



Förderkennzeichen: **19I21046B**

**Schlussbericht zum Verbundvorhaben  
BZ\_Turbolader**

**Entwicklung eines rekuperativen Luftladesystems für Brennstoffzellen  
Teilvorhaben: Entwicklung verlustarmer Leistungselektronik und eines  
Multiphasen-Motors für den Hochdrehzahl-Verdichter**



Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

Silver Atena GmbH  
Dachauer Straße 655  
80995 München

Laufzeit: 01.01.2022 – 31.12.2024

Berichtszeitraum: 01.01.2022 – 31.12.2024

Firmen-Projektleiter  
Raphael BURGMAIR  
Silver Atena GmbH  
E-Mail: r.burgmair@silver-atenade  
Tel: +49 (0)89 189600-8927

Berichterstatter / Bearbeiter  
Bernhard FERNANDO  
Silver Atena GmbH  
E-Mail: b.fernando@silver-atenade  
Tel: +49 (0)89 189600-3989

.....  
(Unterschrift)

.....  
(Unterschrift)



## Inhaltsverzeichnis

1	AUFGABENSTELLUNG .....	5
1.1	Ziele und Voraussetzungen des Teilvorhabens .....	5
1.2	Stand der Wissenschaft und Technik zu Vorhabenbeginn .....	6
1.3	Planung und Ablauf des Vorhabens .....	6
1.4	Zusammenarbeit mit anderen Stellen.....	9
2	ERGEBNISSE DES TEILVORHABENS .....	10
2.1	AP 1.1 „Analyse und Systematisierung“ .....	11
2.2	AP 2.1 „Entwicklung modulare Grunddesign BZ-Luftladesystem“ .....	16
2.3	AP 2.2 „Konzept integriertes Steuer- und Regelsystem“ .....	35
2.4	AP 2.3 „Prüfstandskonzept“ .....	39
2.5	AP 3.1 „Prototypische Umsetzung“ .....	43
2.6	AP 3.2 „Fertigung für die Erprobung“ .....	59
2.7	AP 3.3 „Inbetriebnahme der Komponenten“ .....	62
2.8	AP 4.1 „Komponententests“ .....	63
3	VERWERTBARKEIT DES ERGEBNISSES .....	72
4	ERGEBNISSE DRITTER MIT RELEVANZ FÜR DAS VORHABEN .....	74
5	VERÖFFENTLICHUNGEN.....	75

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Geräte-Entwicklungsprozess für den Turbolader-Inverter	8
Abbildung 2: Systemarchitektur eines Brennstoffzellen-Antriebsstranges	10
Abbildung 3: Systemarchitektur des Gesamtsystems	12
Abbildung 4: Kontextdiagramm des Brennstoffzellen-Turboladers	13
Abbildung 5: Simulationsmodell des Brennstoffzellen-Gesamtsystems	15
Abbildung 6: Brennstoffzellen-Systemmodell	15
Abbildung 7: Vergleich der Phasenspannungen von TNPC und B6-Brücke	17
Abbildung 8: Vergleich der Leistungsverluste zwischen B6-Brücke und TNPC	18
Abbildung 9: Die untersuchten Motorkonzepte im Vergleich	19
Abbildung 10: Optimierungsparameter im 2D-Schnitt	21
Abbildung 11: Variation Nuthöhe – Wirkungsgrad	22
Abbildung 12: Variation Nuthöhe - Phasenstrom	23
Abbildung 13: Thermische Berechnung der Luftspaltwicklung SmCo-Magnet im nominalen Betriebspunkt	24
Abbildung 14: Wicklungsanordnung in einer Statorspule	26
Abbildung 15: Stromdichte für ein Bündel von 7 Drähten mit 0,8 mm Durchmesser	27
Abbildung 16: Stromdichte für ein Bündel von 28 Drähten mit 0,37 mm Durchmesser	28
Abbildung 17: Verschiedene Entwürfe für Wickeltools	29
Abbildung 18: Wickelversuche mit 28er-Bündeln (links) sowie 16er-Bündeln (rechts)	30
Abbildung 19: Schnitte durch die Spulen nach aufgebrachtener Imprägnierung	31
Abbildung 20: Erster Stator-Prototyp mit 13 mm-Segmentierung des Statorgehäuses	31
Abbildung 21: Thermaltests mit dem ersten Statorprototypen	32
Abbildung 22: Wicklung eines aktualisierten Stator-Prototypen	33
Abbildung 23: Vergleich zwischen dem ersten Stator-Prototypen (links) und dem aktualisierten Stator-Prototypen (rechts)	34
Abbildung 24: Simulationsmodell des ZSG	35
Abbildung 25: Darstellung der Beziehung zwischen den Auslegungszielen des Hybrid Managers	37
Abbildung 26: Input- und Outputparameter des Hybrid Managers	37
Abbildung 27: Simulationsmodell des Hybrid Managers	38
Abbildung 28: Modell zur Berechnung der Leistungsanforderung	38
Abbildung 29: Testaufbau für den Invertertest	40
Abbildung 30: Testaufbau der Motorprüfbank bei Silver Atena	41
Abbildung 31: Testaufbau der Motorprüfbank bei der Universität der Bundeswehr	42



Abbildung 32: Übersicht der Software-Komponenten des Hochdrehzahl-Inverters	44
Abbildung 33: Auszüge aus dem Hardwarearchitekturdokument	45
Abbildung 34: Kontextdiagramm des Hochdrehzahl-Inverters	46
Abbildung 35: Beispielseite aus dem Schaltplan	47
Abbildung 36: Bestückung und Routing in einer Mittellage des Computing Moduls	48
Abbildung 37: Lagenaufbau Computing Modul	48
Abbildung 38: Funktionsstruktur des Motorgehäuses	49
Abbildung 39: Funktionales Kontextdiagramm des Motorgehäuses	50
Abbildung 40: Morphologischer Kasten	52
Abbildung 41: Erstes Konzept für das Motorgehäuse	53
Abbildung 42: Zweites Konzept für das Motorgehäuse	54
Abbildung 43: Drittes Konzept für das Motorgehäuse	55
Abbildung 44: Fertig ausgearbeiteter Entwurf	57
Abbildung 45: Konzept der Luftkühlung	58
Abbildung 46: Konzept für ein integriertes Invertergehäuse	59
Abbildung 47: Computing-Modul (Oberseite)	60
Abbildung 48: Driver-Modul (Oberseite)	60
Abbildung 49: Power-Modul (Unterseite)	61
Abbildung 50: Prüfstands Aufbau des Testmotors bei Silver Atena	62
Abbildung 51: Mehrstufiger Erprobungsansatz	63
Abbildung 52: Detailansichten des Motors im Testgehäuse mit Instrumentierung	64
Abbildung 53: Messung der Wellenauslenkung	65
Abbildung 54: Aufbau für den Load-Test an der Motorprüfbank	66
Abbildung 55: Detailansicht von Drehmomentmesswelle sowie Motorabtriebswelle	67
Abbildung 56: Lastbereiche bei den Load-Tests	67
Abbildung 57: Konturplot des Inverter-Wirkungsgrads ( $U_{DC}=520V$ )	68
Abbildung 58: Konturplot des Motor-Wirkungsgrads ( $U_{DC}=520V$ )	69
Abbildung 59: Konturplot des elektrischen Gesamtwirkungsgrads ( $U_{DC}=520V$ )	71



# 1 Aufgabenstellung

## 1.1 Ziele und Voraussetzungen des Teilvorhabens

Idee des Verbundprojektes war die Entwicklung eines Luftversorgungssystems für Brennstoffzellen, welches die elektrifizierte Verdichtertechnologie mit Rekuperation durch eine Turbine als energieeffiziente Technologie einsetzt und die Reduzierung der Herstellkosten durch eine anwendungsadaptive mechanische und elektrische Systemauslegung, eine materialoptimierte Komponentenauslegung in Verbindung mit einer fertigungsoptimierten Konstruktion ermöglicht. Zentrale Lösungsansätze zur Reduzierung der Systemkosten sind dabei der Einsatz eines turbinenbasierten rekuperativen Ladesystems sowie dessen material- und fertigungsoptimale Auslegung sowie einer anwendungsoptimierten Systemauslegung mit angepasster Abstimmung von Mechanik, Elektrik und zugehöriger Steuerung.

Ziel des Verbundprojektes war es, mittels Design-to-Cost-Ansätzen sowie höherer Systemeffizienz des Luftversorgungssystems die wirtschaftliche Attraktivität der Brennstoffzellen-Technologie merklich zu erhöhen. Das im Ergebnis des Projektes entwickelte rekuperative Luftversorgungssystem mit Fokus auf kostenoptimalem Design, optimierter Leistungselektronik und integraler Steuerung sollte erstmalig:

- einen wirtschaftlichen Betrieb von Brennstoffzellen in Nutzfahrzeugen durch
  - eine gesamtheitliche Kostenreduzierung um den Faktor 8 - 10 im Vergleich zu aktuellen Komponenten und
  - eine gleichzeitige Steigerung der Systemeffizienz um 10% im Vergleich zum aktuellen System ermöglichen,
- um damit die Gesamtkostenbilanz („Total-Cost-of-Ownership“) von Brennstoffzellen-Antrieben wesentlich zu verbessern und so
- die Schwelle für einen wirtschaftlichen Einsatz der wasserstoffbasierten Elektromobilität nachhaltig zu reduzieren.

Das wissenschaftlich / technische Ziel von Silver Atena in diesem Forschungsvorhaben bestand in der Neuentwicklung der Leistungselektronik für Brennstoffzellen- und Luftladesysteme und eines belastungsreduzierenden Steuerungskonzepts, um folgende Punkte zu erreichen:

- a. Reduzierung von (Resonanz-)Schwingungen durch Frequenzmeidung,
- b. Unterstützung eines lastreduzierten Anlaufverhaltens bei Brennstoffzellen-Neustart,
- c. Unterstützung eines angepassten Differenzdrucks für variierende Brennstoffzellen-Lastfälle,
- d. Kostenreduzierung durch empirische Messwertableitung,
- e. modellbasiertem Health-Monitoring zur Vermeidung von Systemschäden.



## 1.2 Stand der Wissenschaft und Technik zu Vorhabenbeginn

Zu Vorhabensbeginn gab es bereits verschiedene Lösungsansätze für die Luftversorgung, energetische Steuerung, Umspanntechnik und Topologien von Brennstoffzellen-Antriebssträngen, welche aber noch keinen wirtschaftlichen Einsatz ermöglichten. Funktionale Problemstellungen wurden in allen bisherigen Lösungen durch verstärkten Einsatz von Material und Energie kompensiert. Die Verfahren und Technologien waren daher also bereits bekannt und bewährt, wurden aber in diesem Projekt erstmalig für alternative System-Topologien, wie sie für verschiedene mobile Anwendungen, aber auch je nach Gewichtung der Eigenschaften hinsichtlich Effizienz, Kosten, Haltbarkeit und/oder Bauraum und Gewicht in Frage kommen, optimiert.

Die Umsetzbarkeit des turbinenunterstützten Ladesystem-Prinzips wurde bereits von der IHI Charging International GmbH gemeinsam mit Daimler für den Pkw-Bereich im GLC F-Cell Modell erprobt. Die Besonderheit war hierbei die erstmalige Nutzung der kinetischen Energie des erhitzten Abgasstroms der Brennstoffzelle mittels einer Turbine in einer mobilen Anwendung, welche mit dem Kompressor der Brennstoffzellenluftversorgung gekoppelt ist. Die entstandene Lösung wurde mit Blick auf die hohen Kosten als nicht wirtschaftlich und somit als nicht großserientauglich eingeschätzt. Da aber die grundlegende Umsetzbarkeit des technischen Prinzips nachgewiesen werden konnte, galt es nun mit dem Ziel der Wirtschaftlichkeit, alternative technische Lösungen, Steuerungen und Komponenten für dieses Prinzip zu entwickeln.

Silver Atena verfügt über jahrelange Erfahrungen bei der Entwicklung von Steuergeräten und Leistungselektroniken für verschiedenste Antriebssysteme im Bereich Automotive und Aerospace. Dabei waren auch bereits in der Vergangenheit mehrfach Zielstellungen der Systemoptimierung, vorausschauender Systemsteuerung und die Verwendung neuartiger Technologien für die Leistungselektronik erreicht worden. Silver Atena hat für den H-Tron von Audi den Umrichter (150kW, 400V) entwickelt und produziert. Im Bereich Wechselrichter für Brennstoffzellen-Turboverdichter hat Silver Atena Produkte mit SiC-Technologie im Kundeneinsatz. Silver Atena verfügt über zahlreiche Hochvoltprüfstände für Leistungen bis zu 250kW. An eigenen Motorprüfständen werden Motoren vermessen und mit dem Wechselrichter optimiert.

Die Professur Alternative Fahrzeugantriebe (ALF) der Technischen Universität Chemnitz betreibt seit 2010 Forschung auf dem Gebiet der alternativen Fahrzeugantriebe mit dem Schwerpunkt Brennstoffzellenantriebe und umfasst derzeit 19 wissenschaftliche und 2 technische Mitarbeiter. Zur Professur gehören mehrere Labore zur Untersuchung von Brennstoffzellen und deren Peripherie auf Zell-, Stack- und Systemebene. Teststände im Leistungsbereich von wenigen Watt bis über 100kW ermöglichen die Vermessung von Stacks verschiedener Größen.

## 1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Innerhalb des Gesamtvorhabens hat Silver Atena hauptsächlich zur Bearbeitung der folgenden Arbeitspakete beigetragen:

- 1.1 „Analyse und Systematisierung“
  - 1.1.1 „Anforderungsanalyse“
  - 1.1.4 „Teilmodell Motoren und Leistungselektroniken“

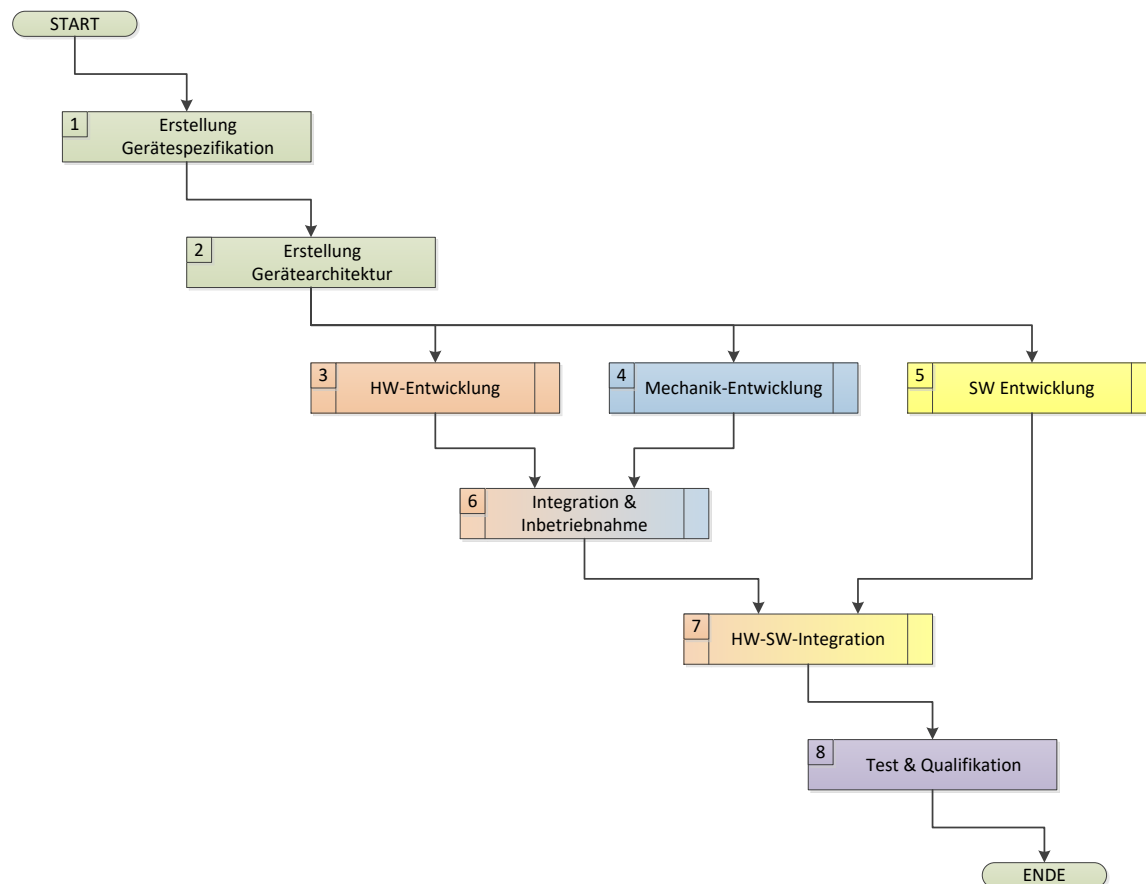


- 2.1 „Entwicklung modulare Grunddesign BZ-Luftladesystem“
  - 2.1.3 „Konzept integrierter E-Motor und Wechselrichter“
  - 2.1.4 „Reglerkonzept BZ-Turbolader“
  
- 2.2 „Konzept integriertes Steuer- und Regelsystem“
  - 2.2.2 „Sicherheitsbewertung und Sicherheitskonzepte“
  - 2.2.3 „Reglerarchitektur“
  
- 2.3 „Prüfstandskonzept“
  - 2.3.3 „Konzeptionierung des Motor- & Steuerungsprüfstandes“
  
- 3.1 „Prototypische Umsetzung“
  - 3.1.3 „Integrierte Entwicklung Motor und Wechselrichter“
  - 3.1.4 „Entwicklung BZ-Antriebsstrang Software“
  - 3.1.5 „Entwicklung Motorprüfstand“
  
- 3.2 „Fertigung für die Erprobung“
  - 3.2.2 „Fertigung Motor/Wechselrichter“
  - 3.2.3 „Fertigung Steuergerät und DCDC-Wandler“
  - 3.2.4 „Fertigung Motorprüfstand“
  
- 3.3 „Inbetriebnahme der Komponenten“
  - 3.3.1 „Inbetriebnahme BZ-Luftsystem“
  - 3.3.2 „Inbetriebnahme Motor mit Wechselrichter“
  
- 4.1 „Komponententests“
  - 4.1.2 „Erprobung integriertes Motor-Wechselrichter-System“
  - 4.1.4 „Systemversuche und Systemtests“

Das Gesamtprojekt wurde unter der Federführung von IHI geplant und die Projektpläne in zahlreichen Abstimmungsmeetings gemeinsam erarbeitet. Das Teilvorhaben von Silver Atena wurde intern so geplant, dass die Schnittstellen zum Gesamtprojektplan (insbesondere die Projektmeilensteine) entsprechend gewahrt wurden. Die interne Projektplanung unterlag dabei den Projektmanagement-Richtlinien von Silver Atena. Es wurde

darauf geachtet, trotz des Forschungscharakters und einiger daraus resultierender Besonderheiten in der Projektabwicklung das Projekt analog zu einem Kundenprojekt zu planen, um größtmögliche Kosteneffizienz und Qualität zu erzielen. Dazu wurden detaillierte Projektplanungsdokumente erstellt und auf dem aktuellen Stand gehalten. Zudem wurde regelmäßig Projektcontrolling durchgeführt und Projektreviewmeetings abgehalten.

Im Gesamtverbund fanden wöchentlich Projektmeetings statt, bei denen der Fortschritt der einzelnen Teilprojekte begutachtet wurde und bei Problemen frühzeitig gegengesteuert werden konnte. Das Gros der technischen Arbeit fand meist in kleineren Arbeitsgruppen statt, die je nach anstehender Aufgabe rasch und unkompliziert gebildet werden konnten.



**Abbildung 1: Geräte-Entwicklungsprozess für den Turbolader-Inverter**

In der obigen Abbildung ist die grundsätzliche Vorgehensweise bei einer Geräteentwicklung bei Silver Atena dargestellt. Hinter den einzelnen Entwicklungsschritten verbergen sich weitere, teils umfangreiche Prozessketten.

Die Schritte 1 und 2 bilden die Konzeptphase, in der ein abgestimmter Input aus dem Verbund unbedingt notwendig ist. Während etwa in der SW-Entwicklung eine nachträgliche Anpassung an den Schnittstellen vorgenommen werden kann, ist dies in der Hardware (sobald die Platinen gelayoutet und gefertigt wurden) entweder gar nicht mehr oder nur mehr mit erheblichem Zeit- und Kostenaufwand möglich. Daher ist es



unumgänglich, diese saubere Vorgangsweise nach dem V-Modell einzuhalten. Die Gerätespezifikation in Schritt 1 leitet sich aus der Gesamtsystemarchitektur und den darin spezifizierten Schnittstellen ab, sowie aus den technischen Anforderungen, welche sich aus der Anforderungsanalyse ergeben (siehe Abschnitt 2.1). Mit Hilfe dieser Dokumente wird im Schritt 2 die Gerätearchitektur erstellt, in welcher der Hardwareaufbau und die grundlegende Funktionsweise des Gerätes designt wird.

An die Definitionsphase in den Entwicklungsschritten 1 und 2 schließen sich die Detailentwicklungen in den Schritten 3-5 an. Diese teilen sich auf in Hardware-Entwicklung, Mechanik-Entwicklung und Software-Entwicklung (siehe Abschnitt 2.5). Im Schritt 6 werden die zunächst die Hardware und die Mechanik zusammengeführt, bevor im Schritt 7 dann auch die SW integriert wird. Das dann fertige Gerät wird im Schritt 8 einer umfangreichen Testkampagne unterzogen.

## 1.4 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Das vorliegende Verbundvorhaben ist durch eine sehr enge firmen- und universitätsübergreifende Zusammenarbeit geprägt.

Zu Projektbeginn stand die Definition der Systemanforderungen, aus welchen sich die Anforderungen für die von Silver Atena entwickelten Komponenten ergaben. Diese Definitionsphase wurde von allen Partnern gemeinsam durchgeführt, was naturgemäß sehr häufige Abstimmungen erforderte.

Mit IHI verband uns eine sehr enge Zusammenarbeit, da der von uns zu entwickelnde Stator in den Brennstoffzellen-Turbolader von IHI eingebaut werden sollte. Für ein optimales Zusammenspiel von Stator und Rotor war es unerlässlich, sehr eng bei der gemeinsamen Auslegung zusammenzuarbeiten. Ebenso konnte Silver Atena von den bei IHI bestehenden Erfahrungen im Motordesign profitieren, sodass auch in diesem Bezug regelmäßiger Austausch stattfand.

Mit der TU Chemnitz gab es sehr enge Schnittstellen im Bereich der Brennstoffzellenregelung. Wie in Abschnitt 2.3 beschrieben, wurde der Hybrid Manager von Silver Atena modelliert, die Stack Control von TUC. Damit diese beiden Regelungskomponenten in der Gesamtsystemregelung optimal zusammenarbeiten, waren eine enge Kooperation und häufiger Austausch erforderlich.

In Abstimmung mit den Verbundpartnern fanden regelmäßige Fortschrittsrunden statt, um die Arbeiten eng aufeinander abzustimmen. Dazu gehörte sowohl eine wöchentliche Telefonkonferenz als auch regelmäßige persönliche Treffen nach Bedarf. Insbesondere für die Integration des Inverters und des Turboladers in den Gesamtsystemprüfstand an der TU Chemnitz waren unsere Mitarbeiter mehrmals für einige Tage vor Ort in Chemnitz.

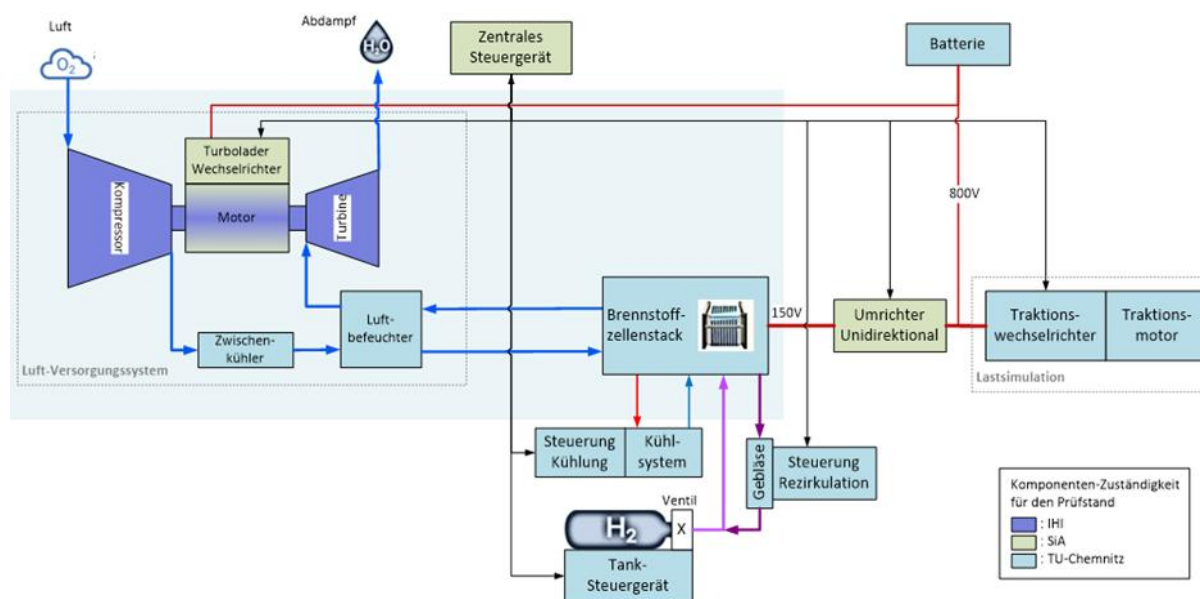


## 2 Ergebnisse des Teilvorhabens

Zur besseren Einordnung des Teilvorhabens von Silver Atena ist in Abbildung 2 die Systemarchitektur eines Brennstoffzellen-Antriebsstranges dargestellt. Die Systemkomponenten, die von Silver Atena im Rahmen des Teilvorhabens entwickelt und aufgebaut wurden, sind in grün dargestellt.

Die überwiegenden Forschungs- und Entwicklungsaufwände wurden in den Turbolader-Wechselrichter (Inverter) sowie den Stator des Turbolader-Motors investiert. Das Zentrale Steuergerät war zu Projektbeginn noch als eigenständiges Gerät konzipiert, wurde aber nach Optimierung der Systemarchitektur im weiteren Projektverlauf vollständig in den Wechselrichter integriert.

Eine weitere Komponente ist der Umrichter (DC/DC-Wandler), der die Spannungswandlung zwischen Brennstoffzellen-Stack, Batterie und Traktions-Wechselrichter übernimmt. Für diese Komponente konnte auf bestehende Entwicklungen bei Silver Atena zurückgegriffen werden, die lediglich mit geringfügigen Anpassungen für den Einsatz im BZ\_Turbolader-Projekt umgerüstet wurden.



**Abbildung 2: Systemarchitektur eines Brennstoffzellen-Antriebsstranges**

Dieser Schlussbericht wird sich im Wesentlichen an der Arbeitspaketeinteilung orientieren, um die Ergebnisse des Vorhabens dokumentieren.

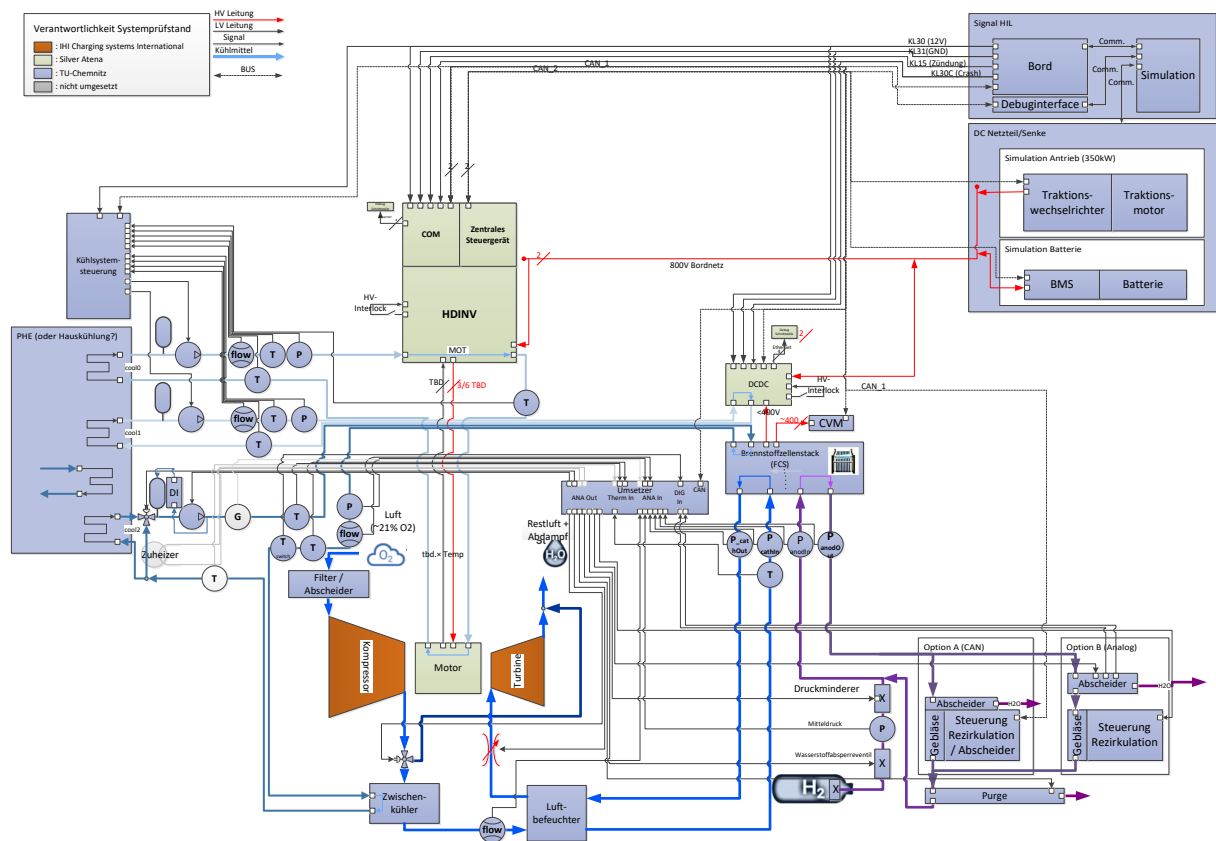
## 2.1 AP 1.1 „Analyse und Systematisierung“

Den Ausgangspunkt für alle weiteren Entwicklungen bildete die Anforderungsanalyse, die in Form zahlreicher Workshops unter Beteiligung aller Verbundpartner durchgeführt wurde. Diese konzentrierten sich auf folgende Bereiche:

- Systemgrenzen
- Definition der Schnittstellen (soweit möglich)
- Hauptanforderungen
- Risiken
- Auswirkungen von Sensor- und Aktorfehlern und Fehlerbehandlung

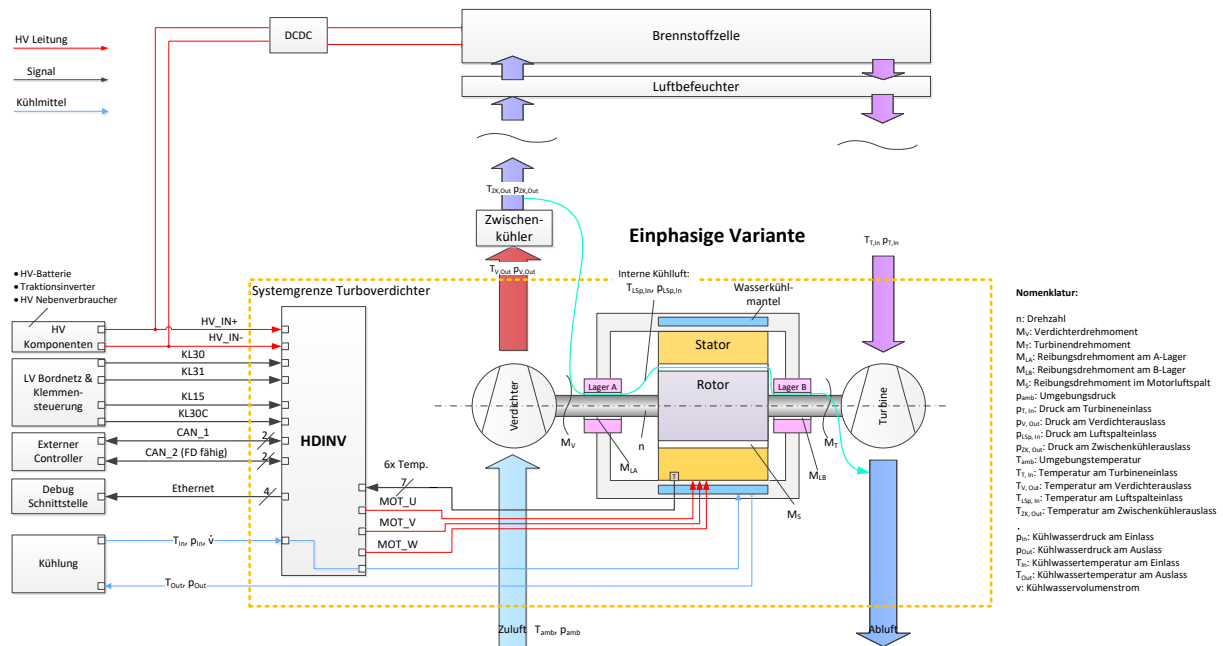
In Abbildung 3 ist die Systemarchitektur des gesamten Systems, wie es in diesem Vorhaben entwickelt und aufgebaut wurde, zu sehen. In dieser Architektur sind alle erforderlichen Systemkomponenten erfasst, sowohl diejenigen, die real aufgebaut werden, als auch diejenigen, die durch eine Simulation nachgebildet werden. Die farbliche Kennzeichnung ermöglicht eine Zuordnung zu den jeweiligen Verbundpartnern. Der Anteil der TU Chemnitz ist in blau dargestellt, der Anteil der IHI in orange und der Anteil von Silver Atena in grün.

