
Raschig	EP 3536	60	70	7	9		15	20	0,5	0,7	250	25	35	0,1	
Raschig	EP 3580	30	50	4	6	V-0	15	20	0,4	0,6	250	30	40	0,1	
Raschig	EP 3581 S ZC	70	90	5	7		20	25	0,4	0,6	250	25	35	0,1	
Raschig	EP 3581 T-1	70	90	5	7		15	20	0,4	0,6	250	25	35	0,1	
Raschig	EP 3582	60	80	8	10		15	20	0,4	0,6	250	20	30	0,1	
Raschig	EP 3585	100	120	8	10		15	20	0,4	0,6	250	20	30	0,1	
Momentive	EP 8412		55		13									29	
Momentive	EP 8414		70		14									24,5	
SBNA Inc.	1961B-1		90					16							0,2
SBNA Inc.	1908-1		80			V-0		37		0,73					0,2
SBNA Inc.	1908B-1		76			V-0		37			500				0,2
SBNA Inc.	1908M-1		62					27							0,15

Abbildung 56: Materialauswahl für spritzgussfähige EP-Formmassen

Die rheologische Charakterisierung der ausgewählten Formmassen erfolgt mit dem Rotationsrheometer mit Platte-Platte-Geometrie im Oszillationsmodus.

Die ausgewählten Materialien wurden hierbei einer Temperaturreihe von 80°C – 200°C unterzogen und somit das Fließhärungsverhalten detektiert. Es ist deutlich zu erkennen, dass eines der Materialien eine signifikant geringere Minimalviskosität besitzt. Dies ist auf eine geringere Harzviskosität oder eine geringere Reaktivität zurückzuführen.

Unabhängig der Ursache kann dieses Verhalten eine verbesserte Werkzeugfüllung bei langen Fließwegen und geringen Wandstärken ermöglichen.

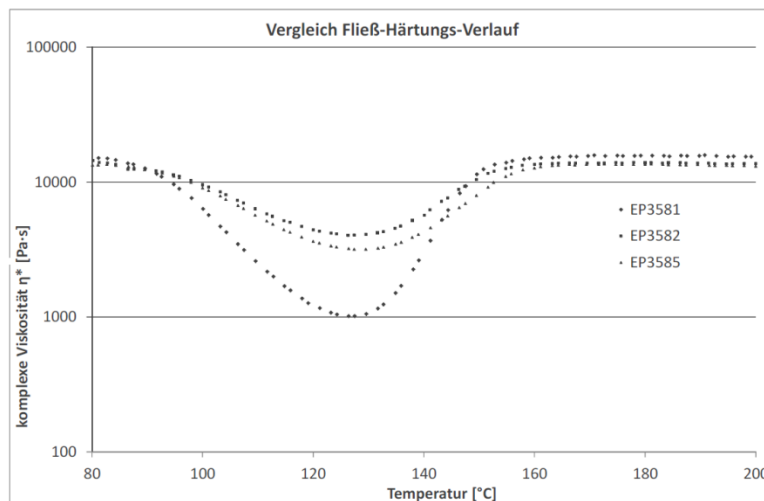


Abbildung 57: Fließ-Härtungsverhalten von Epoxid-Formmassen

Für eine optimale Infiltration des Stators besitzt die EP-Formmasse 3581 die günstigsten Voraussetzungen, da diese, wie aufgezeigt, die geringste Minimalviskosität im Vergleich mit den beiden weiteren Formmassen aufweist.

Für die Ableitung von Verarbeitungstemperaturen wurden zudem DSC-Analysen der Werkstoffe durchgeführt. Es ist ein Glasübergang (ca. 58 °C) und die exotherme Härtingsreaktion (Onset ca. 135 °C, Peaktemperatur ca. 158 °C) zu erkennen. Bei der Betrachtung der verschiedenen Härtingsverläufe zeigt sich, dass die Formmasse EP 3585 eine geringere Härtinggeschwindigkeit im Vergleich zu den beiden anderen Formmassen (EP 3581, EP 3582) aufweist. Für den angestrebten Spritzgussprozess kann dies einen enormen Vorteil darstellen, da die Formmassen beim Einspritzen in das Werkzeug durch die verzögerte Aushärtung länger fließfähig bleiben.

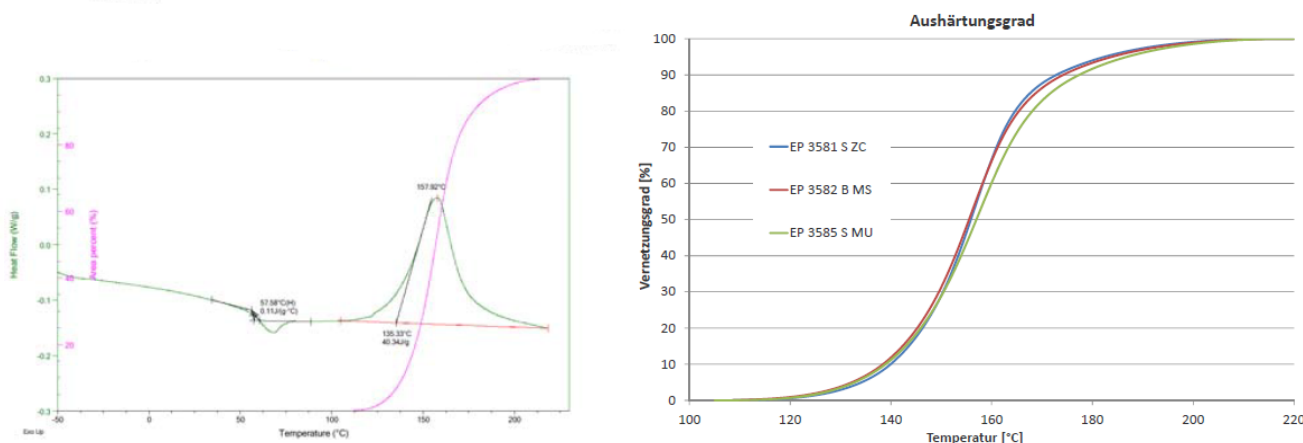


Abbildung 58: DSC-Analysen der ausgewählten Formmassen und Übersicht zur Reaktionskinetik

Für eine erste Interpretation des Formfüllvorganges wurde der Statorverguss mit dem Materialdatensatz einer Ersatzmasse vom Projektpartner Schwarzpunkt berechnet. Nach dem Designfreeze für den Statorverguss sollte auch die Finalgeometrie simuliert werden.

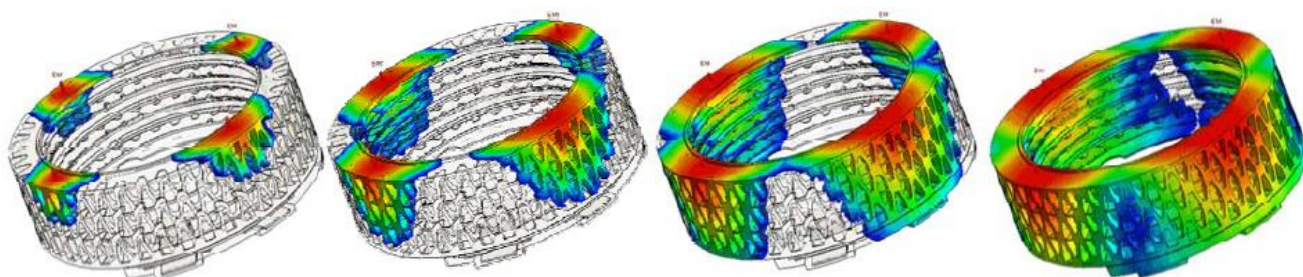


Abbildung 59: Füllsimulation des Statorvergusses

Allerdings wurde, wie bereits in Abschnitt 4 beschrieben, aufgrund geänderter Zielvorgaben (geringere Stückzahlen) durch den Projektpartner Compact Dynamics das Spritzgussverfahren zur unwirtschaftlicheren Fertigungsvariante im Vergleich zum Vakuumverguss angesehen.

Für die Betrachtung als Grundlagenuntersuchung wurde eine Probegeometrie auf eine ebene Probenplatte umgesetzt. Hierfür wurde der TUC eine einzelne Zahngeometrie (Abbildung 60 rechts) aus dem Statorpaket (Abbildung 60 links) konstruktiv zur Verfügung gestellt.

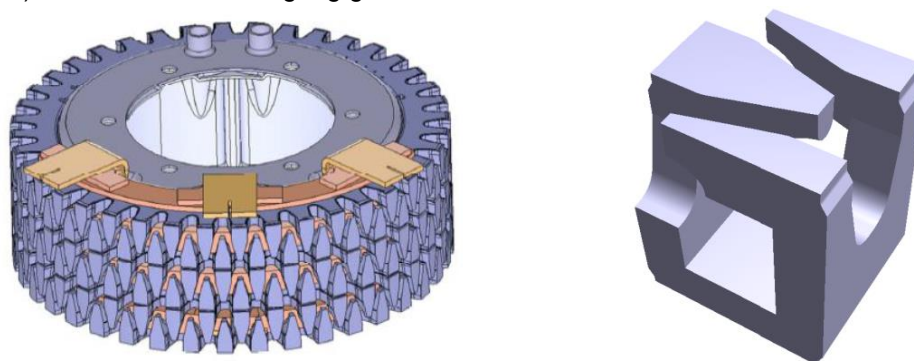


Abbildung 60: Einzelne Zahngeometrie aus dem Statorpaket entnommen

An der TUC steht ein modulares Versuchsplattenwerkzeug zur Verfügung, welches die Möglichkeit für wechselbare Einsätze bietet. Für die Umsetzung der Zahngeometrie wurde diese auf die ebene Versuchsplatte übertragen. Die Realisierung des Werkzeugeinsatzes mit Zahnstruktur ist auf nur einer Werkzeughälfte aufgrund der unmöglichen Entformbarkeit nicht zu realisieren.

Aufgrund dessen wurde die Zahngeometrie zerschnitten und somit eine Werkzeugtrennung über die Zahnhöhe ermöglicht. Es wurden zwei Werkzeughälften mit jeweils drei Zahnreihen über die gesamte Bauteilbreite konstruiert (Bild 2). Aufgrund der drei Statorringe des Originalteiles wurde die Zahngeometrie nicht auf die komplette Versuchsplatte (150 mm) übertragen. Somit ergeben sich im Plattenwerkzeug ähnliche Druckverhältnisse und Fließwege im Vergleich zum Stator.



Abbildung 61: Konstruktive Werkzeugeinsätze mit Zahngeometrie für die Versuchsplatte

Die konstruierten Werkzeughälften wurden vom Werkzeugbauer umgesetzt und in das vorhandene Versuchsplattenwerkzeug implementiert. Für die Gewährleistung einer sicheren Entformung wurden hierfür Entformungsschrägen von 3° umgesetzt und ein umfangreiches Auswerferkonzept umgesetzt.

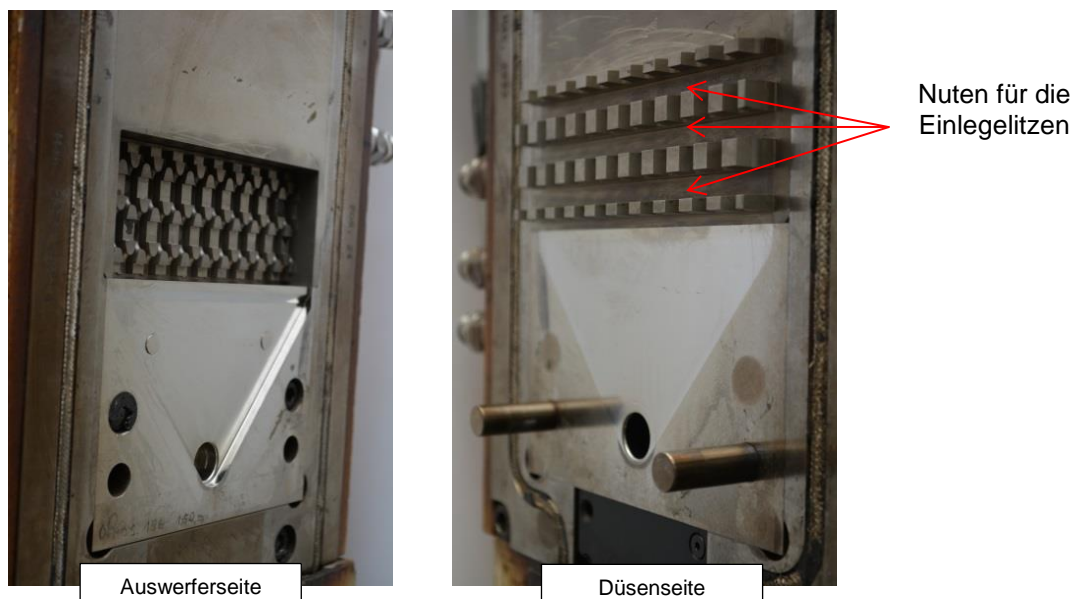


Abbildung 62: Gefertigte Werkzeugeinsätze mit Zahngeometrie für die Versuchsplatte

Wie in Abbildung 62 gekennzeichnet konnten, durch die gewählte Zahngeometrie, drei Kupferlitzen (äquivalent zum Statorbauteil) in die Versuchsplatte eingelegt werden. In Vorversuchen zum Spritzgussprozesse wurden die Probekörper ohne eingelegte Litzen gespritzt und es wurde die prinzipielle Prozessfähigkeit untersucht.

Aufgrund der Voruntersuchung wurden die Materialien EP 3581 SZ C (geringe Minimalviskosität) und EP3585 SM U (geringe Reaktionsgeschwindigkeit) gewählt. Die prinzipielle Prozessfähigkeit konnte nachgewiesen werden und es konnten automatisiert Teile gefertigt werden. Zur Verdeutlichung des Werkstoffverhaltens sind in Abbildung 63 die Werkstoffzustände einer duroplastischen Formmasse beim Spritzgießen dargestellt.



Abbildung 63: Werkstoffzustände einer duroplastischen Formmasse beim Spritzgießen

Bauteile ohne Litzen konnten unter Verwendung der EP-Formmassen mit einer hohen Dimensionsstabilität und vollständig gefüllten Kavität hergestellt werden. Des Weiteren wurde deutlich, dass die Formmasse EP 3581 SZ C zu einer vermehrten Gratbildung im Werkzeug führt, was wiederum auf die geringe Minimalviskosität zurückzuführen ist und somit mit der im Labor ermittelten geringsten Minimalviskosität korreliert. Davon ausgehend wurde vermutet, dass das Material EP3581 SZ C zu einer besseren Formfüllung mit Litzen und einer besseren Litzeninfiltration führt. Hierfür wurden drei auf 140 mm abgelängte Litzen mit Isolation in die Nuten im Werkzeug eingelegt.

Eine vollständige Formfüllung und eine Fertigung von spritzgussfallenden Teilen waren weiterhin möglich. Allerdings wurden die Litzen durch den Einspritzdruck der einströmenden Masse an die düsenseitige Werkzeugwand gepresst, wodurch ein Umfließen der Schmelze nur bedingt bzw. in Abhängigkeit der Materialviskosität nicht möglich war.

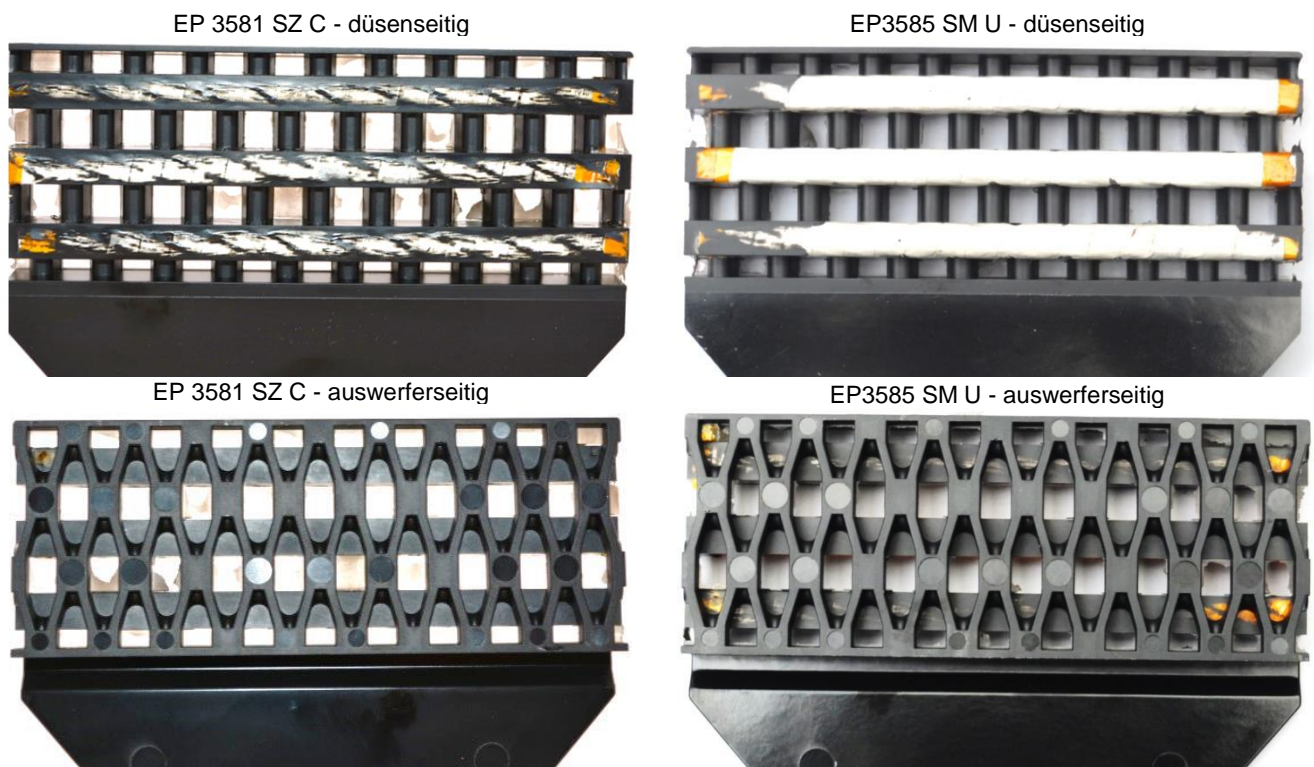


Abbildung 64: Gespritzte ebene Statorgeometrie mit eingelegten Litzen

In den Versuchen bestätigt sich die Vermutung der besseren Formfüllung mit der Niedrigviskoserer EP 3581 SZ C Formmasse. Auswerferseitig ist eine vollständige Konturabbildung bei beiden Formmassen möglich. Düsenseitig ergeben sich durch das Anpressen der Kupferlitzen nur sehr kleine Fließkanäle, welche ein Einströmen der höherviskosen Formmasse EP3585 SM U nahezu vollständig verhindern.

Mit der niederviskosen Formmassen ist ein teilweises Umströmen der Litzen gegeben, wobei ebenfalls keine vollständige Formfüllung und keine geschlossene Materialschicht detektiert werden kann. Dennoch gewährleisteten beide Formmassen einen, wahrscheinlich formschlüssigen, Verbund mit den Kupferlitzen. Eine prinzipielle Umsetzbarkeit des Umspritzens der ebenen Statorgeometrie mit eingelegten isolierten Litzen ist somit gegeben.

Ein weiteres Ziel des Untersuchungen war es die Infiltration der Litzen mit und ohne Isolation zu untersuchen. Hierfür wurden zusätzlich zu den beschriebenen Versuchen einige Kupferlitzen abisoliert, in das Werkzeug eingelegt und umspritzt. Anschließend wurden sowohl die isolierten umspritzten Litzen, als auch die abisolierten umspritzten Litzen aus der Geometrie getrennt und in Epoxidharzmatrix für mikroskopische Untersuchungen eingebettet. Die eingebetteten Litzen wurden mit dem differentiellen Interferenzkontrast unter 50-facher-Vergrößerung mikroskopiert.