Die Systemarchitektur ist ein wichtiges Dokument, da in ihr alle Sensorinputs und Aktuator-Outputs der Komponenten sowie die Wechselwirkungen zwischen ihnen festgehalten werden. Dies ermöglicht es, die Schnittstellen der einzelnen Geräte zu definieren. Während der Systemanalyse stellte sich heraus, dass die Funktionen des zentralen Steuergeräts, welches im Projektantrag als eigenständiges Gerät vorgesehen war, im Turbolader-Inverter integriert werden können. Ursprünglich sollte ein eigenes Gerät die Digitalisierung und Konditionierung der Vielzahl an Sensorinputs übernehmen. Da diese Aufgabe nun direkt von CAN-Umsetzern an den jeweiligen Sensoren erledigt wird, wird dieser Anteil des zentralen Steuergeräts nicht mehr benötigt. Der Regelungsanteil des zentralen Steuergeräts wird vom Hochdrehzahlinverter übernommen.



**Abbildung 3: Systemarchitektur des Gesamtsystems**

In Abbildung 4 ist der nähere Kontext des Brennstoffzellen-Turboladers dargestellt. Darin sind nicht nur die Signalschnittstellen erfasst, sondern auch die mechanischen und thermischen Schnittstellen. Die gestrichelte gelbe Linie stellt die Systemgrenze des Turboverdichters dar, also die Schnittstelle des von der IHI und Silver Atena entwickelten Turboverdichters zum restlichen Brennstoffzellensystem.



**Abbildung 4: Kontextdiagramm des Brennstoffzellen-Turboladers**

Parallel zur Systemarchitektur wurde an den Hauptanforderungen gearbeitet. Diese beruhen teilweise auf Analysen und Berechnungen, teilweise auf Erfahrungswerten von IHI sowie des assoziierten Partners FPTi.

Ergebnis dieser Arbeiten war eine erste grobe Dimensionierung der wichtigsten Anforderungen. Diese Kennwerte dienen als Ausgangspunkt für die ersten Konzeptarbeiten zu Motor und Leistungselektronik. Im Rahmen der Systemsimulationen der TU Chemnitz werden die Anforderungen nochmal verfeinert und können dann für die konkreten Geräteentwicklungen verwendet werden.



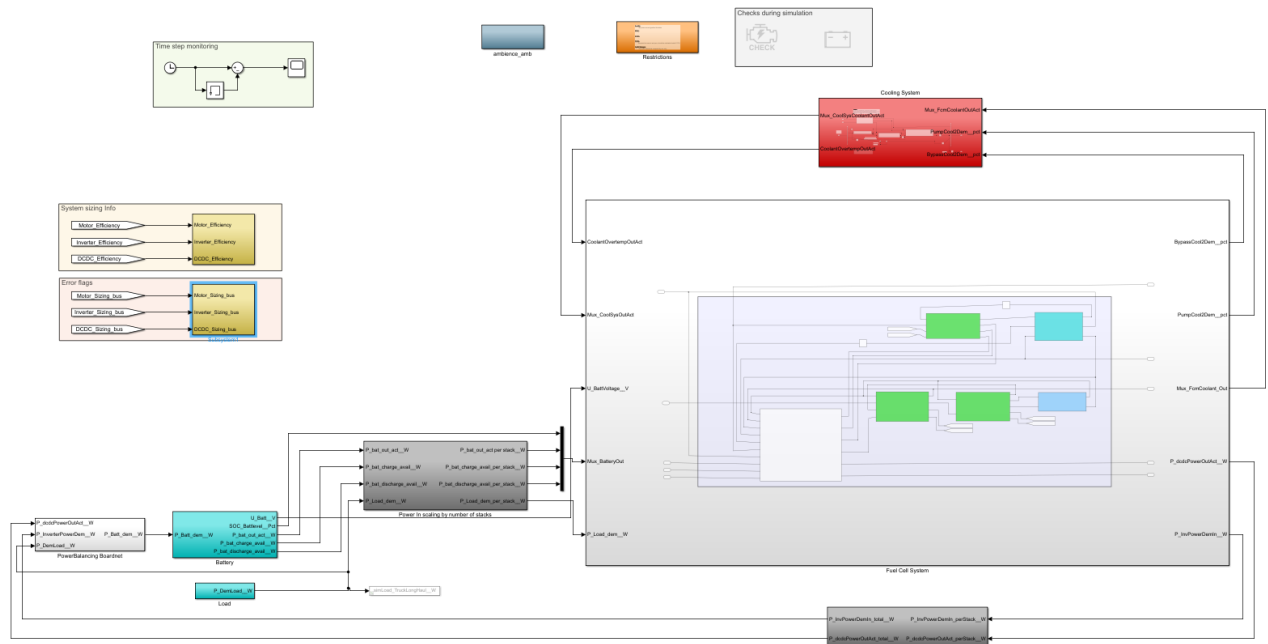
In den nachfolgenden beiden Tabellen sind die Hauptanforderungen an den Inverter sowie die Umweltaanforderungen gelistet.

Parameter	Zustand	Bereich
Input Power, $P_{el}$	Continuous	30kW
Input Voltage, $U_{HV}$	Unlimited operation Limited operation	520V – 920V 450V – 1000V
Input Current, $I_{HV}$	Continuous	57 A
Phase Current rms, $I_{AC}$	Continuous	80..90 Arms
Transients	n.a.	40 V / ms
Active Discharge Passive Discharge	n.a.	1000 V / 2 sec 1000 V / 120 sec
Lifetime	Operation	25000 h

Parameter	In Operation	Transport/Storage
Ambient Temperature [°C]	-40 .. 125	-40 .. 95
Rel. Humidity [%RH], condensing	10 ..100	5 .. 95
Altitude [m]	5400 with derating / 2000 no derating	Air transport
Pressure [kPa]	108.4 with derating / 51.2 no derating	Air transport
Environment	Automotive	Air transport
Cooling Fluid Inlet Tem- peratures, [°C]	-40 .. 75° 75 .. 90°	

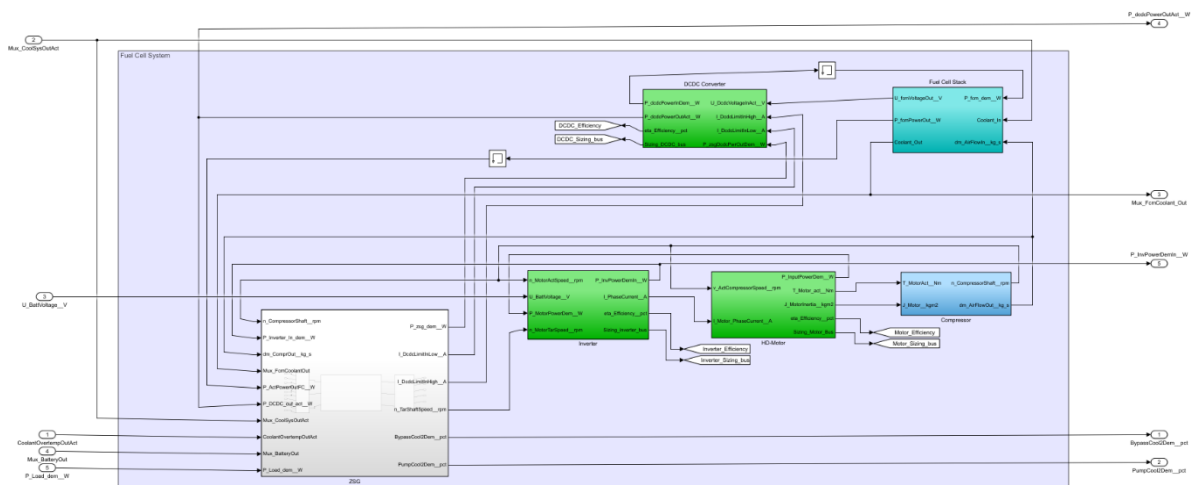


Im Unterarbeitspaket „Teilmodell Motoren und Leistungselektroniken“ haben wir Modelle der elektronischen Komponenten und des Motors erstellt, die in weiterer Folge in die Gesamtsystemsimulation einfließen. Abbildung 5 zeigt den aktualisierten Aufbau der Gesamtsystemsimulation in Form eines Simulink-Modells.



**Abbildung 5: Simulationsmodell des Brennstoffzellen-Gesamtsystems**

Die Hauptkomponente der Systemsimulation bildet das Brennstoffzellen-Systemmodell, das in Abbildung 6 dargestellt ist. Innerhalb des Brennstoffzellen-Systems war Silver Atena für die drei grün dargestellten Komponenten verantwortlich: Das DCDC-Wandlermodell, das Invertermodell sowie das Motormodell. Außerdem lieferten wir einen Teil des Modells für das Zentrale Steuergerät (ZSG).



**Abbildung 6: Brennstoffzellen-Systemmodell**



Die Teilmodelle für den Inverter und den Motor berechnen ein Drehmoment, das als Input für das Kompressormodell dient. Im Gegenzug fließt die Drehzahl des Kompressors (welche ja der Motordrehzahl entspricht) zurück in die Modelle für den Inverter und den Motor.

Zwei weitere Teilmodelle beschreiben die Funktionalitäten des Zentralen Steuergerätes (ZSG): Der Hybrid Manager und die Fuel Cell Control Unit. Die Fuel Cell Control Unit regelt unter anderem den Luftmassenstrom zur Brennstoffzelle. Für diese Aufgabe erhält sie als Input sowohl den Bedarf (aus dem Brennstoffzellenmodell) als auch den tatsächlichen Luftmassenstrom aus dem Kompressormodell. Der Output ist einerseits die Sollgeschwindigkeit des Kompressors, welche als Input in das Invertermodell fließt, andererseits eine Leistungsanforderung, welche in das Brennstoffzellenmodell fließt. Weiterhin regelt das ZSG die Kühlung der Brennstoffzelle, den Differenzdruck zwischen Kathode und Anode der Brennstoffzelle und schließlich die Wasserabscheidung, Rezirkulation und das Ausstoßen („Purge“) der angereicherten Inertgase ( $N_2$ ).

Der Hybrid Manager koordiniert die Leistungsbilanz zwischen Pufferbatterie und Brennstoffzelle. Er steuert, abhängig von Faktoren wie etwa dem Ladezustand der Batterie und der angefragten Gesamtantriebsleistung, welche Komponente (Batterie oder Brennstoffzelle) wie viel Strom liefern muss und wie viel Leistung im System überhaupt zur Verfügung steht.

Das Teilmodell des DCDC-Konverters wiederum bildet den DCDC-Wandler ab und konvertiert die abgegebene elektrische Leistung der Brennstoffzelle in eine für das Antriebssystem nutzbare elektrische Leistung mit dem richtigen Spannungsniveau und mit den entsprechenden Umwandlungsverlusten, die als Wirkungsgrad als zweiten Output dieses Teilmodell verlassen.

Die Modellierungsarbeiten fanden in enger Abstimmung mit der TU Chemnitz statt. Es war wichtig, die Schnittstellen zwischen den Teilmodellen präzise zu definieren, damit sich die einzelnen Modellkomponenten nahtlos integrieren lassen.

## **2.2 AP 2.1 „Entwicklung modulare Grunddesign BZ-Luftladesystem“**

In Abschnitt 1.3 wird die grundlegende Vorgehensweise bei der Geräteentwicklung des Turbolader-Inverters grob umrissen. Die Konzeptarbeiten zum integrierten E-Motor und Wechselrichter beinhalteten die Untersuchung verschiedener Inverter- sowie Motortopologien. Folgende Invertertopologien wurden im Rahmen der Voruntersuchung als vielversprechend erachtet und in detaillierten Berechnungen und Simulationen näher betrachtet:

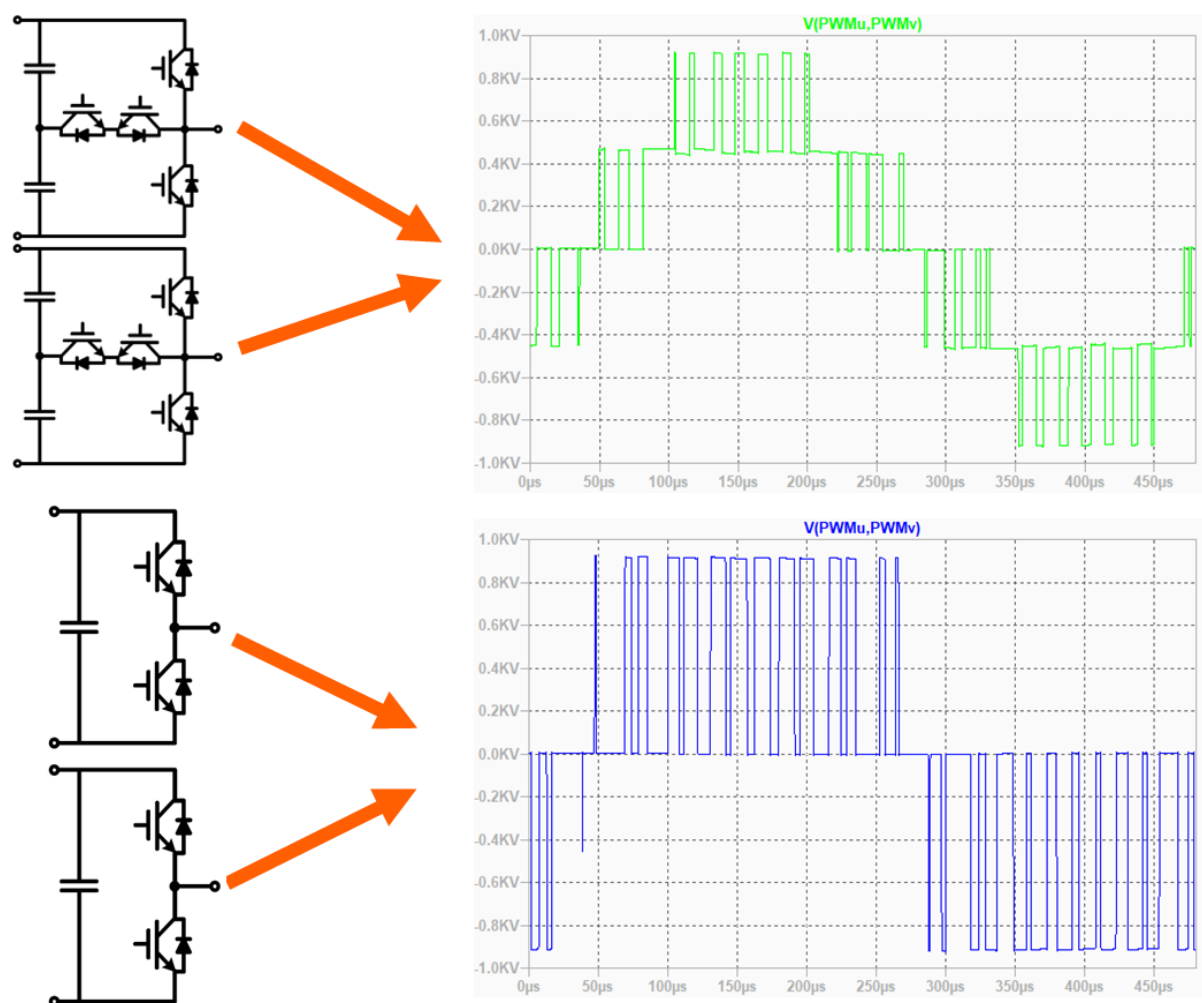
- T-Type Neutral Point Clamped (TNPC)
- Flying Capacitor Converter (FCC)
- B6-Brücke 3-phasig
- B6-Brücke 6-phasig



Bei den Vorab-Berechnungen zeigte sich, dass die Verluste im Motor etwa 80% der kombinierten Verluste von Inverter plus Motor ausmachen. Daher war es im Sinne einer Gesamtoptimierung zielführend, bei der Abstimmung zwischen Inverter und Motor eine etwas niedrigere Invertereffizienz hinzunehmen – um im Gegenzug eine wesentlich höhere Motoreffizienz zu erzielen.

Für die Motortopologie wurde ein 3-phasiger Permanentmagnet-Synchronmotor (PMSM) ausgewählt. Dieser wurde anschließend in Kombination mit den unterschiedlichen Invertertopologien simuliert. Dies erfolgte unter Einbeziehung verschiedener Schaltfrequenzen sowie unterschiedlicher Magnetvarianten.

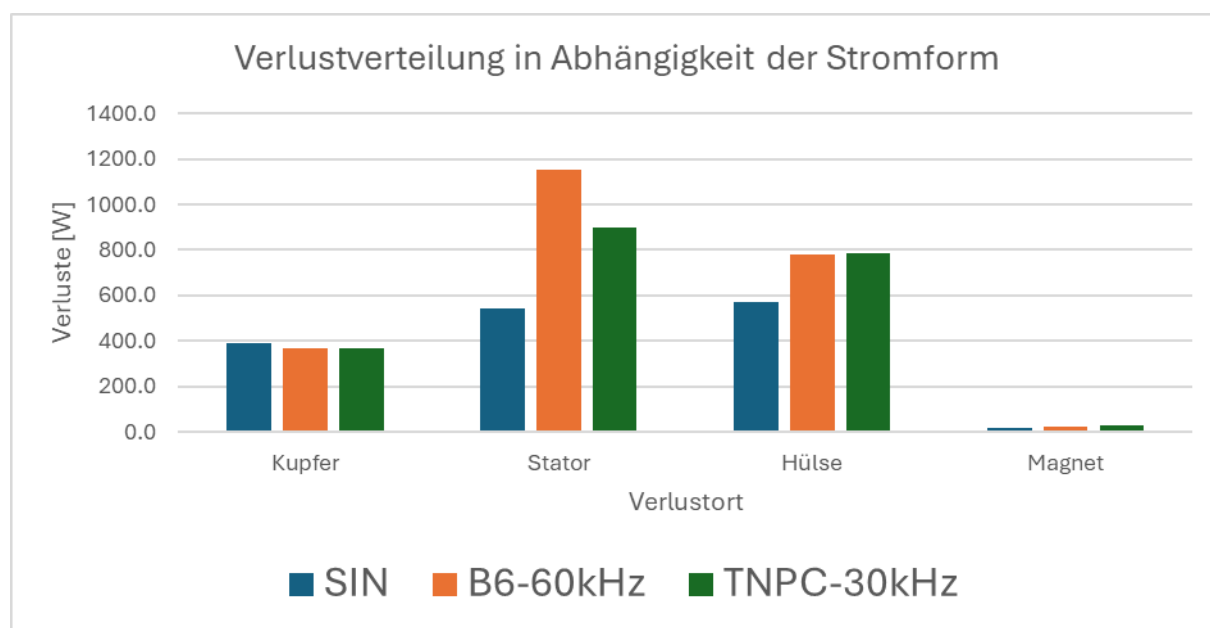
Aus diesen Untersuchungen ergab sich, dass der 3-phasige 3-Level TNPC Inverter für unseren Anwendungsfall ein Optimum aus Wirkungsgrad, Performance der zur Verfügung stehenden Leistungshalbleiter sowie die Anzahl der benötigten Bauteile bietet. Dies hat wiederum Einfluss auf Kosten und Platzbedarf. Der TNPC-Inverter liegt zwar vom Wirkungsgrad her im Bereich einer konventionellen B6-Brücke, führt allerdings zu wesentlich geringeren Leistungsverlusten im Motor sowie verbessertem EMV-Verhalten (elektromagnetische Verträglichkeit).



**Abbildung 7: Vergleich der Phasenspannungen von TNPC und B6-Brücke**

Abbildung 7 zeigt anschaulich den Vorteil einer 3-Level TNPC Topologie gegenüber einer konventionellen 2-Level B6-Brücke bei den generierten Phasenspannungen. Beim 3-Level TNPC stehen pro Sinushalbwelle drei Spannungsniveaus zur Verfügung, um die Sinusspannung durch Modulation nachzubilden, bei der B6-Brücke sind es lediglich 0 V und die Maximal/Minimalspannung. Dadurch lassen sich Phasenströme generieren, die näher am idealen Sinusverlauf liegen, was in weiterer Folge die Verlustleistung verringert.

In Abbildung 8 ist der Unterschied bei den Leistungsverlusten noch einmal dargestellt, in Referenz zum idealen Sinus. Verglichen wurden hier die Verluste in unterschiedlichen Motorkomponenten, einmal für eine Ansteuerung mit B6-Brücke, die mit 60 kHz getaktet ist und einmal für einen TNPC-Inverter, der mit der halben Taktfrequenz, also mit 30 kHz angesteuert wird. Der TNPC-Inverter erlaubt es durch die 3-Level-Topologie, auch mit niedrigerer Taktfrequenz die Phasenströme hinreichend genau nachzubilden. Dabei bietet die geringere Taktfrequenz des TNPC-Inverters einen wesentlichen Vorteil für den Motor: es lassen sich die Ummagnetisierungsverluste deutlich reduzieren, was wiederum einen höheren Gesamtwirkungsgrad des integrierten Systems E-Motor + Wechselrichter bedeutet.

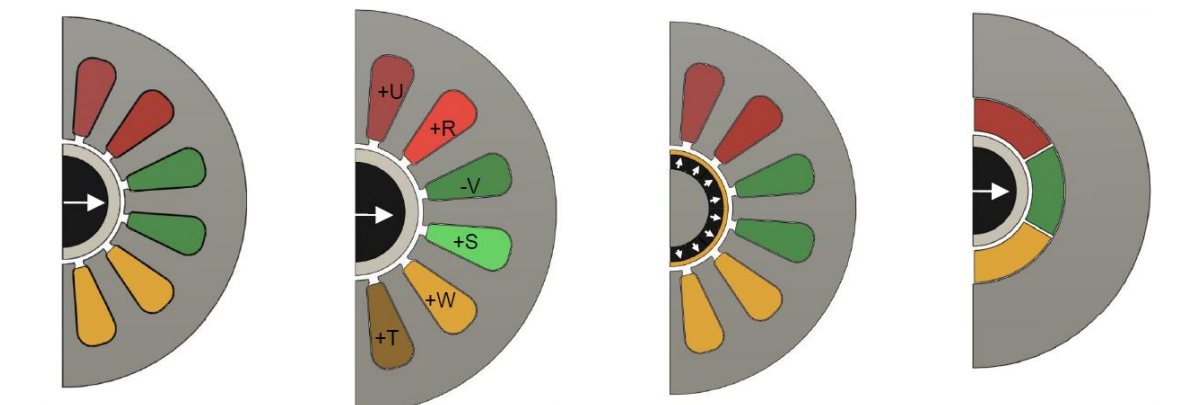


**Abbildung 8: Vergleich der Leistungsverluste zwischen B6-Brücke und TNPC**

Nach internen Konzeptstudien haben wir unseren externen Partner SciMo damit beauftragt, eine genauere Betrachtung der ausgewählten Motorkonzepte durchzuführen.



Referenz 3-phasig 3ph	Referenz 6-phasig 6ph	Oberflächenmagnete SPM	Luftspaltwicklung LS
Referenzmotor 3-phasig	6-phasig	Oberflächenmagnete segmentiert mit Kohlefaserbandage	Nuthöhe 11 mm



**Abbildung 9: Die untersuchten Motorkonzepte im Vergleich**

Neben dem 3-phasigen Referenzmotor wurden drei weitere Varianten untersucht, die im Folgenden kurz beschrieben werden.

- Die Ausführung als 6-phasige Maschine
- Eine Variante mit Stahlwelle, Oberflächenmagneten und dünnerer Kohlefaser-Bandage
- Stator mit Luftspaltwicklung

### **6-phasige Wicklung**

Die 3-phasige Wicklung hat einen räumlichen  $120^\circ$ -Versatz der Spulen. Die Spulen werden wiederum mit einer zeitlichen  $120^\circ$ -Phasenverschiebung bestromt. Hierdurch ergibt sich ein Drehfeld. In höherphasigen Maschinen wird dieser Winkel feiner unterteilt. Allerdings muss bei einer 6-phasigen Maschine eine asymmetrische Anordnung gewählt werden. Würde man eine 6-phasige Maschine mit  $60^\circ$ -Versatz aufführen, so würden die neu hinzugekommen Phasen genau gegenüber von schon existierenden Phasen stehen, nur eben mit umgedrehter Polarität. Bei der asymmetrischen Variante werden die neu hinzugekommenen Phasen daher um  $30^\circ$  verschoben.

### **Variante mit Oberflächenmagneten und cfk-Bandage**

Die Inconel-Bandage des Referenzmotors hat den Nachteil, dass die elektrische Leitfähigkeit zu hohen Wirbelstromverlusten führt. Zusätzlich ist die Inconel-Bandage recht dick (ca. 4 mm) was zusätzlich zu den hohen Verlusten beiträgt. Auch der magnetische Luftspalt ist insgesamt so groß, was höhere Ströme in der Statorwicklung erfordert.

Ein Rotordesign mit Kohlefaserbandage bietet an diesen Stellen Vorteile. Die Bandage ist dünner und hat eine niedrigere elektrische Leitfähigkeit. Um eine ausreichende Rotorsteifigkeit zu erzielen, wird eine zentrale Stahlwelle verwendet. Somit handelt es sich bei diesem Aufbau nicht mehr um einen Zentralmagneten, sondern einen Rotor mit Oberflächenmagneten. Die Magnete können zur Reduktion von Wirbelströmen radial und axial segmentiert werden. Kohlefaserbandagen haben eine niedrigere maximale Einsatztemperatur und sind in der Fertigung schwieriger aufzupressen. Zum einen ist der thermische Ausdehnungskoeffizient ungeeignet für einen Schrumpferverband und zum anderen ist die Hülse deutlich dünnwandiger. Die Magneten können prinzipiell radial oder diametral magnetisiert werden, wobei die diametrale Magnetisierung deutliche Vorteile bringt. Zur diametralen Magnetisierung ist es zielführend, die Rotoren in zusammengebautem Zustand mit einer Vorrichtung zu magnetisieren.

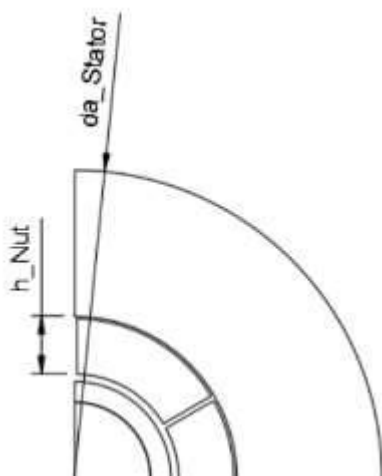
### ***Luftspaltwicklung***

Konventionell aufgebaute Motoren haben Statorzähne, welche den magnetischen Fluss führen und ein in die Nuten eingelegte Wicklung, welche den Strom führt. Bei einer Luftspaltwicklung wird auf dieses Konzept verzichtet, stattdessen wird der gesamte Raum mit Wicklung ausgefüllt. Ein Statorjoch kann weiterhin verwendet werden (Luftspaltwicklung). Wird auf das Statorjoch verzichtet, kann man diesen auch als eisenlosen Stator bezeichnen.