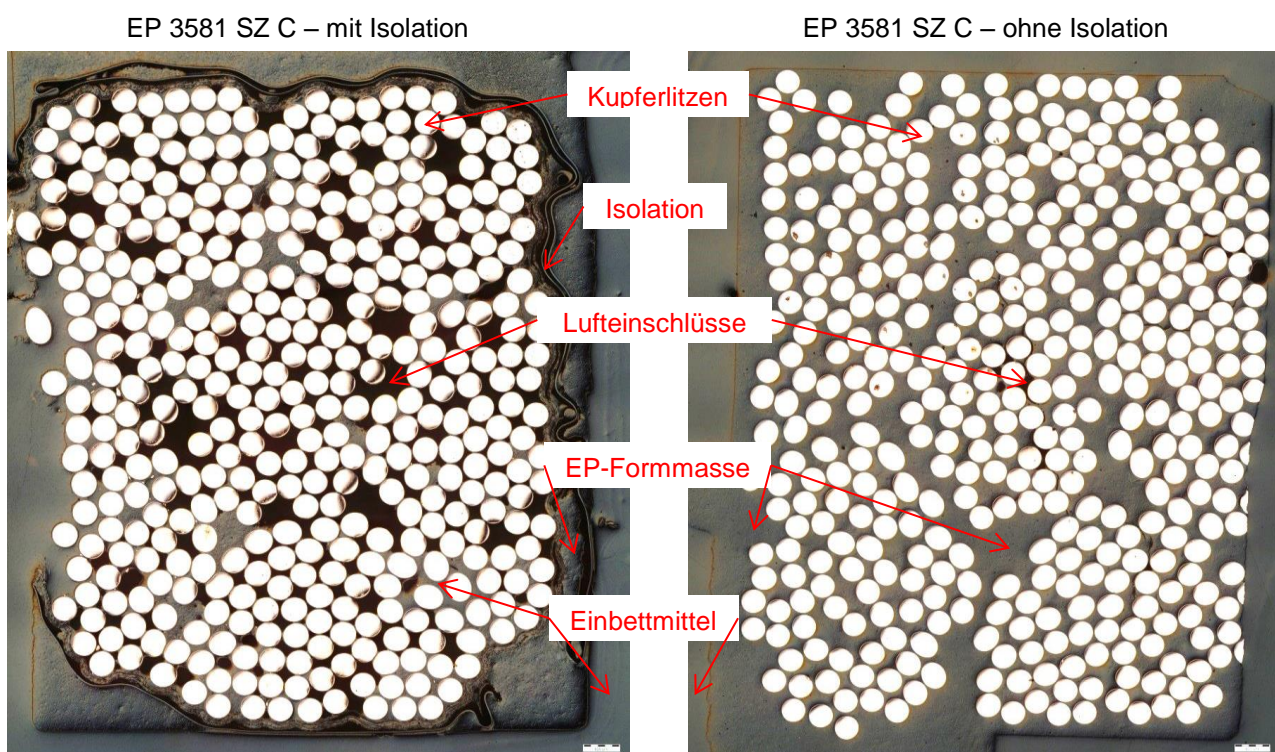


Abbildung 65: Mikroskopie der umspritzten Kupferlitzen mit (links) und ohne Isolation (rechts)

In Abbildung 65 wird deutlich, dass es bei der umspritzten Litzen mit Isolation (links) zu keiner bzw. einer sehr schlechten Infiltration der Kupferdrähte kommt. Es sind deutliche Luftporen und unbenetzte Kupferdrähte in der Litze zu erkennen.

Des Weiteren wird ein Aufstauen der EP-Formmasse an der Isolation deutlich. In die Litze ist ausschließlich Einbettmittel, welches für die Probenpräparation der Mikroskopie verwendet wurde, eingedrungen und benetzt einige Kupferdrähte. Zusammengefasst ist eine Infiltration der abisolierten Kupferlitzen, durch die fehlende Möglichkeit der Diffusion der EP-Formmasse durch das Isolationsband nicht möglich.

Die Möglichkeit der Infiltration lieferten die Versuche ohne Isolation. In Abbildung 65 (rechts) wird deutlich, dass es zu einer guten Infiltration der Kupferlitze kommt und die EP-Formmasse nahezu vollständig die einzelnen Kupferdrähte benetzt. Es sind des Weiteren nur sehr wenige Luftporen, insbesondere im Vergleich zum Versuch mit Isolation, in der Kupferlitze zu erkennen. Zusammengefasst ist eine Verarbeitung und vollständige

Benetzung der Kupferlitzen ohne Isolation im Spritzgussprozess möglich. Einschränkend muss das komplexere Handling der abisolierten Litzen durch fehlende Dimensionsstabilität genannt werden.

In der hier dargestellten Machbarkeitsstudie wurde das Einlegen manuell umgesetzt. Für eine Serienanwendung bestünde weiterer Forschungsbedarf hinsichtlich der Handlings- und Automatisierungstechnik des Systems. Eine prinzipielle Umsetzbarkeit der Serienfertigung im Spritzgussprozess ist ausgehend von der durchgeführten Machbarkeitsstudie gegeben!

5.3.2 Optimierung des derzeitigen Vakuumvergusses

Der derzeitige Vakuumverguss ist durch eine sehr aufwendige Prozesstechnik gekennzeichnet. Dabei wird zu Beginn der Stator bei 80 °C ca. 12 h vorgewärmt und anschließend im Vakuum vergossen. Nach einer 4-stündigen Gelierphase des infiltrierte Stators bei 80 °C wird der gesamte Werkstoffverbund im Ofen bei 130 °C über 4 h ausgehärtet.

Es sollte untersucht werden, welche Auswirkungen die Verkürzung der Prozesskette bzw. der einzelnen Prozesszeiten oder die Verwendung einer alternativen Vergussmasse auf die thermomechanischen Eigenschaften besitzt. Als polymere Materialien wurde das derzeitige Vergusssystem (CW 229 / Standard-Verguss), das Vergusssystem mit schnellerem Härter (CW 229 NPC) und ein neues Vergussharz mit erhöhter Rissbeständigkeit im Tieftemperaturbereich (Ultifill 2114 TC) untersucht.

Zu Beginn wurden die nicht ausgehärteten Harze hinsichtlich des thermischen Abbauverhaltens (thermogravimetrische Analyse – TGA) und der Reaktionskinetik (Differential Scanning Calorimetry – DSC) untersucht. In der TGA-Analyse zeigen die Harze ein nahezu identisches Abbauverhalten im einsatzrelevanten Bereich bis max. 180 °C. Erst bei höheren Temperaturen (ab ca. 200°C) kann ein unterschiedliches Abbauverhalten analysiert werden.

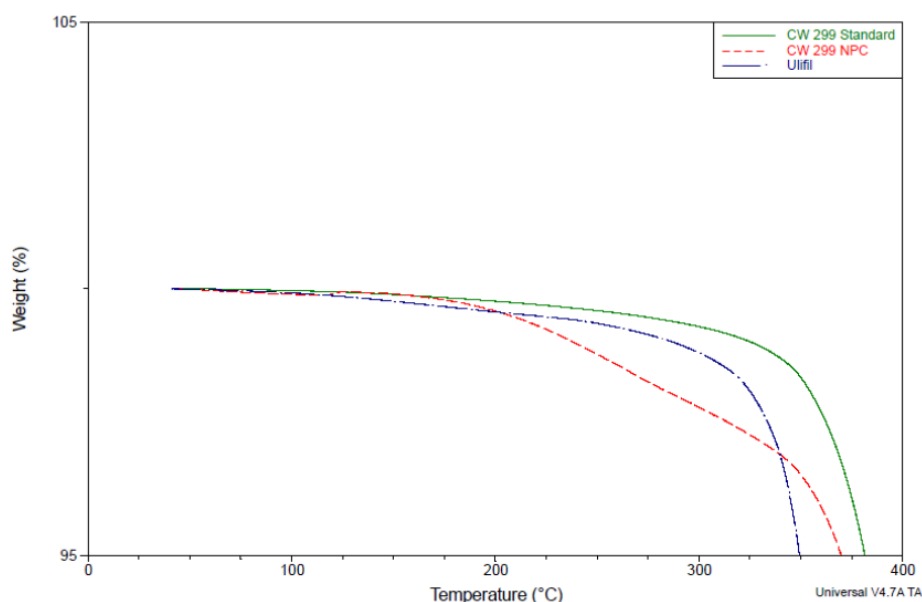


Abbildung 66: TGA - Analyse der verschiedenen Vergussmassen

Bei der Untersuchung der Reaktionskinetik der einzelnen Vergussmassen wurden jedoch einige Unterschiede deutlich. In Abbildung 67 sind die Ergebnisse der DSC-Analyse bei einer Heizrate von 10 K/min dargestellt.

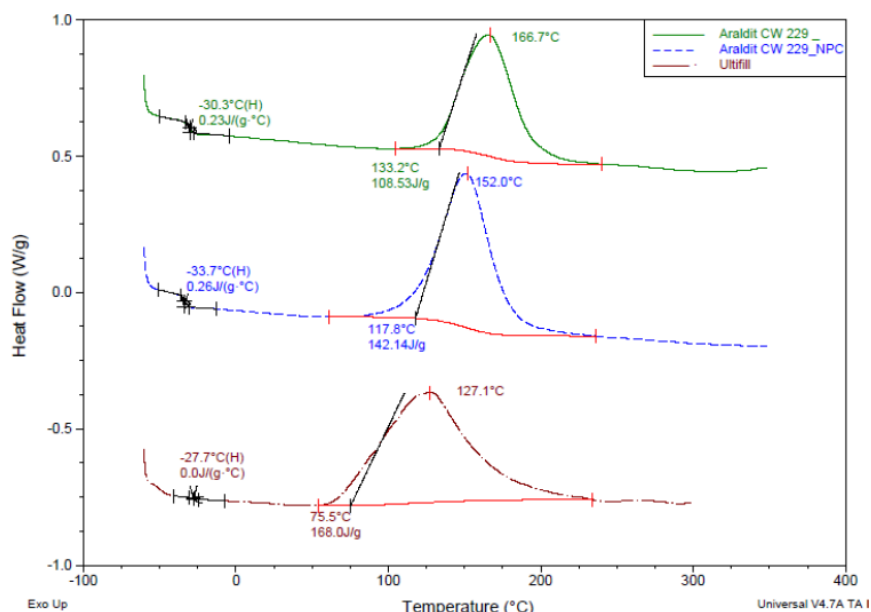


Abbildung 67: DSC-Analysen der Vergussmassen mit 10 K/min

Unter anderem weist das Harz Ultifill (braun) eine Härtung bei wesentlich niedrigeren Temperaturen, aber eine geringe Reaktionsgeschwindigkeit im Vergleich zur Standardvergussmasse CW 229 auf.

Des Weiteren verschiebt die Zugabe des NPC-Härters den Reaktionsbeginn der CW 229-Vergussmasse um 20 K zu niedrigeren Temperaturen, allerdings ohne Verkürzung der Reaktionsgeschwindigkeit (Verhältnis Reaktionsbeginn zu Reaktionsmaximum). Die Versuche wurden mit vier verschiedenen Heizraten (5, 10, 20, 40 K/min) durchgeführt, um auf dieser Datenbasis eine Reaktionskinetik für eine angestrebte Füllsimulation zu generieren. Des Weiteren wurden die Versuche mit 10 K/min für die Bestimmung des Aushärtegrades an verschiedenen hergestellten Proben genutzt. Dafür wurde Gelierzeit, Geliertemperatur, Härtezeit und Härtetemperatur bei den Gießharzen variiert (Tabelle 4).

Tabelle 4: Prozessvariation für die drei Vergussmassen

CW 229	4 h bei 90°C + 4h bei 130°C (Standard)
	5 h bei 150 °C
CW 229 NPC	2 h bei 150 °C
Ultifill 2114 TC	1,5 h bei 60 °C
	1,5 h bei 100 °C
	6 h bei 60 °C

Unter den in Tabelle 4 dargestellten Prozessbedingungen wurden planparallele Probekörper vom Projektpartner Compact Dynamics hergestellt und der Technischen Universität Chemnitz zur Verfügung gestellt.

Zur Bestimmung des Aushärtegrades wurden die gehärteten Proben in der DSC, mit einem zu den Ausgangsgießharzen äquivalenten Versuchsprogramm (konstante Heizrate von 10 K/min), untersucht und die Reaktionsenthalpien ins Verhältnis gesetzt.

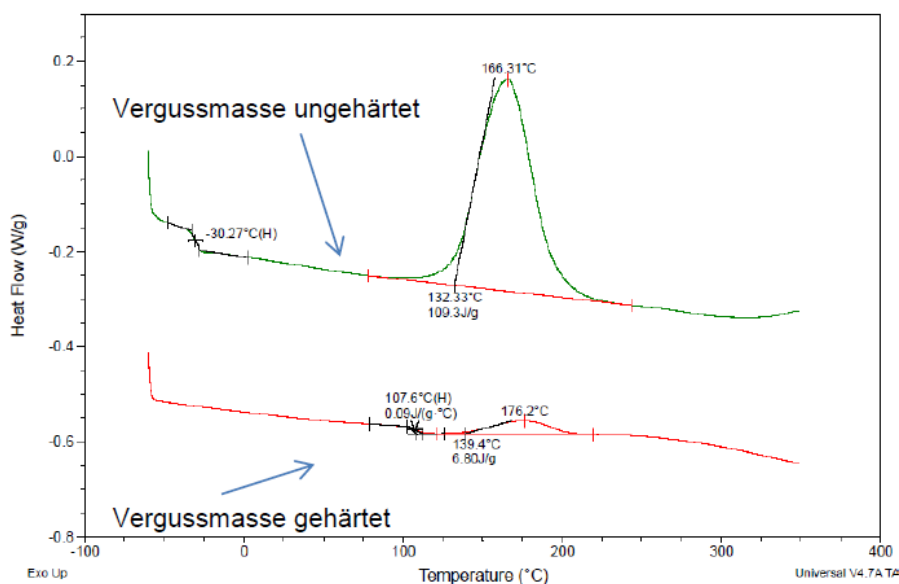


Abbildung 68: Ermittlung des Aushärtegrades mittels DSC

Bei allen sechs Prozessvariationen ergibt sich ein Aushärtegrad im Bereich von 92% - 95%. Ein signifikanter Einfluss der Prozessparameter bzw. der Vergussmassenvariation auf den resultierenden Aushärtegrad kann nicht ermittelt werden.

Für eine exaktere Charakterisierung des thermomechanischen Verhaltens in Abhängigkeit der Prozessparameter bzw. Harzzusammensetzung wurden zusätzlich Dynamisch-Mechanischen-Analysen (DMA) durchgeführt. Hierbei wird aus den gehärteten Probekörpern ein planparalleler rechteckiger Biegestab präpariert, einseitig eingespannt, mit einer Amplitude von 20 µm und einer Frequenz von 1 Hz belastet. Die DMA wird im linearelastischen Bereich durchgeführt und der Widerstand gegen Verformung gemessen. Aus der resultierenden Phasenverschiebung können u.a. Aussagen zum Verlauf von Speicher- und Verlustmodul und des Glasüberganges getroffen werden. Bei Vergleich der Speichermodule (Steifigkeiten) der verschiedenen Gießharze in Abhängigkeit der Aushärtebedingungen sind deutliche Unterschiede erkennbar (Abbildung 69).

Das Harz Ultifill weist bei allen drei Versuchsparametersätzen eine geringe Steifigkeit im Vergleich zum Standardharz auf und besitzt den Glasübergang (sprunghafter Steifigkeitsverlust) bei wesentlich niedrigeren Temperaturen im Vergleich zu der CW 229 - Standardvergussmasse. Da eine dauerhafte Gebrauchstemperatur des Motors bei mind. 100°C liegt, eignet sich diese Vergussmasse nur sehr eingeschränkt. Eine Beeinflussung durch den Verarbeitungsprozess ist kaum zu detektieren.

Ein Verarbeitungseinfluss ist ebenfalls beim CW 229 Standardharz nicht zu quantifizieren. Eine Reduktion der Prozesszeit ist im Hinblick auf die Ergebnisse durchaus denkbar. Eine weitere Verkürzung durch Verwendung des NPC-Beschleunigers ist ebenfalls möglich. Allerdings weist diese Harzvariation einen ca. 1000 MPa geringeren Speichermodul und somit eine geringe Materialsteifigkeit auf.

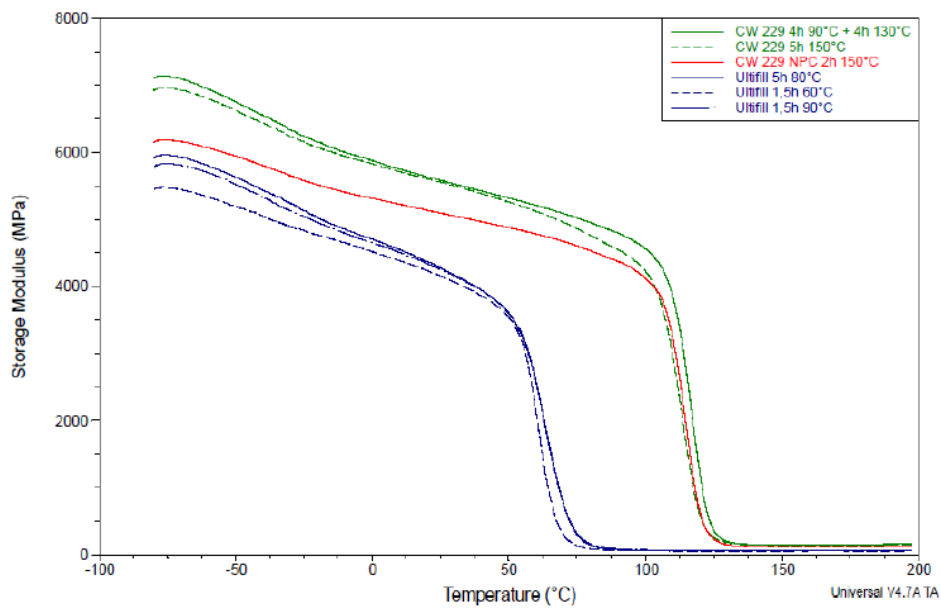


Abbildung 69: Speichermodule der Vergussmassen aus der DMA

Ein weiteres Qualitätskriterium stellt die thermische Längenausdehnung der ausgehärteten Vergussmasse dar.

Bei einer zu großen thermischen Ausdehnung im Vergleich zum metallischen Statormaterial kann es zur Materialablösung kommen. Aufgrund dessen wurden die unterschiedlich gehärteten Massen mittels der Thermisch-Mechanischen-Analyse (TMA) untersucht. In dieser wird die Dimensionsänderung der Probe über einen planparallelen nahezu lastfreien Auflagestempel (0,5 N) in über eine Temperaturrampe (3 K/min) gemessen. Anhand des sprunghaften Anstieges der Dimensionsänderung kann der Glasübergang der Probe bestimmt werden (Abbildung 70).