Luftspaltwicklungen haben in der Regel den Nachteil, dass bei gleichem Strombelag deutlich niedrigere Drehmomente erreicht werden. Auch der zusätzlich für die Wicklung bereitstehende Raum (ansonsten ausgefüllt mit Statorzähnen) kann dies bei weitem nicht kompensieren. Vorteilhaft ist hingegen, dass die Eisenverluste in den Statorzähnen entfallen und auch im Statorjoch und im Rotor niedrige Verluste auftreten, da die Flusspulsationen sehr viel niedriger ausfallen. In der Wicklung können allerdings höhere Wirbelstromverluste auftreten, da der magnetische Fluss nicht mehr durch Statorzähne an der Wicklung vorbeigeführt wird, sondern in diesem Fall die Wicklung komplett durchdringen muss.

Aus den durchgeführten Berechnungen und Simulationen der einzelnen Konzepte sowie deren Bewertungen ergab sich, dass die toroidale Luftspaltwicklung für unseren Anwendungszweck am besten geeignet ist. Hierbei wird der Wickelkopf nicht wie üblich zu einer anderen Nut geführt, sondern jede Nut bildet eine eigene Spule, welche auf kürzestem Weg um das Joch herumführt. Hierdurch kann bei sehr kurzen Aktivlängen eine kürzere Wickelkopflänge erzielt werden. Zudem können die außen am Joch vorbeigekühlten Wicklungsbereiche besser gekühlt werden.

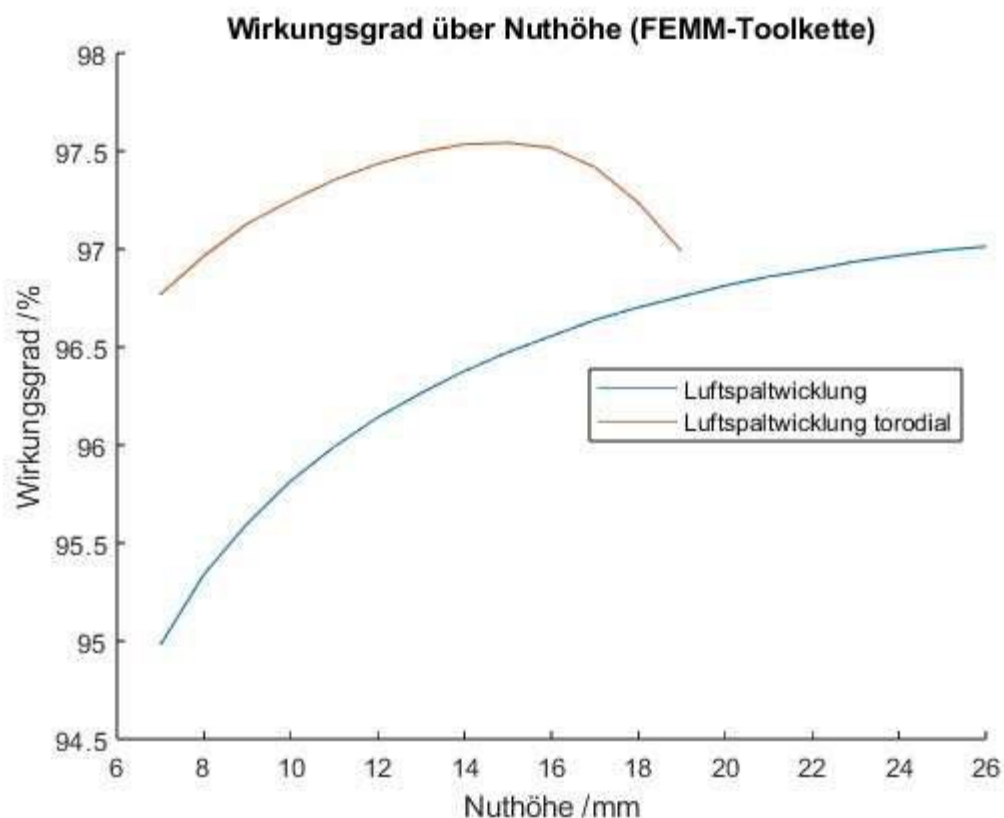
Das Konzept der toroidalen Luftspaltwicklung wurde anschließend einem Optimierungsprozess unterzogen. Die Geometrien waren durch die Integration im Turbolader großteils bereits vorgegeben, allerdings kann die Nuthöhe variiert werden. In der ersten Optimierung wurden, wie in Abbildung 10 dargestellt, der Parameter Nuthöhe ( $h_{\text{Nut}}$ ) variiert. Der Außendurchmesser  $da_{\text{Stator}}$  wird konstant gehalten.



**Abbildung 10: Optimierungsparameter im 2D-Schnitt**

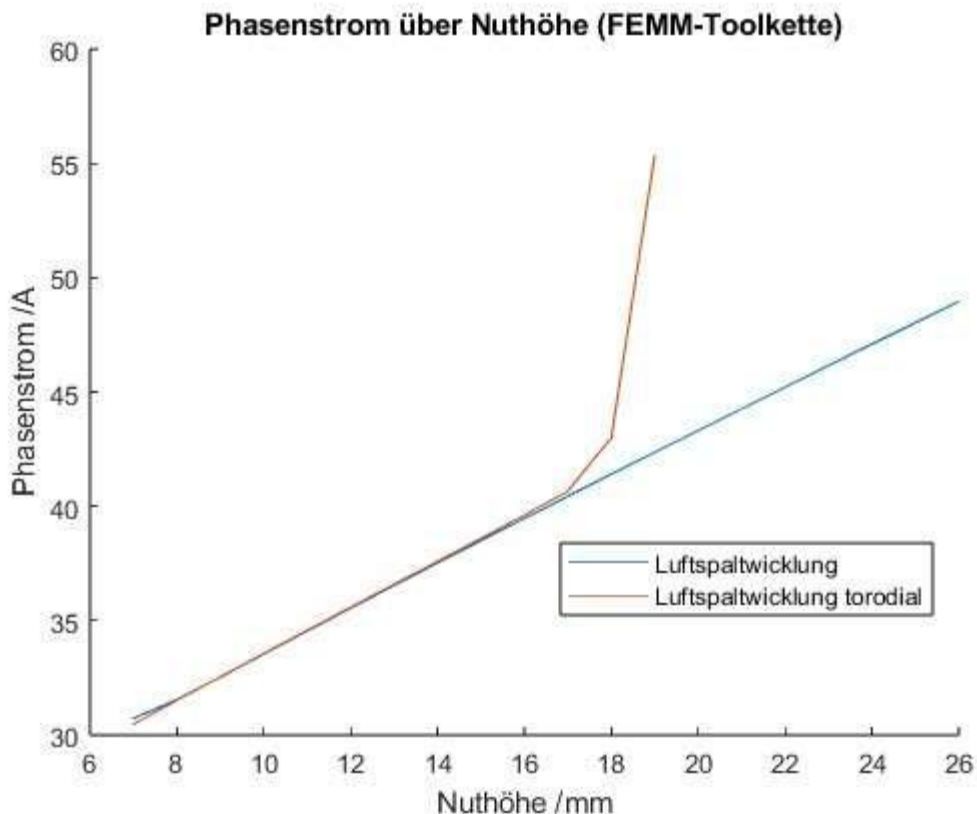
In der zweiten Optimierung wurde eine toroidale Wicklung angenommen und das Statorjoch so reduziert, dass der gesamte Außendurchmesser (inkl. Toroidalwicklung) konstant bleibt. Die Wickelkopflänge wurde jeweils neu berechnet. Der Füllgrad für die Toroidalwicklung wurde ebenfalls zu 36 % angenommen. Die stromführenden Leiter außerhalb des Statorjochs wurden in der elektromagnetischen FEM nicht berücksichtigt. Zielfunktion für beide Optimierungen war ausschließlich die Effizienz im nominalen Arbeitspunkt ( $>105.000$  U/min und  $>1,5$  Nm).

Durch die kürzeren Wickelköpfe erzielt die Toroidalwicklung höhere Wirkungsgrade, trotz schlankerem Statorjoch. Die optimale Nuthöhe liegt hierbei mit 14 mm deutlich niedriger als bei herkömmlichem Wickelkopf. Hier profitiert die Maschine bei den langen Wickelköpfen auch bei hohen Nuthöhen noch von der zusätzlichen Nutfläche. Dieser Zusammenhang ist in Abbildung 11 dargestellt.



**Abbildung 11: Variation Nuthöhe – Wirkungsgrad**

Mit zunehmender Nuthöhe sind für das gleiche Moment höhere Phasenströme notwendig. Die Windungszahl wurde in dieser Variation nicht angepasst, es ist jedoch davon auszugehen, dass der Leistungsfaktor ebenfalls abnimmt. Bei der Toroidalwicklung steigt ab einer Nuthöhe von 17 mm der Phasenstrom stark an. Ab diesem Wert ist das Statorjoch zu schlank und voll in der Sättigung. Den Zusammenhang zwischen Nuthöhe und Phasenstrom kann man Abbildung 12 entnehmen.



**Abbildung 12: Variation Nuthöhe - Phasenstrom**

Ein wesentlicher Teil der Bewertung der Konzepte war die Berechnung der Verluste und damit des Wirkungsgrades jedes Konzepts. In **Tabelle 1** ist ein Auszug aus den Berechnungsergebnissen angeführt.

Motorkonzept	Betriebspunkt	Verluste									η Best Case [%]
		Kupfer [W]	Statorblech			Rotorhülse [W]	Magnet [W]	Welle [W]	Luftspalt [W]	Total [W]	
			Hysteresis [W]	Wirbelstrom [W]	Zusatz [W]						
3ph (wsp=13)	BP3, Sinusstrom	300,5	12,6	160,9	48,6	185,6			81,4	789,6	95,74%
6ph (wsp=13)	BP3, Sinusstrom	279,0	12,4	156,4	47,4	138,8			81,4	715,4	96,13%
SPM (wsp=13)	BP3, Sinusstrom	241,6	18,6	282,9	69,6	74,3			81,4	768,4	95,85%
LS (wsp=38, h_nut=11mm)	BP3, Sinusstrom	973,0	1,6	19,3	9,6	2,4			81,4	1087,3	94,23%
LS N52UH (wsp=33, h_nut=11mm)		560,8	1,6	19,3	9,6	2,4			81,4	675,1	96,34%

**Tabelle 1: Auszug aus Ergebnistabelle mit sinusförmigem Strom**

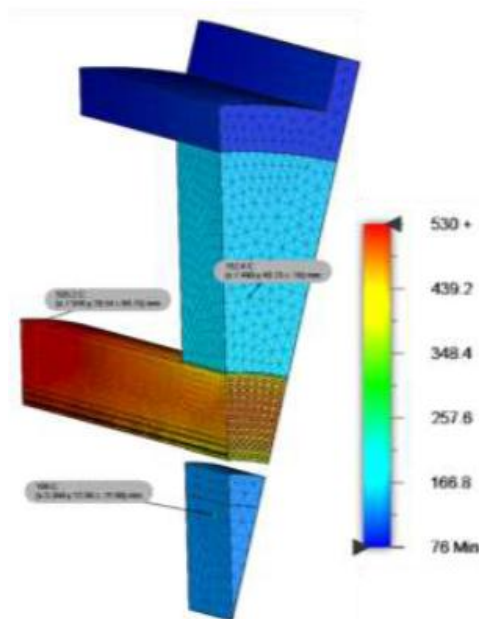
Die dreiphasige Referenzmaschine hat für solche eine kleine Baugröße schon recht hohe Verluste. Die Verluste im Stator teilen sich auf in Kupferverlusten mit 301 W in BP3 und Statorisenverlusten von 222 W. Die Verluste in der Inconel-Bandage sind wie erwartet sehr hoch für solch ein kleines Rotorvolumen.

Die 6-phasige Wicklungsvariante führt in hingegen allen Verlustarten zu einer Verbesserung, wobei die Rotorverluste am meisten profitieren und bei den Statorisenverlusten der Unterschied marginal ist.

Die Variante mit Oberflächenmagneten und einer Bandage aus kohlefaserverstärktem Kunststoff hat wie erwartet deutlich niedrigere Rotorverluste. Im Vergleich zur 6-phasigen Variante sind die Rotorverluste ungefähr halbiert. Die Kupferverluste sind auch niedriger, allerdings sind in dieser Variante die Statorisenverluste deutlich höher, wahrscheinlich auf Grund des geringeren elektromagnetischen Luftspaltes. Allerdings sind Statorisenverluste am besten zu kühlen und auch der Einsatz eines dünneren Elektrobleches würde von den Kosten nicht allzu stark ins Gewicht fallen.

Die Luftspaltwicklung hingegen zeigt sehr niedrige Rotorverluste und auch niedrige Statorisenverluste. Allerdings sind die Kupferverluste hier um den Faktor 3 höher. Hier müssen mit geeigneten Maßnahmen die Wicklungstemperaturen reduziert werden. Zum Beispiel durch den Einsatz von NdFeB Magneten, welche bereits fast zu einer Halbierung der Kupferverluste führen. Oder durch Optimierung der Nuthöhe, durch Erhöhung des Kupferfüllgrades, durch Verkürzung der Wickelkopflänge (z.B. Toroidalwicklung) und durch bessere thermische Anbindung der Wicklung an den Stator oder das Gehäuse.

Die thermische Berechnung wurde mit etwas kürzeren Wickelköpfen und damit auch etwas niedrigeren Kupferverlusten durchgeführt. Die Ergebnisse geben dennoch einen guten Einblick in die zu erwartenden Temperaturen. In den Berechnungen wurde keine thermische Anbindung der Wickelköpfe modelliert. Daher treten in den Wickelköpfen hohe Temperaturen auf. Insgesamt sind bei allen Varianten ohne Kühlluft die Rotortemperaturen sehr hoch. Mit Kühlluft sind die Rotortemperaturen für alle Varianten erträglich, wobei die dreiphasige Referenzmaschine mit 219 °C am höchsten ist, der Sprung auf 6-phasig führt zu Temperaturen von 191 °C, die Maschine mit Oberflächenmagneten hat mit 163 °C schon Temperaturen, welche NdFeB Magneten erlauben würden. Die Luftspaltwicklung hat mit Kühlluft Temperaturen von 109 °C, was ein guter Bereich für NdFeB-Magnete ist.



**Abbildung 13: Thermische Berechnung der Luftspaltwicklung SmCo-Magnet im nominalen Betriebspunkt**



Folgendes Fazit lässt sich aus den Konzeptstudien ziehen:

Die 6-phasige Variante bringt motorseitig nur Vorteile, die Verbesserungen sind allerdings überschaubar in einer Größenordnung von ca. 10% niedrigeren Verlusten. Die Variante mit Oberflächenmagneten profitiert bezüglich den Wirbelstromverlusten in der Bandage deutlich von der dünneren Bandage und der niedrigeren elektrischen Leitfähigkeit. Die Verluste werden hier ungefähr halbiert im Vergleich zur 6-phasigen Variante. Die Statoreisenverluste sind deutlich höher, können allerdings gut gekühlt werden und könnten auch über dünnere Elektrobleche gesenkt werden. Das Entwicklungsrisiko besteht hier eher bei der Rotorfestigkeit, den biegekritischen Drehzahlen, der Fertigung und dem Zusammenbau des Rotors, sowie der Dauerhaltbarkeit der Kohlefaser-Bandage.

Die Variante mit Luftspaltwicklung unterscheidet sich in ihren Eigenschaften deutlich von den anderen Varianten. Die frequenzabhängigen Verluste sind hier sehr niedrig, speziell auch im Rotor. Dafür sind die Verluste in der Wicklung so hoch, dass hier eine Vielzahl von Verbesserungen notwendig ist, um auf die geforderte Leistungsanforderungen zu kommen. Dies umfasst z.B. den Wechsel auf NdFeB-Magneten, welche allerdings auch deutlich niedrigere Magnettemperaturen erfordern. Zusätzlich muss der Füllgrad erhöht, die Wickelkopflänge reduziert und die thermische Anbindung der Wicklung deutlich erhöht werden, um die Wicklungstemperatur weit genug abzusenken. Trotz dieser Herausforderungen untersuchen wir diese Variante wegen des hohen Potentials weiter.

Die Luftspaltwicklung hat den Vorteil, dass der schlecht zu kühlende Rotor exzellent niedrige Verluste aufweist. Die Luftspaltwicklung hat aber den Nachteil hoher Kupferverluste. Zudem ist die Luftspaltwicklung fertigungstechnisch eher ein Exot, zumindest wenn man von dickwandigeren Wicklungen spricht. Hier muss daher untersucht werden, welche Füllgrade mit der Luftspaltwicklung industrialisierbar erreicht werden können. Gelingt es, die Füllgrade signifikant zu steigern, dann fällt die Konzeptentscheidung klar auf die Luftspaltwicklung. Gerade die Toroidalwicklung, hat ein hohes Potential dazu hohe Füllgrade und kürzere Wickelkopflängen zu ermöglichen. Ebenfalls muss bei der Wicklung darauf geachtet werden, Wirbelströme in der Wicklung zu vermeiden. Dies erfordert einerseits einen filigranen Wickeldraht (z.B. 0,3 mm oder kleiner), zum anderen heißt dies aber auch, Wirbelströme in parallelen Leiterschleifen zu vermeiden.

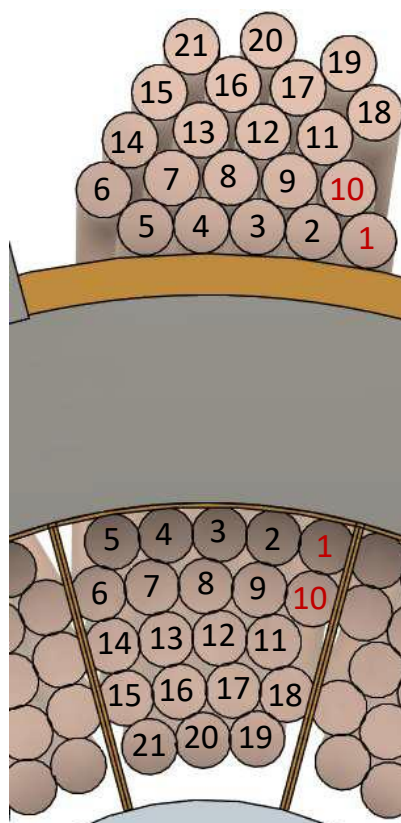
Um das Stator-konzept weiter zu untersuchen, wurden von unserem Partner SciMo Wickelversuche durchgeführt. Wickelversuche dienen dazu, die Leistungsfähigkeit, Zuverlässigkeit und Effizienz von Motorspulen zu bewerten und zu optimieren.

Die Hauptziele der Wickelversuche waren:

- Optimierung der Spulenkonstruktion durch Kombination verschiedener Drahtdurchmesser, Drahtbündelungen, Wickelmuster und Spulenformen.
- Überprüfung der elektrischen Eigenschaften wie beispielsweise den elektrischen Widerstand, die Induktivität, die Kapazität und den Isolationswiderstand. Durch die Analyse dieser Eigenschaften können potenzielle Probleme identifiziert und behoben werden, um die elektrische Leistungsfähigkeit der Spulen zu verbessern.

- Validierung von Fertigungsprozessen durch Bewertung der Wickelqualität, der Drahtisolierung, der Drahtspannung und anderer wichtiger Parameter.
- Thermalbetrachtung: Motorspulen erzeugen während des Betriebs Wärme, und eine effiziente Wärmeableitung ist entscheidend für die Zuverlässigkeit und Lebensdauer des Motors. Ein wesentlicher Betrachtungspunkt war die ausreichende Kühlung der Spulen durch entsprechend dimensionierte Luftspalte.
- Optimierung des Wickelprozesses sowie der eingesetzten Werkzeuge und Materialien, um eine mögliche spätere Serienfertigung zu begünstigen.

Jede Motorspule besteht aus 21 Windungen. Diese Zahl ergibt sich aus den elektrischen Anforderungen an den Motor und war somit fest vorgegeben. Die Anordnung der Wicklungen ist jedoch nicht beliebig. Es muss zum Beispiel darauf geachtet werden, dass benachbarte Windungszahlen nicht zu weit auseinanderliegen, da sonst die Spannungsdifferenzen zwischen den Windungen zu hoch werden können und die Gefahr eines Spannungsdurchschlags steigt.



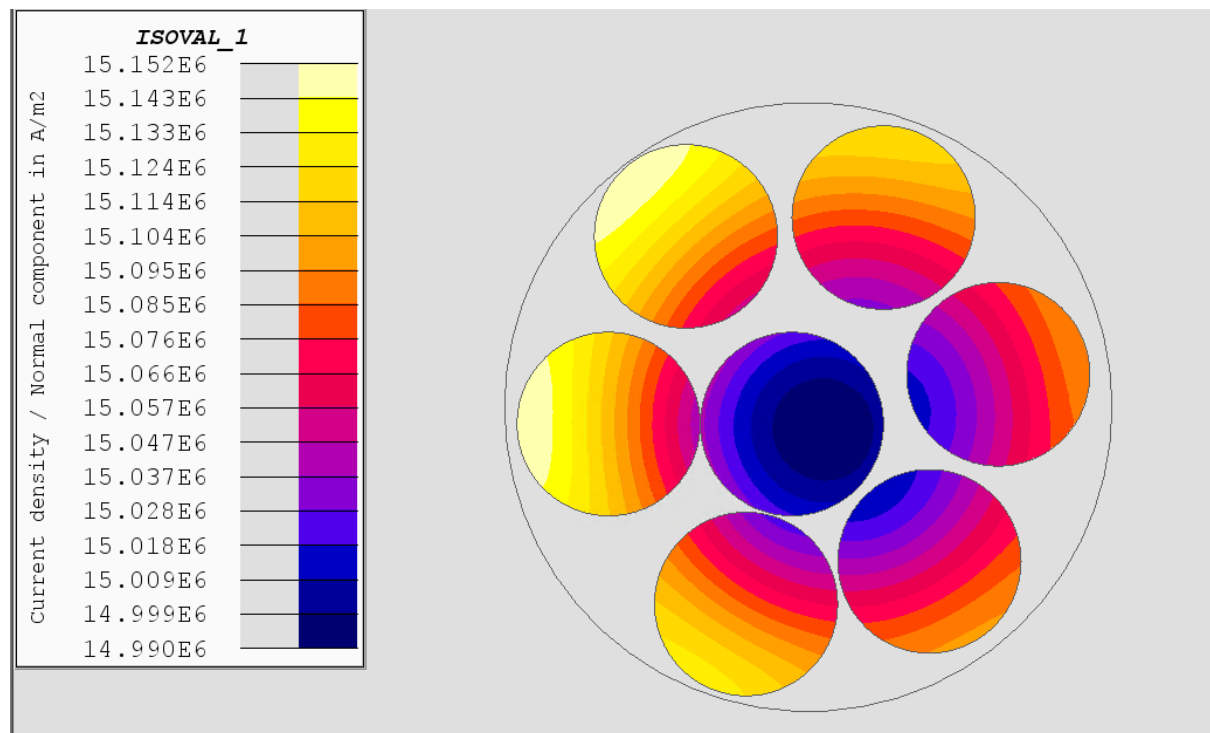
**Abbildung 14: Wicklungsanordnung in einer Statorspule**

Abbildung 14 zeigt die Anordnung der 21 Wicklungen in der Statorspule. Die größte Spannungsdifferenz ergibt sich zwischen Wicklung 1 und Wicklung 10. Dies ist jedoch noch tolerierbar.

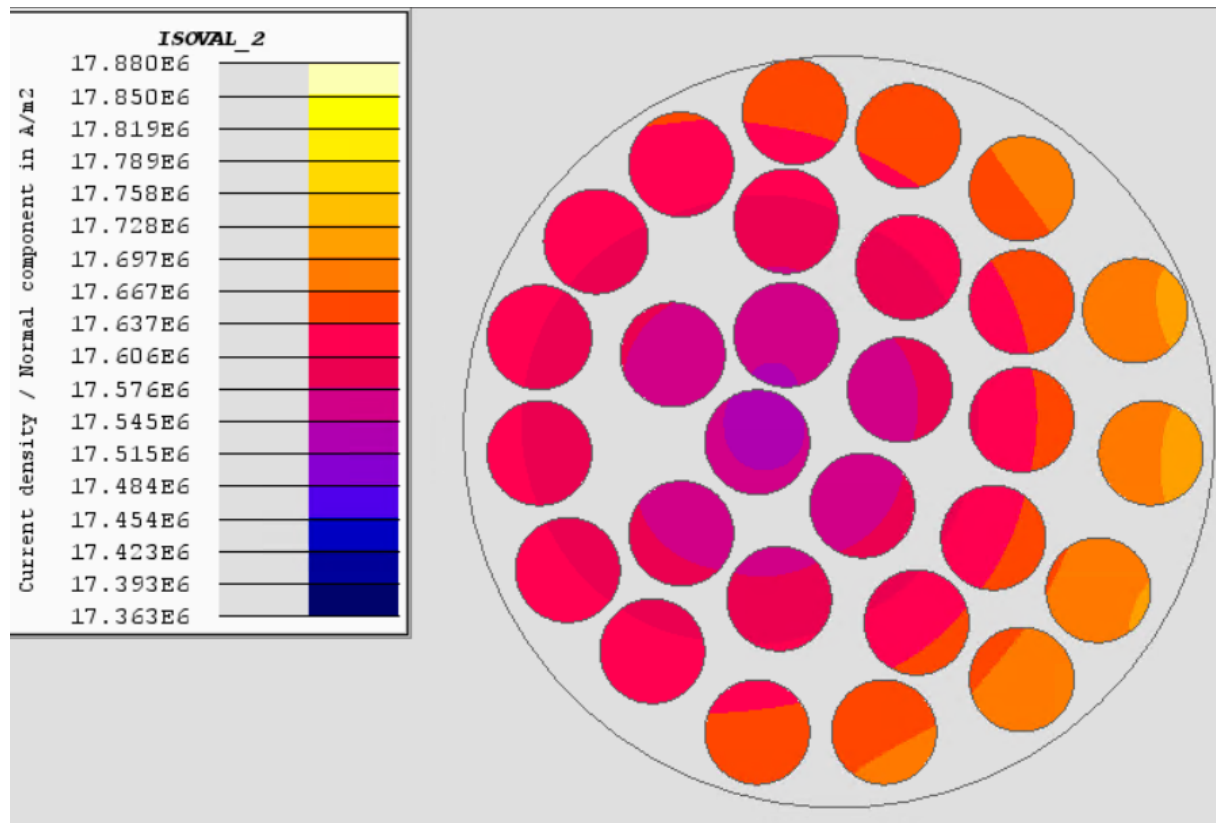
Eine wesentliche Frage bestand darin, ob für die Spule Einzeldrähte oder Drahtbündel (Litzen) verwendet werden sollen. Der Vorteil von Einzeldrähten besteht in einer einfacheren Handhabung sowie in einer geringeren Wahrscheinlichkeit von Drahtbrüchen. Der Vorteil von Litzen hingegen liegt in einer höheren Flexibilität sowie einer besseren Wärmeableitung durch die im Verhältnis größere Oberfläche des Drahtbündels.

Für unseren Fall war jedoch noch ein anderer Aspekt ausschlaggebend. Aus einer bei Silver Atena durchgeführten Voruntersuchung ergab sich, dass eine Wicklung aus Einzeldrähten zu hohe Wechselstromverluste des Motors verursacht. Die Gründe dafür liegen im Skin-Effekt sowie im Proximity-Effekt, die dazu führen, dass der Strom tendenziell entlang der Oberfläche der Leiter fließt und nicht gleichmäßig im gesamten Querschnitt verteilt ist. Litzen, die aus mehreren dünnen Drähten bestehen, haben im Allgemeinen einen geringeren Skin-Effekt und Proximity-Effekt als einzelne dicke Drähte, da dünnere Drähte eine größere Oberfläche im Verhältnis zu ihrem Volumen haben.

Die folgenden beiden Abbildungen zeigen eine Simulation der Stromdichte durch den Litzenquerschnitt, einmal mit einem Bündel von 7 parallelen Drähten mit je 0,8 mm Durchmesser (und einmal mit einem Bündel von 28 parallelen Drähten mit je 0,375 mm Durchmesser). Die theoretischen Füllfaktoren sind 59 % für die 7-drähtige Litze bzw. 56 % für die 28-drähtige Litze.



**Abbildung 15: Stromdichte für ein Bündel von 7 Drähten mit 0,8 mm Durchmesser**



**Abbildung 16: Stromdichte für ein Bündel von 28 Drähten mit 0,37 mm Durchmesser**

Die Untersuchungen wurden für verschiedene Bündelungen und Drahtdurchmesser durchgeführt. Dabei erwies sich die Kombination von 28 Drähten mit je 0,37 mm Durchmesser als bester Kompromiss zwischen übertragbarer Leistung und Verlusten.

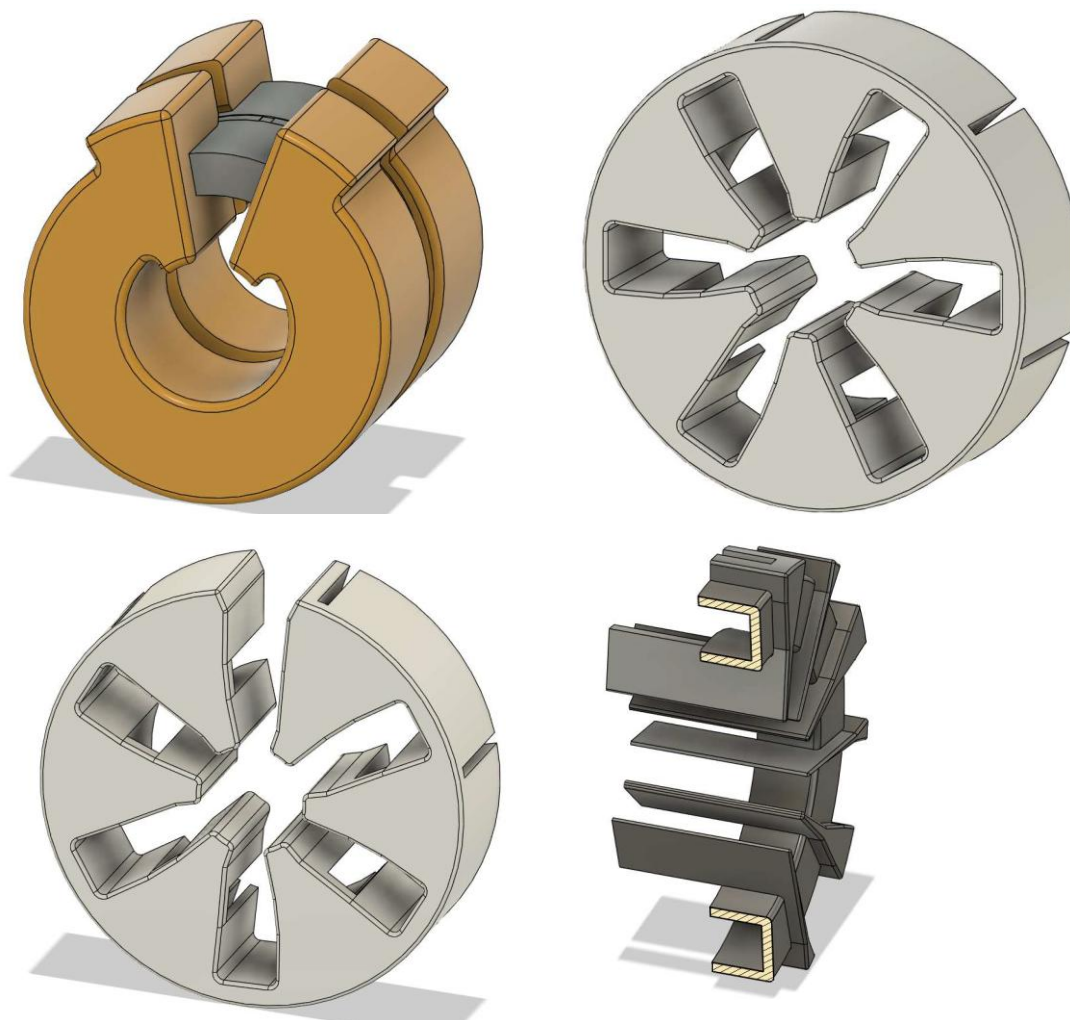
Eine weitere wesentliche Fragestellung ist jene des Füllfaktors. Dieser drückt das Verhältnis zwischen dem Volumen des Drahtmaterials, das tatsächlich in der Spulenwicklung verwendet wird, und dem Gesamtvolumen der Spulenform aus. Ein höherer Füllfaktor ermöglicht eine bessere Nutzung des verfügbaren Raums innerhalb der Spulenform, was sich nicht zuletzt in einer geringeren Stromdichte und daraus resultierend geringeren Ohm'schen Verlusten niederschlägt. Diese führen in weiterer Folge zu einem höheren Motorwirkungsgrad und verringertem Kühlbedarf. Aus diesen Gründen ist man im Motordesign bestrebt, einen möglichst guten Füllfaktor in der Spule zu erzielen.