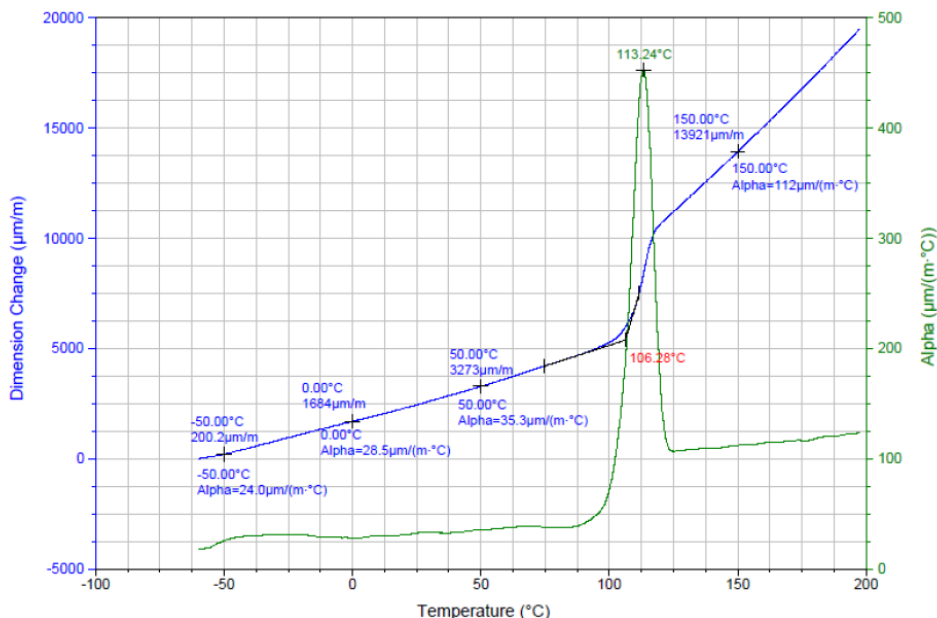


Abbildung 70: Exemplarische TMA-Messung des CW 229

In der TMA wurden die verschiedenen Vergussmassen in Abhängigkeit der jeweils gewählten Prozessvariante untersucht. Es wurden die jeweiligen Glasübergänge am Onset der Dimensionsänderung ausgewertet und die thermische Längenausdehnung der Proben alle 50 K quantifiziert. Die TMA-Analyse bestätigt die DMA-Analyse und es wird deutlich, dass das Ultifill, im Vergleich zur Standardvergussmasse, den Glasübergang bei der

niedrigsten Temperatur aufweist und einen höheren thermischen Längenausdehnungskoeffizienten besitzt. Es können wiederum keine Abhängigkeiten von der Prozessführung (Zeit, Temperatur) detektiert werden. Eine Unabhängigkeit der thermischen Längenausdehnung, von den Prozessparametern und ebenfalls von der Zugabe des Beschleunigers wird bei dem Material CW 229 deutlich.

Zusammengefasst scheint eine Prozesszeitverkürzung mit der Standardvergussmasse (CW 229) als auch mit beschleunigten Standardvergussmasse (CW 229 NPC) möglich. Das Alternativharz Ultifill ist aufgrund des niedrigen TG und des höheren Ausdehnungskoeffizienten als ungeeignet anzusehen. Für nachfolgende Untersuchungen wurde sich nach Rücksprache mit dem Projektpartner Compact Dynamics auf die Prozessoptimierung für die Vergussmasse CW 229 konzentriert. Ziel ist es, die Prozess-Zustands-Eigenschaftbeziehungen des CW 229 Standardharzes über den gesamten Aushärtungsprozess zu untersuchen. Hierfür wurden die Gelier- (90°C) und die Härtingszeit (130°C) in engen Abstufungen variiert (Tabelle 5).

Tabelle 5: Variation der Gelier- und Härtingszeiten

Gelieren (90°C)	Härten (130°C)
0 h	0,5 h
0 h	1 h
0 h	2 h
0 h	4 h
0 h	6 h
1 h	2 h
1 h	4 h
2 h	2 h
2 h	4 h
4 h	10 min
4 h	20 min
4 h	30 min
4 h	1 h
4 h	2 h
4 h	4 h

In der DSC-Analyse wird deutlich, dass ab den Parametersätzen 0–2 und 4–2 keine Restreaktivität der Vergussmasse in Form einer Wärmestromdifferenz in der DSC messbar ist. Zusammenfassend ist die Vergussmasse ab einer Härtungsdauer von 2 h vollständig gehärtet und es ist ebenfalls keine weitere Steigerung des Glasüberganges (ca. 100°C) zu erkennen. Für eine exakte Analyse des Werkstoffzustandes wurden vier Versuchsparametersätze ausgewählt (rote Umrandung - Tabelle 5) und deren Proben in der DMA untersucht.

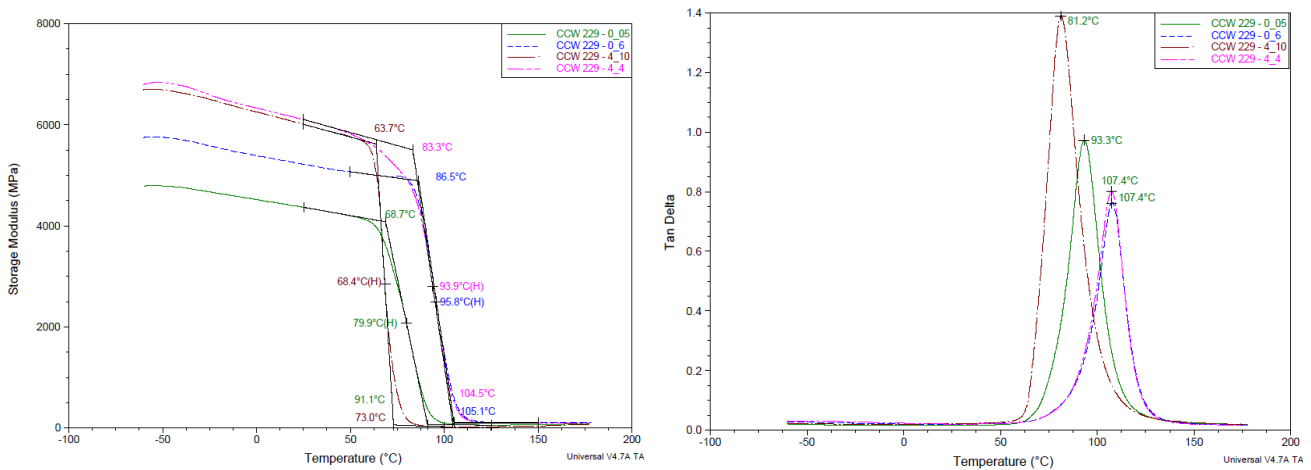


Abbildung 71: Verlauf der Speichermodule (links) und der Verlustmodule (rechts) aus den DMA-Messungen von Probenausgewählter Prozessparameter

Bei der Analyse der Speichermodule wird deutlich, dass die beiden Materialien mit jeweils 4-stündiger Gelierung die höchste Steifigkeit aufweisen. Des Weiteren wird durch Steigerung der Härtingszeit von zehn Minuten auf vier Stunden einer höheren Glasübergang erreicht (64°C auf 83 °C). Die Proben ohne vorherige Gelierung weisen eine deutlich, geringere Steifigkeit auf, wobei die 6-stündig gehärtete Probe sowohl eine höhere Steifigkeit (ca. 5000 MPa auf ca. 6000 MPa) als auch einen höheren Glasübergang ausweist (69 °C auf 87 °C).

Zusammengefasst ergibt die vorherige Gelierung eine höhere Steifigkeit, durch eine wahrscheinlich gestiegene Netzwerkdicke, welche durch eine erhöhte Härtezeit nicht mehr auszugleichen ist. Ein Grund hierfür könnte die fehlende Molekülbeweglichkeit durch Bildung eines weitmaschigen Netzwerkes während der hohen Härtingstemperaturen sein. Dies bestätigt die Analyse des dazugehörigen Tan Delta im Glasübergang, d.h. der Dämpfung des Materials im Glasübergang.

Die Dämpfung ist bei der kürzesten Härtingszeit am höchsten und bei einer längeren Härtingszeit (über 4 h) nahezu konstant und unabhängig von der vorhergehenden Gelierzeit. Dies könnte mit dem Vernetzungsgrad direkt in Verbindung stehen. Durch die lange Härtingszeit hat sich ein hoher Vernetzungsgrad ausgebildet und je höher dieser Vernetzungsgrad desto geringer die Dämpfung des Materiales im Glasübergang. Ausgehend von diesen Ergebnissen kann für das Standardvergussmaterial eine möglichst lange Gelierphase empfohlen werden, welche mit einer möglichen Reduktion der Härtingszeit auf 2 h einhergeht.

Abschließend wurden die drei Vergussvarianten hinsichtlich Ihrer Viskosität in Abhängigkeit der Temperatur am Rotationsrheometer im Oszillationsmodus untersucht.

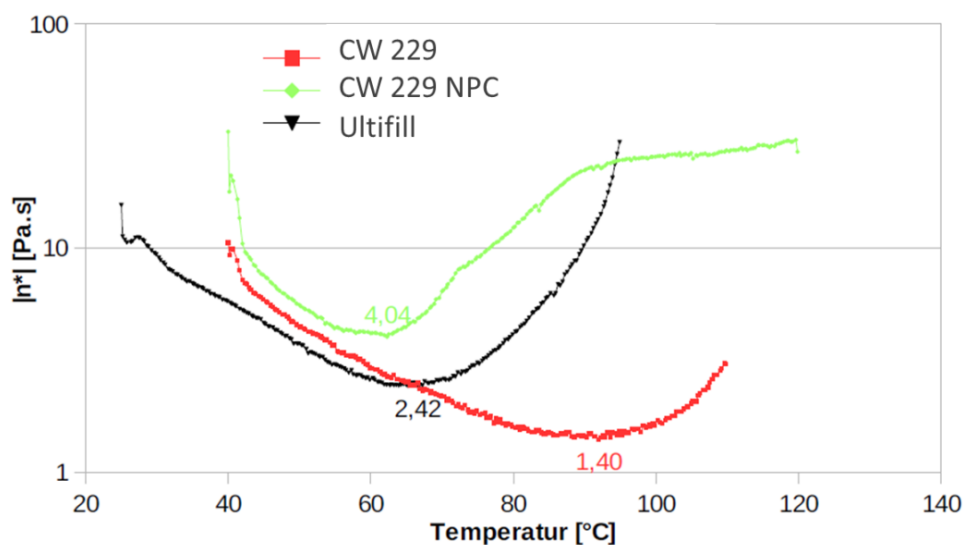


Abbildung 72: Viskositätsverhalten der Vergussmassen über die Temperatur am Rotationsrheometer

Die Messungen wurden mit einer Frequenz von 1 Hz und einer Deformation von 0,01 % spaltgesteuert durchgeführt. Durch die geringe Viskosität konnten die Messungen nicht mit der Platte-Platte-Geometrie vermessen werden, da es zu einem Austritt der Epoxidharze im Bereich der Minimalviskosität kam. Es wurde eine spezielle Pfannengeometrie hergestellt, um den Austritt der Substanz zu vermeiden. In den Ergebnissen wird deutlich, dass die Vergussmasse CW 229 mit Beschleuniger wie zu erwarten wesentlich zeitiger härtet als ohne Beschleuniger.

Dadurch gelangt die Vergussmasse ohne Beschleuniger allerdings zu geringeren Minimalviskositäten. Im Vergleich dazu härtet die Alternativvergussmasse Ultifill ebenfalls ca. 25 K zeitiger und weist eine höhere Materialviskosität auf. Bezogen auf das Fließ-Härtungsverhalten kann zusammengefasst werden, dass die Vergleichsharze jeweils zeitiger härten, allerdings somit nicht die Minimalviskosität der Ausgangsmasse erreichen. Eine Formfüllung ist somit wahrscheinlich mit der derzeitigen Vergussmasse am prozessstabilsten möglich, wobei geringfügig längere Härtingszeiten notwendig sind. Um eine Infiltration im Bereich der Minimalviskosität zu erreichen, kann die Statorvergusstemperatur für das CW 29 erhöht werden.

Im Rahmen des Arbeitspaketes 5 wurde in Kooperation mit dem Projektpartner MS Schramberg das Herstellverfahren für die Rotormagnete diskutiert und ein Lastenheft für das Trägermaterial bestimmt. Im ersten Schritt wurde das Aichi-Pulver hinsichtlich des Fließ-Härtungsverhaltens charakterisiert. Hierfür wurde begonnen, eine geeignete Messmethode für das Rotationsrheometer zu entwickeln.

Die Schwierigkeit liegt im hohen Füllstoffanteil der Compounds, was zu einem quasi Feststoffverhalten führt. Für gefüllte Compounds mit ca. 93 Gew.-% Füllanteil konnten bereits konsistente Fließ-Härtungskurven aufgezeichnet werden, jedoch lassen die hohen Streuungen keine exakten Aussagen zu Viskositätswerten zu.

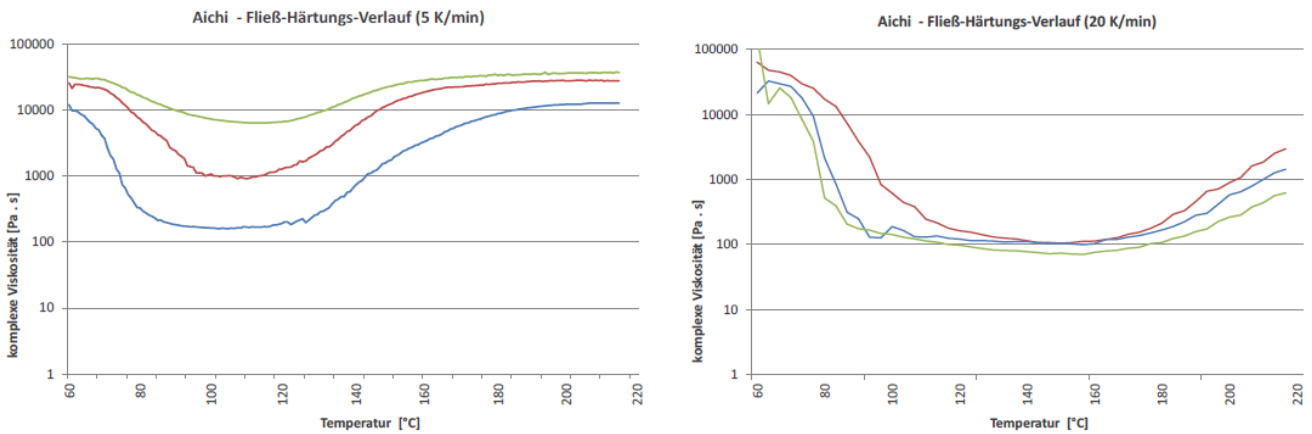


Abbildung 73: Fließ-Härtungs-Verlauf des Aichi-Pulvers bei verschiedenen Heizraten am Platte-Platte-Rheometer

Parallel zu den Arbeiten am kommerziell erhältlichen Aichi-Pulver wurden rheologische Untersuchungen an diversen Harztypen, Härtern und Beschleunigern als Trägermaterial für die Magnetwerkstoffentwicklung durchgeführt.

Das Material wurden hinsichtlich der rheologischen Grundeigenschaften und seiner Härtungscharakteristik untersucht.

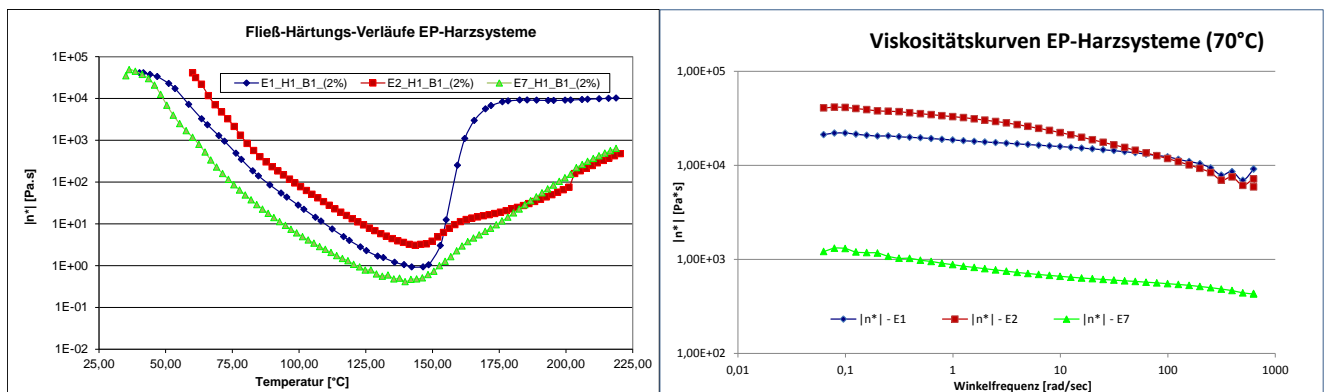


Abbildung 74: Fließ-Härtungs-Verläufe (links) und Viskositätskurven ausgewählter Epoxidharz-Härter-Beschleunigersysteme

Aufgrund der Entscheidung des Projektpartners MS Schramberg den Untersuchungsschwerpunkt wieder auf das Aichi-Pulver zu legen, wurden an den beschriebenen Harz-Härter-Systemen keine Untersuchungen mit gefüllten Epoxidharzsystemen und einer sich eventuell einstellenden Fließ-Härtungs-Charakteristik durchgeführt.

5.4 Arbeitspaket 4 – Herstellung eines Statorträgers mit integrierter Kühlfunktion

Ziel war die Entwicklung und Industrialisierung eines Statorträgers mit integrierter Kühlfunktion, inklusive der mechanischen und thermischen Anbindung des Statorträgers an das Statorpaket, bestehend aus Statorringen aus Sintermaterialien und Statorwicklung.

Die Leistungsfähigkeit des Motors ist von seiner Entwärmung und vom thermischen Widerstand zwischen den verlustbehafteten Stator-Bauteilen und dem Kühlwasserkreislauf abhängig. Deshalb ist neben einem effizienten Kühler eine Verbindungstechnik mit sehr gutem thermischem Leitwert erforderlich. Zudem ist auf die Anpassung der Bauteilausdehnung und einen reproduzierbaren Verbindungsprozess zu achten.

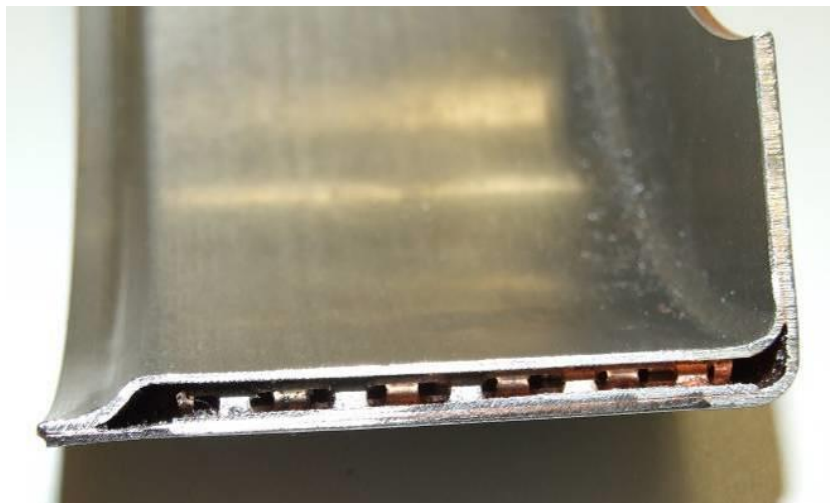


Abbildung 75: Prinzip Aufbau Statorträger

Der Statorträger besteht aktuell aus folgenden Hauptbestandteilen:

- Aussentopf
- Innentopf
- Turbulatorbleche
- Wasseranschlüsse

Technische Daten DYNAX Statortäger		Wert			Einheit
		min	nom	max	
Durchmesser		139,9	140	140	mm
Länge			54	56	mm
Wärmeausdehnungskoeffizient		10		14	$\times 10^{-6} /K$
Werkstoff - Wasserseitig	Al-Legierung				
Betriebsdruck			3		bar
Prüfdruck			5		bar
Motormoment			75	85	Nm
Zielgewicht Kühler (trocken)			0,3		kg
Kühlmedium	Wasser/Glykol				
Kühlwassertemperatur		-40	70		°C
Kühlwasservolumenstrom			6	10	l/min
Druckverlust:			150		mbar
Absoluter Wärmewiderstand (zwischen Oberfläche Kühlmantel und Kühlmedium)			2		K/KW
Temperaturbereich		-40		+140	°C

Das Arbeitspaket 4 wurde nach Beginn des Projektes in Abstimmung mit dem Projektträger umgewidmet, da der im Automobilbereich vorrangig eingesetzte Aluminiumkühler aufgrund unterschiedlicher Wärmeausdehnungskoeffizienten von Aluminium und dem Sintermaterial der Statorringe nicht anwendbar ist.