In Bezug auf den erreichbaren Füllfaktor sind Litzen gegenüber Einzeldrähten im Nachteil. Einzeldrähte haben im Allgemeinen einen höheren Füllfaktor als Litzen, da sie eine engere Wicklung ermöglichen. Bei Litzen lässt sich nicht vermeiden, dass zwischen den dünnen Litzendrähten ein gewisser Zwischenraum verbleibt, der nicht mit Drahtmaterial gefüllt ist.

Der nächste Schritt bestand darin, ein geeignetes Wickelwerkzeug zu konstruieren, damit die einzelnen Spulen korrekt auf das ringförmige Statorjoch gewickelt werden können. Beim idealen Wickelwerkzeug wird nach einem Kompromiss aus Stabilität, Funktion und montagegerechtem Design gesucht. Es stellt sich unter anderem die Frage nach einem Werkzeug für alle Spulen oder mehrere unterschiedliche Werkzeuge;



wiederverwendbaren oder verlorenen Werkzeugen; offenen Werkzeugen oder solche, wo der Draht durchgefädelt werden muss; Werkzeugen, die für jede Wicklung mitgedreht werden müssen oder ortsfesten Werkzeugen.



**Abbildung 17: Verschiedene Entwürfe für Wickeltools**

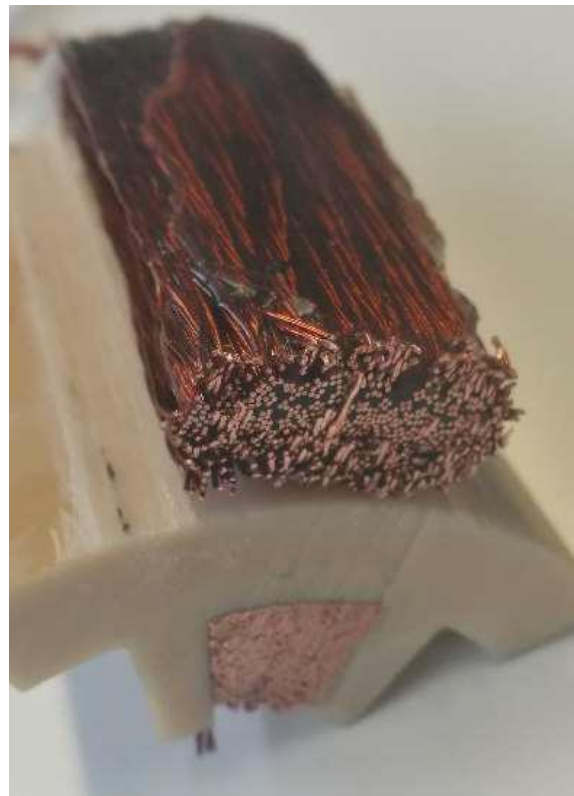
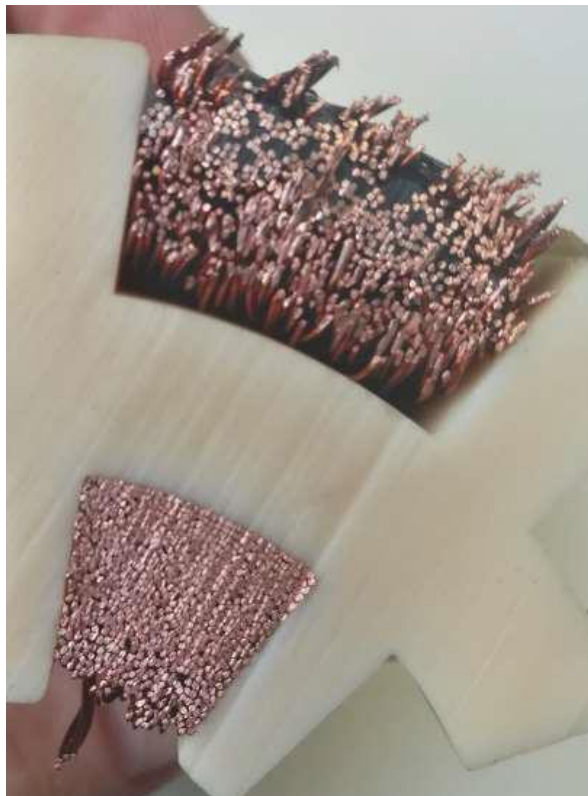
Abbildung 17 zeigt unterschiedliche Wickelwerkzeug-Konzepte, die näher betrachtet wurden. Die Entscheidung fiel für das links oben gezeigte Wickelwerkzeug, das einen guten Kompromiss aus Stabilität und Handhabbarkeit darstellte. Für eine Serienfertigung wäre das Werkzeugen weniger gut geeignet, da für jede der sechs Spulen ein unterschiedliches Werkzeug benötigt wird, aber für die Prototypenherstellung erwies es sich als ideal.



**Abbildung 18: Wickelversuche mit 28er-Bündeln (links) sowie 16er-Bündeln (rechts)**

Obwohl die theoretische Betrachtung ein Optimum von 28-drähtigen Litzen ergab (siehe oben), wurden Wickelversuche mit unterschiedlichen Drahtbündelungen und Litzengeometrien (rund, gewalzt) durchgeführt, um die Fertigbarkeit sowie den erzielbaren Gesamtfüllfaktor zu untersuchen. Abbildung 18 zeigt beispielhafte Bilder aus zwei Wickelversuchen mit 28er-Bündeln mit 21 Windungen bzw. 16er-Bündeln mit 42 Windungen.

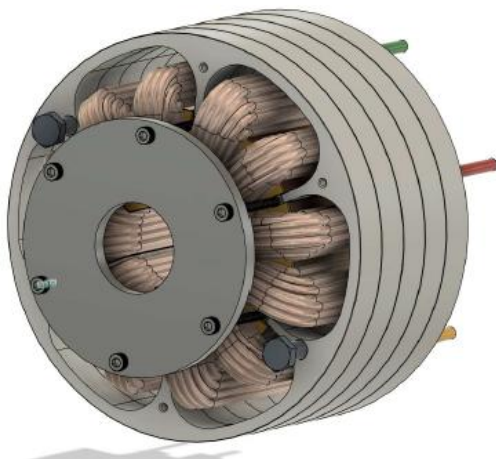
Nach den Wickelversuchen wurden auch Imprägniertests durchgeführt. Die gewickelten Spulen werden nach dem Wickeln imprägniert. Dies erfüllt mehrere Zwecke. Zum einen schützt es die Spulen vor mechanischen Beschädigungen, nicht zuletzt dadurch, dass es verhindert, dass sich die Windungen durch die auftretenden starken Lorentzkräfte bewegen und gegeneinander reiben würden; zum anderen verbessert die Imprägnierung die elektrische Isolation und die Wärmeabfuhr. Die Imprägniertests sollten untersuchen, welche Imprägniermethode sich am besten eignet und ob die Imprägnierung die Spule gut durchdringt. In Abbildung 19 sind Schnitte durch die Spulen gezeigt, um diese Aspekte zu analysieren.



**Abbildung 19: Schnitte durch die Spulen nach aufgebrachter Imprägnierung**

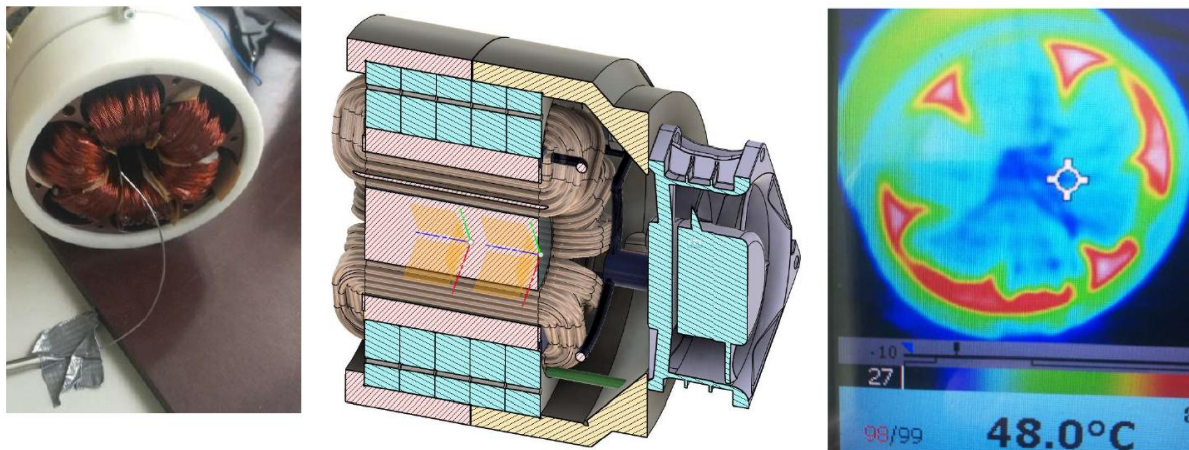
Die Wickelversuche und die Imprägniertests waren erfolgreich und führten dazu, dass für beide Techniken eine gute Methode gefunden wurde, die Funktion und prototypische Umsetzbarkeit miteinander vereinen.

Abbildung 20 zeigt einen ersten aufgebauten Stator-Prototyp, mit dem elektrische und thermische Tests durchgeführt wurden. Dieser Prototyp weist eine Segmentierung des Gehäuses in 13mm dicke Segmente auf.



**Abbildung 20: Erster Stator-Prototyp mit 13 mm-Segmentierung des Statorgehäuses**

Die Segmentierung dient dazu, die entstehenden Wirbelströme im Gehäuse zu begrenzen. Diese erzeugen erhebliche Wirbelstromverluste, welche zu einer Effizienzminde- rung des Motors und damit einhergehend einer starken Erwärmung führen.



**Abbildung 21: Thermaltests mit dem ersten Statorprototypen**

Bei den durchgeführten Thermaltests (Versuchsaufbau siehe Abbildung 21) zeigte sich eine zu starke Erwärmung des Statorjochs auf bis zu 152 °C. Dies wurde durch die Wirbelströme im Statorgehäuse hervorgerufen, weswegen die Segmentierung reduziert wurde. Statt 13 mm starken Segmenten wurden nun 1 mm dicke Blechsegmente verwendet und zu einem Gehäusepaket verbunden. Dies reduzierte die Wirbelströme um 30 % und verringerte die Jochtemperatur auf einen akzeptablen Wert von 89 °C.

Nachdem mit der ersten Generation des Stators Tests bei Silver Atena durchgeführt wurden, wurden nochmal einige kleinere Designänderungen vorgenommen.

Eine Anpassung betraf das Anbringen von Statorösen, kleinen Laschen am äußeren Rand des Stators zur axialen Fixierung im Motorgehäuse. Diese erfüllen mehrere Zwecke. Sie erleichtern die Montage des Stators im Gehäuse, da sie eine klare Positionierung und Fixierung ermöglichen. Außerdem helfen die Statorösen, Bewegungen während des Betriebs zu vermeiden. Ohne eine geeignete Fixierung könnte sich der Stator unter den Kräften, die während des Betriebs auf ihn wirken (z.B. durch Vibrationen, thermische Ausdehnung oder magnetische Kräfte), axial verschieben. Diese Bewegungen können zu einer Fehljustierung des Luftspalts zwischen Stator und Rotor führen, was die Effizienz und den Betrieb des Motors beeinträchtigen kann. Statorösen verhindern solche axialen Verschiebungen und sorgen für eine stabile Positionierung.

Eine weitere Designänderung betraf den Ersatz des Isolationspapiers durch Isolationskappen. Während beide Technologien zur elektrischen Isolierung der Wicklungen im Stator eines Elektromotors dienen, haben Isolationskappen gegenüber Isolationspapier einige Vorteile. Durch die Fertigung aus Kunststoff bzw. Kunstharz sind Isolationskappen robuster als Isolationspapier, was sie insbesondere in der Umgebung mit hohen



Vibrationen und thermischen Belastungen widerstandsfähiger macht. Die Dicke der Isolationskappen schützt auch besser gegen elektrische Durchschläge, insbesondere bei höheren Spannungen. Außerdem bieten die Kappen Fertigungsvorteile, da die vorgefertigten Formen genau auf die Statornuten passen und somit weniger anfällig gegenüber Montagefehlern sind, im Gegensatz zu Isolationspapier, das leicht verrutschen oder falsch platziert werden kann. Isolationspapiere haben Vorteile was Kosten, Platznutzung und Flexibilität betrifft, aber für unseren Fall erwiesen sich die Isolationskappen als geeigneter.

Abbildung 22 zeigt den Stator-Prototyp der zweiten Generation während der Wicklung der Spulen.



**Abbildung 22: Wicklung eines aktualisierten Stator-Prototypen**



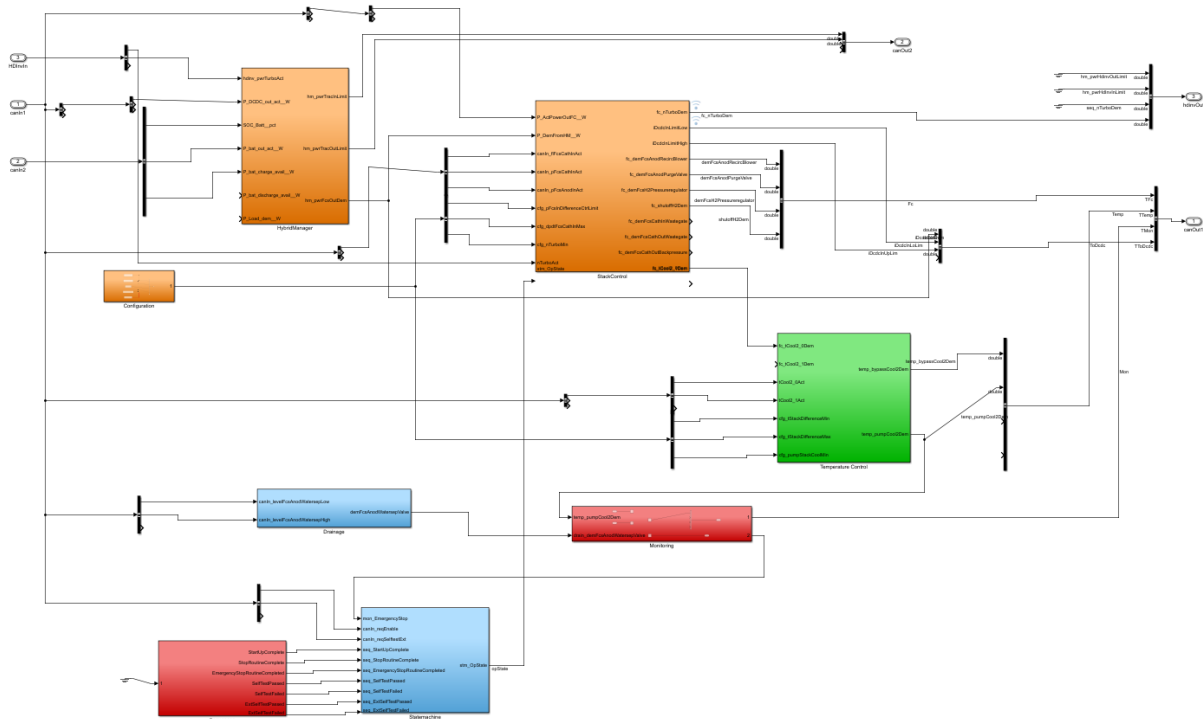
**Abbildung 23: Vergleich zwischen dem ersten Stator-Prototypen (links) und dem aktualisierten Stator-Prototypen (rechts)**

Abbildung 23 zeigt einen Vergleich zwischen den beiden Stator-Prototypen. Für die leichtere Systemintegration wurde bei den neuen Prototypen auch ein Stecker für die Phasenanschlüsse eingebaut.



### 2.3 AP 2.2 „Konzept integriertes Steuer- und Regelsystem“

Das Regelungssystem des BZ-Turbolader ist eng verknüpft mit der Entwicklung des Modells für das Zentrale Steuergerät (ZSG), wie in Abschnitt 2.2 beschrieben.



**Abbildung 24: Simulationsmodell des ZSG**

Wie oben beschrieben, nimmt das ZSG eine sehr zentrale Rolle im System ein. Die Hauptkomponenten sind hier der Hybrid Manager (orangefarbene Komponente in der Mitte) und die Stack Control (orangefarbene Komponente rechts daneben). Der Hybrid Manager wurde von Silver Atena modelliert, die Stack Control von TUC.

Die Hauptziele für das Design des Hybrid Managers (HM) sind:

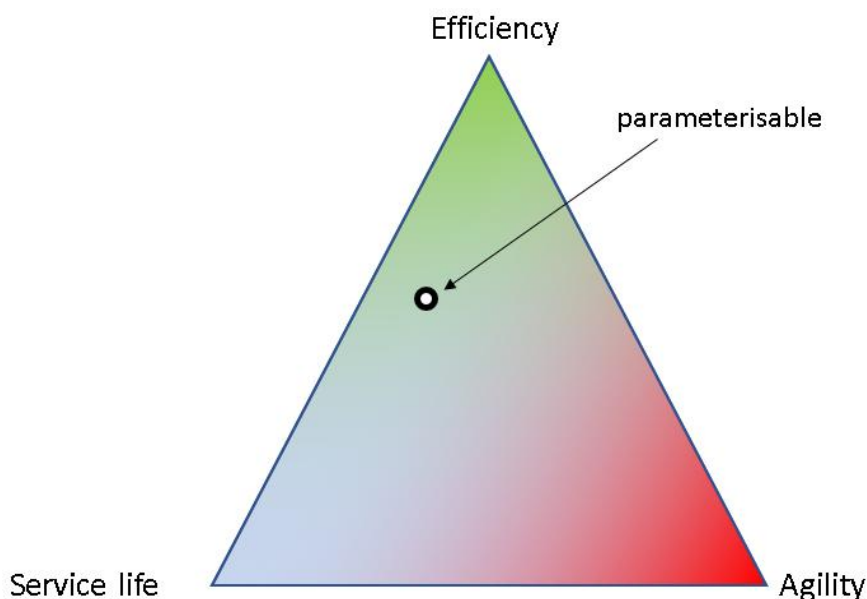
- Die Batterie über einem unteren Schwellenwert für den Ladezustand (SOC) zu halten, um genügend Reserven für eine Bergfahrt zu haben, bei der die Leistung der BZ allein nicht ausreicht (z. B. 50 % SOC).
- Die Batterie unter einem oberen Schwellenwert halten, um einer schnellen Alterung der Batterie entgegenzuwirken (z. B. 90 % SOC).



- Die Strategie sollte einen (parametrierbaren) SOC in der Mitte zwischen unterem und oberem Grenzwert bevorzugen. So sollte der durchschnittliche Leistungsbedarf bei einem SOC nahe der unteren Schwelle höher sein als bei einem SOC nahe der oberen Schwelle.
- Die Leistung, die in der mechanischen Fahrzeugbremse aufgrund der begrenzten Batterieladeleistung „vernichtet“ wird, muss minimiert werden (Minimierung der BZ-Leistung während der Rekuperation).
- Die Leistungsanforderung an das Brennstoffzellensystem ist möglichst konstant zu halten, um der Alterung der Brennstoffzellen entgegenzuwirken.
- Bei hohem Leistungsbedarf, bei dem die Batterie allein nicht ausreicht, ist so gut wie möglich mit der Brennstoffzellenleistung kompensieren.

Da die HM-Ziele in manchen Situationen im Widerspruch zueinander stehen können, müssen sie nach Prioritäten geordnet/abgewogen werden.

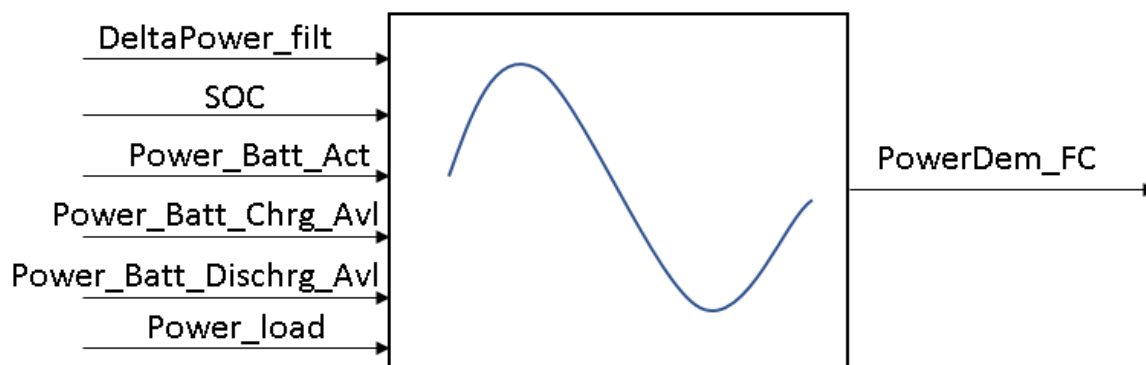
- Effizienz: Fokus auf Energieeinsparung. In manchen Situationen wird die vom Fahrer geforderte Leistung nicht vollständig genutzt; eine hohe Rekuperationsleistung kann auch zu einer häufigeren Leistungsanpassung der BZ (oder sogar zur Abschaltung) führen.
- Agilität: Fokus auf Leistung, wenn technisch machbare Leistung bereitgestellt wird. Eine verstärkte Alterung der BZ durch ständige Leistungsänderungen der BZ wird in Kauf genommen. Auch die Überschreitung der SOC-Obergrenze wird akzeptiert.
- Nutzungsdauer: Fokus auf Materialschonung (weitestgehende Vermeidung von BZ- und Batteriealterung, die auch zu erhöhter De-Rating-Einstufung des Fahrerwunsches oder zu kurzfristiger Energieverschwendung führen kann).



**Abbildung 25: Darstellung der Beziehung zwischen den Auslegungszielen des Hybrid Managers**

Die berechnete Leistungsanforderung an den BZ muss versuchen, den SOC in einem bevorzugten Bereich zu halten, in dem **DeltaPower\_filt** (die gefilterte Leistungsdifferenz, die der BZ zu wenig oder zu viel liefert, um die Batterie weder zu entladen noch zu laden) so nahe wie möglich bei null liegt.

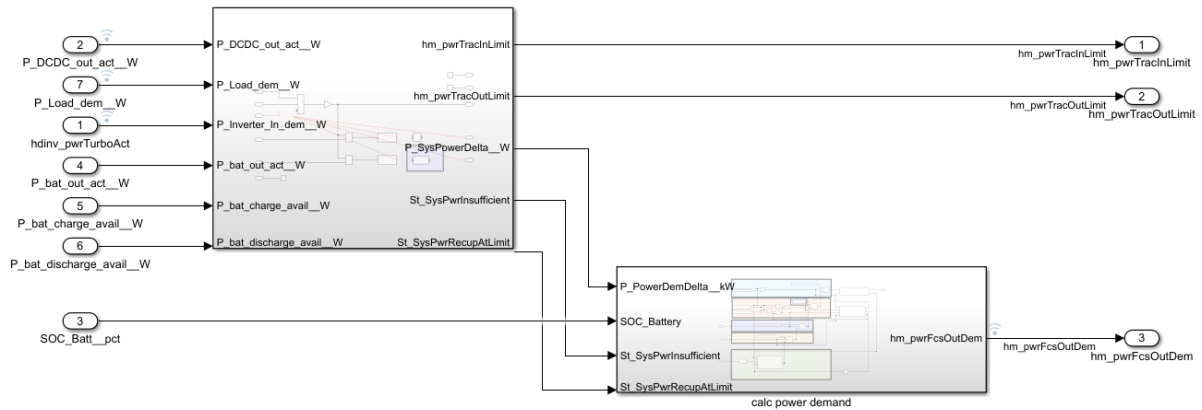
Für Grenzwerte, bei denen die Batterie ihre Entladegrenze (**Power\_Batt\_Dischrg\_Avl**) oder Ladegrenze (**Power\_Batt\_Chrg\_Avl**) erreicht, muss die Leistungsanforderung versuchen, die aktuelle Batterieleistung (**Power\_Batt\_Act**) unabhängig vom SOC innerhalb dieser Grenzen zu halten.



**Abbildung 26: Input- und Outputparameter des Hybrid Managers**

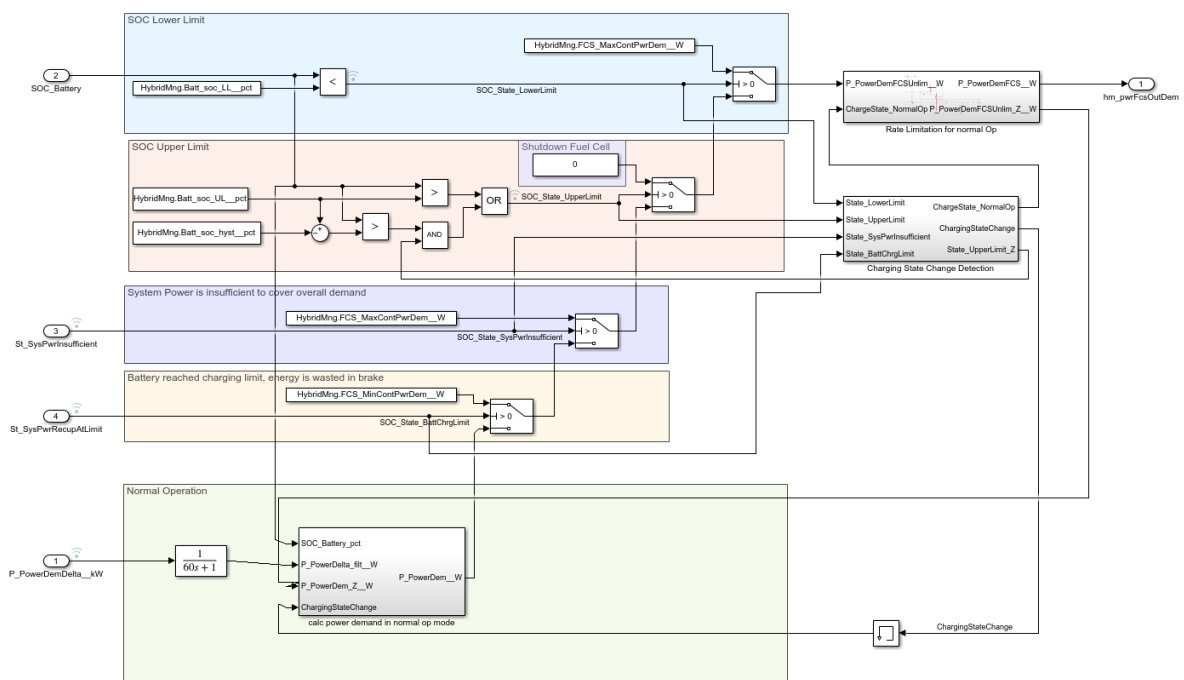


Im Simulink-Modell ist diese Funktionalität auf zwei Untermodelle verteilt, wie im folgenden Diagramm in Abbildung 27 dargestellt.

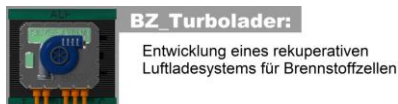


**Abbildung 27: Simulationsmodell des Hybrid Managers**

Das linke Teilmodell berechnet die Leistungsdifferenz, indem es die Ausgangsleistung des DCDC-Wandlers, den Lastbedarf und die Eingangsleistung des Wechselrichters vergleicht. Die Leistungsdifferenz wird dann in ein komplexeres Modell (unten rechts dargestellt) eingegeben, das den Leistungsbedarf des Brennstoffzellenstapels berechnet. Dieses Modell ist in Abbildung 28 abgebildet.