Daraufhin haben wir das Arbeitspaket in zwei Unterpakete aufgeteilt:

- Herstellung eines Stator Kühlers aus aluplattiertem Ferranblech
- Herstellung einer Lötverbindung zwischen Statorträger und Statorpaket anstelle der aktuell verwendeten Klebeverbindung

5.4.1 Herstellung eines Stator Kühlers aus aluplattiertem Ferranblech

Der Statorträger soll aus tiefgezogenen- bzw. gedrückten Blechen gefertigt werden.

Der Statorträger wird als Zylinder ausgeführt. Der Außendurchmesser bildet die Kontaktfläche zum Stator. Die Bleche sind einseitig aluplattiert. Die Plattierung zeigt zur Wasserseite, somit sind die Stahlbleche zum Kühlkreis hin gegen Korrosion geschützt. Zusätzliche Bauteile, die nicht von thermischen Ausdehnungsdifferenzen betroffen sind, werden aus Aluminium gefertigt. Das sind z.B. Standard-Kühlerbauteile wie Turbulatorbleche und Fittings. Die Bauteile sollen mit in der Kühlerfertigung verwendeten, neuartigen Lötprozessen gefertigt werden (z.B. „Nocolock“).

Durch den Einsatz dieses Flussmittels ist eine kontinuierliche Lötung im Tunnelofen möglich.

Die Bleche sollen mit zwei unterschiedlichen Alu-Plattierungen beschichtet werden:

- Schicht 1: Hochschmelzendes Alu (Grundbeschichtung)
- Schicht 2: Niederschmelzendes Alu, dient als Lotzusatzwerkstoff

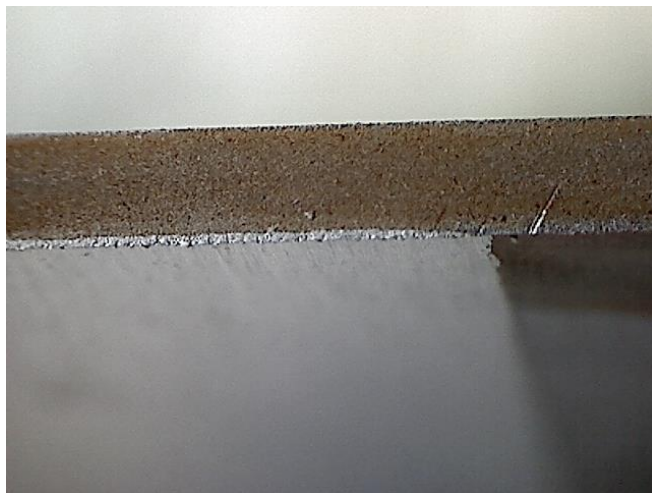


Abbildung 76: Aluplattiertes Ferranblech

Für die Statorträger-Muster wurden Kühlermantel innen und Kühlermantel aussen mit einem lotplattierten Ferranblech hergestellt. Die Lotschicht ist jeweils dem Kühlkanal zugewandt.

Der Schichtaufbau des einseitig lotplattierten FERAN-Blechtes ist exemplarisch:

- 3,2% Al4343 (32µm AlSi7,5)
- 0,8% Al3003 (8µm AlMn1Cu)
- 7% AlSi0,8 (70µm)
- 82% SGW (0,82mm St14, tiefziehfähig, GK, walzblank)
- 7% AlSi0,8 (70µm)

Für den Lötprozess stellt sich die festgestellte Formabweichung (kein paralleler Kühlerspalt) der Musterteile als problematisch dar. Das in den Kühlerspalt eingelegte Turbulenzblech hat eine Höhe von 2,96mm. Daher wurde es notwendig, den verbleibenden Spalt von bis zu 0,5mm mit Aluminium-Streifen auszufüttern.

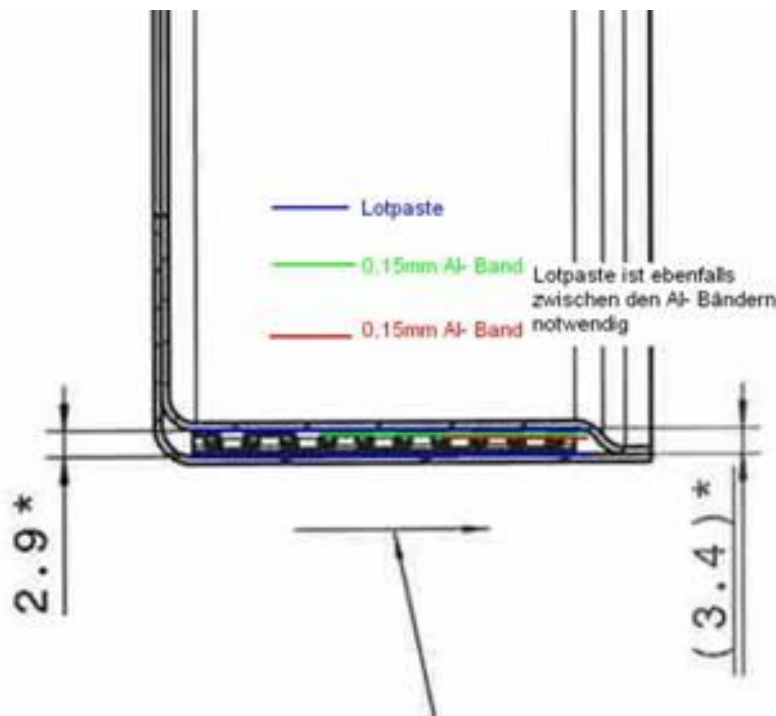


Abbildung 77: Aufbau Statorkühler

Die Teile wurden mit dem Nocolok Flux Lötprozess gelötet. Aufgrund der abweichenden Geometrie wurden die Teile relativ dick bepastet.

Vorteile:

- Ersatz der teuren Drehteile durch seriengerechte, werkzeugfallende Pressteile
- Korrosionsschutz im Kühlkreis durch die Aluplattierung
- Deutliche Gewichtsreduzierung durch wanddickenoptimierte Stahlblechteile und Aluteile
- Sehr gute thermische Anbindung des Kühlers an den Stator
- Innovative Serienprozesse beim Verlöten der Kühlerbauteile
- Kostensenkung im Vergleich zur Vakuumlötlung

Herausforderungen:

- Prozess- und fertigungsgerechtes Design der Kühlerbauteile, Prozessentwicklung Löten:
 - o Befluxung der Bauteile (z.B. Nocolock, Spray oder elektrostatisch) zur Durchbrechung der Oxidationsschicht
 - o Lötprofil für Bauteile mit unterschiedlichen Ausdehnungen und Wärmekapazitäten
- Walzplattieren des Halbzeuges (Tiefziehblech) mit hoch- und niedrigschmelzender Alu-Beschichtung
- Auswahl des Prozesses zur Fertigung der Kühlerbauteile (Tiefziehen, Hydroforming, Drücken)
- Prozessuntersuchung mit aluplattierten Blechen (Abrieb, Abplatzungen, Risse, Verunreinigungen)

5.4.2 Herstellung einer Lötverbindung zwischen Statorträger und Statorpaket

Die in diesem Teilarbeitspaket gewonnenen Erkenntnisse wurden im Rahmen einer im Hause Compact Dynamics GmbH erstellten Bachelorarbeit erarbeitet und sind in der Bachelorarbeit von M. Bleicher [13] ausführlich erläutert.

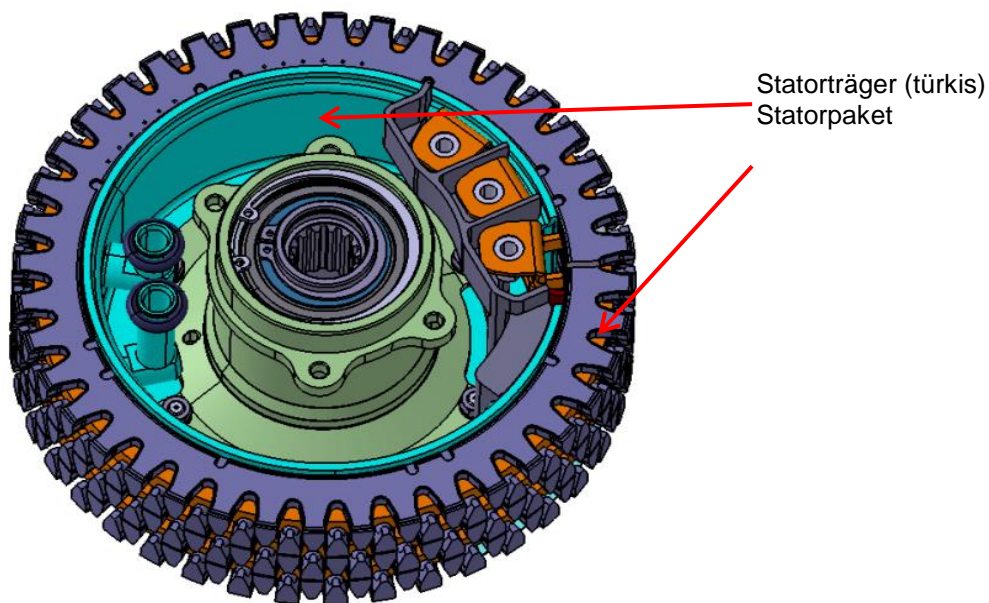


Abbildung 78: Stator Axialflussmaschine vor Verlöten und Verguss

Mit einem Lötprozess ist das Statorpaket mit dem Statorträger (Kühler) vollflächig zu verbinden. Die für das Löten notwendige Temperatur soll möglichst materialschonend an die Verbindungsfuge gebracht werden.

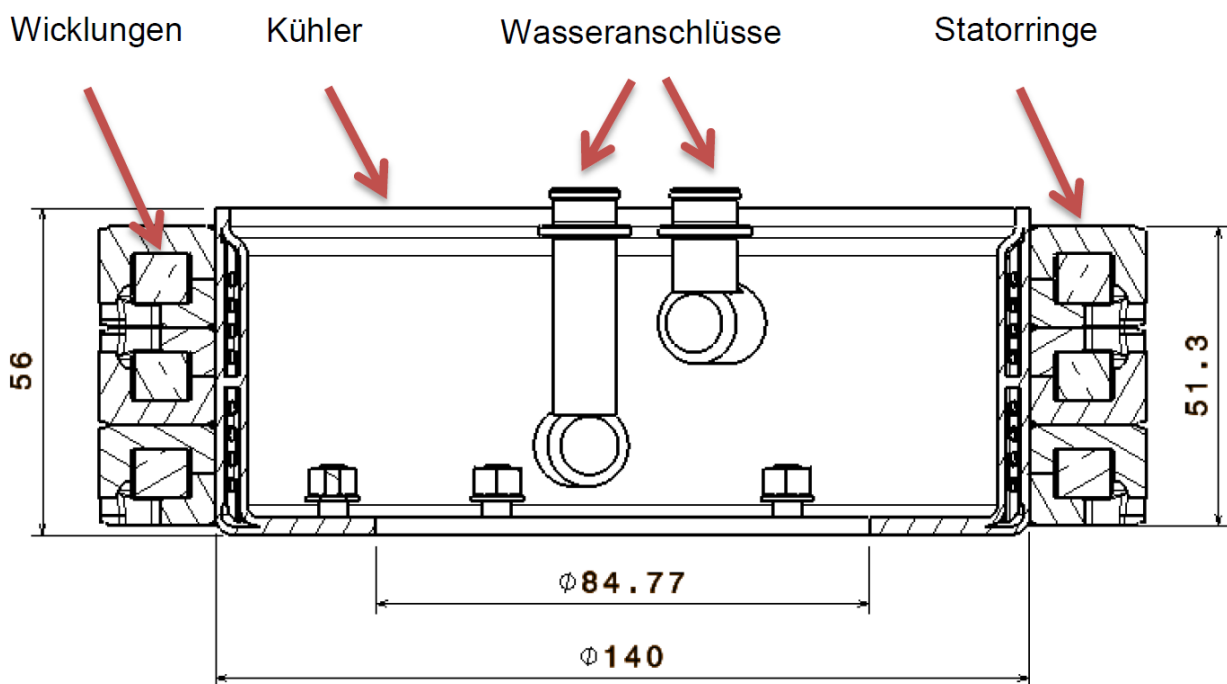


Abbildung 79: Prinzip Aufbau Statorkühler / Statorpaket (rot: Verbindung Statorträger / Statorpaket)

Die Verbindung zwischen Stator und Statorträger soll neben einer guten mechanischen Festigkeit eine gute thermische Leitfähigkeit besitzen, da diese eine Barriere zwischen den verlustbehafteten Stator (Statorringe mit Wicklungen) und dem Kühler darstellt.

Der zurzeit eingesetzte Klebstoff mit seinem geringen Leitwert führt zu einem erheblichen Temperaturgradienten zwischen Statorträger und Stator. Trotz des gleichen Wärmeausdehnungskoeffizienten beider Teile führt dies zu unterschiedlichen Dehnungen der Bauteile, was zur Schädigung der Klebstoffschicht und damit dem Kontaktverlust zwischen Statorringen und Statorträger führen kann.

Vorteile Lötverbindung:

- Ersatz der thermischen Barriere (Klebstoff $\sim 1,5 \text{ W/mk}$) durch eine sehr gut leitende Schicht (Zinnlot $\sim 70 \text{ W/mk}$)
- Vorbeschichten der Bauteile
 - o erleichtert die Montage
 - o ermöglicht eine gute industrielle Umsetzung

Herausforderungen

- Auswahl des Lotmaterials (Verfügbarkeit, Kosten, Schmelztemperatur, Loteignung)
- Galvanisches Aufbringen der Lotbeschichtung auf Statorträger und Statorringe
- Abdecken (maskieren) der Statorringe (Vermeidung von Wirbelstromverlusten)
- Ermitteln des erforderlichen Lotdepots
- Prozessauswahl zur Erwärmung der Lotstelle
- Wicklungen dürfen nicht geschädigt werden
- Qualifizierung des Prozesses hinsichtlich
 - o Lunkerbildung
 - o Benetzung
 - o Flußmittel / -reste
 - o Vollflächige Verlotung
- Anlagentechnik
 - o Aufbau einer Laboranlage
 - o Auswahl eines Wärmeträgermediums
 - o Auswahl der Aggregate (Pumpen, Erhitzer, Ventile, usw.) für Hochtemperaturanwendung
 - o Vorgaben für Industrieanlagen in Abstimmung mit Anlagenhersteller
- Aufbau und Vermessung von Musterstatoren

Nachfolgend abgebildete Verfahren und Anlagen wurden betrachtet und auf ihre Eignung hin bewertet.

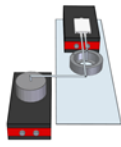
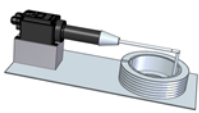
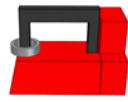
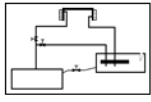
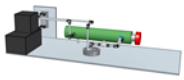
	Überhitzer Wasserdampf 	Lufterhitzer 	Induktion 	Galden HS 240 	Wärmeträgeröl 
Anschaffungskosten	Gering	Gering	Hoch	Mittel	Mittel
Betriebskosten	Gering	Gering	Mittel	Hoch	Mittel
Gefahr für den Anlagenbediener	Mittel	Mittel	Gering	Mittel	Hoch
Wirkungsgrad	Mittel	Gering	Hoch	Hoch	Hoch
Reinigungsaufwand nach dem Löten	Gering	Gering	Mittel	Mittel / Hoch	Hoch
Leistung	Gering	Gering	Mittel / Hoch	Mittel	Hoch
Funktion	x	✓	x	✓	✓
Lötzeit	Mittel / Lang	Lang	Kurz	Mittel	Kurz

Abbildung 80: Übersicht Anlagenkonzepte

Folgende Lötversuche wurden dabei durchgeführt:

- Dampfphasenlötung
- Fluidlötung
- Kontaktlötung

5.4.2.1 Lötversuche in der Dampfphasenlötanlage

Das Dampfphasenlöten, (engl.: vapor phase) nutzt zur Erwärmung der Baugruppe die bei der Phasenänderung eines Wärmeträgermediums vom gasförmigen in den flüssigen Zustand freigesetzte Kondensationswärme. Dabei findet eine Kondensation an der Oberfläche des Lötgutes statt, bis die gesamte Baugruppe die Temperatur des Dampfes erreicht hat. Siedet die Flüssigkeit, bildet sich über ihr eine gesättigte, chemisch inerte Dampfzone, deren Temperatur mit dem Siedepunkt der Flüssigkeit weitgehend identisch ist, so dass sich eine optimale Schutzgasatmosphäre ausbildet und Oxidationen im Dampfphasen-Lötprozess ausgeschlossen werden.

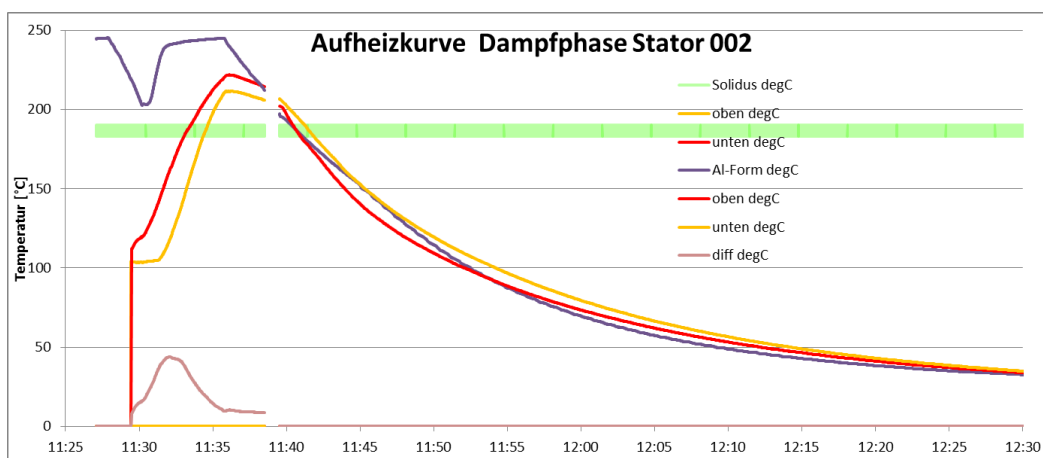


Abbildung 81: Temperaturverlauf Dampfphasenlöten



Abbildung 82: Lötversuch Dampfphasenlötanlage

Die Versuche waren prinzipiell erfolgreich, die Durchwärmung des kompletten Statorpakets erfolgte gleichmäßig.

Problematisch ist, dass der Wärmeeintrag sich nicht nur auf den zu lötenen Bereich beschränkt, sondern auch die Wicklung mit aufheizt. Bei Löttemperaturen von ca. 240° C besteht bereits bei kurzer Einwirkzeit die Gefahr der Degradation für die Wicklungsisolierung.

Da die Dämpfe innerhalb des Statorpakets kondensieren, erfolgt beim Herausnehmen des gelöteten Stators eine Kontaminationsverschleppung, d.h. das nun flüssige Medium kann in die Umgebungsatmosphäre entweichen. Entsprechende Vorkehrungen dagegen sind zukünftig erforderlich.

5.4.2.2 Kontaktlötung

Beim Kontaktlöten wird das zu lötenen Medium über eine heiße Oberfläche aufgewärmt. Aufgrund der Höhe des Statorpakets erfolgt diese Aufwärmphase sehr unterschiedlich.

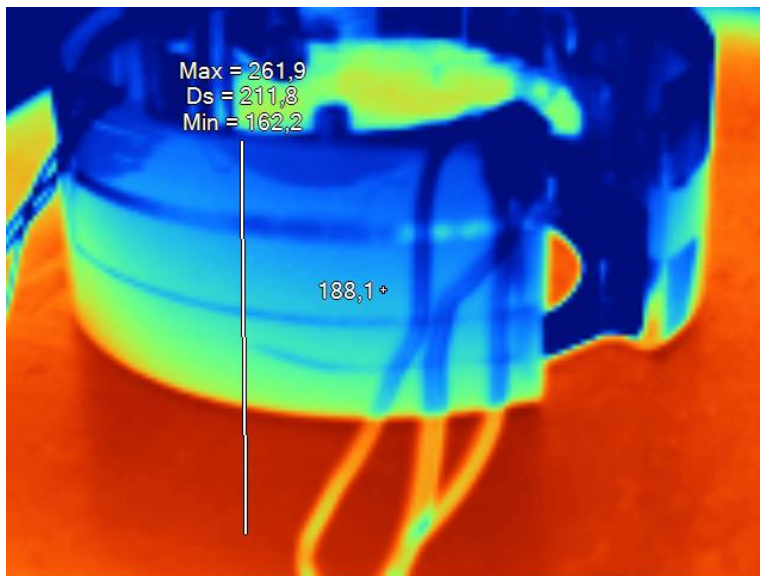


Abbildung 83: Thermographieaufnahme Kontaktlöten

Während die Heizplatte (rot) sehr heiß ist, erwärmt sich der Stator erst langsam von unten her. Das hat zur Folge, dass die Lötbedingungen für die drei Phasenringe höchst unterschiedlich verlaufen.

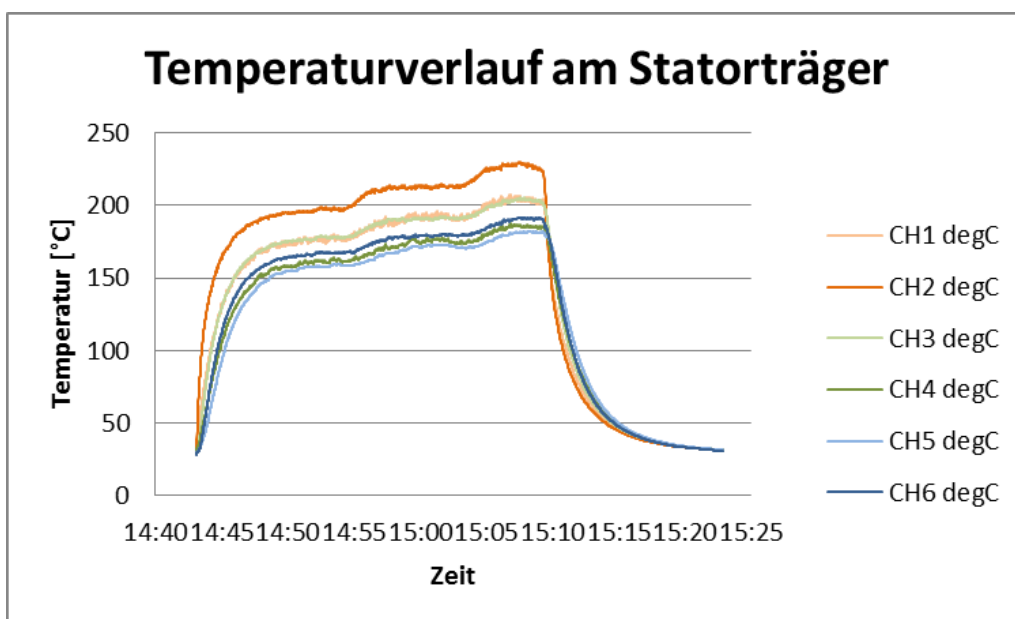


Abbildung 84: Temperaturverlauf Kontaktlöten

Zwischen den Messpunkten ergaben sich Temperaturunterschiede von bis zu 30° C, so dass anzunehmen ist, dass das Lotgut am untersten Statorring bereits zu schmelzen beginnt, wenn das Lotgut am obersten Ring noch annähernd fest ist. Auch hier ergibt sich eine unnötige und zwingend zu vermeidende Schädigung der Wicklungsisolaton.

Dieses Lötverfahren eignet sich hervorragend für flache Strukturen, wie z.B. Chiplöten, ist jedoch für das Löten des Stators ungeeignet.

5.4.2.3 Fluidlötung

Beim Fluidlöten wird ein heißes Medium (z.B. Midel 7131) mittels einer Pumpe in den Statorkühler eingebracht und erhitzt den Stator dort, wo die Wärme für den Lötprozess benötigt wird. Die Wicklung wird durch die kurze Prozesszeit geschont.

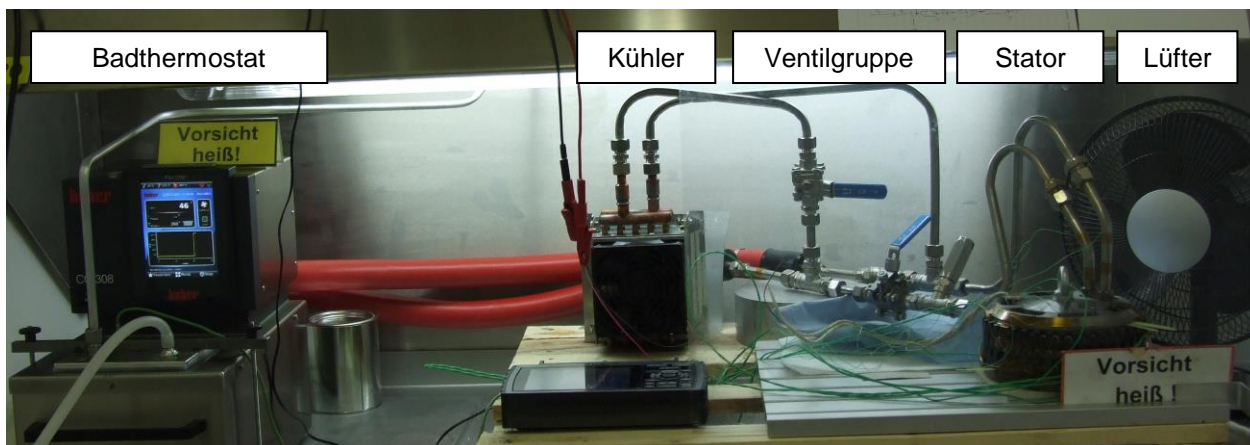


Abbildung 85: Aufbau Fluidlötversuch

Über das Badthermostat wird das Medium erhitzt und über einen Heizkreislauf durch den Stator gepumpt. Dieser wird schrittweise erwärmt, bis die Löttemperatur erreicht ist.

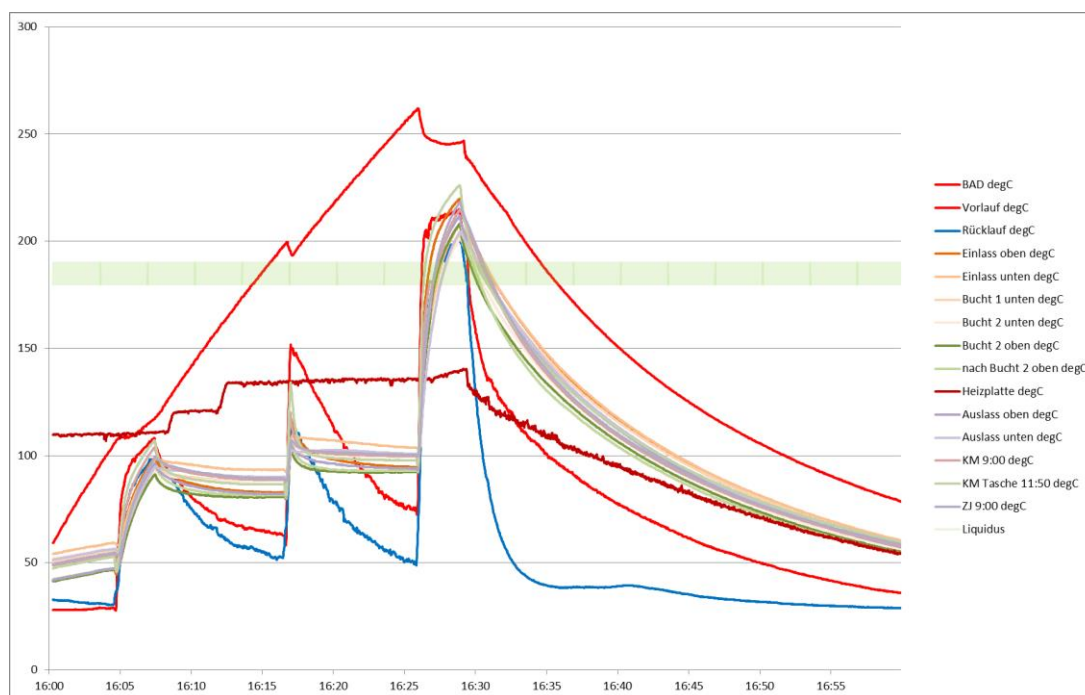


Abbildung 86: Temperaturverlauf Fluidlöten

Nach dem Erreichen der Lötphase wird das Medium über das Ventilsystem in den Kühlkreislauf umgeleitet, dort heruntergekühlt und durch die Zirkulation durch den Statorkühler der Stator abgekühlt.

Um diesen Prozess in der Produktion einzusetzen, ist eine speicherprogrammierbare Steuerung (SPS) zu verwenden und ein entsprechender Ablauf zu programmieren.

Schlußfolgerung:

Der effizienteste Lötprozess für den Statorträger ist das Fluidlöten, bei dem das Temperaturmedium direkt in den Kühler eingebracht wurde, um den Statorträger von innen heraus zu erwärmen, ohne einen unnötigen, materialschädigenden Wärmeeintrag in die Wicklung zu erfordern.

Die notwendigen Schritte zur Implementierung des Fluidlötens wurden im Rahmen der Arbeit von Herrn Bleicher definiert.

5.5 Arbeitspaket 5 – Herstellen von Magnetringen als Kompletttring

5.5.1 Compounds

Zunächst wurden für die Presstechnik geeignete Compounds hergestellt. Im Wesentlichen wurden dabei folgende Punkte berücksichtigt:

- Mögliche Harze
 - Geeignete Additive
 - Anisotrope Magnetpulver unterschiedlicher Hersteller
 - Compoundierverfahren
-
- bevorzugter Einsatz bei radial ausgerichteten Magneten
 - bevorzugter Einsatz bei axial ausgerichteten Magneten

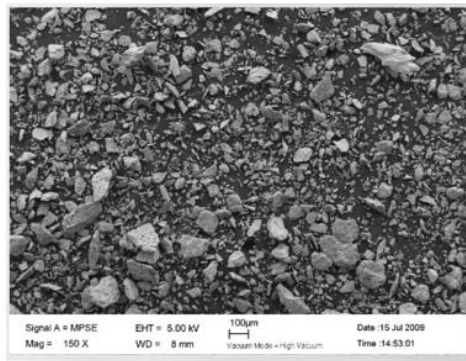
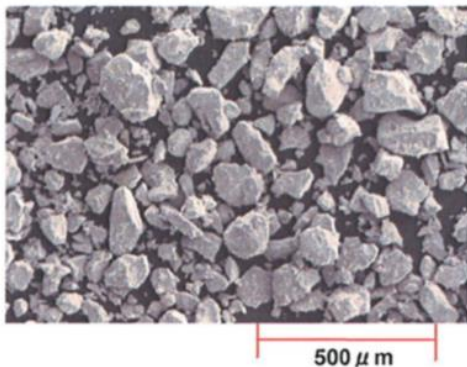


Abbildung 87: Unterschiedliche Compounds von Magnetmaterialien

Zur Qualifizierung der unterschiedlichen Compounds wurden zunächst 2 Versuchswerkzeuge erstellt.

1. Magnetfeldrichtung und Pressrichtung parallel
2. Magnetfeldrichtung senkrecht zur Pressrichtung.

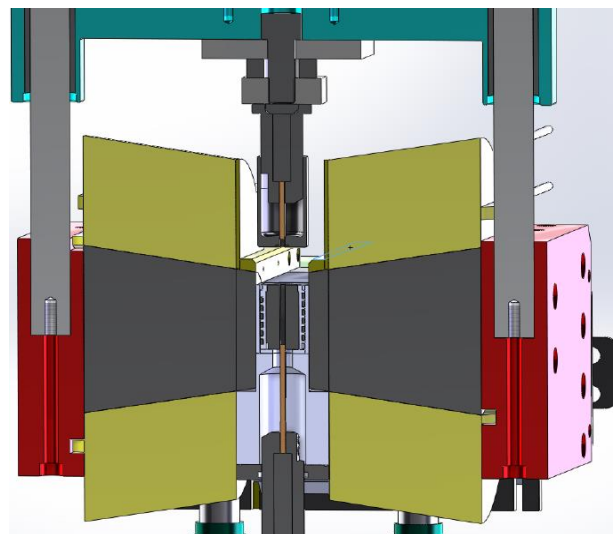
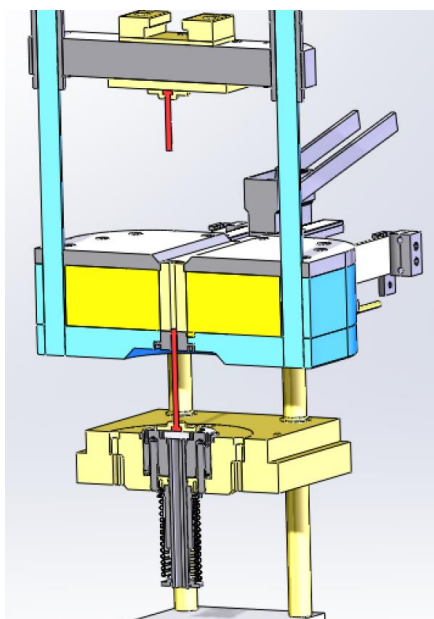


Abbildung 88: Magnetfeldrichtung und Pressrichtung parallel / Magnetfeldrichtung senkrecht zur Pressrichtung

Es waren 2 Versuchswerkzeuge notwendig, da je nach Magnetgeometrie und Magnetisierungsart sich Magnetfeldrichtung und Pressrichtung unterscheiden.

Bei der Ermittlung eines geeigneten Pressverfahrens und der Prozessparameter wurden zwei unterschiedliche Konzepte verfolgt:

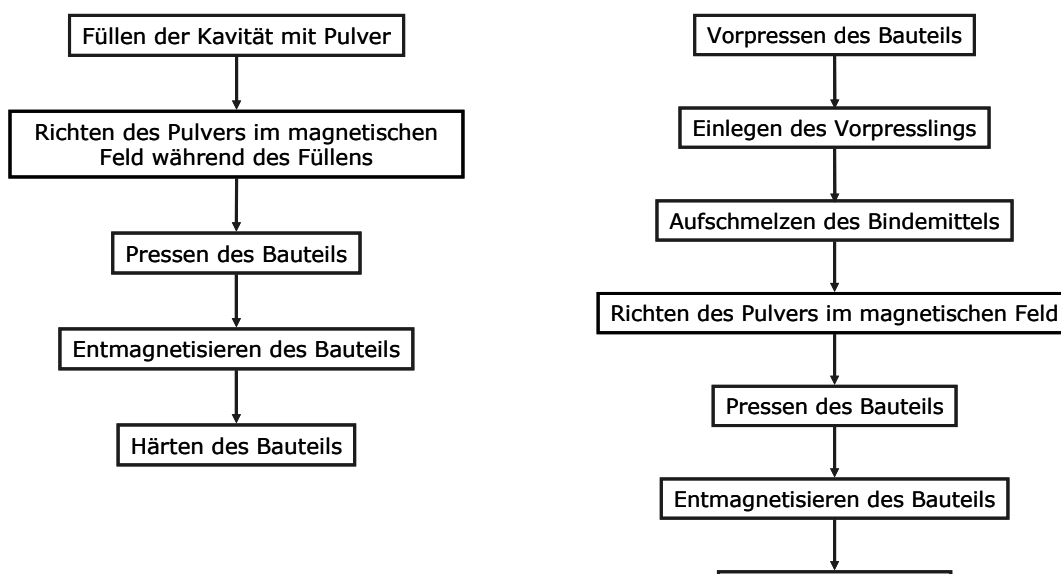


Abbildung 89: Vergleich Einstufiges Pressverfahren / Zweistufiges Pressverfahren

5.5.2 Einstufiges Pressverfahren

Es wurden unterschiedliche Compoundvarianten mit beiden Versuchswerkzeugen untersucht.

Aufgrund der Korngeometrie und der magnetischen Vorzugsrichtung innerhalb des Kornes kann für die Variante „Magnetfeldrichtung quer zur Pressrichtung“ nur das Pulver eines Herstellers verwendet werden, da durch die Pressanisotropie die magnetische Ausrichtung während des Pressprozesses zerstört wird.

Die maximal erreichten magnetischen Werte lagen bei 860mT für „Magnetfeldrichtung und Pressrichtung parallel“ und „Magnetfeldrichtung senkrecht zur Pressrichtung“.

5.5.3 Zweistufiges Pressverfahren

Beim Zweistufigen Pressverfahren werden zunächst Magnete isotrop vorgepresst.

Im zweiten Schritt werden die Vorpresslinge unter Temperatur und Magnetfeld nachverdichtet. Um die Struktur des Vorpresslings aufzubrechen um die Anisotropie zu erzeugen, sind große Felder notwendig. Ebenfalls sollte der Vorpressling eine sehr geringe Dichte aufweisen, was die maschinelle Verarbeitbarkeit erschwerter.

Mit entsprechend hohem werkzeugtechnischem Aufwand wurden ebenfalls magnetische Werte von 860mT erreicht.

Wie beim Einstufigen Pressverfahren kann aufgrund der Korngeometrie und der magnetischen Vorzugsrichtung innerhalb des Kornes für die Variante „Magnetfeldrichtung quer zur Pressrichtung“ nur das Pulver eines Herstellers verwendet werden, da durch die Pressanisotropie die magnetische Ausrichtung während des Pressprozesses zerstört wird.

Da bei den unterschiedlichen Pressverfahren dieselben magnetischen Werte erreicht wurden, der werkzeug- und verfahrenstechnische Aufwand bei dem zweistufigen Pressverfahren jedoch deutlich höher ist, wurden die weiteren Versuche mit dem einstufigen Pressverfahren fortgeführt.

Mit einem weiteren Versuchsaufbau sollte die Machbarkeit einer polarorientierten magnetischen Ausrichtung nachgewiesen werden.

Hierzu wurde ein Werkzeug für einen 4poligen Ringmagneten hergestellt.