**Abbildung 28: Modell zur Berechnung der Leistungsanforderung**



## 2.4 AP 2.3 „Prüfstandskonzept“

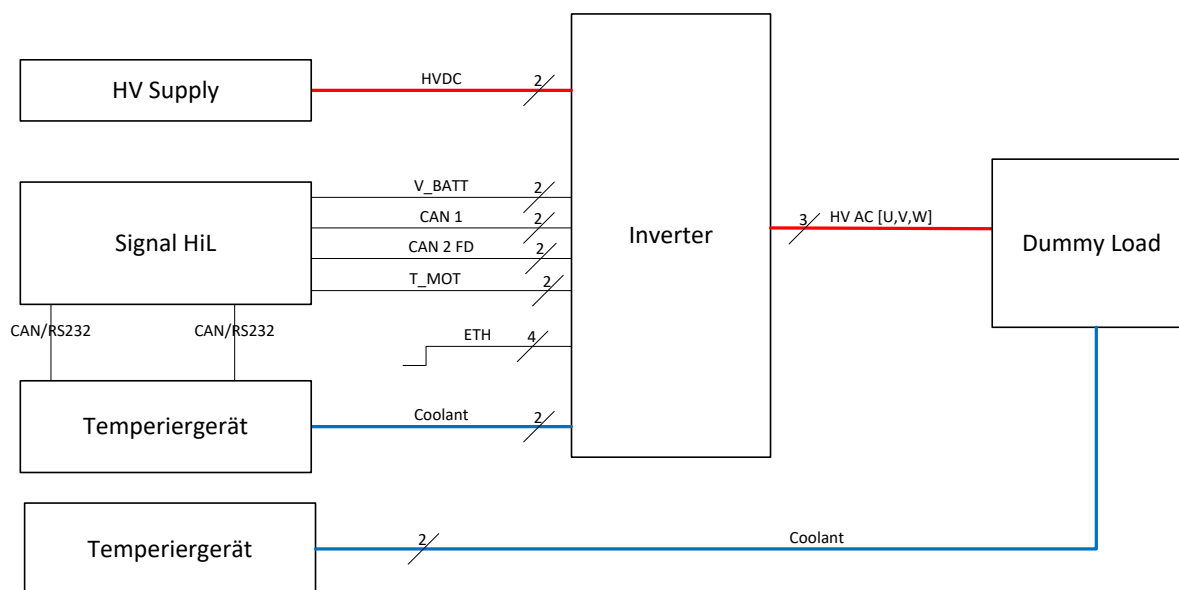
Herausforderungen für die Konzeptionierung des Prüfstands waren die Vielzahl der Komponenten, deren Zusammenwirken auf dem Prüfstand getestet werden musste sowie Drehzahlen bis zu  $125.000 \text{ min}^{-1}$ . Insbesondere die Drehmomentmessung bei diesen hohen Drehzahlen ist schwierig und erfordert spezielle, sehr teure Messmittel. Aus diesem Grund wurde für die finale Validierung eine Kooperation mit der Universität der Bundeswehr München (UniBW) eingegangen, welche über einen geeigneten Motorprüfstand verfügt.

Insgesamt sieht unser Testkonzept eine dreistufige Systemvalidierung vor:

- 1) Inbetriebnahme des Hochdrehzahl-Inverters mit einem bekannten Motor von IHI. Dies findet bei uns im Haus auf der Motorprüfbank statt.
- 2) Test des entwickelten Motors ohne Last. Hier werden keine hohen Drehmomente gefahren, aber der Drehzahlbereich kann getestet werden. Auch dieser Test kann noch bei uns im Haus durchgeführt werden.
- 3) Test der integrierten BZ-Turbolader-Komponente aus Motor und Inverter inklusive Leistungsmessung an der Motorprüfbank der UniBW.

Der Vorteil dieser schrittweisen Validierung besteht darin, dass wir die Möglichkeit haben, die beiden kritischen Komponenten zunächst separiert voneinander zu testen, um die jeweiligen Charakteristika besser bestimmen zu können. Erst am Ende erfolgt die Systemintegration und der gemeinsame Leistungstest an der UniBW.

Abbildung 29 zeigt den Testaufbau für den Test des Hochdrehzahlinverters. Der Inverter wird mit Hochspannung versorgt, die Phasenströme fließen in eine Ersatzlast. Über den Signal-HiL werden die Systemumgebung simuliert und die Sollvorgaben an den Inverter geschickt. Gleichzeitig können über die Ethernet-Schnittstelle die internen Parameter des Inverters gemessen und ausgewertet werden.



**Abbildung 29: Testaufbau für den Invertertest**

Ein Motorprüfstand für Elektromotoren – auch Motorprüfbank genannt – ist ein spezialisierter Prüfstand, der für die Bewertung und Charakterisierung von Elektromotoren unter kontrollierten Bedingungen eingesetzt wird. Der Zweck einer solchen Prüfbank liegt primär darin, die Leistungsfähigkeit, Effizienz, Zuverlässigkeit und thermische Stabilität von Elektromotoren zu testen. Die Motorprüfbank simuliert realitätsnahe Betriebsbedingungen und ermöglicht es, verschiedene Parameter wie Drehmoment, Drehzahl, Wirkungsgrad, Stromverbrauch und Verlustleistung präzise zu messen und zu analysieren. Dies erlaubt es uns, die durch die Auslegungsberechnungen vorhergesagten Motorparameter experimentell zu prüfen.

Es fanden zunächst bei Silver Atena im Haus Vorversuche mit einer eingeschränkten Version der Motorprüfbank ohne Lastmotor statt (sog. „No-Load-Tests“). Danach wurde an einem spezialisierten Prüfstand der Universität der Bundeswehr in Neubiberg eine vollständige Testkampagne durchgeführt.

Die Hauptbestandteile der Motorprüfbank für den Testaufbau bei Silver Atena sind:

- Eine stabile Plattform, welche Vibrationen und andere mechanische Störeinflüsse minimiert, die die Messgenauigkeit beeinträchtigen könnten. Des Weiteren muss die Prüfstandsplattform die Kräfte und Momente, die bei den hohen Drehzahlen entstehen können, aufnehmen können.
- Eine ausreichend dimensionierte Stromversorgung, um den Elektromotor mit der notwendigen elektrischen Energie zu versorgen. In unserem Fall ist der Hochdrehzahl-Inverter Teil des Brennstoffzellen-Turbolader-Systems, daher besteht die Stromversorgung aus einer Hochspannungsgleichstromversorgung.
- Ein Signal-HiL (Hardware-in-the-Loop Testsystem) als Steuer- und Regelungseinheit. Diese Komponente steuert und überwacht den gesamten

Testablauf. Über den HiL kann man die Betriebspunkte des Prüflings regeln sowie die Messdaten der angeschlossenen Sensoren aufzeichnen.

- Ein Kühlsystem, um die signifikante Abwärme des Motors abzutransportieren und sicherzustellen, dass der Motor während der Tests unter akzeptablen thermischen Bedingungen betrieben wird und eine Überhitzung vermieden wird. Ebenso muss der Hochdrehzahl-Inverter gekühlt werden.
- Ein Sicherheitssystem, bestehend aus einem Berstschutzkäfig, um im Falle eines mechanischen Versagens von Motor- oder Lagerkomponenten die Umgebung vor herumfliegenden Teilen zu schützen.

In Abbildung 30 ist der Testaufbau mit den oben beschriebenen Komponenten schematisch dargestellt.

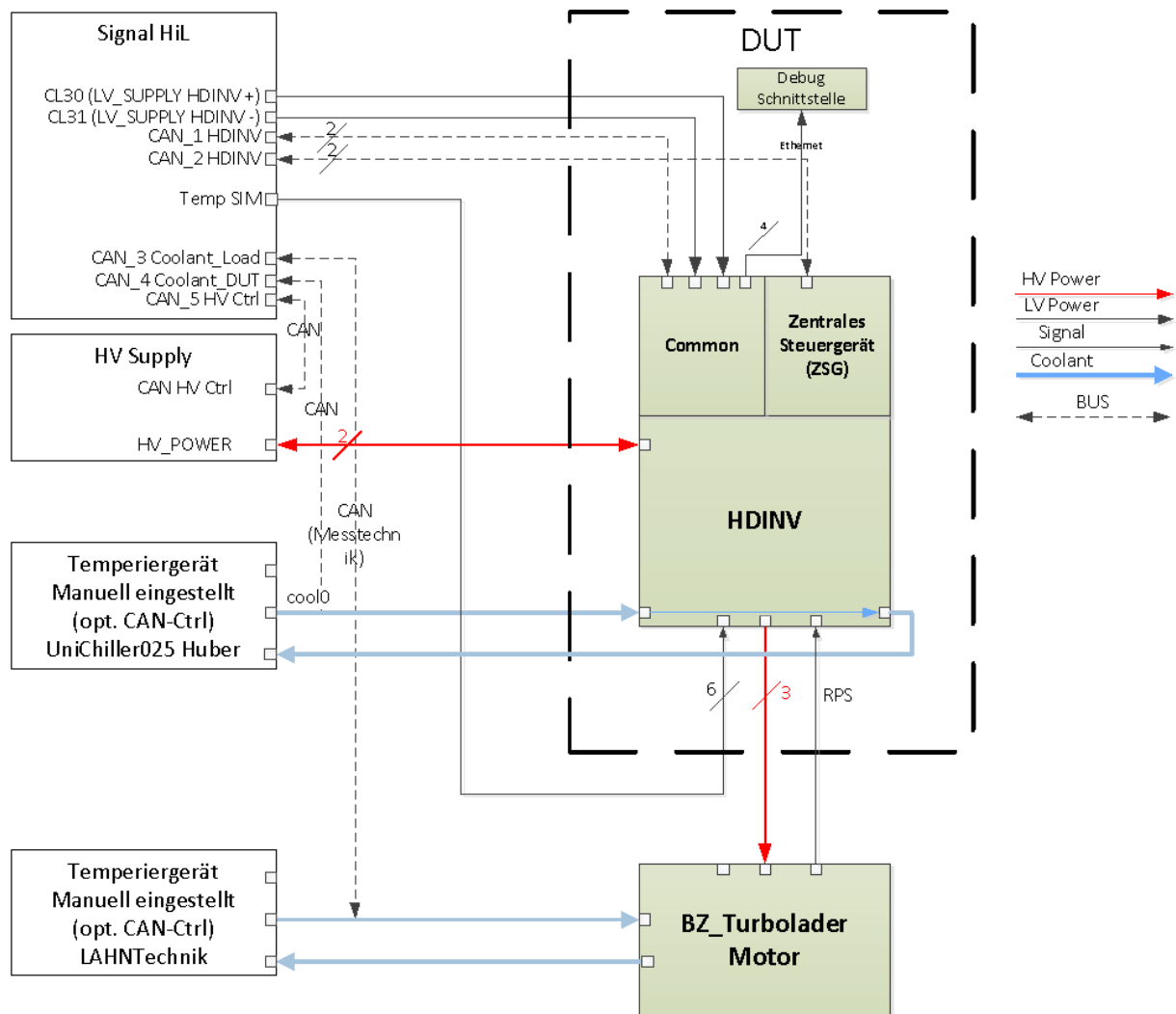
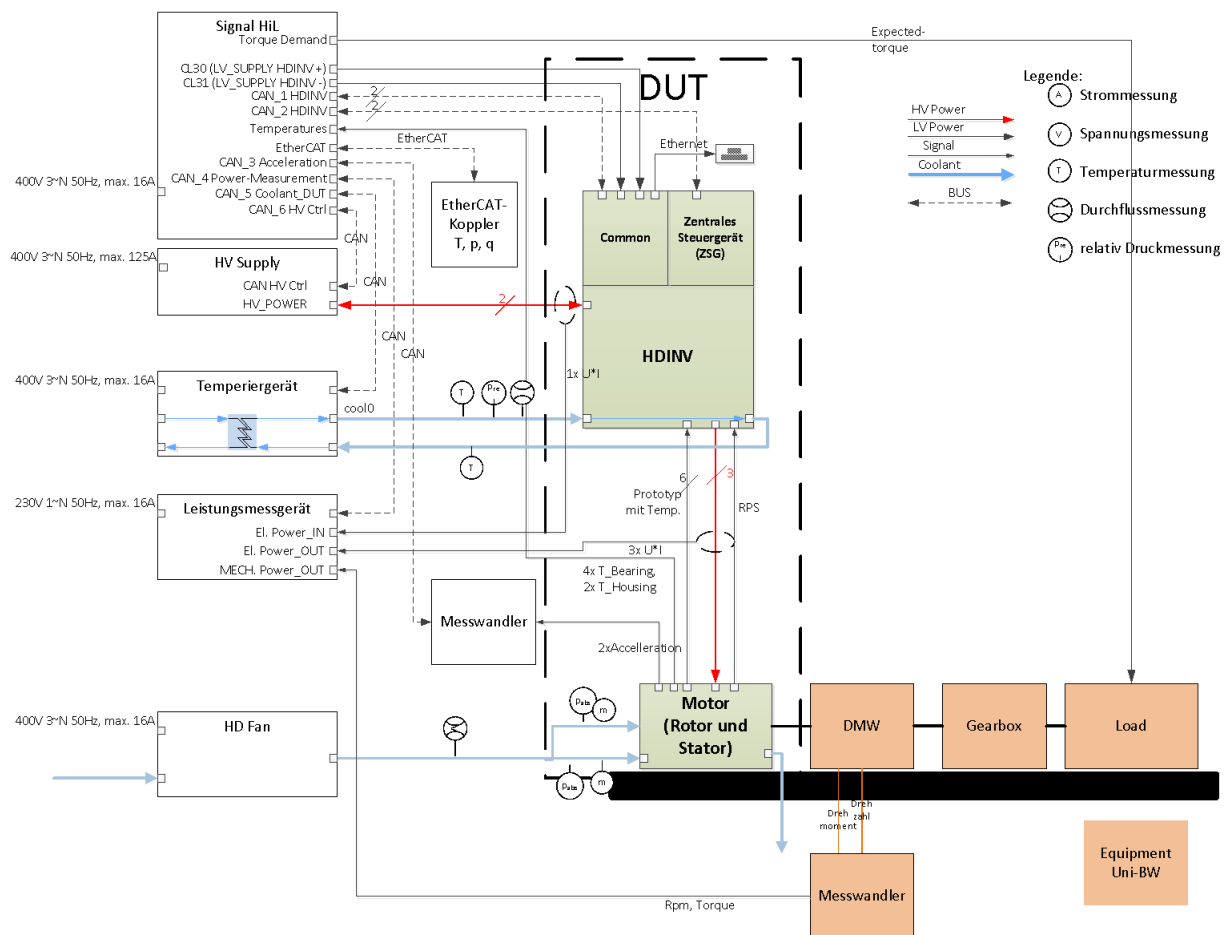


Abbildung 30: Testaufbau der Motorprüfbank bei Silver Atena



**Abbildung 31: Testaufbau der Motorprüfbank bei der Universität der Bundeswehr**

Wie oben geschildert findet der Test bei Silver Atena ohne Gegenlast statt. Am Motorprüfstand an der Universität der Bundeswehr, wo der Motor unter Last getestet wird, sind noch zusätzliche Prüfstandskomponenten vorhanden:

- Eine Lastmaschine simuliert die Last, die der Elektromotor in der Realität antreiben würde. Sie fungiert in unserem Fall als Bremse und steuert das Drehmoment und die Drehzahl, die dem zu testenden Motor entgegengesetzt werden.
- Eine Drehmomentmesswelle misst das von dem Elektromotor erzeugte Drehmoment sowie die Drehzahl. Des Weiteren werden der Strom und die Spannung, die in den Motor eingespeist werden, sowie die daraus resultierende elektrische Leistung gemessen. Zahlreiche Temperatursensoren überwachen außerdem die Wärmeentwicklung in verschiedenen Bereichen des Motors, insbesondere in den Wicklungen und im Gehäuse.

Abbildung 31 zeigt den Testaufbau für die Leistungsmessungen der integrierten Inverter-Motor-Komponente an der UniBW. Zwei Leistungsmessgeräte (LMG 671) vermes-



sen präzise die Phasenströme und eine Drehmomentmesswelle (DMW) zwischen Motor und Getriebe erlaubt es uns, das Motormoment exakt zu bestimmen.

## 2.5 AP 3.1 „Prototypische Umsetzung“

Die prototypische Umsetzung besteht aus mehreren Teildisziplinen, wie in Abbildung 1 ersichtlich. Im Folgenden werden die Entwicklungsschritte in den Bereichen Software, Hardware und Mechanik näher erläutert.

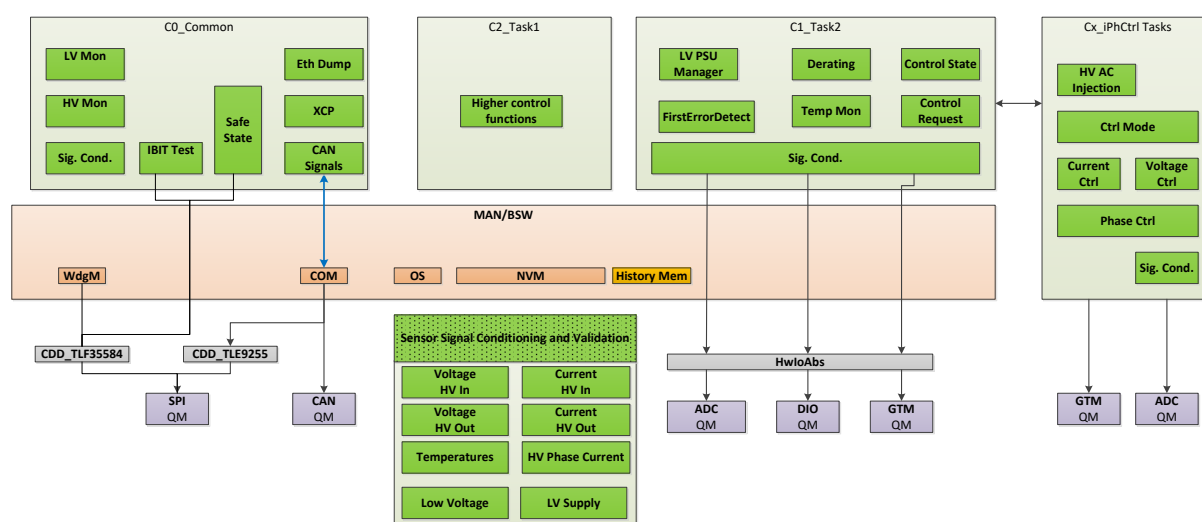
### **Software-Entwicklung**

Die Software des BZ-Turbolader-Hochdrehzahlmotorreglers besteht einerseits aus einer Basis-Softwarekomponente und andererseits aus der Reglerapplikation. Zu den Aufgaben der Basis-SW zählen unter anderem:

- **State Manager:** Der State Manager stellt sicher, dass die Software bestimmte, definierte Stati annimmt und auch die Statusübergänge definiert ablaufen. Bei jedem Start des Motorreglers werden zunächst Initialisierungsroutinen ausgeführt, die den Prozessor initialisieren und dessen Register korrekt konfigurieren. Danach wird eine Reihe von diagnostischen Tests durchgeführt, um den Speicher und andere Module auf ihre Funktionstüchtigkeit hin zu prüfen. Wenn alle Aufstartroutinen erfolgreich durchgeführt wurden, wechselt der State Manager in den Operation-Modus, in welchem dann die Reglerapplikation gestartet und im weiteren Verlauf zyklisch aufgerufen wird.
- **Scheduling:** Das Scheduling-Modul stellt sicher, dass die festgelegte Regelfrequenz genau eingehalten wird. Dies bedeutet, dass alle Funktionsaufrufe und Datentransfers zu festgelegten Zeiten stattfinden müssen und auch deren Ausführungszeit überwacht wird, um ein Überschreiten der maximalen Ausführzeit zu verhindern. Das genaue Einhalten der Zykluszeit ist von großer Wichtigkeit für die Regelungsapplikation, da diese von einer konstanten Zeitdifferenz zwischen zwei Regelschritten ausgeht. Wird diese Aufruffrequenz nicht genau eingehalten oder ist mit einem Jitter behaftet, könnte dies im schlimmsten Fall zu unerwünschten Regler-Oszillationen führen.
- **Diagnose:** Auf den Motorregler-Platinen befinden sich zahlreiche Sensoren, die Ströme, Spannungen und Temperaturen der Boards und des Motors messen. Das Diagnosemodul wertet die entsprechenden Informationen aus und meldet alle Unregelmäßigkeiten. Besonders zeitkritische Kenngrößen werden bereits in der Hardware direkt ausgewertet, zum Beispiel die Überstromerkennung. Trägere Diagnosedaten, wie etwa die Motortemperaturen, können direkt in der Software überwacht werden. Fällt eine Überwachungsgröße aus dem Normbereich, werden Gegenmaßnahmen eingeleitet, die von einer Lastreduktion bis hin zum kompletten Abschalten des Motors führen können.

- Kommunikation: Der Motorregler ist über CAN-Schnittstellen mit anderen Systemkomponenten verbunden. Daneben gibt es noch ein Ethernet-Interface für Testzwecke sowie zahlreiche digitalen Ein- und Ausgänge, über welche diskrete Signale geschickt werden können. Die Verarbeitung der ein- und ausgehenden Kommunikation ist ebenfalls Teil der Basis-SW.

Den ersten Schritt der SW-Entwicklung bildet die Erstellung der Software-Architektur. Diese definiert den wesentlichen Aufbau der Software, die Unterteilung in einzelne SW-Komponenten, die grobe Architektur des Reglers, das Timing der Software, das Speicherlayout des Prozessors, die Statusmaschine der Basis-SW, das Startup-Verhalten, und viele weitere Aspekte. Abbildung 32 zeigt die wichtigsten Zusammenhänge zwischen den einzelnen Prozessor- bzw. Softwarekomponenten.

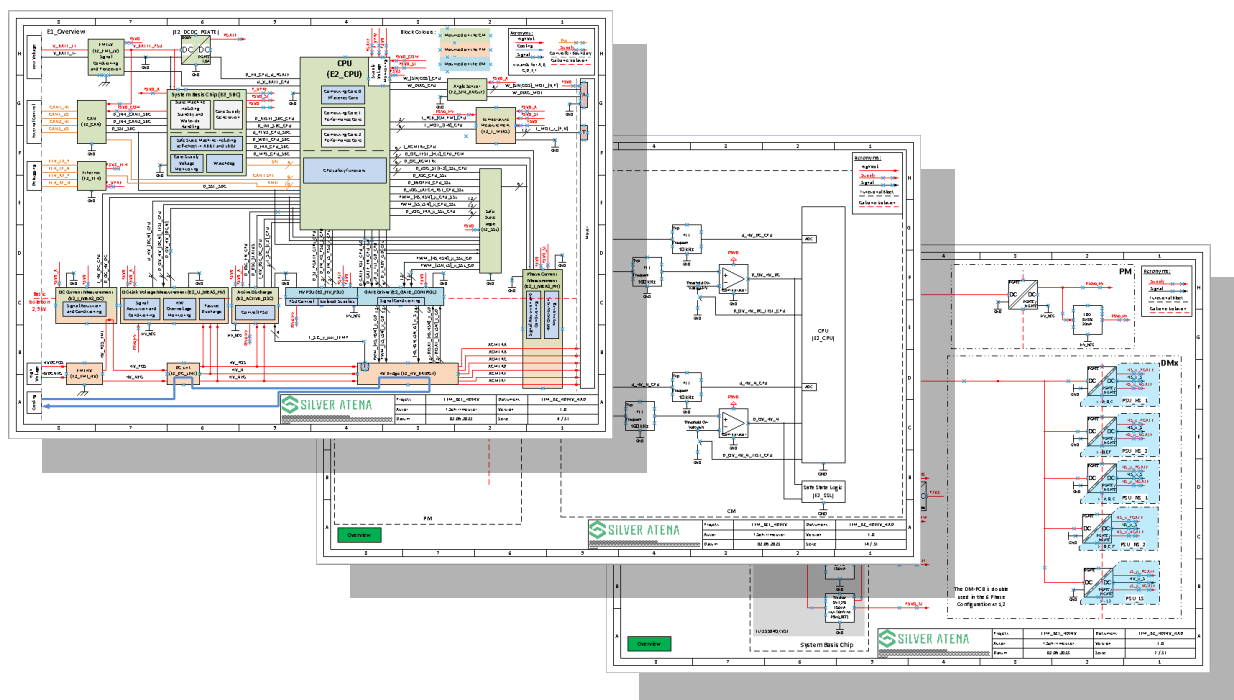


**Abbildung 32: Übersicht der Software-Komponenten des Hochdrehzahl-Inverters**

### Hardware-Entwicklung

Der erste Schritt in der Hardware-Entwicklung ist die Definition der Hardware-Architektur. Dabei handelt es sich um einen detaillierten Funktionsentwurf der elektronischen Schaltungen, ohne jedoch konkrete elektronische Komponenten oder Schaltungen für die Funktionen zu spezifizieren. Nur wenige Schlüsselkomponenten sind in diesem Stadium bereits spezifiziert.

Die Hardware-Architektur folgt einem hierarchischen Design, von einem Kontextdiagramm auf Ebene 0, das das Zusammenspiel der Komponente im System beschreibt, über Ebene 1, welche einen detaillierten Überblick über die einzelnen Komponentenmodule gibt, bis hin zur Ebene 2, auf welcher bereits konkrete Signalpfade beschrieben werden. Beispielhaft sind Auszüge aus der Hardware-Architektur in Abbildung 33 gezeigt.



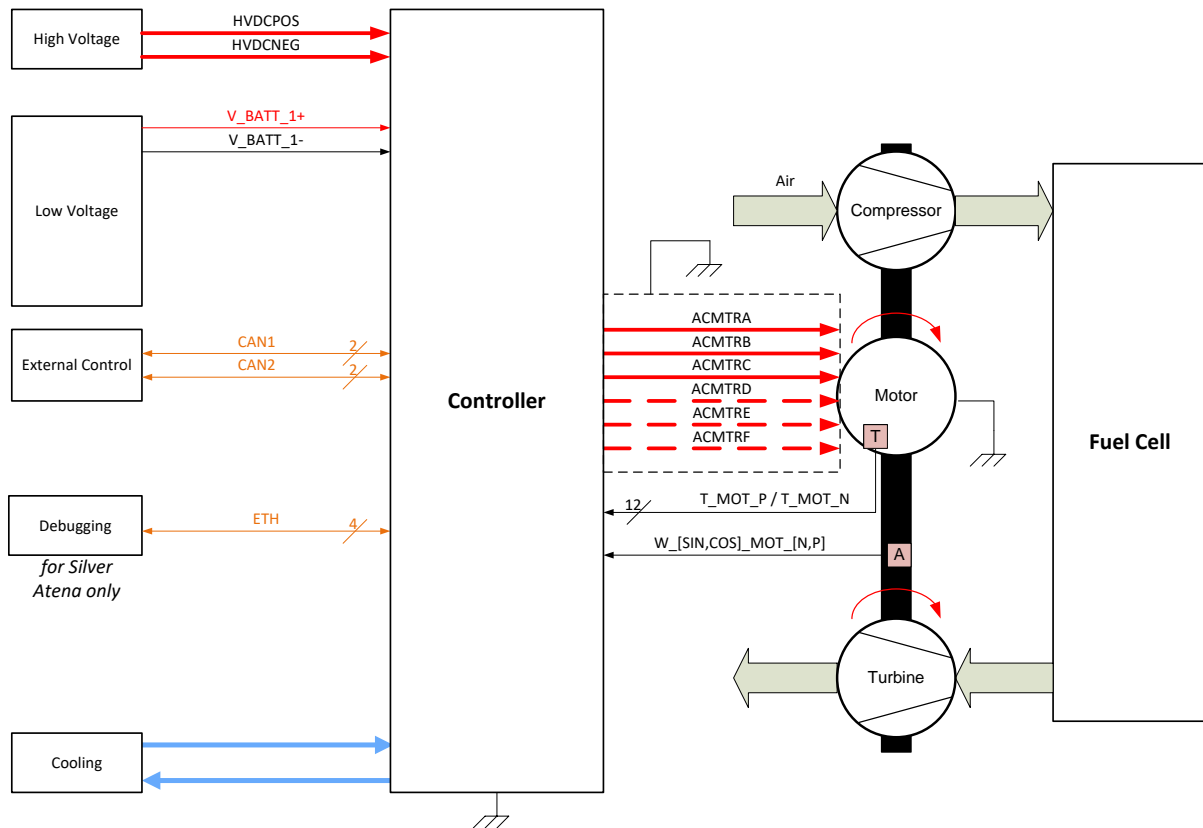
**Abbildung 33: Auszüge aus dem Hardwarearchitekturdokument**

In Abbildung 34 ist das Kontextdiagramm des Hochdrehzahl-Inverters dargestellt. Man sieht die Hoch- und Niederspannungseingänge, die Busverbindungen zur Kommunikation mit anderen Systemkomponenten sowie das Kühlinterface. Auf der rechten Seite sind die Phasenströme zum Betrieb des Turbolader-Motors sowie Sensorinterfaces zum Messen der Motortemperaturen gezeigt.

Auf der Grundlage der Hardware-Architektur werden die Schaltpläne der Leiterplatte designt. Die Schaltpläne sind die Konkretisierung der Funktionen der Architektur mit konkreten elektronischen Komponenten und den Verbindungen zwischen ihnen.

Der Hochdrehzahl-Inverter besteht aus einem Kommunikations- und einem Leistungsteil. Ein modulares Design des Inverters erlaubt es, einerseits den Bauraum optimal auszunutzen und andererseits auch eine klare Aufgabentrennung zu erzielen. Daher ist die Inverter-Hardware auf drei Platinen aufgeteilt:

- Computing-Modul (CM): Kommunikation mit Sensoren und den restlichen Systemkomponenten, Signalverarbeitung und Regelung
- Driver-Modul (DM): Gate-Treiber zum Ansteuern der Leistungsschalter
- Power-Modul (PM): Leistungsschalter und Bereitstellung der hohen Motorströme



**Abbildung 34: Kontextdiagramm des Hochdrehzahl-Inverters**

Für jede der Platinen wird ein eigener Schaltplan designet. Begleitend zur Schaltplanerstellung wird eine sogenannte Design Justification durchgeführt, in dem alle relevanten Schaltplanelemente berechnet und dimensioniert werden. Ebenso erfolgt eine Bauteilrecherche, welche neben technischen Daten und Preisinformationen auch die Lieferzeiten erfassen muss. Ein Thema, was insbesondere bei der aktuellen Bauteilknappheit sehr wichtig ist. Es kommt häufig zur Situation, dass Schaltplanteile umdesignet werden müssen, weil wesentliche Bauteile nicht verfügbar sind oder inakzeptabel lange Lieferzeiten aufweisen.

Beispielhaft ist in Abbildung 35 eine Seite aus dem Schaltplan des Computing Moduls angeführt, konkret die Ethernet-Schnittstelle.

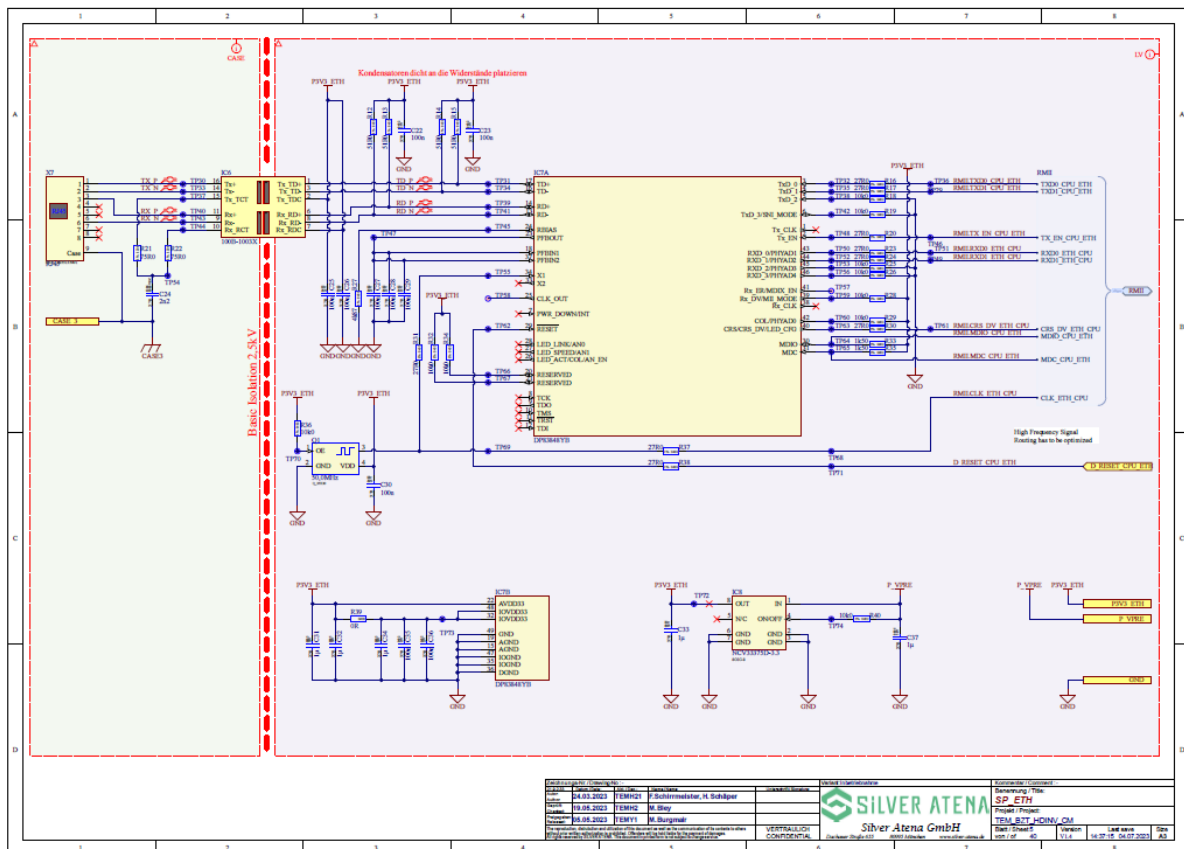
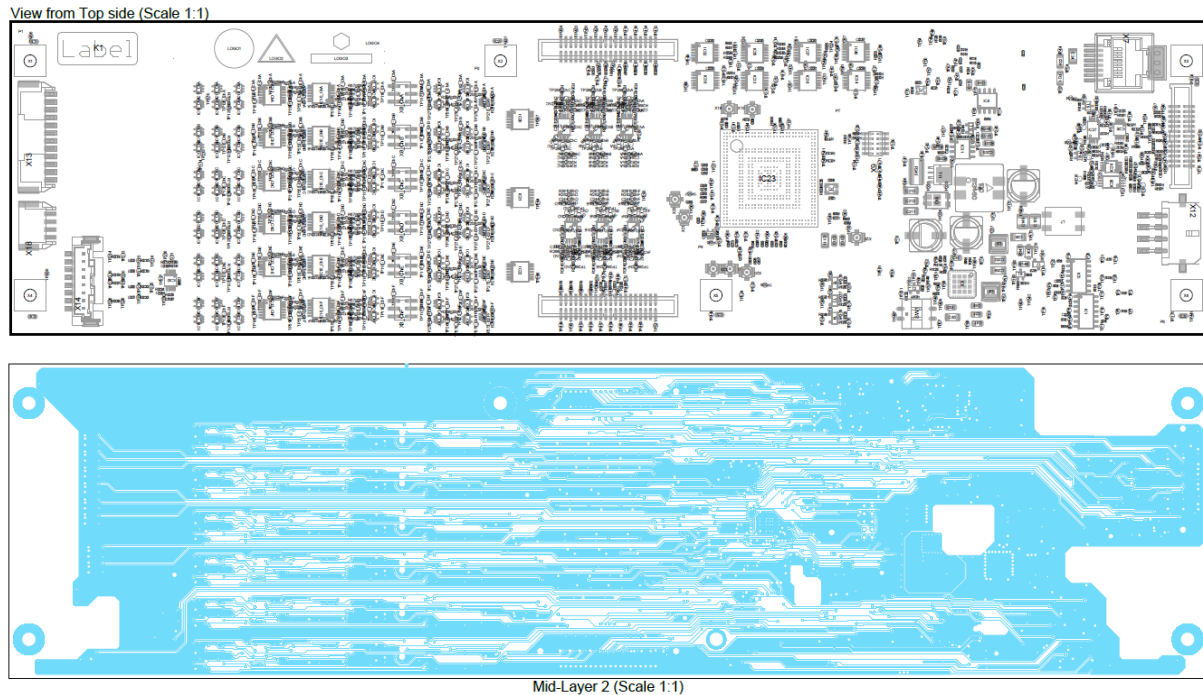


Abbildung 35: Beispielseite aus dem Schaltplan

Nach dem Entwurf der Schaltpläne wird das Platinenlayout entworfen. Der Schaltplan spezifiziert die elektronischen Komponenten und die logischen Verbindungen zwischen ihnen, ohne irgendwelche physikalischen Parameter zu spezifizieren. Das Layout hingegen platziert jedes Bauteil auf der Leiterplatte und routet die Verbindungen zwischen diesen Bauteilen.

Die Leiterplatten des BZ-Turbolader-Inverters bestehen jeweils aus mehreren Lagen, die bestimmte Funktionen haben. Einige Lagen führen ein bestimmtes Spannungsniveau oder Massepotential, während andere Lagen Routings zwischen Komponenten enthalten. Sogenannte Vias sind vertikale Verbindungen zwischen diesen Lagen. Die Platzierung der elektronischen Bauteile ordnet die Komponenten in funktional sinnvolle Blöcke, um unnötig lange Strompfade zu vermeiden. Auch thermale Aspekte und mögliche elektromagnetische Störungen, insbesondere zwischen Hochfrequenzelementen, müssen berücksichtigt werden. Der Entwurf der Routings muss die Signallaufzeiten berücksichtigen, insbesondere bei Kommunikationsbussen oder externen Speicherkomponenten. Wenn beispielsweise die einzelnen Leitungen eines Ethernet-Busses unterschiedlich lang sind, wird das resultierende Signal verzerrt und es können Kommunikationsfehler auftreten.



**Abbildung 36: Bestückung und Routing in einer Mittellage des Computing Moduls**

In Abbildung 36 ist beispielhaft die Bestückung auf der Oberseite des Computing-Moduls gezeigt (oben) sowie das Routing der Leiterbahnen in einer der Mittellagen (unten). Der Lagenaufbau des Computing Moduls ist in Abbildung 37 gezeigt.

Layer Stack Legend

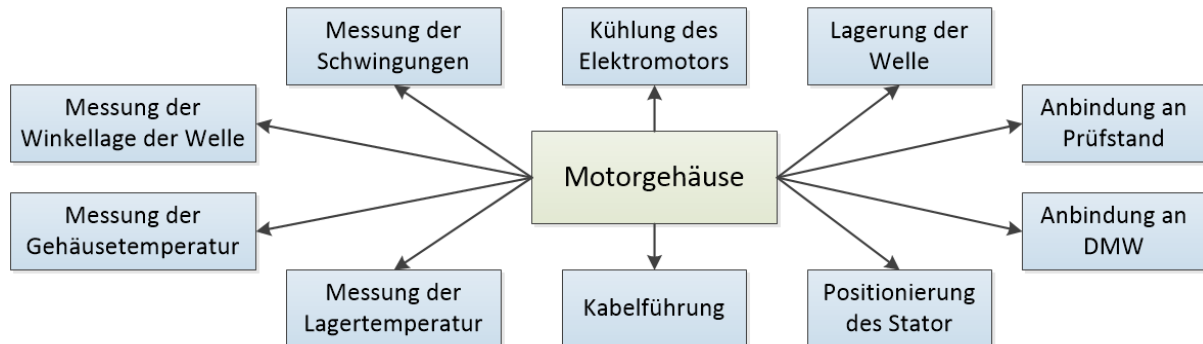
Layer	Type	Gerber	Thickness	Description	Material
Top Solder	Solder Mask	GTS	0.010mm		Surface Material
Top Layer	Signal	GTL	0.035mm		Copper
	Dielectric		0.212mm		Prepreg
Mid-Layer 1	Signal	G1	0.035mm	Copper Foil	Copper
	Dielectric		0.250mm	Core	Core
Mid-Layer 2	Signal	G2	0.035mm	Copper Foil	Copper
	Dielectric		0.230mm		Prepreg
Mid-Layer 3	Signal	G3	0.035mm	Copper Foil	Copper
	Dielectric		0.250mm	Core	Core
Mid-Layer 4	Signal	G4	0.035mm	Copper Foil	Copper
	Dielectric		0.230mm		Prepreg
Mid-Layer 5	Signal	G5	0.035mm	Copper Foil	Copper
	Dielectric		0.250mm	Core	Core
Mid-Layer 6	Signal	G6	0.035mm	Copper Foil	Copper
	Dielectric		0.212mm		Prepreg
Bottom Layer	Signal	GBL	0.035mm		Copper
Bottom Solder	Solder Mask	GBS	0.010mm		Surface Material
Total thickness: 1.934mm					

**Abbildung 37: Lagenaufbau Computing Modul**

## **Mechanik-Entwicklung**

Eine wesentliche Teilaufgabe war die Auslegung und Konstruktion eines Motorgehäuses, welches für den Test des entwickelten Motors auf unserem Prüfstand benötigt wird.

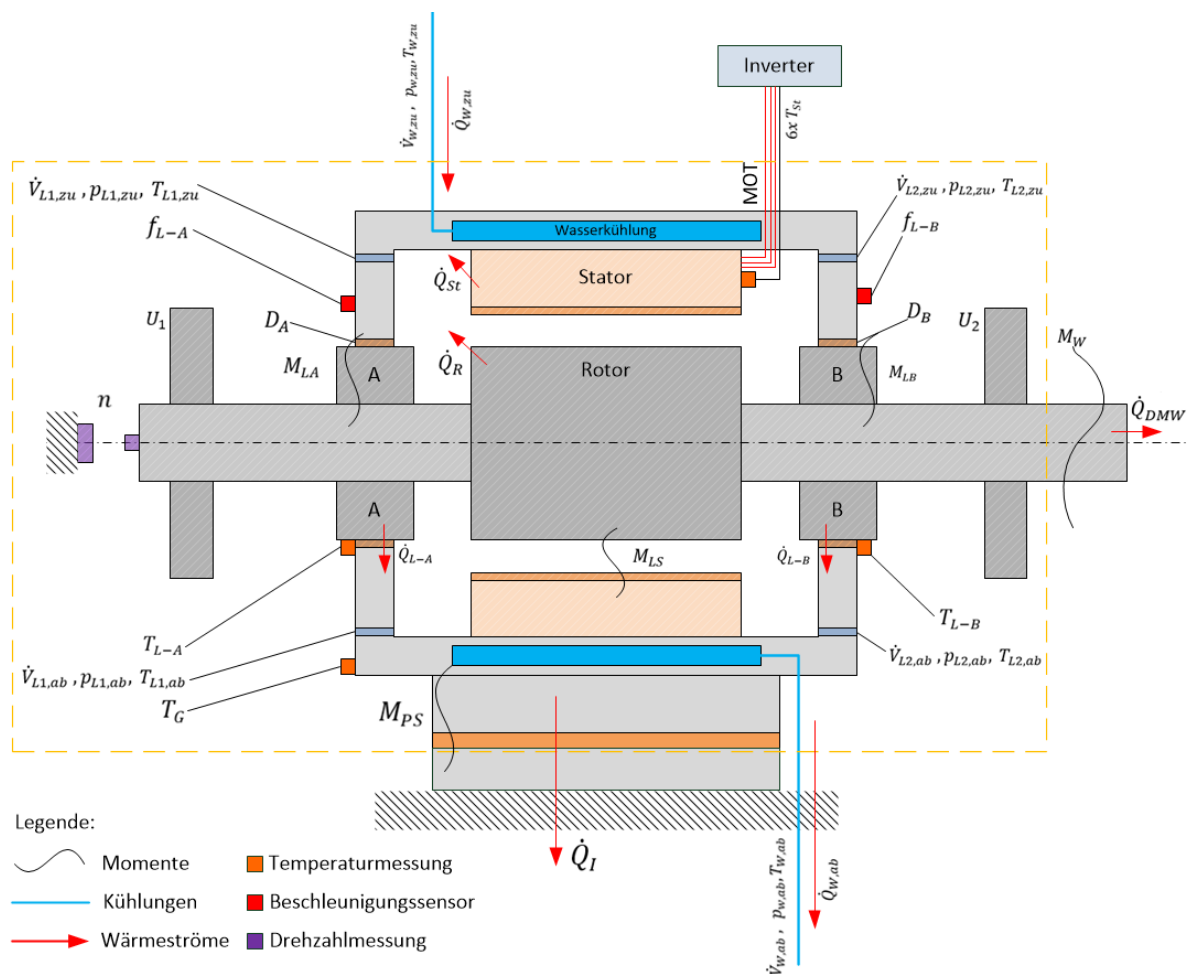
Das Motorgehäuse erfüllt zahlreiche essenzielle Aufgaben, welche in Abbildung 38 dargestellt sind.



**Abbildung 38: Funktionsstruktur des Motorgehäuses**

Zunächst war eine Wasserkühlung für den Motor geplant mit optionalen Anschlüssen für eine zusätzliche Luftkühlung. Im Laufe des Projektes wurde, in Abstimmung mit den Projektpartnern, auf eine reine Luftkühlung umgeschwenkt und eine Kühlung mit Wasser komplett verworfen. Nach der Anforderungsänderung wurde das gefundene Konzept erneut bewertet und nach einer entsprechenden Modifikation als weiterhin zielführend bewertet.

Um die Schnittstellen zu den anderen Komponenten des Elektromotors besser zu veranschaulichen, wird in Abbildung 39 ein funktionales Kontextdiagramm dargestellt. Die schraffierten Komponenten wie der Stator und Rotor mit Wuchtscheiben sowie die Dämpfung der Welle sind nicht Teil der Konstruktion, haben aber erheblichen Einfluss auf diese. Beide Teile müssen im Gehäuse gelagert werden und bestimmen damit die Dimensionen und Abmessungen von diesem.



$\dot{V}_{W,zu/ab}$	Volumenstrom der Wasserkühlung im Zu-/Ablauf	$M_{LA}$	Reibungsmoment im Lager A
$\dot{V}_{L1/2,zu/ab}$	Volumenstrom der Luftkühlung im 1/2 Zu-/Ablauf	$M_{LB}$	Reibungsmoment im Lager B
$T_G$	Temperatur im Gehäuse	$M_{LS}$	Reibungsmoment im Luftspalt
$T_{W,zu/ab}$	Temperatur der Wasserkühlung im Zu-/Ablauf	$n$	Drehzahl
$T_{L1/2,zu/ab}$	Temperatur der Luftkühlung im 1/2 Zu-/Ablauf	$f_{L-A/B}$	Schwingungsmessung am Lager A/B
$A/B$	Lager A/B	$\dot{Q}_{St}$	Übertragener Wärmestrom vom Stator
$T_{L-A/B}$	Temperatur am Lager A/B	$\dot{Q}_R$	Übertragener Wärmestrom vom Rotor
$T_{St}$	Temperatur vom Stator	$\dot{Q}_{W,zu/ab}$	Übertragener Wärmestrom der Wasserkühlung im Zu-/Ablauf
$p_{w,zu/ab}$	Druck der Wasserkühlung im Zu-/Ablauf	$\dot{Q}_{DMW}$	Übertragener Wärmestrom an die Drehmomentenmesswelle
$p_{L1/2,zu/ab}$	Druck der Luftkühlung im 1/2 Zu-/Ablauf	$\dot{Q}_{L-A/B}$	Übertragener Wärmestrom der Lager A/B
$M_W$	Moment an der Welle	$\dot{Q}_I$	Übertragener Wärmestrom an die Isolierung
$M_{PS}$	Übertragenes Moment an den Prüfstand	$U_{1/2}$	Unwuchtanregung 1/2
		$D_{A/B}$	Dämpfung des Lagers A/B

Abbildung 39: Funktionales Kontextdiagramm des Motorgehäuses



Als bewährte Methode für die Lösungssuche wurde für diese Teilaufgabe der morphologische Kasten gewählt (siehe Abbildung 40). Bei diesem Ordnungsschema in Tabellenform werden die ermittelten Teilfunktionen sowie aus den Anforderungen entstehende Variationsmöglichkeiten in den Zeilen aufgelistet. Für jede einzelne Funktion werden mehrere Lösungsmöglichkeiten dargestellt. Manche davon werden von vornherein ausgeschlossen (durchgestrichen dargestellt). Um die einzelnen Konzepte zu erstellen, muss aus jeder Zeile eine Lösung für die Umsetzung der Teilfunktion ausgewählt werden. So entsteht eine Kombination aus den vielen unterschiedlichen Teillösungen und setzt sich zu einer Gesamtlösung zusammen.

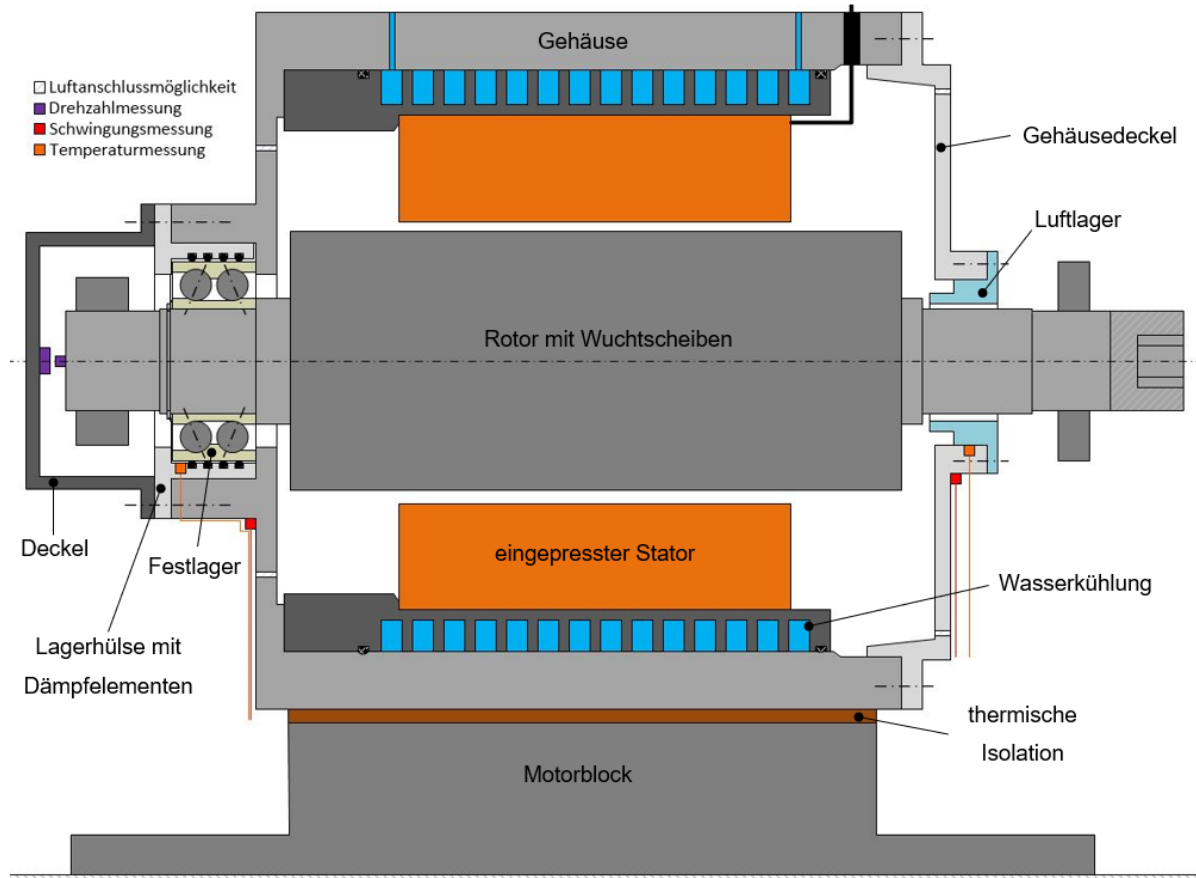
Für diese Arbeit wurden drei Konzepte aus dem morphologischen Kasten in Abbildung 40 erarbeitet, welche mit den Pfeilen in den Farben grün, orange und blau gekennzeichnet sind. Ergänzend zu den Teilfunktionen aus Abbildung 38 wurde das Fertigungsverfahren aufgenommen. Für die Schwingungsmessung zum Auswuchten der Welle im montierten Zustand wird auf einen externen Dienstleister zurückgegriffen. Jener stellt Beschleunigungssensoren zur Verfügung, damit lediglich Montagebohrungen am Gehäuse angebracht werden müssen.

Die Entwicklung des Motorgehäuses ist ein gutes Beispiel, an dem sich die anforderungsbasierte Entwicklung nachvollziehen lässt. Daher werden im Folgenden drei erarbeitete Konzepte in größerer Detailtiefe vorgestellt. Im Anschluss wird erläutert, welches Konzept ausgewählt wurde und eine Begründung dafür gegeben.



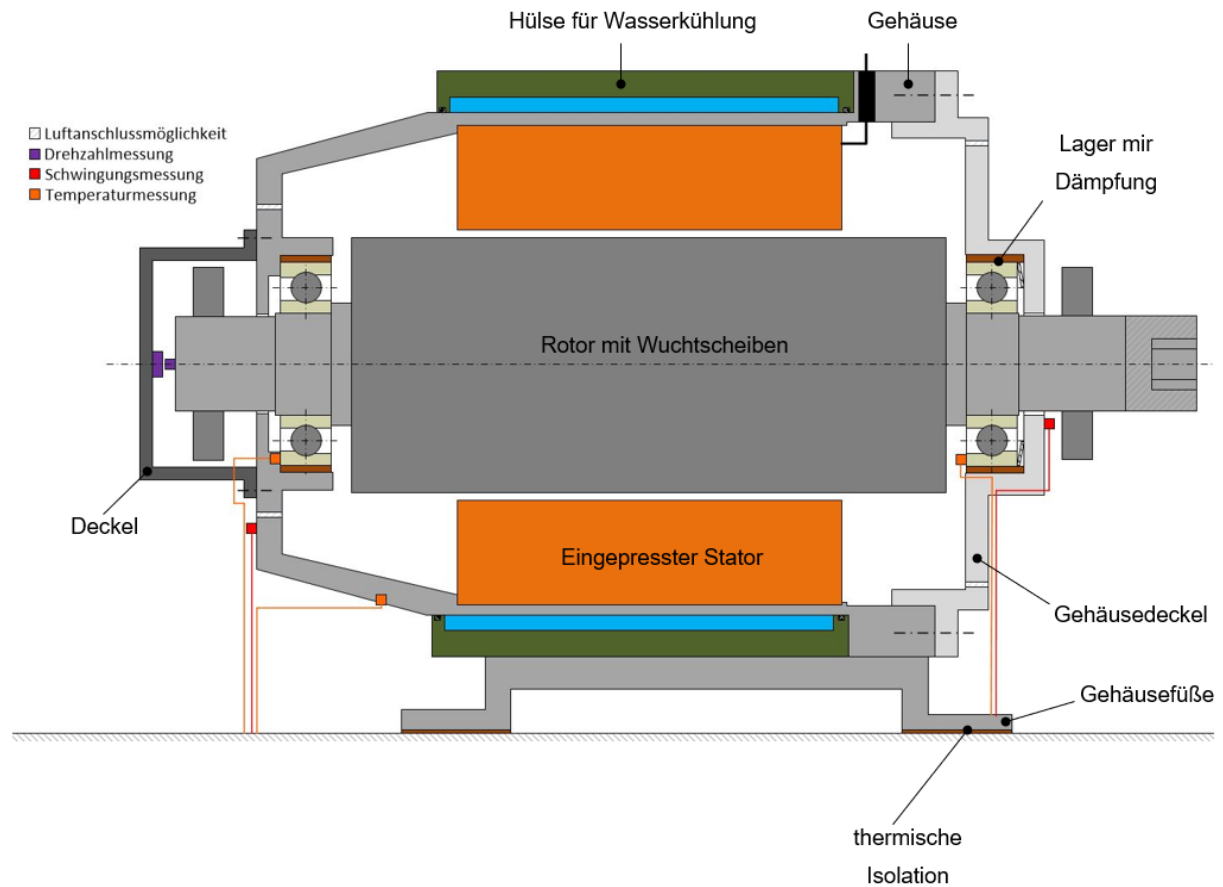
Teilfunktion	Lösungsmöglichkeit		
Fertigungsverfahren Gestaltung der Wasserkühlung	<p>Fräsen</p> <p>Gehäuseteilung [8]</p>	<p>Sandguss</p> <p>Rohrumwickel [9]</p>	<p>Druckguss</p> <p>Hülse [10]</p>
Lagerung Welle	<p>Wälzlagerung [11]</p>	<p>Folienluftlager mit axialer Sicherung [12]</p>	<p>Wälzlagerung [11] plus Folienluftlager [12]</p>
Positionierung Lager A	<p>Gehäuse</p>	<p>Gehäusedeckel</p>	<p>Lagerhülse</p>
Positionierung Lager B	<p>Gehäuse</p>	<p>Gehäusedeckel</p>	<p>Lagerhülse</p>
Lagesicherung Stator	<p>Übermaßpassung [13] Presspassung (Übermaßpassung)</p>	<p>Toleranzhülsen [14]</p>	<p>Spielpassung mit axialer Sicherung [15]</p>
Temperaturmessung Anbringung Hall-Sensor	<p>Einschraubfühler</p>	<p>Oberflächenfühler</p>	<p>Drahtthermoelement</p>
Anbringung an den Prüfstand	<p>Deckel</p>	<p>Ständer auf Prüftisch</p>	<p>Gehäuse</p>
	<p>Block</p>	<p>Füße an Gehäuse</p>	
	Konzept 1	Konzept 2	Konzept 3

Abbildung 40: Morphologischer Kasten



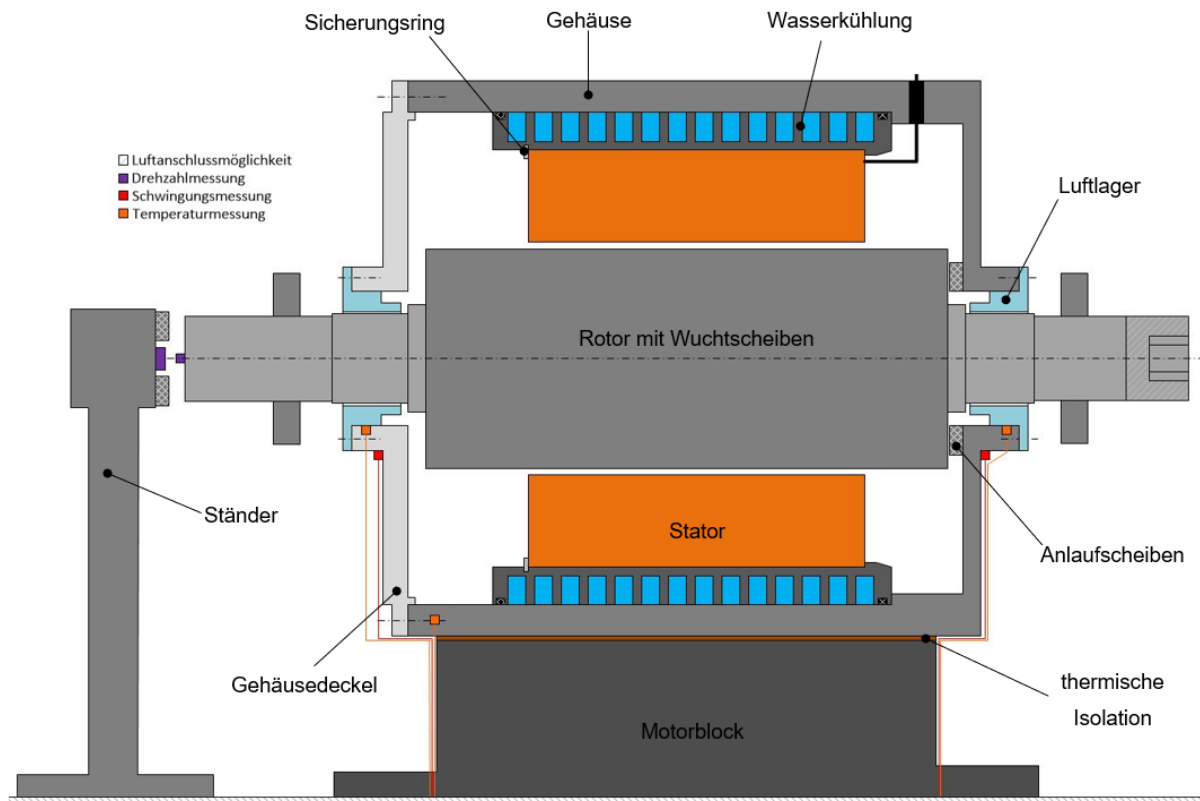
**Abbildung 41: Erstes Konzept für das Motorgehäuse**

Das erste Konzept, welches in Abbildung 41 abgebildet ist, ist ein aus dem Vollen gefrästes Motorgehäuse mit einer Teilung für die Wasserkühlung. Für die Lagerung des Rotors wird ein zweireihiges Schrägkugellager als Festlager sowie ein Folienluftlager als Loslager verwendet. Das Wälzlager wird dabei in einer Hülse gesichert, dies ermöglicht ein leichteres Wechseln des Lagers mit Dämpfung. Im Deckel ist das Luftlager befestigt. Der Stator wird für einen optimalen Wärmeübergang mit einer Übermaßpassung eingepresst. Der Drehwinkelsensor muss mit einem Abstand von einem Millimeter zum Magneten am Wellenende angebracht werden, was wiederum mit einem Deckel, der an das Gehäuse geschraubt wird, umgesetzt wird. Das Motorgehäuse wird über einen Motorblock am Teststand fixiert.