Folgende Parameter sollten dabei ermittelt werden:

- Benötigtes magnetisches Richtfeld
- Magnetische Werte in Abhängigkeit zur Pressdichte
- Auswertung der erreichten magnetischen Werte und Vergleich zur FEM Berechnung

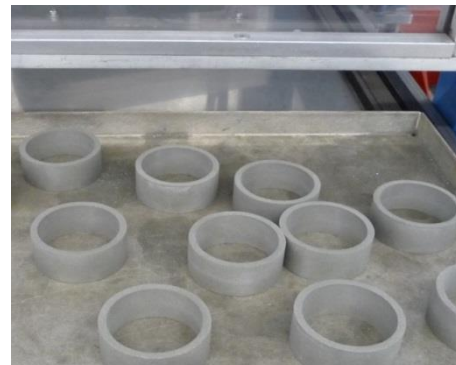
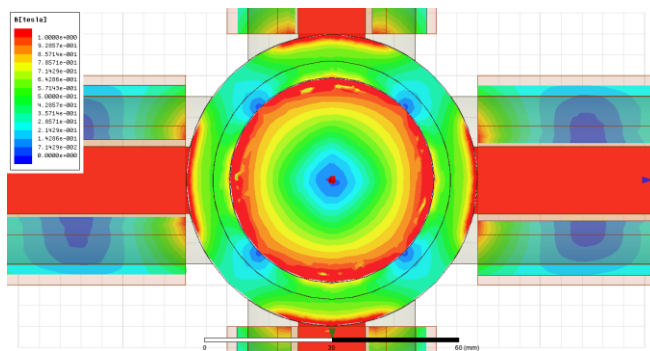
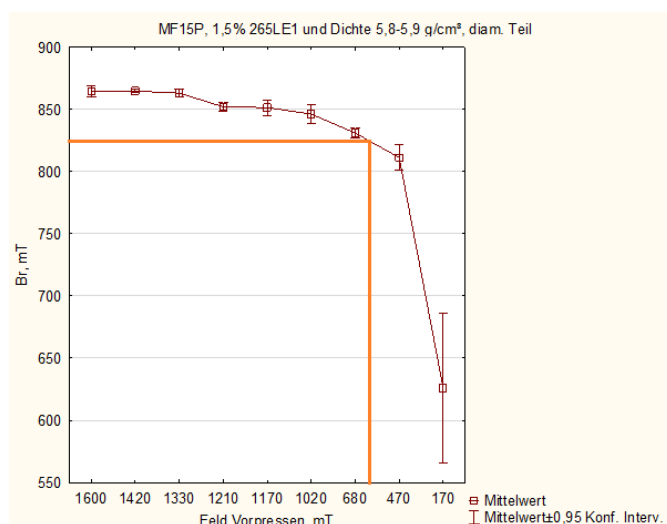


Abbildung 90: Aufbau Werkzeugkonzept mit Darstellung der Magnetfeld / gepresste Magnetrohlinge

Ergebnis:

Ein Magnetfeld von > 600mT muss erzielt werden um eine Remanenz von größer 860mT zu erreichen.



Im nächsten Schritt stand die Auslegung des Werkzeugs für den im Projekt beschriebenen 80poligen Ringmagneten an.

Aus zeitlichen Gründen und der sehr komplexen und teuren Herstellung des Werkzeuges wurde vereinbart, den 80poligen Ringmagneten vorerst als als 4poligen Ringausschnitt (Segment) mit denselben Abmessungen für Außendurchmesser, Innendurchmesser, Magnetdicke und Magnethöhe des Groax Ringes auszuwählen.

Das benötigte Magnetfeld sollte zunächst mittels Elektromagnetsystem erzeugt werden.

Bei der Auslegung des Elektromagnetsystems wurden folgende Punkte berücksichtigt:

- Polabstand
- benötigter Drahtdurchmesser
- Magnetfeld in der Kavität
- Leitertemperatur bei anliegendem Feld
- Impulsdauer

Es musste eine optimale Leitergeometrie konzipiert werden, um zwischen den Polen keinen magnetischen Rückschluss zu erzeugen und dennoch genügend Leiterquerschnittsfläche zu haben, die als Stromaufnahme dient.

Bei den Berechnungen wurde festgestellt, dass der Polabstand nur einen sehr kleinen Drahtquerschnitt zulässt, um genügend Feld in die Kavität zu bekommen.

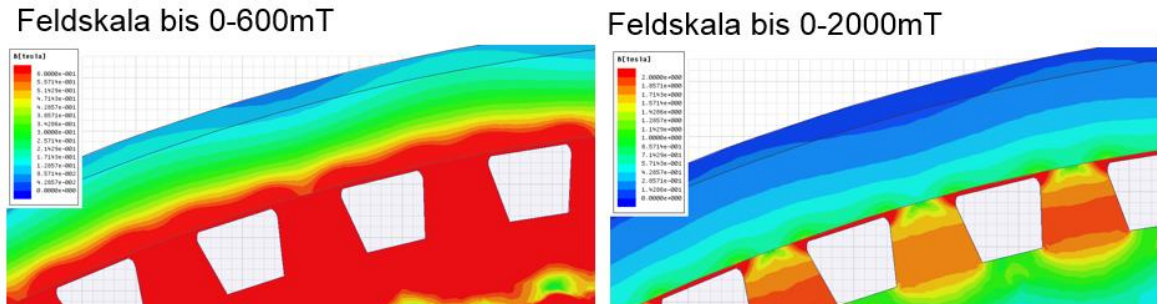


Abbildung 91: Erzeugtes Magnetfeld in Matrizenkavität / Überprüfung der Sättigung zwischen den Polen

Nach Herstellung des Werkzeugs und eines speziellen Gleichrichters wurde mit der Abpressung der Segmente nach Versuchsplan durchgeführt.

Ergebnis:

Durch den sehr geringen Polabstand sind sehr hohe Ströme notwendig (3000A) um das notwendige Feld zu erzeugen. Dies führte zu einem raschen Temperaturanstieg des Kupferleiters. Daher konnte lediglich eine Impulszeit vom Gleichrichter von max. 0,1sek. angelegt werden, um die Isolierung des Kupferleiters nicht zu zerstören.

Das durch ein Elektromagnetsystem erzeugbare Magnetfeld ist für die Ausrichtung des Magnetpulvers im Pressprozess nicht ausreichend lang. Eine Orientierung des Magnetpulvers in die spätere Magnetisierungsrichtung ist nicht möglich. Versuche mit „Impulsstrom“ und geringerem „Haltestrom“ waren ebenfalls nicht erfolgreich.

Daher wurden Überlegungen angestrebt, das Magnetfeld über ein Dauermagnetsystem zu erzeugen, wodurch kein Temperatureintrag über ein Spulenstrom notwendig ist.

Vorteile sind:

- kein Temperatureintrag durch Spulenstrom beim Pressprozess
- Magnetisieren/ Entmagnetisieren in einem Pressvorgang
- Kein Luftspalt zwischen Dauermagnetsystem und Kavität, somit kein Feldverlust

Für den Pressenablauf wurde eine gesonderte Presse mit Hubzylinder benötigt.

Es wurden unterschiedliche Magnetsysteme berechnet, dabei wurden folgenden Parameter variiert.

- Magnetgeometrie und Magnetlänge
- Geometrie und Länge Flussleitstücke
- Material Flussleitstücke

Es wurde ein Werkzeug mit Permanentmagnetsystem hergestellt. Das magnetische Richtfeld lag wie bei den Grundlagenversuchen ermittelt bei 600mT.

Die mit diesem Werkzeug hergestellten Magnete waren sehr inhomogen, was durch eine nicht ausreichende magnetische Ausrichtung während des Pressprozesses verursacht wird.

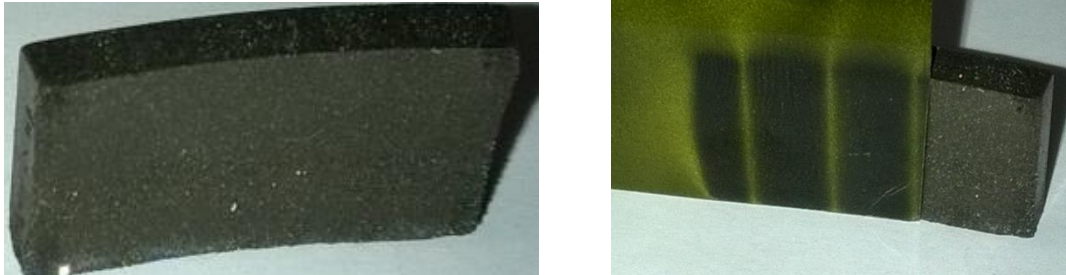


Abbildung 92: Segmentmagnet 4polig am Innendurchmesser magnetisiert

Es wurden alternative Magnetsysteme berechnet bzw. optimiert und ein weiteres Presswerkzeug mit optimiertem Magnetsystem hergestellt.

Dabei wurde folgendes berücksichtigt:

- Erhöhung der Magnetfelder
- das Befüllen des Pulvers muss außerhalb der Matrize bzw. außerhalb des Magnetsystems erfolgen um ein Vorverdichten und entrichten zu vermeiden.

Bei Berichtserstellung lagen hierzu noch keine Ergebnisse vor. Das Projekt wird außerhalb des Förderprojektes weiter geführt.

5.6 Arbeitspaket 6 – Sensorlose Motorregelung

Die umfangreichen Arbeiten beinhalten den kompletten Entwicklungsprozess der sensorlosen Regelung. Angefangen beim Entwurf über die Implementierung bis hin zur Inbetriebnahme am Prüfstand mit Redesignmaßnahmen wurde der komplette Entwicklungsprozess durchlaufen. Die Tätigkeiten wurden in der Planung des Gesamtprojekts im Arbeitspaket 6 „Sensorlose Regelung Axialflussmaschine - SeRAx“ zusammengefasst.

Dieses Arbeitspaket untergliedert sich in vier Teilpakete, welche im folgenden Abschnitt vorgestellt werden.

5.6.1 Teilpaket 6.1:

Stabilitätsnachweis für die sensorlose Regelung im oberen Drehzahlbereich

Nach Literaturrecherche und Einarbeitung in die bereits existierenden EMK-Regelalgorithmen wurde das Grundwellenverhalten der Regelstrecke analysiert und deren erweiterten relevanten Eigenschaften wissenschaftlich dokumentiert. Trotz der Besonderheiten im Magnetkreis konnte gezeigt werden, dass sich die Maschine DYNAX mit einem analytischen Modell beschreiben lässt, das dem einer Synchronmaschine [2] sehr ähnlich ist.

$$\begin{aligned}
 u_d &= R_{dd} I_d + R_{dq} I_q + L_{dd} \frac{dI_d}{dt} + L_{dq} \frac{dI_q}{dt} - \omega (L_{qd} I_d + L_{qq} I_q) + \frac{\Psi_{d,f}}{dt} - \omega \Psi_{q,f} \\
 u_q &= R_{qd} I_d + R_{qq} I_q + L_{qd} \frac{dI_d}{dt} + L_{qq} \frac{dI_q}{dt} - \omega (L_{dd} I_d + L_{dq} I_q) + \frac{\Psi_{q,f}}{dt} + \omega \Psi_{d,f}
 \end{aligned}$$

Die asymmetrischen Eigenschaften der Maschine DYNAX lassen sich in winkelabhängigen Funktionen für die Widerstandsparameter R und Induktivitätsparameter L ausdrücken. Das Grundwellenverhalten ist somit ähnlich dem konventioneller Synchronmaschinen, so dass sich bekannte EMK-basierte sensorlose Regelverfahren anwenden lassen. Zur Erfassung produktionsbedingter Parameterabweichungen wurde der, bereits zu Projektbeginn vorliegende, EMK-Algorithmus an mehreren Maschinen getestet.

Die Regelergebnisse waren stets exakt, so dass eine sensorlose Winkelschätzung auf Basis der EMK-Berechnung als robust anzusehen ist. Die Führung eines Stabilitätsnachweises im engeren Sinne war aufgrund der Komplexität der Regelstrecke und der Vielzahl an Parametern nicht möglich. Die Ausarbeitung eines Verfahrens zur vollautomatischen Kalibrierung des EMK-Algorithmus wurde zurückgestellt um nach Festlegung der finalen Reglerstruktur ein schlüssiges Konzept mit den Algorithmen für den unteren Drehzahlbereich zu finden.

5.6.2 Teilpaket 6.2:

Untersuchung eines Konzeptes für die sensorlose Regelung im unteren Drehzahlbereich

Die Lösung der Kernaufgabe wurde mit einer Grundlagenuntersuchung an der Maschine bezüglich Anisotropien im Magnetkreis begonnen. Die rotorfeste Anisotropie (siehe Abbildung 93), durch lokale Sättigungseffekte im Stator, muss von der sensorlosen Regelung erfasst werden und ist deshalb von besonderem Interesse.

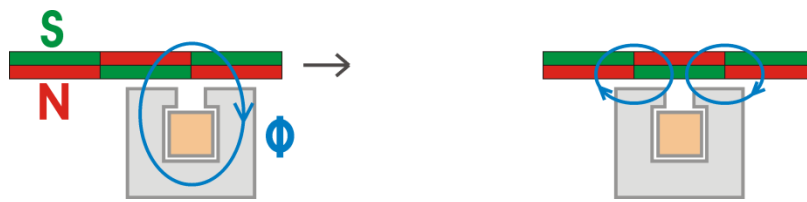


Abbildung 93: Magnetischer Fluss im Stator in Abhängigkeit der Rotorposition in schematischer Darstellung, links d-Ausrichtung: geringere Induktivität, rechts q-Ausrichtung: höhere Induktivität

Eine weitere, jedoch statorfeste, Anisotropie (siehe Abbildung 94) entsteht durch die asymmetrische Kopplung der Streufelder zwischen den Phasenscheiben und konnte in Messungen bestätigt werden.



Abbildung 94: Statorfeste Anisotropie durch asymmetrische Streufelder in schematischer Darstellung

Zur Abdeckung dieser und weiterer gefundener Zusammenhänge musste ein neues Maschinenmodell [6] erstellt werden, das die Modellierungstiefe des vorhandenen Modells bei weitem übertrifft. Abgebildet wird u.a. die nichtlineare Charakteristik des Statormaterials inkl. Hystereseverhalten von SMC, die Auswirkung von Wirbelströmen, die Stromverdrängung in den Wicklungen sowie die magnetische Kopplung der Phasen durch Streufelder. Die Verifizierung des Modells erfolgte anhand von im Labor ermittelten Messdaten.

Mit den Kenntnissen über das Zusammenspiel von Störeinflüssen und Nutzeffekten wurde ein Algorithmus basierend auf einem Luenberger-Beobachter [7][8] zur sensorlosen Schätzung der Rotorlage entworfen. Der neue Algorithmus konnte in der Simulationsumgebung des Maschinenmodells erfolgreich getestet werden. Als passender Stromregler wurde ein prädiktives Hystereseverfahren [7][9] ausgewählt, das von den Beobachterdaten profitiert und bei geringem Aufwand hochdynamische Ergebnisse sicherstellt.

Abschließend wurde eine Prozedur zur vollautomatischen Beobachterkalibrierung, woraus sich die Kalibrierung der anisotropie- und EMK-basierten Winkelalgorithmen ableitet, entworfen und in Simulationen verifiziert.

5.6.3 Teilpaket 6.3:

Implementierung der sensorlosen Regelung für den vollständigen Drehzahlbereich

Die ausgewählten Winkelbestimmungsverfahren zur Abdeckung des vollen Betriebskennfeldes wurden zusammen mit dem prädiktiven Hysterese-Stromregler in ein Modell (siehe Abbildung 95) implementiert, aus welchem sich mit entsprechender Software echtzeitfähiger Code für den Controller des Wechselrichters erzeugen lässt. Mit der Trennung von modellbasierter Funktionsbeschreibung und Implementierung geht zusätzliche Flexibilität einher. So können aus dem erstellten Modell verschiedene Implementierungen mit jeweils spezifischen Anforderungen an Zertifizierung und Normerfüllung abgeleitet werden.

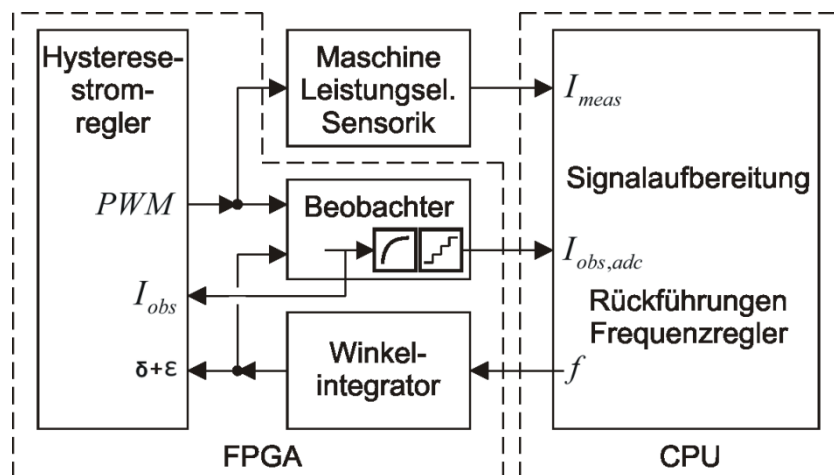


Abbildung 95: Beobachterstruktur der sensorlosen Regelung des Rotorwinkels δ mit Winkelfehler ϵ basierend auf gemessenen Strömen I_{meas} und beobachteten Strömen $I_{obs,adc}$

Zur Erhöhung der Serientauglichkeit und Robustheit gegenüber Herstellungstoleranzen und Alterungseffekten wurden zusätzlich adaptive Regelschleifen für ausgewählte Kalibrierdaten implementiert.

5.6.4 Teilpaket 6.4: Test und Optimierung am Prüfstand

Unter Einbeziehung der Anforderungen aktueller Anwendungen der Maschine DYNAX wurden Prüfkriterien erarbeitet. Diese umfassen neben vorgegebenen Drehzahl- und Drehmomentbereichen u.a. auch Kenngrößen zu Regeldynamik und Effizienz. Als Referenz für sämtliche Kriterien gelten stets die erreichbaren Ergebnisse mit der, zu Projektbeginn vorhandenen, sensorgeführten Vektorregelung.

Zur Steigerung des Praxisbezugs der Ergebnisse wurden, zusätzlich zu den ursprünglich vorgesehenen einzelnen Trajektorien, komplette Fahrzyklen geprüft. Ein Fahrzeugmodell berechnet aus den Drehzahlprofilen der Fahrzyklen die entsprechenden Soll-Drehmomentverläufe. Anhand ihrer Relevanz wurden folgende Fahrprofile zur Vermessung am Prüfstand ausgewählt:

- WLTP: Worldwide Harmonized Light Vehicle Test Procedure
- NEFZ: New European Driving Cycle
- FTP72: Federal Test Procedure (USA)
- 1015-Mode: Emission and Fuel economy Test Procedure (Japan)

Speziell im WLTP-Zyklus wird ein breites Feld von Arbeitspunkten angefahren. Mehrere Beschleunigungs- und Bremsvorgänge erfolgen bei kleinen Drehzahlen nahe Stillstand und fordern insbesondere die Umschaltstrategie zwischen den implementierten Winkelalgorithmen.