**Abbildung 42: Zweites Konzept für das Motorgehäuse**

In Abbildung 42 ist das zweite Konzept zu sehen. Hierbei soll das Gehäuse über das Sandgussverfahren hergestellt werden mit Füßen zur Anbindung an den Prüfstand. Eine Nachbearbeitung ist allerdings zusätzlich nötig. Über eine Hülse mit Dichtungsringen, die über das Motorgehäuse geschoben wird, ist die Kühlung des Elektromotors ohne großen Fertigungsaufwand umsetzbar. Zur Lagerung der Welle werden Schrägkugellager in X-Anordnung verwendet, wobei das linke Lager im Gehäuse und das rechte Lager in einem Deckel positioniert wird. Der Stator wird wieder über eine Presspassung im Motor fixiert. Der Hall-Sensor mit Platine wird, wie in Konzept 1 an einem zusätzlichen Deckel befestigt. In dieser Variante werden Oberflächenfühler zur Temperaturermittlung platziert, um Platz bei der Befestigung zu sparen.



**Abbildung 43: Drittes Konzept für das Motorgehäuse**

Bei der dritten Variante handelt es sich um ein Motorgehäuse, welches ebenfalls aus dem Vollen gefräst wird und die Kühlung über die Gehäuseteilung umsetzt. Die Lagerung erfolgt hier über zwei Folienluftlager. Wie in Abbildung 43 zu sehen ist, wird das linke Lager über den Deckel positioniert, welcher zudem die Montage ermöglicht. Das rechte Luftlager wird im Gehäuse angeschraubt. Bei dieser Anordnung ist besonders auf eine axiale Sicherung zu achten, da es sich um eine schwimmende Lagerung handelt. Der Stator wird über eine Spielpassung eingesetzt und mit einem angeschrägten Sicherungsring lagegesichert. Einschraubfühler sind zur Temperaturmessung vorgesehen. Ein zusätzlicher Ständer, auf dem der Drehwinkelsensor befestigt wird, soll zur Drehzahlmessung dienen. Die Befestigung an den Prüfstand erfolgt über einen Motorblock, welcher an das Gehäuse geschraubt wird.

Zur Auswahl des besten Konzepts wurden folgende Kriterien in Betracht gezogen:

- Wartungsanfälligkeit: Gewichtungsfaktor 11 %
- Fertigungsaufwand: Gewichtungsfaktor 4 %
- Montageaufwand: Gewichtungsfaktor 2 %
- Genaues Messen: Gewichtungsfaktor 22 %
- Kosten: Gewichtungsfaktor 7 %
- Fähigkeit zur Kühlung: Gewichtungsfaktor 20 %

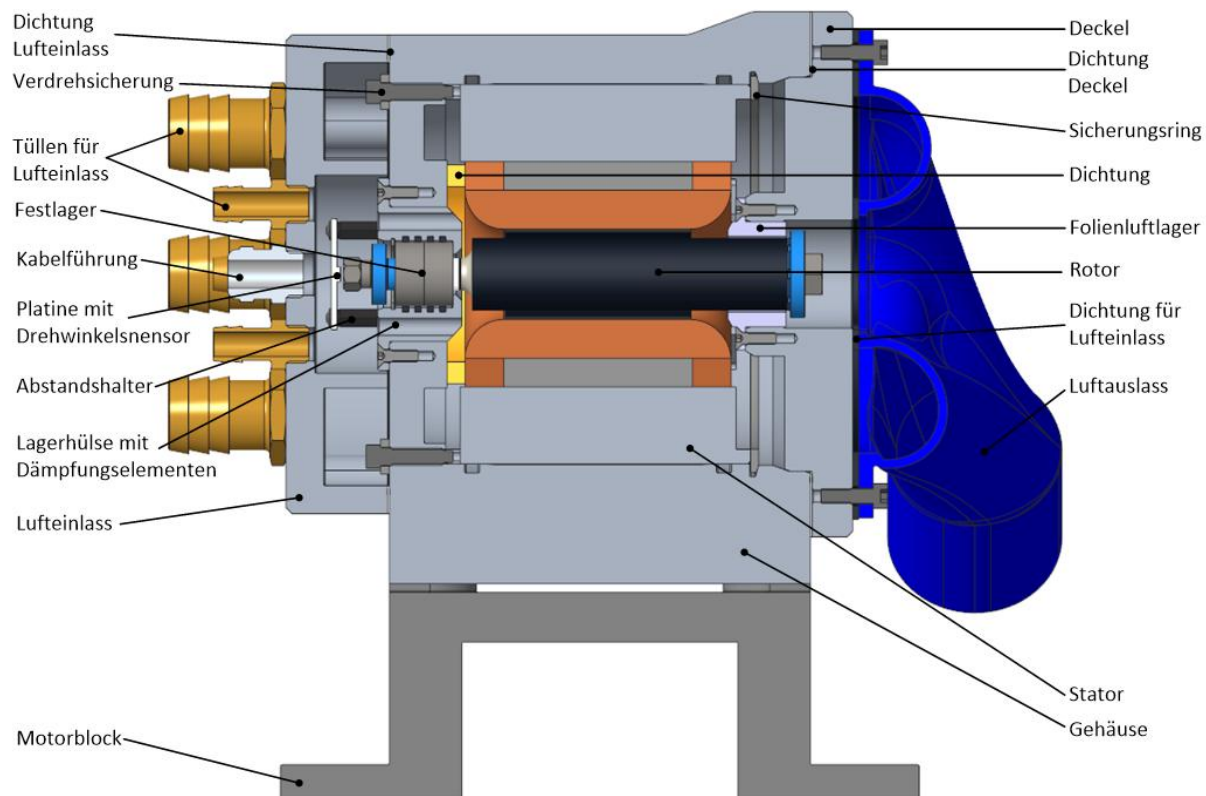


- Wartungsfreundlichkeit: Gewichtungsfaktor 13 %
- Ermöglichung hoher Drehzahlen: Gewichtungsfaktor 22 %

Zum Vergleich der Bewertungskriterien untereinander und für eine systematische Gewichtung erfolgte ein paarweiser Vergleich in einer Matrix. Dabei werden die Merkmale bei der Gegenüberstellung nach den Relationen „wichtiger als“, „gleich wichtig wie“ oder „weniger wichtig“ bewertet und dafür Punkte vergeben. Anschließend lässt sich aus dem Verhältnis der Punktezahlen zueinander ein Gewichtungsfaktor für die einzelnen Kriterien ermitteln.

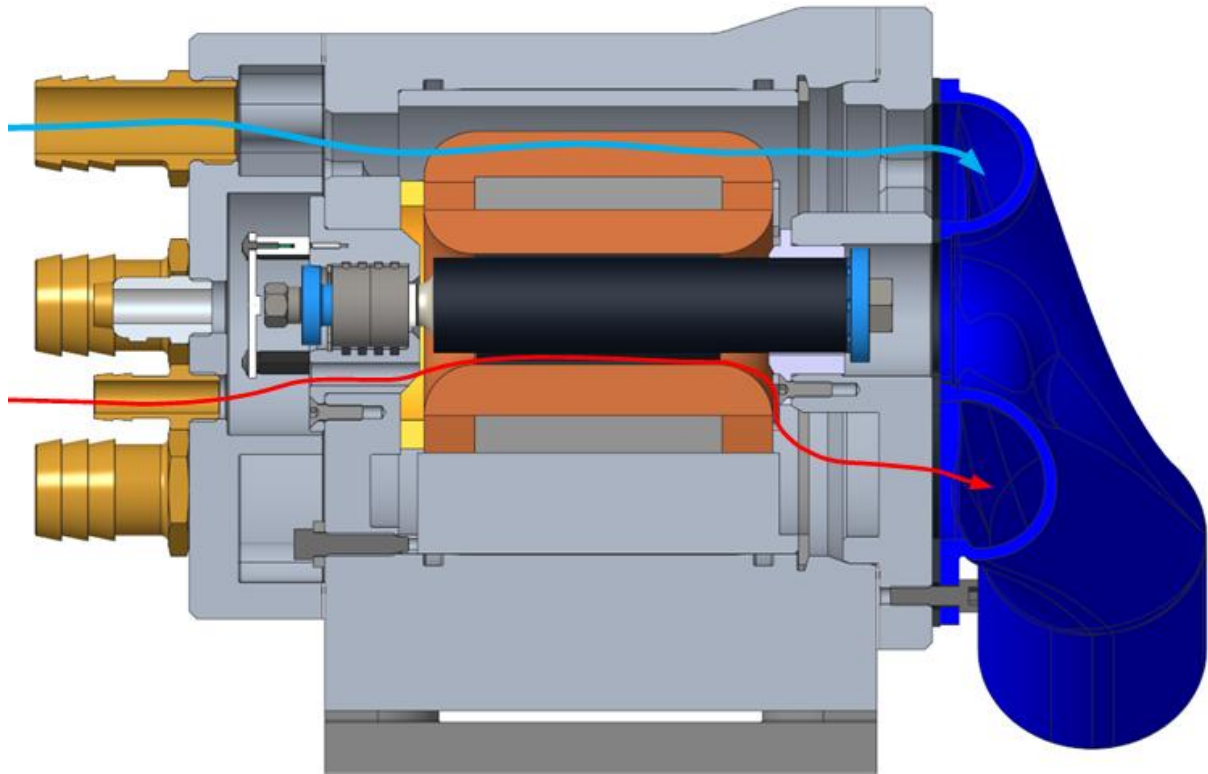
	Konzept 1	Konzept 2	Konzept 3	Gewichtung $G_i$
Wartungsanfälligkeit [P <sub>1</sub> ]	4	3	3	11%
Fertigungsaufwand [P <sub>2</sub> ]	3	1	3	4%
Montageaufwand [P <sub>3</sub> ]	2	4	4	2%
Messgenauigkeit [P <sub>4</sub> ]	4	4	4	22%
Kosten [P <sub>5</sub> ]	3	1	2	7%
Fähigkeit zur Kühlung [P <sub>6</sub> ]	5	4	5	20%
Wartungsfreundlichkeit [P <sub>7</sub> ]	4	3	2	13%
Ermöglichung hoher Drehzahlen [P <sub>8</sub> ]	4	3	5	22%
<b>Wertigkeit der Variante</b>	<b>0,81</b>	<b>0,64</b>	<b>0,77</b>	

Anschließend wurden die Wertigkeiten der einzelnen Varianten ermittelt, wie in obiger Tabelle dargestellt ist. Bei dieser Berechnung wurden die Konzepte in den jeweiligen Kriterien zwischen 0 und 5 Punkten bewertet. Das theoretische Maximum der Wertigkeit ist 1. Als beste Lösung der gewichteten Bewertung ging Konzept 1 mit einer Wertigkeit von 0,81 hervor und diente damit als Grundlage für die weitere Entwurfsphase.



**Abbildung 44: Fertig ausgearbeiteter Entwurf**

In Abbildung 44 ist der fertige Konstruktionsstand des Motorgehäuses im Schnitt zu sehen, wobei die wichtigsten Bauteile bezeichnet sind.



**Abbildung 45: Konzept der Luftkühlung**

Die Luftkühlung setzt sich aus zwei Volumenströmen zusammen, die mit einem Hochdruckgebläse erzeugt werden. In Abbildung 45 sind diese in einem geknickten Schnitt eingezeichnet. Der blaue Pfeil zeigt die Kühlung für den Stator, dabei strömt die Luft durch den Wickelkopf. Der rot eingezeichnete Volumenstrom kühlt über den Luftspalt den Rotor und die Statornut. Damit diese getrennt voneinander eingestellt werden können, müssen verschiedene Luftanschlüsse verwendet werden. Auf der Luftausgangsseite werden die Volumenströme zusammen abgeführt. Für den Lufteintritt als auch den Luftaustritt wird eine vorgegebene Fläche eingestellt.

Beim Lufteinlass handelt es sich um einen zusätzlichen Deckel, welcher an das Gehäuse geschraubt wird. In diesen werden Tüllen für die beiden Kühlungen befestigt, da für eine direkte Anbringung an das Gehäuse zu wenig Platz ist. Die Schlauchanschlüsse werden so positioniert, dass die Luft in direktem Wege durch die Zwischenräume des Stators strömt. Die Tüllen für die Luftspaltkühlung werden so platziert, dass sie das Kühlmedium vorbei an der Platine durch die Lagerhülse lenken. Zum Anschluss der Kabel für den Drehwinkelsensor sowie den Temperatursensor befindet sich im Zentrum eine dichtende Kabeldurchführung.

Neben dem Motorgehäuse umfassten die Mechanik-Entwicklungen auch den Hochdrehzahl-Inverter. So wurde ein Konzept entwickelt, wie der Hochdrehzahl-Inverter, der in unserem Fall auch das Zentrale Steuergerät beinhaltet mechanisch mit dem Brennstoffzellen-Turbolader integriert werden kann. Das Hauptaugenmerk lag hierbei auf der möglichst effizienten Abfuhr der Verlustleistung des Inverters. Für diesen Zweck wurden zahlreiche Varianten untersucht, in denen die Inverterplatinen, insbesondere die Leis-

tungsschalter, um einen Kühlkanal angeordnet sind. Besondere Anforderungen wurden an den Kühlkörper gestellt, der in den Kühlkanal hineinragt und für einen guten Wärmetransport sorgen soll. Einerseits soll die Oberfläche der Kühlrippen maximiert werden, andererseits soll aber der Kühlkörper den Luftstrom nicht zu sehr stören. Auch die serientaugliche Fertigbarkeit war ein Kriterium. Ein mögliches gasgekühltes Inverterkonzept ist in Abbildung 46 dargestellt. Das Invertergehäuse ist gelb hervorgehoben und befindet sich angeflanscht am Luftaustritt des Motorgehäuses mit integriertem Turbinengehäuse. Der Kühlkörper des Inverters ragt von oben in den Kühlkanal hinein. Selbstverständlich sind auch konventionelle flüssigkeitsgekühlte Konzepte mit separatem Gehäuse möglich.



**Abbildung 46: Konzept für ein integriertes Invertergehäuse**

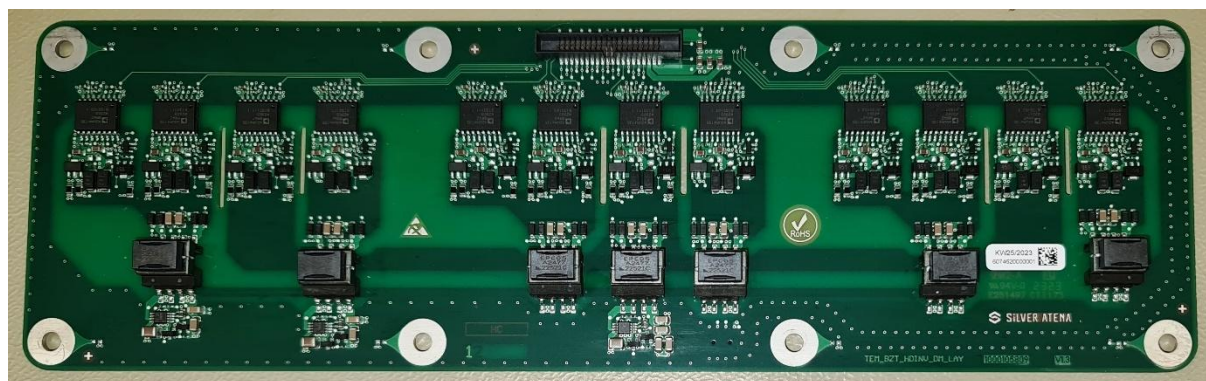
## **2.6 AP 3.2 „Fertigung für die Erprobung“**

Das Ergebnis des Layout-Prozesses, wie in Kapitel 2.5 im Abschnitt „Hardware-Entwicklung“ beschrieben, ist ein vollständiger Satz von Hardware-Fertigungsdaten. Diese wurden dann an einen spezialisierten Electronic Manufacturing Services (EMS)-Partner übergeben, der zunächst die mehrlagige Leiterplatte mit den Signalroutings und den Löt pads für die Bauteile druckt. In einem zweiten Schritt werden alle Bauteile von einem Spezialroboter auf der Platine platziert und mit ihr verlötet.

Im Folgenden sind die gefertigten Platinen des kombinierten Hochdrehzahlinverters gezeigt. Wie bereits früher beschrieben, ist die Funktion des Zentralen Steuergerätes ebenfalls in diesem Gerät integriert.

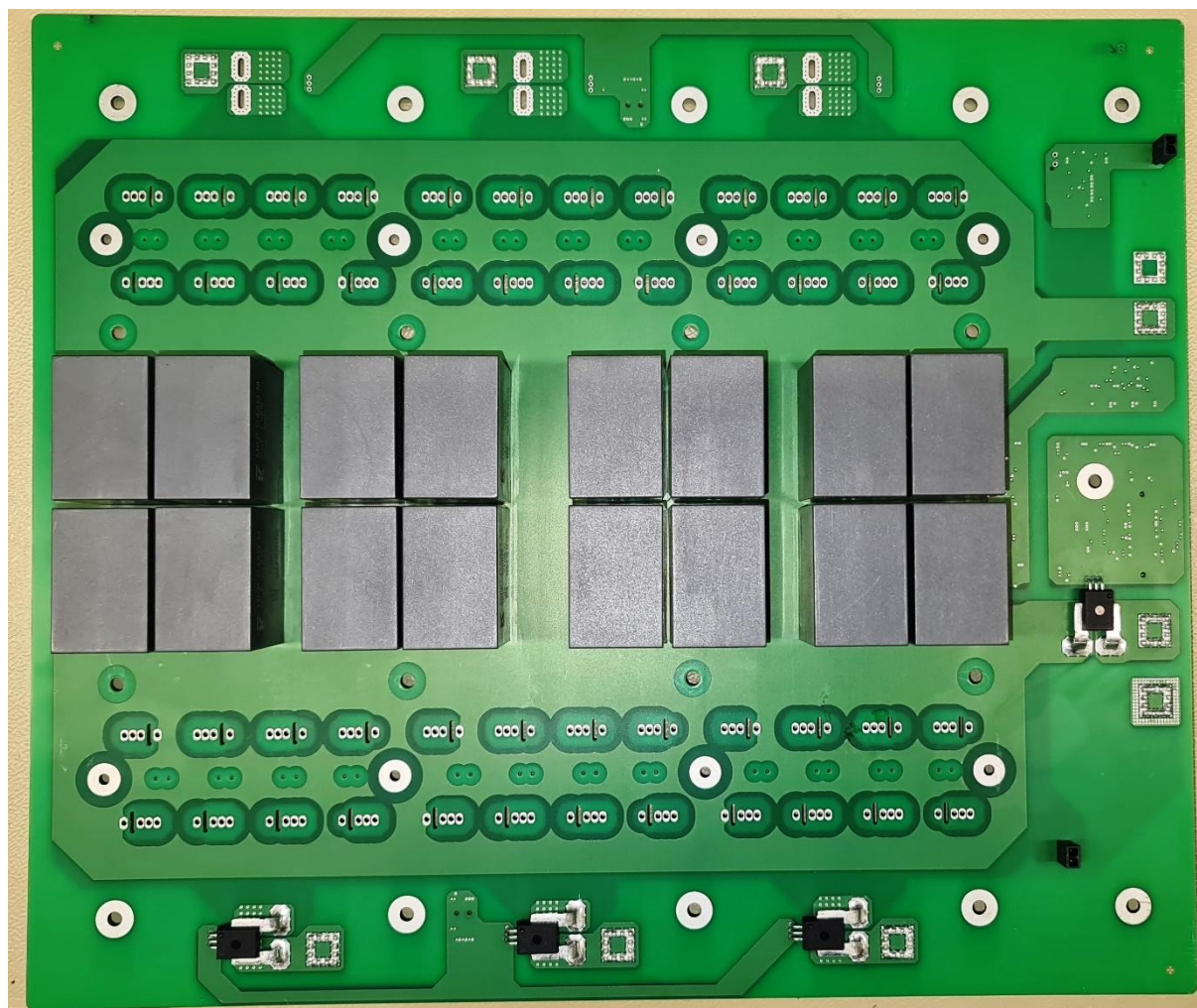


**Abbildung 47: Computing-Modul (Oberseite)**



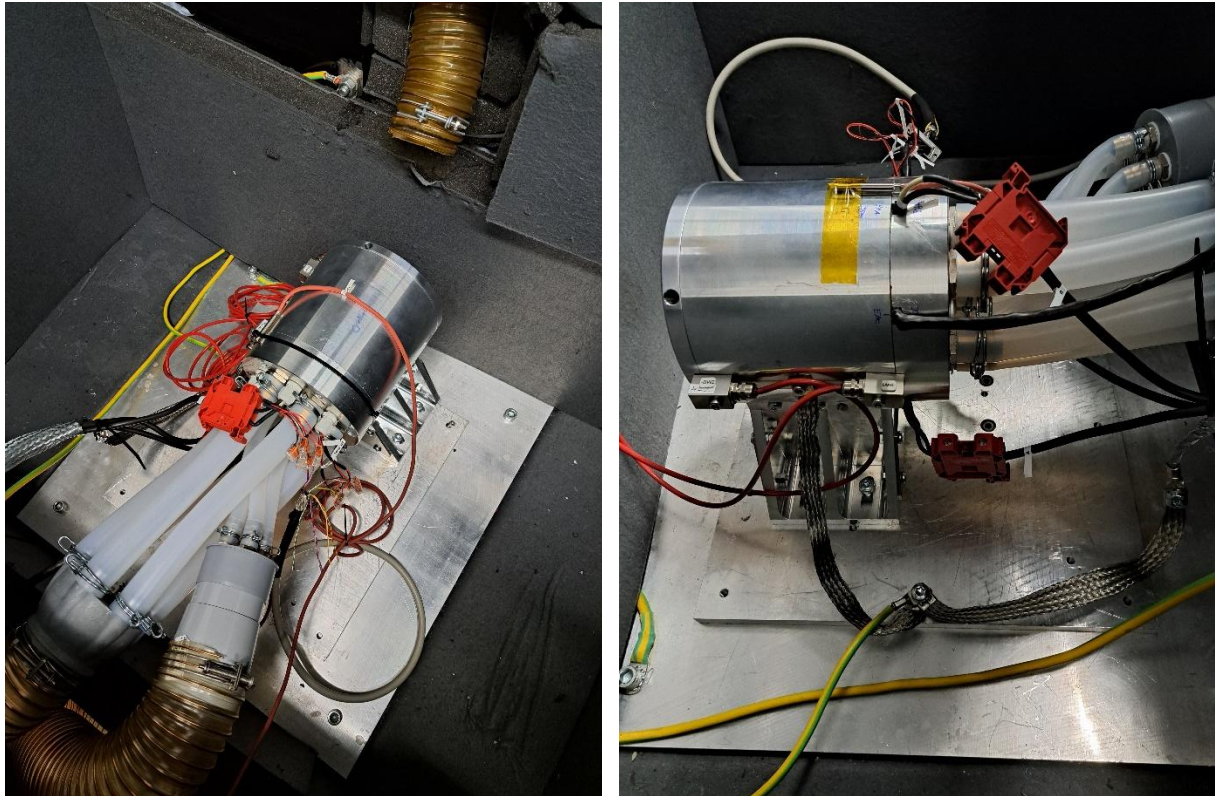
**Abbildung 48: Driver-Modul (Oberseite)**

Das Computing-Modul (CM) beinhaltet die CPU und dient der Kommunikation mit Sensoren sowie den restlichen Systemkomponenten. Auch die Signalverarbeitung und die Regelung (sowohl Motorregelung als auch die Regelungsaufgaben des Zentralen Steuergeräts) werden hier ausgeführt. Das Driver-Modul (DM) beinhaltet die Gate-Treiber zum Ansteuern der Leistungsschalter. Das Power-Modul (PM) schließlich beinhaltet die Leistungsschalter und dient der Bereitstellung der hohen Motorströme.



**Abbildung 49: Power-Modul (Unterseite)**

Parallel dazu werden auch die benötigten mechanischen Komponenten gefertigt. Die gefertigten Leiterplatten und mechanischen Komponenten werden zunächst einzeln getestet und anschließend miteinander integriert.



**Abbildung 50: Prüfstands-aufbau des Testmotors bei Silver Atena**

Das linke Bild in Abbildung 50 zeigt einen Blick von oben in den Berstschutzkäfig. Deutlich zu erkennen ist die Kühlluftzufuhr, welche über zahlreiche Silikonschläuche in das Gehäuse geleitet wird, um die Kühlung sicherzustellen.

Im rechten Bild sieht man einen Teil der Verkabelung und Messinstrumentierung. Über die roten Klemmen werden die Phasenströme in den Motor geleitet (die Bilder zeigen Tests mit den Statorn der ersten Generation). Auf die Oberseite ist eine Temperatursonde geklebt, um die Gehäusetemperatur zu erfassen. Weitere Temperaturmessfühler befinden sich im inneren des Motorgehäuses und werden auf der bildabgewandten Seite aus dem Gehäuse geführt. Auf der bildzugewandten Seite sind am Motor noch zwei Beschleunigungssensoren angebracht (rote Kabel). Diese dienen dazu, den Rundlauf des Motors und der Lager zu überprüfen.

## **2.7 AP 3.3 „Inbetriebnahme der Komponenten“**

Bei der Inbetriebnahme des Turbolader-Motors wurde zunächst eine statische und dynamische Wuchtung des Motors inkl. Motorwelle vorgenommen. Dies wurde durch einen externen Dienstleister bei Silver Atena durchgeführt, da hierfür Speziälsensorik, entsprechende Auswertesoftware und das spezifische Know-How benötigt wurden.

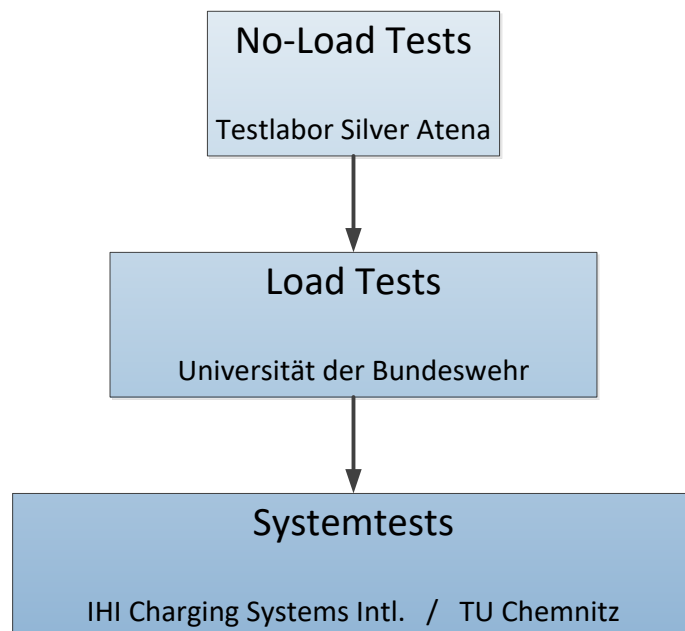
Für das Wuchten wurden Beschleunigungssensoren an zwei Stellen (Schwingungsebenen) am Motor angebracht. Anschließend wurden bei verschiedenen Drehzahlen

die Beschleunigungen gemessen. Diese werden für die Auswertung in zwei Diagrammen dargestellt, einmal die Amplitude der Beschleunigung (in Vielfachen der Erdbeschleunigung  $g$ ) und einmal der Phasenwinkel der Schwingungen. Eigenfrequenzen bei rotierenden Systemen erkennt man typischerweise durch eine Amplitudenüberhöhung sowie durch eine Phasenabsenkung um  $180^\circ$ .

Der Ausgleich von Unwuchten kann durch Materialabtrag oder Materialzugabe erfolgen. In unserem Fall befindet sich auf der Motorwelle eine Wuchtscheibe mit umlaufenden Gewindebohrungen, in denen durch Eindrehen von unterschiedlichen Metall- und Kunststoffschrauben der gewünschte Massenausgleich erfolgte. Dies wird so lange durchgeführt, bis die Unwucht unterhalb der vorgegebenen Toleranz bleibt.

## 2.8 AP 4.1 „Komponententests“

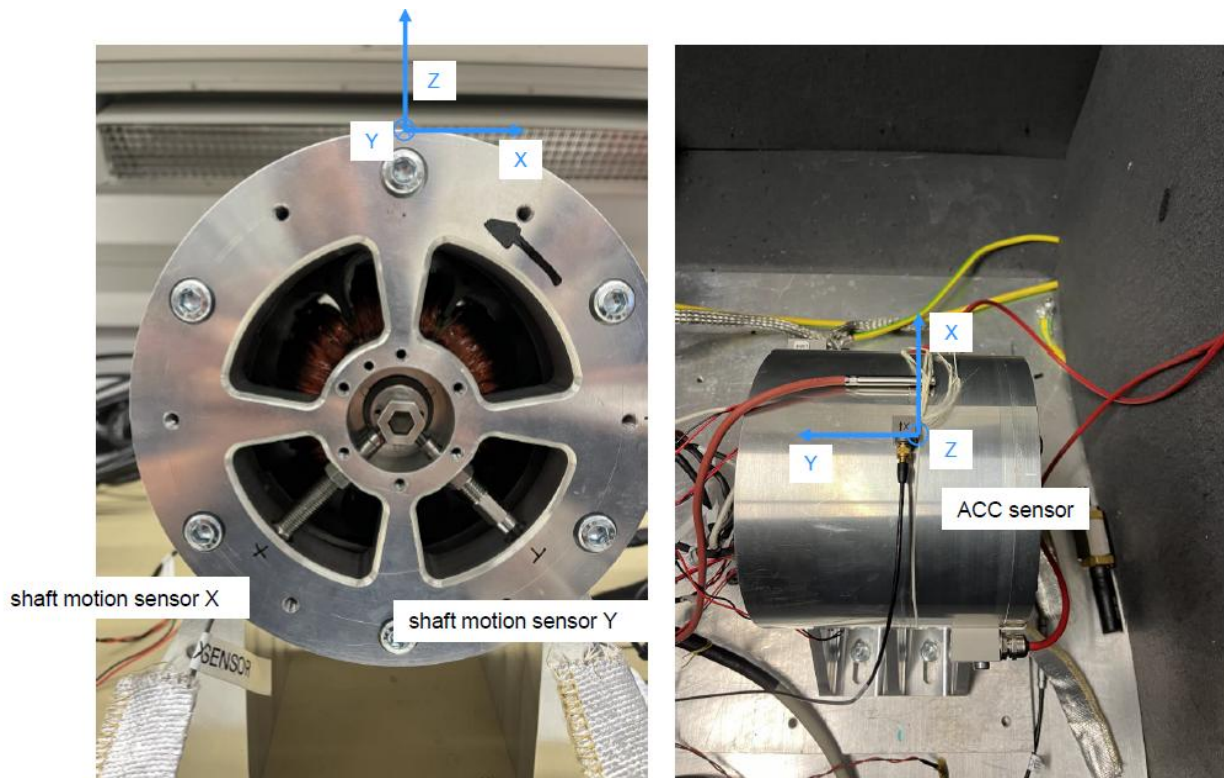
Da sowohl der Elektromotor als auch der Inverter eine Neuentwicklung in diesem Forschungsvorhaben darstellen, wurde für die Erprobung ein mehrstufiger Ansatz gewählt, um alle Komponenten möglichst gut getrennt voneinander charakterisieren zu können. Dies ist in Abbildung 51 schematisch dargestellt. Der erste Schritt waren No-Load Tests, welche im Testlabor von Silver Atena auf der dafür aufgebauten Motorprüfbank durchgeführt wurden. Im Anschluss daran wurden Load Tests am Motorprüfstand der Universität der Bundeswehr (UniBw) in Neubiberg durchgeführt. Die umfangreichste Teststufe schließlich bildet der Test des Gesamtsystems. Dabei werden Untersuchungen am Turbolader bei IHI Charging Systems Intl. GmbH durchgeführt, welche dann in Brennstoffzellensystemtest an der Technischen Universität Chemnitz gipfeln.