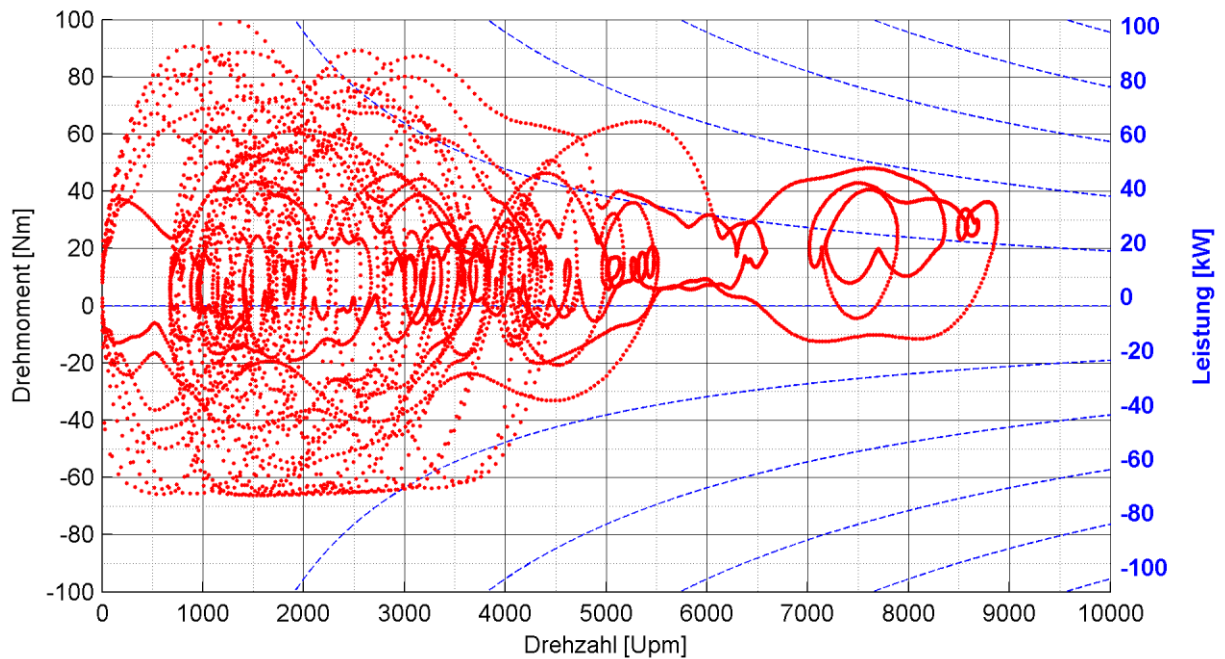


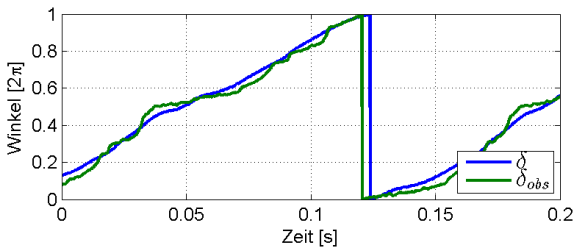
Abbildung 96: Soll-Trajektorien im WLTP-Fahrzyklus

5.7 Erzieltes Ergebnis

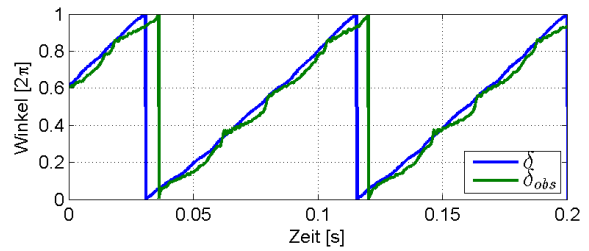
Mit der neuen sensorlosen Regelung lässt sich die Maschine DYNAX im kompletten Betriebskennfeld betreiben. Dies umfasst sowohl den motorischen als auch den generatorischen Betrieb von Stillstand bis Maximalgeschwindigkeit. Dies konnte am Prüfstand eindrucksvoll mit dem einwandfreien Abfahren des WLTP-Fahrzyklus aus Abbildung 96 gezeigt werden.

Zur Beurteilung der Leistungsfähigkeit der sensorlosen Regelung sind insbesondere die Arbeitspunkte nahe am und im Stillstand sowie kurz nach der Umschaltung in die EMK-Berechnung bei ca. 1000 Upm von Interesse. Die Verläufe des sensorlos geschätzten Winkels δ_{obs} und des gemessenen Referenzwinkels δ dieser Arbeitspunkte sind in Abbildung 97 dargestellt.

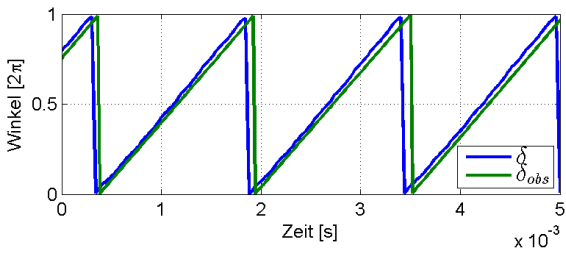
12 Upm, 0 Nm:



17 Upm, 80 Nm:



1000 Upm, 0 Nm:



1000 Upm, 80 Nm:

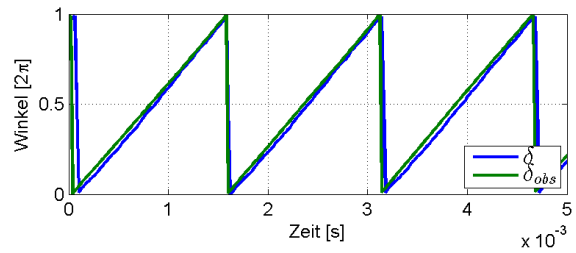


Abbildung 97: Gemessener Referenzwinkel δ und geschätzter Rotorwinkel δ_{obs} in verschiedenen Arbeitspunkten

Bei niedrigen Drehzahlen wird der Rotorwinkel aus den Anisotropien im Magnetkreis gewonnen. Der geschätzte Winkel verläuft unruhiger als der gemessene. Die Abweichungen sind jedoch gering und das Verfahren arbeitet absolut stabil. Dennoch stellt dies einen Ansatzpunkt für weitere Untersuchungen dar. An der unteren Grenze des Drehzahlbereichs zum Einsatz der EMK-Berechnung bei 1000 Upm befindet sich deren kritischster Arbeitspunkt, da hier die Amplitude der auszuwertenden Spannung gering ist. Trotzdem sind in Abbildung 97 ruhige Winkelverläufe mit insbesondere unter Vollast sehr kleinen Winkelfehlern zu sehen. Der Algorithmus arbeitet stabil und äußerst zufriedenstellend.

Das stationäre Drehmoment-Drehzahl Betriebskennfeld ist in Abbildung 98 zu sehen. Zur Messdatenaufnahme wurde ein Stufen-Fahrprofil mit Drehmomentvorgaben im 10 Nm Raster verwendet.

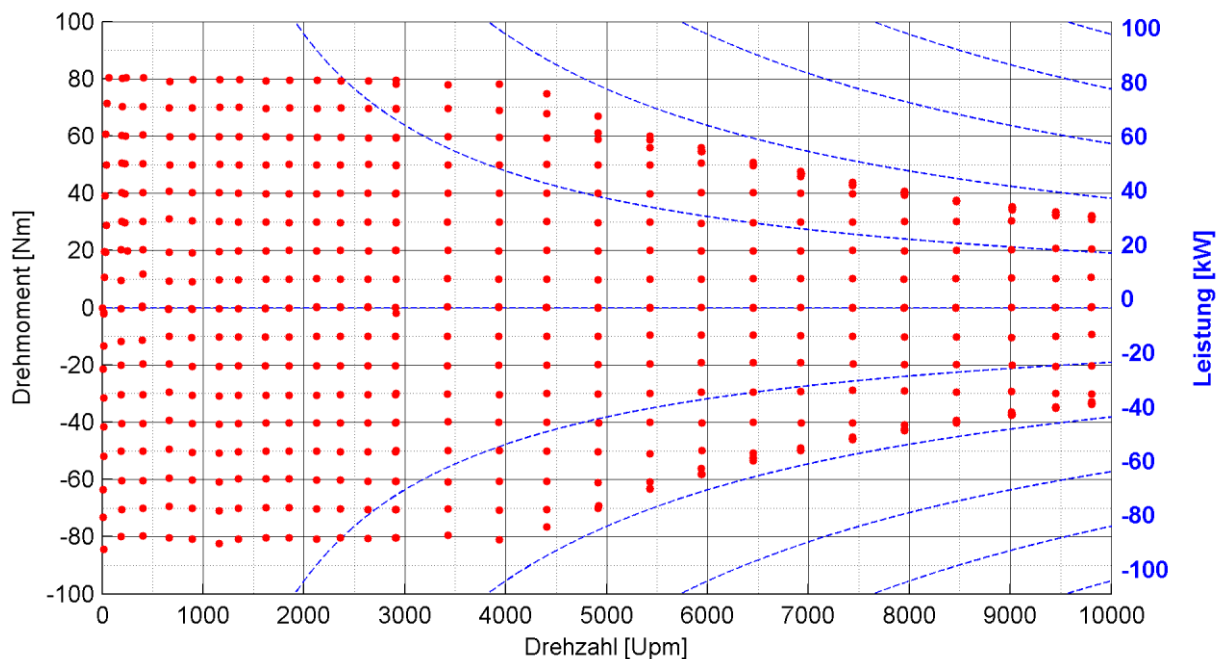


Abbildung 98: Stationäres Kennfeld, Messwerte bei konstanter Motortemperatur

Bis zum Erreichen der Aussteuergrenze kann die Drehmomentvorgabe eingehalten werden. Im Feldschwächbereich folgen die gemessenen Drehmomente der durch die Zwischenkreisspannung limitierten Leistungshyperbel.

Der Einfluss der ansteigenden Rotortemperatur, mit Schwächung der Permanentmagneten, kann auf Basis der EMK-Berechnung kompensiert werden. Im Drehzahlbereich des anisotropiebasierten Verfahrens ist dies nicht möglich. Daraus folgt bei längeren Fahrzyklen ein reduziertes Drehmoment in Bereichen niedriger Drehzahl. Eine Temperaturkompensation auf Basis der Statorinduktivitäten ist ein vielversprechender Lösungsansatz und bietet sich als Ansatzpunkt für weiterführende wissenschaftliche Arbeiten an.

Weiteres Optimierungspotential verbirgt sich in der Minimierung der Geräuscentwicklung durch das Anregungssignal zur Anisotropieauswertung. Eine Weiterentwicklung könnte höhere Frequenzen und/oder kleinere Signalamplituden ermöglichen und dadurch zusätzliche Anwendungen erschließen.

Zusammenfassend kann von vollem Projekterfolg gesprochen werden. Die neu entwickelte sensorlose Regelung ist auf einem Stand, mit dem sie an ersten praktischen Anwendungen getestet werden kann. Diesbezügliche Ziele werden vom Projektinitiator Compact Dynamics verfolgt.

5.8 Arbeitspaket 7 – Produktionsplanung

Für die Produktionsplanung wurden die Fertigungsschritte analysiert und eine Produktionsstrategie erarbeitet. In Zusammenarbeit mit der Firma FIV wurde eine Analyse der Produktionsstrukturen aller Projektpartner durchgeführt.

Die entscheidenden Eingangsgrößen für das angestrebte Produktionskonzept waren anfänglich festzulegen. Sie dienen als grundlegende Prämissen, um die Optimierungen und auch Fortschreibungen kontrolliert vornehmen zu können.

Zu klären waren Aussagen wie z.B.

- Produktionsprogramm: Einzelprodukt vs. Produktfamilie (Variantenproduktion oder Kundenlinien) - betrifft zu berücksichtigende Flexibilitätsanforderungen an die Produktion.
- Output/Kapazität.: Die Kapazitätseckwerte in Stck/Jahr sind die Basis für die Berechnung anderer Kennzahlen, wie z.B. für Ressourcen, Material, Flächen und Layoutplanung, Transportverpackungen.
- Wertschöpfungstiefe: einstufiges/mehrstufiges Produktionskonzept gibt Anhaltspunkte über die Flächen, Invest- und Personalbedarfe.
- Betriebsmittel/Invest: Inwieweit können die derzeit in der Entwicklung befindlichen Herstellverfahren und –technologien hinsichtlich ihrer technischen Kennwerte als gegeben vorausgesetzt werden? Der technische Fortschritt – obwohl noch nicht erreicht – muss berücksichtigt werden.
- Produktentwicklung: Ebenso sind verschiedene Produktverbesserungen auf Baugruppenebene in Arbeit, die die Wertschöpfungsstruktur stark beeinflussen werden, z.B. Substitution eigengefertigter Teile (Arbeitsplan) durch fremdgefertigte Teile (Stückliste).
- Standort: „Grüne Wiese-Ansatz“ an konkretem Standort oder typische Referenzanlage, die entsprechende Prämissen explizit darstellt und spezifische Modifikationen erlaubt.
- Anlaufelastizität: Die Aufgabe besteht darin, für ein konkret bekanntes Produkt die Produktion und Logistik-Konzept zu entwickeln. Da die Marktresonanz und damit die Bedarfsentwicklung unsicher sind, muss die Ausgestaltung auf verschiedene ramp up-Kurven ausgelegt werden können

5.8.1 Ergebnis:

Die Eckdaten wurden zusammengestellt, um als Grundlage der Planung für die weiteren Schritte zu dienen. Sie bringen eine erste Orientierung hinsichtlich Funktionsweise, technischer Anforderungen, Investments in Anlagen, Personal und Gebäude. Zugleich stellt sie einen Suchraum für Fragen und zu bearbeitende offene Punkte dar.

Für die Fertigung des DYNAX® wurde eine Analyse der derzeitigen Fertigungsschritte vorgenommen und eine Fertigungsstrategie auf Basis von Stückzahlenszenarien erarbeitet.

In den nachfolgenden Abbildungen sind die einzelnen Innovationsstufen der Fertigungsprozesse dargestellt, das Ergebnis der Untersuchung für eine sinnvolle Produktionssystem-Struktur gezeigt und eine Produktionsstätte entworfen.

Innovationsstufen DYNAX® MGI 25-48							
Stückzahlenszenario 4.0 15001 - 50000 Einheiten / Jahr							
Hauptbaugruppe	Baugruppe	Zeichnungsnummer / Version	Arbeitsschritte	Hersteller	Arbeitsplatz	Abbildung	Dokumente
Rotor	Glocke		Fertigung Magnetringbeistellung	AT CD			
	Magnetring		Fertigung	extern			
Stator	Statorträger		Fertigung Drückteile	extern			
			Fertigung Turbulatorbleche	extern			
			Beschaffung Kleinteile	extern			
			Vorfrierung der Bauteile	extern			
			Laserschweißen	extern			
			Bepastung	extern			
			Montage Einzelteile	extern			
		Löten	extern				
		Dichtprüfung	extern				
		ggf. Dichtschweißen	extern				
	Dichtprüfung	extern					
	mechanische Endbearbeitung (Drehen / Bohren / Fräsen)	extern					
	Statorringe		Fertigung Bürsten Schlitzen	PMG CD CD			
	Statorwicklung		Ablängen Abisolieren Vorformen Verdichten Konfektionieren (Löten) Prüfen	extern extern extern extern extern CD			
	Verbindung Statorringe - Statorträge		Vormontage Pollegesensor Verkleben Statorringe / Wicklung auf Statorträger Prüfung Isolationswiderstand	extern CD CD			
	Verguss			CD			
	Endmontage Stator			CD			
Elektronik	Controller Module Zwischenkreis Hauptplatine Steckerplatine Strommessplatine			extern			
	Kontaktierung			CD			
	Komponentenmontage			CD			
	Rotorgehäuse			CD			
	Adaptergehäuse			CD			
Endmontage	Zusammenbau Motor			CD			
	Prüfung			CD			
	Software			CD			
					CD		

Abbildung 99: Innovationsstufe Fertigungsprozesse

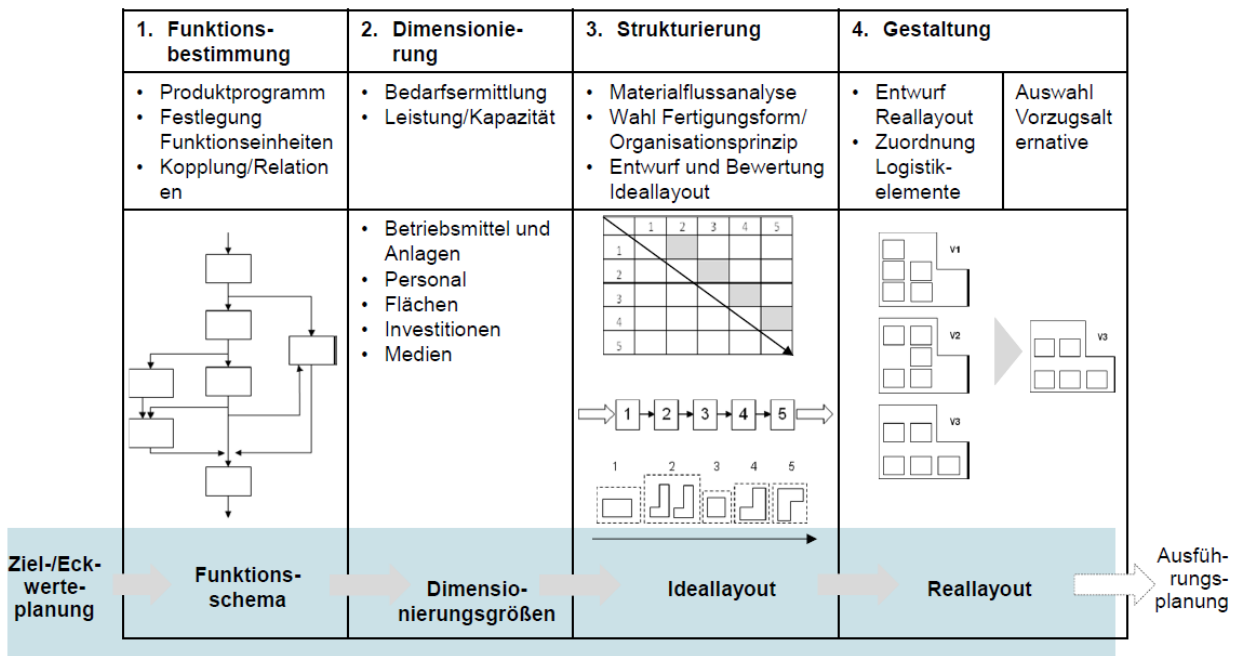


Abbildung 100: Produktionssystem - Struktur

6 Nutzen für das Unternehmen, insbesondere Verwertbarkeit des Ergebnisses

6.1 Compact Dynamics GmbH

Die Anschlussfähigkeit besteht in erster Linie in Applikationsentwicklungen für das DYNAX® System.

So soll eine Produktfamilie auch Leistungsklassen über und unter dem im Rahmen des Förderprojektes industrialisierten Axialflussmotors abdecken, um speziell im Automotive-Bereich die zukünftig vielfältigen Anwendungsbereiche bedienen zu können.

Der untere Leistungsbereich soll bei 10 kW liegen. Mit dieser Leistungsklasse können z.B. Zweiräder der Führerscheinklasse A1 ausgerüstet werden. Auch Bootsantriebe und Industrielüfter arbeiten mit dieser Leistung.

Der obere Leistungsbereich von 50 – 150 kW kann voraussichtlich nur mit höheren Spannungen realisiert werden. Grundsätzlich kann das DYNAX® System, durch Ändern der Windungszahl, einfach an ein anderes Spannungsniveau angepasst werden.

Durch die Skalierung des Durchmessers und / oder der Länge kann das DYNAX®-System relativ einfach an andere Leistungsanforderungen adaptiert werden.

Ein großes Potential liegt in der Integration eines zusätzlichen Untersetzungsgetriebes. Durch das Außenläufer-Konzept kann innerhalb des Statorinnendurchmessers ein Planetengetriebe integriert werden. Somit ist es möglich, ohne zusätzlichen Bauraum ein sehr hohes Drehmoment abzugeben. Damit wäre eine äußerst kompakte Antriebseinheit für vielfältige Antriebs- und Stellaufgaben verfügbar. Besonders große Marktchancen werden bei einer Integration des Motors in ein Differenzialgetriebe erwartet. Die Baugruppe, bestehend aus E-Motor mit Elektronik und Getriebe, bildet eine komplette Antriebseinheit die mit minimalem Aufwand in ein Fahrzeugchassis montiert werden kann. Diese Einheit soll als Plattform für Standardantriebe dienen und primär Startup-Unternehmen und Nischenanwendungen bedienen. In Zusammenarbeit mit OEMs und Tier1 besteht derzeit ein großes Potenzial, komplette Achslösungen für Hybridfunktionen auszustatten.

Diese Weiterentwicklungen werden nach Abschluss des Projektes umgesetzt. Hierdurch bietet sich für alle Projektpartner ein sehr positives und lang angelegtes Geschäftsmodell in dem stark wachsenden Markt der elektrischen Antriebe.

Unabhängig von der Vermarktung des DYNAX® Systems, können die im Rahmen des Förderprojektes entwickelten Fertigungsprozesse und Technologien für andere Motorentypen übertragen und weiterentwickelt werden. So ist es den Industriepartnern möglich, aufgrund des erarbeiteten Know-how neue Absatzmärkte, vorwiegend im Automobilbereich, zu erschließen und auszubauen.

Zusätzlich zu den internen Entwicklungsprojekten der Industriepartner können wissenschaftliche Folgeprojekte den weiteren Einsatz dieser Technologien verstärken und weitere Bereiche über Transferierung von Erkenntnissen erschließen. Die Demonstration einer geschlossenen Entwicklungskette bis zum fertigen Demonstrator bietet hierbei auch hervorragende Möglichkeiten zur Erschließung neuer Anwendungen. Basierend auf den erreichten Ergebnissen werden z.B. seitens des Projektteams am IVW weitere Forschungsbedarfe identifiziert. Dies erfolgt gegen Ende bzw. nach Abschluss des Projektes. Im nächsten Schritt erfolgt die Analyse dieser Bedarfe, Machbarkeitsabschätzungen sowie die Organisation entsprechender Kompetenzen zur Lösung der dann anstehenden Fragestellungen über weitere

Verbundprojekte bzw. bilaterale Zusammenarbeit. Hiermit wird eine langfristige Weiterentwicklung in den relevanten Themengebieten gewährleistet.

6.2 CirComp GmbH

Das Unternehmen CirComp sieht den Nutzen dieses Forschungsprojektes maßgeblich in einem Zugewinn an Know-how.

Hier ist insbesondere das Wickeln vollumwickelter Körper (Behälter); das Tränken von Glasfasern; sowie das Implementieren von extern mit dem Software-Tool CADWIND erstellten CNC-Wickelprogrammen.

Die Umsetzung von Entwicklungsergebnissen in eine Serienfertigung ist bis Ende 2015 geplant.

6.3 Institut für Verbundwerkstoffe

Als nicht gewinnorientiertes Forschungsinstitut wird keine kommerzielle Verwertung angestrebt. Wissenschaftlich sind insbesondere die Arbeiten zu den Gewinden im dickwandigen GFK interessant und werden im Rahmen eines Dissertationsvorhabens weiter untersucht. Auch an der Verarbeitung von PU im Wickelverfahren wird weiter geforscht, da die im Vorhaben gewonnenen Erkenntnisse auf ein großes Potential schließen lassen.

6.4 MS Schramberg GmbH & Co. KG

Durch die höheren Leistungsdichten dieser neuen Materialien, in Verbindung mit den wirtschaftlicheren Fertigungsmöglichkeiten bei der Fertigung (Spritzgusstechnik, Presstechnik, Automatisierbarkeit) erschließen sich grundsätzlich neue Märkte. Weiterhin wird es eine Verlagerung von gesinterten

Magneten zu kunststoffgebunden Magneten geben. Dabei wird die Wettbewerbssituation wegen der bei diesen Produkten besser automatisierbaren Fertigung gegenüber China deutlich erhöht.

Bei erfolgreichem Projektabschluss können die Ergebnisse weitgehend auf anderer Magnetgeometrien und Magnetabmessungen übertragen werden. Der Einsatz ist neben den weiter oben bereits erwähnten Einsatzmöglichkeiten in kleineren und mittleren Antrieben auch in anderen Branchen z.B. in der Sensortechnik denkbar.

6.5 TU Chemnitz

Der Machbarkeitsnachweis des Umspritzens einer ebenen Statorgeometrie mit eingelegten Litzen im automatisierbaren Spritzgussprozess wurde dargestellt. Durch Rationalisierung der Isolation und somit Infiltration der einzelnen Kupferlitzen könnte gleichzeitig ein besserer Wirkungsgrad durch Verringerung der Verlustleistung generiert werden.

Somit steht Compact Dynamics im Falle einer Nachfragesteigerung eine Fertigungstechnologie zur Verfügung, mit welcher Großserienstückzahlen gefertigt werden könnten. Durch das aufgezeigte Reduktionspotenzial insbesondere hinsichtlich verwendeter Zykluszeiten beim Härten und Gelieren der Vergussmassen besteht für Compact Dynamics die Möglichkeit die Prozesszeit des derzeitigen Vergussprozesses zu reduzieren und eine wirtschaftlichere Fertigung zu generieren.

Die Professur Kunststoffe der Technischen Universität konnte im Laufe des Projektes einen hohen Wissensstand zur Materialcharakteristik, Verarbeitung und Anwendung erlangen. Diese Wissensbasis bildet die

Grundlage der Arbeitsgruppe Duroplaste der Professur Kunststoffe als Forschungs- und Entwicklungspartner für die Industrie in zukünftigen Projekten.

Durch den Know-how-Gewinn und den projektbezogenen Kontakt mit duroplastverarbeitenden Unternehmen konnte eine Basis zur Zusammenarbeit in weiteren FuE-Projekten geschaffen werden. Diese Projekte befinden sich derzeit in der Beantragungs-, Entwicklungs- oder Konzeptphase und ermöglichen der Professur Kunststoffe die weitere Fortführung der Forschungsthematik duroplastischer Formmassen.

Des Weiteren können über die Ausstellung des Demonstrators zur prinzipiellen Machbarkeit der spritzgusstechnischen Umspritzung, u.a. auf Messen neue Kontakte zu Industriepartnern und Forschungsinstituten geschlossen werden, aus welchem wiederum neue Projekte entstehen können.

Durch die Entwicklung einer Methodik zur Ermittlung rheologischer Materialdaten an niederviskosen härtenden Systemen mit dem Rotationsrheometer in Zusammenarbeit mit TA Instruments konnte eine neue Messgeometrie im hauseigenen Analyselabor integriert und somit die Voraussetzung zur Bestimmung kinetischer Daten in Abhängigkeit von Temperatur und Scherung geschaffen werden.

Des weiteren konnten wie beschrieben einzelne Punkte und Erkenntnisse in die Lehre übernommen werden.

7 Zusammenarbeit mit anderen Stellen oder außerhalb des Verbundprojektes (Schulung, Beratung, Erfahrungsaustausch u. a.)

7.1 Konsortium

In Zusammenarbeit mit dem BMBF und dem Projektträger Karlsruhe kamen alle Förderprojekte der Bekanntmachung zu einem Koordinatorentreffen am 19.06.2013 in Karlsruhe zusammen, um sich über die Förderprojekte auszutauschen.

Ansonsten gab es keine Zusammenarbeit mit weiteren Stellen, die über die Wahrnehmung der im Projekt geplanten Abstimmungen hinausging.

7.2 Compact Dynamics GmbH

Im Zuge der Akquisitionstätigkeiten wurden die Aktivitäten im Umfeld von GroAx vorgestellt und stießen im Automotive Umfeld auf reges Interesse.

7.3 Institut für Verbundwerkstoffe

Es wurde am Workshop „Zukünftige Forschungsfelder Produktion E-Motor“ des VDMA am 12.09.2014 teilgenommen.

7.4 TU Chemnitz

Im Rahmen des Projektes gab es eine Vielzahl an Kooperationen und des Erfahrungsaustausches mit anderen Unternehmen und Instituten.

Eine besonders tiefgründige Diskussion und Zusammenarbeit gab es mit der Raschig GmbH, welche die rieselfähigen duroplastischen Harze zur Verfügung gestellt hat. Des Weiteren ist die Zusammenarbeit mit dem Hersteller des Rotationsrheometers (TA Instruments) hervorzuheben, mit welchem die neue, nicht kommerziell erhältliche, Messgeometrie für härtende niederviskose Vergussmassen und Formmassen erstellt wurde. Mit TA Instruments gab es zudem immer einen Erfahrungsaustausch hinsichtlich Geräteparameter, Messverfahren und Ergebnisinterpretation. Somit konnte das werkstoffanalytische Verständnis hinreichende vertieft werden.

Hinsichtlich der Werkzeugkonstruktion für die Übertragung der Statorgeometrie auf eine ebene Versuchsplatte gab es eine sehr enge Zusammenarbeit und mehrere Telefonkonferenzen mit der Firma Oechsler (Werkzeugbau). Hierbei wurden insbesondere Werkzeugtrennkonzepete und Entformungskonzepete diskutiert.

Hinsichtlich der Simulation des Fließverhaltens gab es eine Zusammenarbeit mit der Firma MoldEx-3D, wobei insbesondere die Erstellung von Materialdaten und die Modelle zum Fließverhalten diskutiert und kritisch hinterfragt wurden. Zusammengefasst ist derzeit keine zuverlässige Simulation des Fließverhaltens einer duroplastischen Formmasse aus Sicht der Technischen Universität Chemnitz möglich. Der Erkenntnisstand hierzu soll u.a. in neuen Forschungsvorhaben erweitert werden.

Abschließend sind diverse Diskussionen auf der 8. Internationalen Duroplasttagung zu nennen. In diesem Rahmen wurden mit mehreren Herstellern, Verarbeitern und Simulationssoftwareherstellern die Herausforderungen der seriellen Fertigung diskutiert.

8 Darstellung des während des Vorhabens bekannt gewordenen Fortschritts auf diesem Gebiet bei anderen Stellen

Während der Durchführung des Projekts ist kein Fortschritt auf dem Vorhabensgebiet bei anderen Stellen bekannt geworden. Weder in einschlägigen Fachzeitschriften bzw. auf Fachtagungen, noch im Bereich der Schutzrechtsanmeldungen wurden für das Vorhaben relevante bzw. sich mit dem Vorhaben überschneidende Themen veröffentlicht.

9 Veröffentlichungen, Vorträge, Referate, etc.

9.1 Compact Dynamics GmbH

Veröffentlichungen:

- Interview der Effizienzfabrik des VDMA zum Förderprojekt GroAx
- Bachelorarbeit Michael Bleicher

Vorträge

- Vortrag EDPC 2014

9.2 CirComp GmbH

- IVW Jahresbericht 2012 ; Seite 76-77
- IVW Jahresbericht 2013 ; Seite 68-69
- IVW Jahresbericht 2014 ; Seite 66-67

9.3 Institut für Verbundwerkstoffe

- Wissenschaftlicher Vortrag bei der „European Conference of Composite Materials ECCM16“ in Sevilla, Spanien am 23.06.2014.
- Wissenschaftliches Poster beim IVW-Kolloquium am 11. & 12.06.2015
- Diverse Vorträge beim Internen IVW-Kolloquium

9.4 TU Chemnitz

Es wurden mit den beschriebenen Ergebnissen keine eigenständigen Veröffentlichungen, Vorträge oder Referate durchgeführt.

Die Ergebnisse zu den Untersuchungen des Vakuumvergussprozesses wurden im Rahmen einer Bachelorarbeit durchgeführt, welche an der Technischen Universität Chemnitz einsehbar ist.

Einzelne Erkenntnisse insbesondere zu thermomechanischem Werkstoffverhalten und zur Simulation des Fließverhaltens wurden auf einzelnen Vortragsfolien und im Rahmen der Lehre verwendet.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: P1-Hybrid.....	9
Abbildung 2: P2-Hybrid.....	10
Abbildung 3: P3-Hybrid.....	10
Abbildung 4: P4-Hybrid.....	10
Abbildung 5: Übersicht Motortopologien.....	11
Abbildung 6: Prinzip Transversalfusstechnologie Compact Dynamics	11
Abbildung 7: Zusammensetzung Projektpartner	12
Abbildung 8: Beispiel Kontaktierung Litze - Stromschiene.....	25
Abbildung 9: Stator vor Verguss.....	27
Abbildung 10: Statorträger – Rohteile (Drückteile) innen und aussen	28
Abbildung 11: Zusammenbau Statorträger für Lötprozess.....	28
Abbildung 12: Statorträger bearbeitet.....	28
Abbildung 13: Verkleben der Statorringe mit dem Stator	29
Abbildung 14: CAD-Modell Dreifach-Magnetring	31
Abbildung 15: Vergleich WLTP – NEFZ	33
Abbildung 16: Ergebnis Technologierecherche AP3.....	37
Abbildung 17: AP3 - Übersicht Stückzahlenszenarien	37
Abbildung 18: CAD-Modell Tangentialwicklung	39
Abbildung 19: Ergebnis nach Entlackung.....	41
Abbildung 20: Prinzipskizze Ultraschallschweißen	42
Abbildung 21: Kabelschuh nach erfolgtem Ultraschallschweißen.....	42
Abbildung 22: Kontaktierung mittels Widerstandsschweißen.....	43
Abbildung 23: Kontaktierung mittels Tauchbadlötten	43
Abbildung 24: verfügbarer Bauraum Stromschiene	45
Abbildung 25: Konstruktionszeichnung Stromschiene innen	46
Abbildung 26: Konstruktionszeichnung Stromschiene außen	47
Abbildung 27: Konstruktionszeichnung Wicklung kpl.	47
Abbildung 28: verfügbarer Bauraum Wicklung.....	48
Abbildung 29: FE-Modell mit 6-Eck Polygon	49
Abbildung 30: Vergleichsspannungen unter Drehmoment (links) und Radiale Aufweitung unter Fliehkraft (rechts)	50
Abbildung 31: FE-Simulation des Pull-Out-Versuches.....	51
Abbildung 32: Vergleich Y-Dehnung in Experiment (links) und Simulation (rechts) des Scherversuches	51
Abbildung 33: Simulation einer Kreuzlage in CADWIND	52
Abbildung 34: Kraft über Temperatur (durch elektrische Aufheizung) dreier SMA-Drähte	52
Abbildung 35: Nasswickeln der Rotorglocke	53
Abbildung 36: Links: Anpressscheiben; rechts: Anwendung der Anpressscheiben an Rotorglocke	54
Abbildung 37: Links: Versuchstand zum Wickeln mit PU; rechts: Schliffbilder gewickelter PU-GF-Rohre.....	54
Abbildung 38 - Schematische Darstellung des Nasswickelverfahrens	55
Abbildung 39 - Erstes Funktionsmuster auf der Wickelmaschine	55
Abbildung 40 - Musterglocken, hergestellt mit unterschiedlichen Prozessparametern.....	56
Abbildung 41 - Musterglocke nach der Entformung (Wickel mit Magnetring u. Sondenring).....	57
Abbildung 42 - Schematische Darstellung der Wickelkontur im Vergleich zum CAD-Model der RTM-Glocke	58
Abbildung 43 - Wickel mit Andrückscheiben, vor und nach Entformung.....	59
Abbildung 44 - Funktionsmuster, Rückseite	59
Abbildung 45 - Funktionsmuster, Frontseite.....	60
Abbildung 46 - Andrückscheiben und Wickelkern	60
Abbildung 47 - Optimierte Andrückscheiben	61
Abbildung 48 - Vieleck-Aufsatz (Rapid-Prototyping)	62
Abbildung 49 - Metallisches Vieleck auf Wickelkern bei Wickelversuchen	62
Abbildung 50 - Schematische Darstellung der Wickelkontur.....	64
Abbildung 51 – Qualifizierungsmuster mit rot eingefärbtem Harz nach dem Entformen	65
Abbildung 52 – Qualifizierungsmuster rot lackiert, einbaufertig	65
Abbildung 53 – Qualifizierungsmuster rot lackiert, einbaufertig	66
Abbildung 54 – Weiterführende Wickelversuche.....	67
Abbildung 55: Lastenheft für Vergussmaterialien.....	68

Abbildung 56: Materialauswahl für spritzgussfähige EP-Formmassen	68
Abbildung 57: Fließ-Härtungsverhalten von Epoxid-Formmassen.....	69
Abbildung 58: DSC-Analysen der ausgewählten Formmassen und Übersicht zur Reaktionskinetik.....	70
Abbildung 59: Füllsimulation des Statorvergusses.....	70
Abbildung 60: Einzelne Zahngeometrie aus dem Statorpaket entnommen	70
Abbildung 61: Konstruktive Werkzeugeinsätze mit Zahngeometrie für die Versuchsplatte	71
Abbildung 62: Gefertigte Werkzeugeinsätze mit Zahngeometrie für die Versuchsplatte	71
Abbildung 63: Werkstoffzustände einer duroplastischen Formmasse beim Spritzgießen	72
Abbildung 64: Gespritzte ebene Statorgeometrie mit eingelegten Litzen	72
Abbildung 65: Mikroskopie der umspritzten Kupferlitzen mit (links) und ohne Isolation (rechts)	73
Abbildung 66: TGA - Analyse der verschiedenen Vergussmassen	74
Abbildung 67: DSC-Analysen der Vergussmassen mit 10 K/min.....	75
Abbildung 68: Ermittlung des Aushärtegrades mittels DSC	76
Abbildung 69: Speichermodule der Vergussmassen aus der DMA	77
Abbildung 70: Exemplarische TMA-Messung des CW 229.....	77
Abbildung 71: Verlauf der Speichermodule (links) und der Verlustmodule (rechts) aus den DMA-Messungen von Probenausgewählter Prozessparameter	79
Abbildung 72: Viskositätsverhalten der Vergussmassen über die Temperatur am Rotationsrheometer	80
Abbildung 73: Fließ-Härtungs-Verlauf des Aichi-Pulvers bei verschiedenen Heizraten am Platte-Platte- Rheometer	81
Abbildung 74: Fließ-Härtungs-Verläufe (links) und Viskositätskurven ausgewählter Epoxidharz-Härter- Beschleunigersysteme.....	81
Abbildung 75: Prinzip Aufbau Statorträger	82
Abbildung 76: Aluplattiertes Ferranblech.....	84
Abbildung 77: Aufbau Stator Kühler	85
Abbildung 78: Stator Axialflussmaschine vor Verlöten und Verguss	86
Abbildung 79: Prinzip Aufbau Stator Kühler / Statorpaket (rot: Verbindung Statorträger / Statorpaket)	86
Abbildung 80: Übersicht Anlagenkonzepte.....	88
Abbildung 81: Temperaturverlauf Dampfphasenlöten	88
Abbildung 82: Lötversuch Dampfphasenlötanlage	89
Abbildung 83: Thermographieaufnahme Kontaktlöten	90
Abbildung 84: Temperaturverlauf Kontaktlöten	90
Abbildung 85: Aufbau Fluidlötversuch	91
Abbildung 86: Temperaturverlauf Fluidlöten.....	91
Abbildung 87: Unterschiedliche Compounds von Magnetmaterialien.....	93
Abbildung 88: Magnetfeldrichtung und Pressrichtung parallel / Magnetfeldrichtung senkrecht zur Pressrichtung	94
Abbildung 89: Vergleich Einstufiges Pressverfahren / Zweistufiges Pressverfahren.....	94
Abbildung 90: Aufbau Werkzeugkonzept mit Darstellung der Magnetfeld / gepresste Magnetrohlinge	96
Abbildung 91: Erzeugtes Magnetfeld in Matrizenkavität / Überprüfung der Sättigung zwischen den Polen	97
Abbildung 92: Segmentmagnet 4polig am Innendurchmesser magnetisiert	98
Abbildung 93: Magnetischer Fluss im Stator in Abhängigkeit der Rotorposition in schematischer Darstellung, links d-Ausrichtung: geringere Induktivität, rechts q-Ausrichtung: höhere Induktivität	100
Abbildung 94: Statorfeste Anisotropie durch asymmetrische Streufelder in schematischer Darstellung	100
Abbildung 95: Beobachterstruktur der sensorlosen Regelung des Rotorwinkels δ mit Winkelfehler ε basierend auf gemessenen Strömen I_{meas} und beobachteten Strömen $I_{obs,adc}$	101
Abbildung 96: Soll-Trajektorien im WLTP-Fahrzyklus.....	102
Abbildung 97: Gemessener Referenzwinkel δ und geschätzter Rotorwinkel δ_{obs} in verschiedenen Arbeitspunkten	103
Abbildung 98: Stationäres Kennfeld, Messwerte bei konstanter Motortemperatur	104
Abbildung 99: Innovationsstufe Fertigungsprozesse.....	106
Abbildung 100: Produktionssystem - Struktur	106
Abbildung 101: Entwurf Produktionsbereich DYNAX	107

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: ursprüngliche Projektplanung	34
Tabelle 2: ursprüngliche Meilensteinplanung	34
Tabelle 3: Übersicht Isolationsmaterialien Feindrahtlitzen	40
Tabelle 4: Prozessvariation für die drei Vergussmassen	75
Tabelle 5: Variation der Gelier- und Härtingszeiten	78