**Abbildung 51: Mehrstufiger Erprobungsansatz**

Ein No-Load Test, auch als Leerlauftest bezeichnet, ist ein entscheidender Schritt in der Erprobung und Validierung eines neu entwickelten Elektromotors. Dieser Test wird ohne eine angeschlossene mechanische Last durchgeführt. Der Hauptzweck dieses Tests besteht darin, die grundlegenden Betriebsparameter des Motors zu charakterisieren und eventuelle Probleme frühzeitig zu identifizieren.

Für den No-Load Test wurde ein spezielles Testgehäuse entwickelt, um möglichst frühzeitig auch ohne das finale Motorgehäuse des Partners IHI eine erste Erprobung durchführen zu können. In Abbildung 50 wurde bereits der Prüfstands Aufbau für den No-Load Test gezeigt. In Abbildung 52 ist gezeigt, wie der Motor für den Test instrumentiert wurde. Zwei Sensoren messen die Wellenauslenkung in X- sowie in Y-Richtung. Ein Beschleunigungssensor misst die Beschleunigungen an der Gehäuseoberseite in allen drei Raumrichtungen und dient zur Überwachung der Vibrationen und des Rundlaufs des Motors. Des Weiteren messen Temperatursonden die Gehäusetemperatur sowie die Innentemperatur in den Motorwicklungen an verschiedenen Stellen.



**Abbildung 52: Detailansichten des Motors im Testgehäuse mit Instrumentierung**

Folgende Vorteile ergeben sich aus dem Betrieb des Motors ohne Last:

- Risikominderung: Durch die Durchführung eines No-Load Tests können potenzielle Risiken und Probleme frühzeitig erkannt und behoben werden, bevor der Motor unter realen Betriebsbedingungen getestet wird.

- **Schnelle Testautomatisierung:** Der Test ermöglicht die Erprobung und das Debugging der Automatisierung, was bei den späteren Tests an der UniBw, bei IHI Charging Systems Intl. GmbH, bzw. der TU Chemnitz wertvolle Zeit spart.
- **Vertrautheit mit dem System:** Der Test gibt den Ingenieuren die Möglichkeit, sich mit dem neuen Motor und seinen Eigenschaften vertraut zu machen.
- **Geringer Aufwand:** Da der Test ohne mechanische Last durchgeführt wird, ist der Testaufbau und -durchführung weniger aufwändig und kostengünstiger
- **Frühe Fehlererkennung:** Da der Motor ohne Last betrieben wird, können grundlegende Probleme wie mechanische Unwucht, Überhitzung oder Vibrationen frühzeitig erkannt und behoben werden, bevor der Motor unter Last getestet wird.
- **Justierung der Reglerparameter:** Der Test ermöglicht die Feinabstimmung der Reglerparameter, um einen stabilen und effizienten Betrieb des Motors sicherzustellen.
- **Validierung des Thermalconzepts:** Durch die Überwachung der Temperaturentwicklung können mögliche Thermalprobleme identifiziert und behoben werden.

Beim Betrieb des Motors ohne Last werden verschiedene Parameter gemessen und aufgezeichnet. Dazu gehören die Stromaufnahme und Spannung, die Drehzahl, die Temperaturentwicklungen im Motor und an den Lagern sowie die Vibrations- und Geräuschpegel. Die Auswertung für  $30.000 \text{ min}^{-1}$  ist beispielhaft in Abbildung 53 zu sehen.

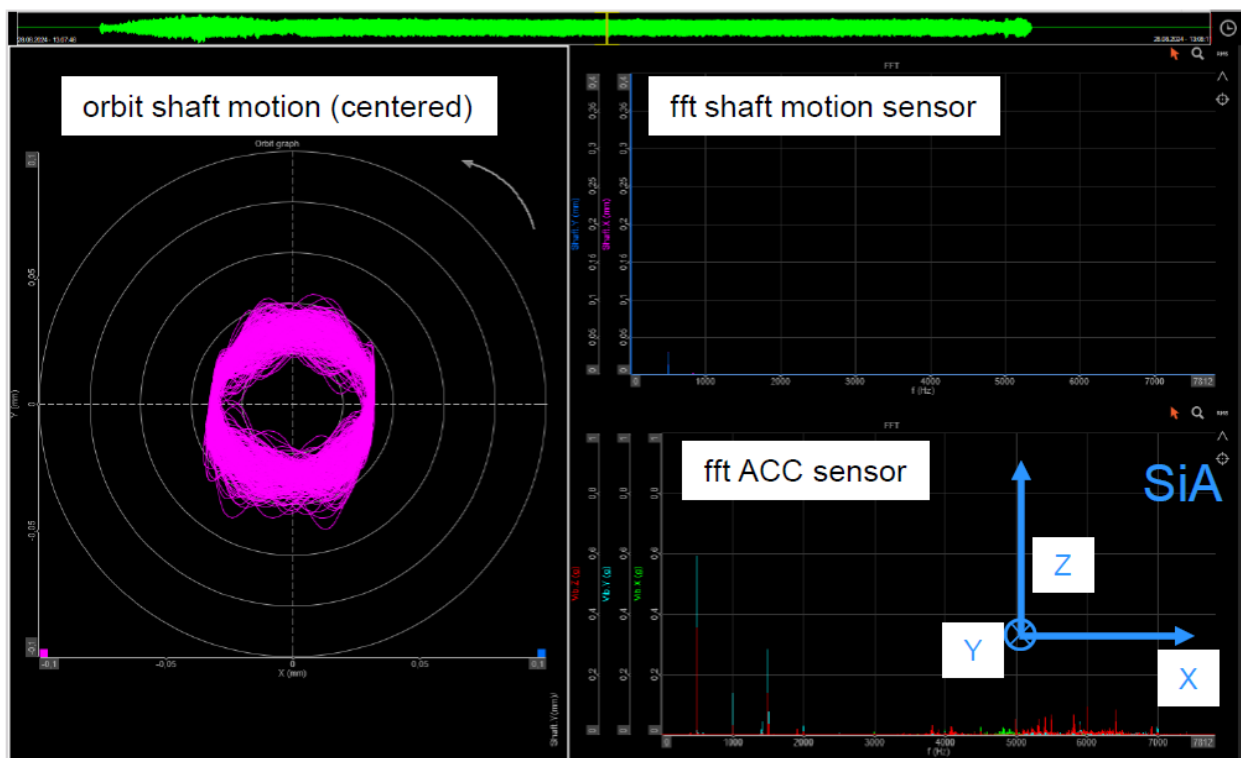
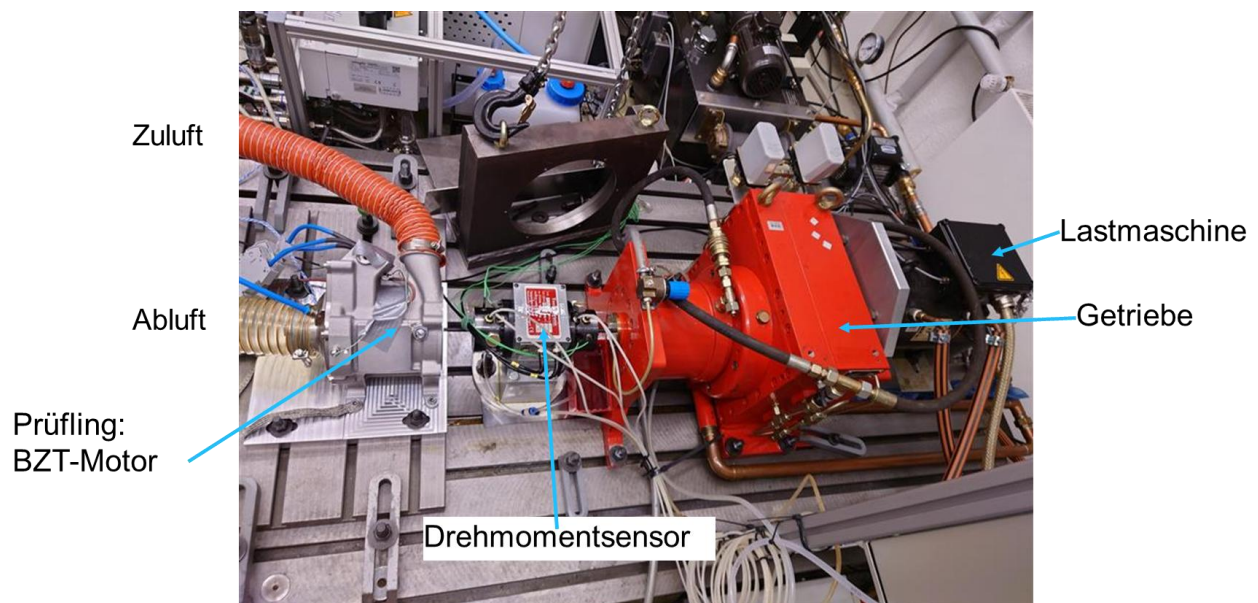


Abbildung 53: Messung der Wellenauslenkung

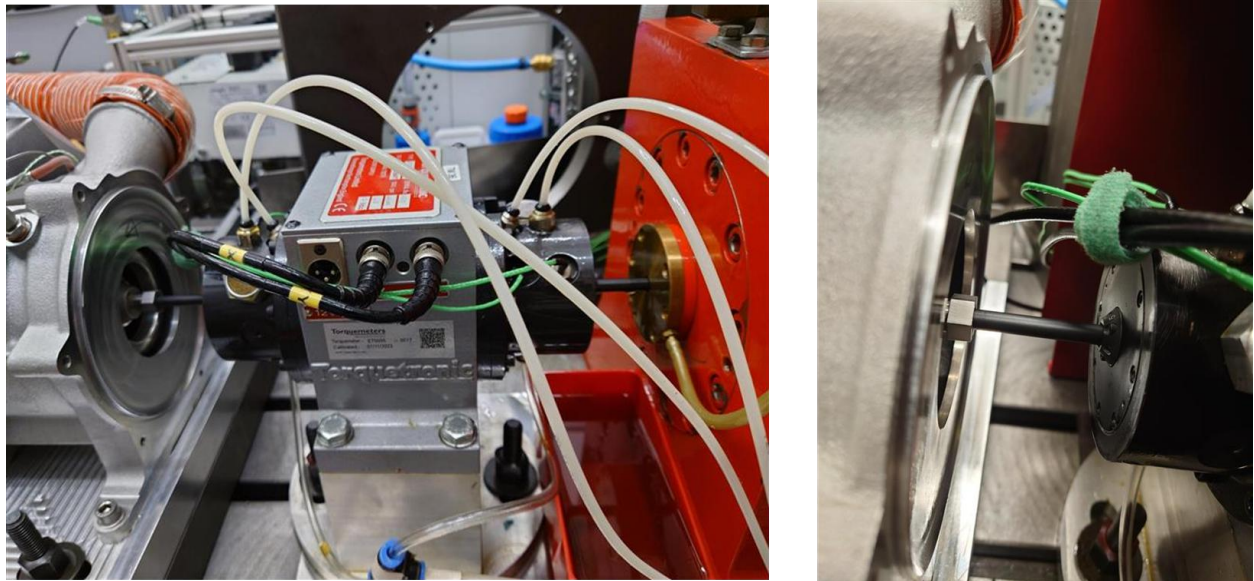
Trotz seiner Vorteile hat der No-Load Test auch einige Einschränkungen. Da der Motor ohne Last betrieben wird, können bestimmte Probleme, die nur unter Lastbedingungen auftreten, nicht erkannt werden. Dazu gehören beispielsweise lastabhängige Schwingungen oder lastabhängige Temperaturanstiege. Ebenso erlaubt der No-Load Test keine genaue Messung der Verluste im Motor, da die Verluste unter Lastbedingungen höher und anders verteilt sind. Der Test liefert keine vollständigen Informationen über das Verhalten des Motors unter realen Betriebsbedingungen und hat daher nur begrenzte Aussagekraft.

Für eine umfassende Validierung des Motors sind daher Tests unter Last erforderlich. Für diese Zwecke haben wir einen Motorprüfstand an der Universität der Bundeswehr benutzt. Abbildung 54 zeigt den Gesamtaufbau für den Test. Der Prüfling ist über ein Getriebe an eine Lastmaschine angeschlossen. Das Drehmoment wird über eine Drehmoment-Messwelle gemessen. Hierfür wurde von der Universität eigens eine Messwelle beschafft, welche im geforderten hohen Drehzahlbereich messen kann. Wichtig für das Thermalmanagement sind die korrekten Zu- und Abluftströme zum bzw. vom Turbolader-Motor.



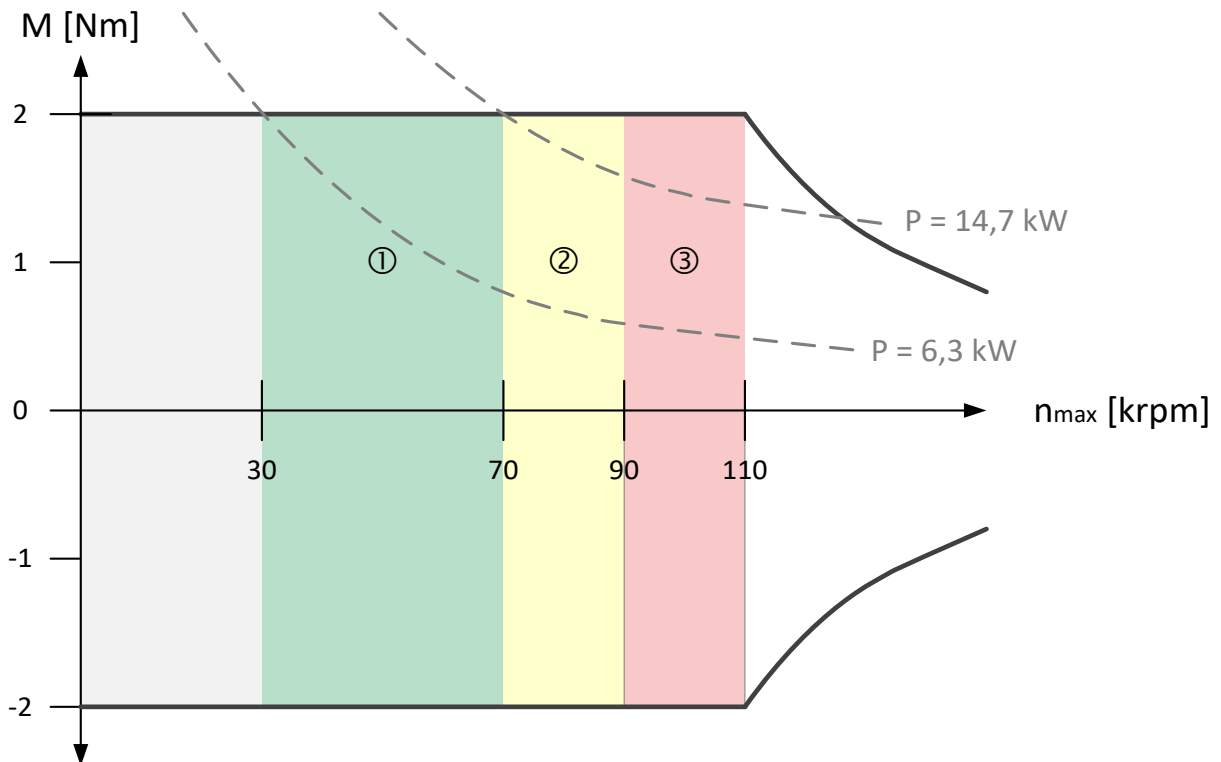
**Abbildung 54: Aufbau für den Load-Test an der Motorprüfbank**

In Abbildung 55 sind der Drehmomentsensor sowie die Abtriebswelle des Turbolader-Motors ersichtlich.



**Abbildung 55: Detailansicht von Drehmomentmesswelle sowie Motorabtriebswelle**

Für die Lasttests wurden verschiedene Drehzahlbereiche definiert, um die Belastung für Motor und Inverter schrittweise zu steigern. Dies wurde als Vorsichtsmaßnahme gemacht, um im Falle eines Schadens bei einem höheren Lastregime dennoch verwertbare Teilergebnisse zu erhalten.

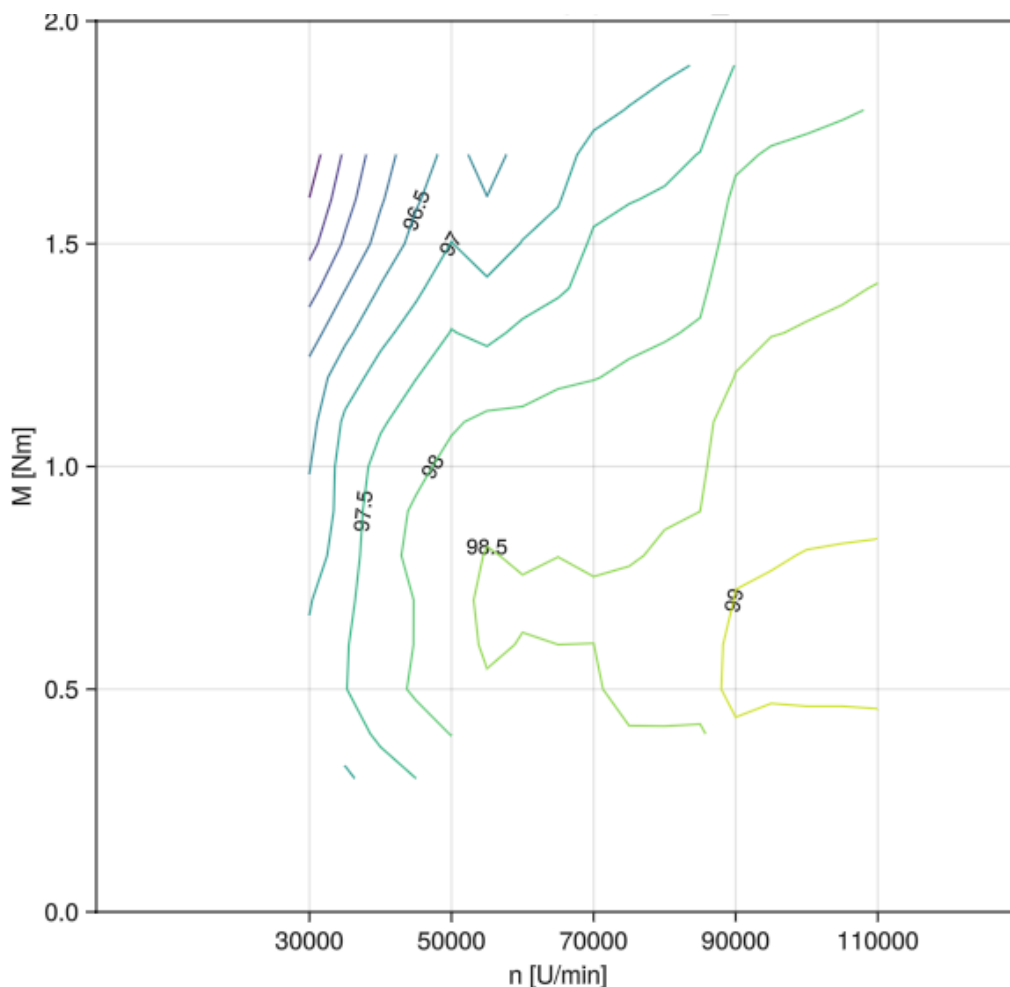


**Abbildung 56: Lastbereiche bei den Load-Tests**

Wie in Abbildung 56 dargestellt, wurde der niedrigste Lastbereich von  $30.000 \text{ min}^{-1}$  bis  $70.000 \text{ min}^{-1}$  gewählt. Der mittlere Lastbereich erstreckt sich von  $70.000 \text{ min}^{-1}$  bis  $90.000 \text{ min}^{-1}$  und der höchste getestete Lastbereich schließlich von  $90.000 \text{ min}^{-1}$  bis  $110.000 \text{ min}^{-1}$ . Beispielhaft sind in der Grafik zwei Kurven konstanter Leistung qualitativ eingezeichnet. In den Testkampagnen wurde jeweils ein Drehmoment konstant eingestellt und dann in Lastbereich der komplette Drehzahlbereich abgefahren.

Temperatursensoren zeichneten die Wärmeentwicklung in den Wicklungen auf (alle drei Phasen), ebenso in den Lagern, um die mechanischen Reibungsverluste feststellen zu können. Über die Drehmoment-Messwelle der Motorprüfbank konnten das Drehmoment und die Drehzahl erfasst werden. Zwei Leistungsmessgeräte maßen im Test den Strom- und Spannungsverlauf sowohl am Invertereingang (Gleichstrom) sowie am Inverterausgang.

Für die Berechnung des Wirkungsgrads des 3-phasigen 3-Level TNPC Inverters wurden die DC-Eingangsleistung und die Ausgangsleistung des Inverters ins Verhältnis gesetzt. Das Ergebnis ist im Konturplot in Abbildung 57 für 520V Eingangsspannung dargestellt.



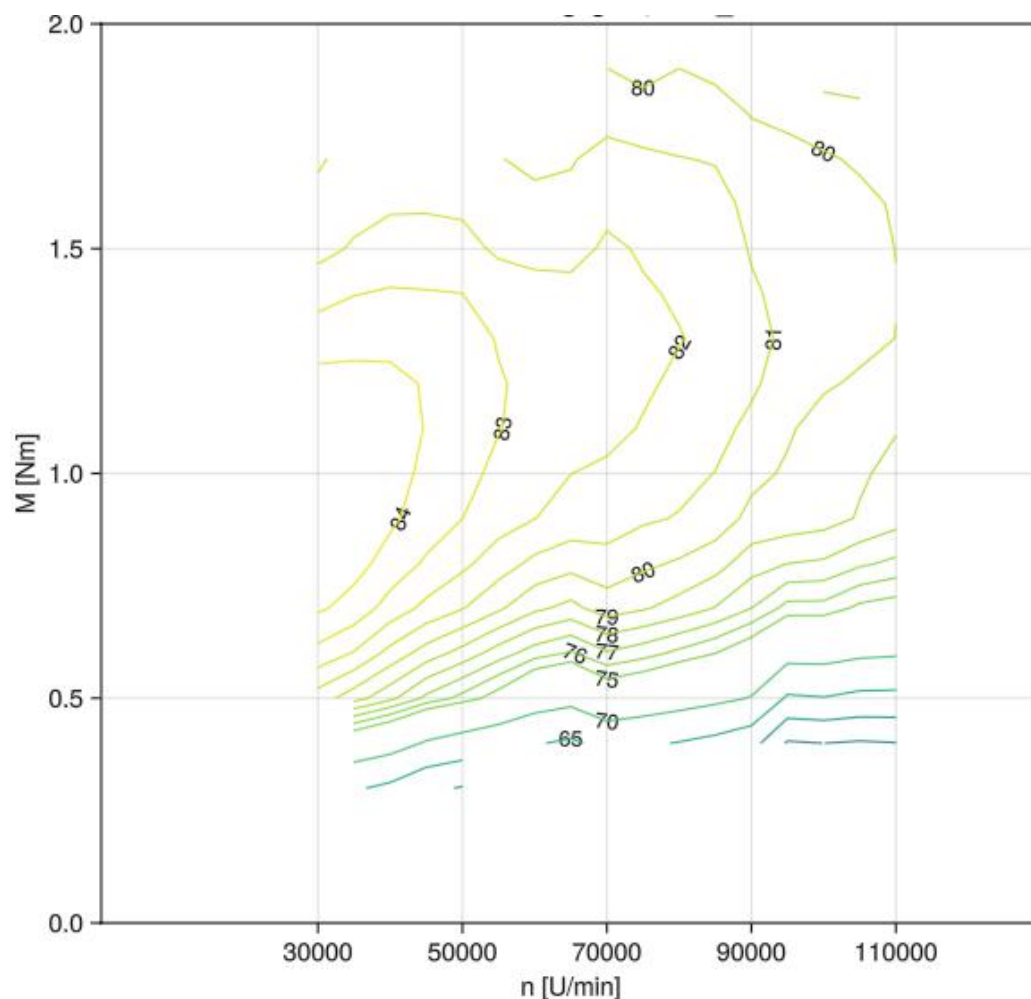
**Abbildung 57: Konturplot des Inverter-Wirkungsgrads ( $U_{\text{DC}}=520\text{V}$ )**



Konturplots sind eine effektive Methode, um Wirkungsgrade auf einem Drehzahl-Drehmoment-Diagramm darzustellen. Die Konturlinien verbinden Punkte gleichen Wirkungsgrads und schaffen so eine detaillierte Karte der Wirkungsgradverteilung über das gesamte Drehzahl-Drehmoment-Feld. Dies erlaubt eine genaue Analyse und Optimierung der Betriebsstrategien. Der Vergleich von Konturplots unterschiedlicher Betriebsbedingungen oder Systemkonfigurationen erlaubt es, leicht Unterschiede und Gemeinsamkeiten erkennen und so Rückschlüsse auf die Systemperformance ziehen.

Die Leistungsfähigkeit des Inverters ist insgesamt als sehr gut einzuordnen. Bei hohen Leistungen liegt er bei etwa 98%, bei speziellen Betriebspunkten kann er bis über 99% hinausgehen. Bei niedrigen Leistungen wird immer mehr als 95% erreicht.

Für die Berechnung des Motorwirkungsgrads wurde die mechanische Leistung mit der elektrischen Eingangsleistung ins Verhältnis gesetzt. Die mechanische Leistung kann aus Drehzahl und Drehmoment berechnet werden (Drehmoment multipliziert mit der Winkelgeschwindigkeit), die beide gemessen wurden. Die elektrische Eingangsleistung des Motors entspricht der Ausgangsleistung des Inverters.



**Abbildung 58: Konturplot des Motor-Wirkungsgrads ( $U_{DC}=520V$ )**

Die Verlustleistung des Motors setzt sich im Wesentlichen aus zwei Komponenten zusammen: drehzahlproportionale Verluste sowie drehmomentproportionale Verluste. Die drehzahlproportionalen Verluste stammen aus den Streuflüssen im Motorgehäuse. Die drehmomentproportionalen Verluste ergeben sich aus den Ohm'schen Verlusten in den Motorwicklungen.

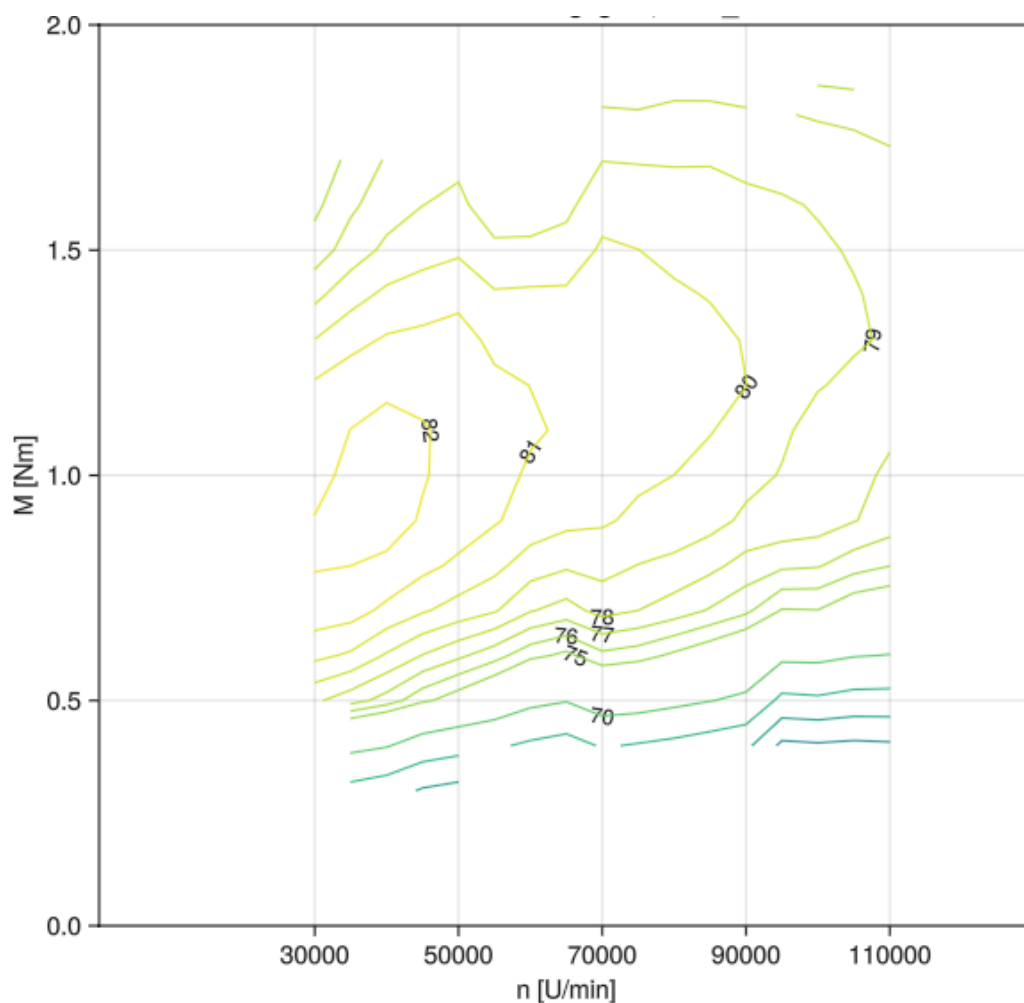
Die Leistungsfähigkeit des Motors fällt hinter den Erwartungen zurück, sowohl bezüglich der Berechnungen als auch im Vergleich zu alternativen Motorarchitekturen. Bei hohen Leistungen kommt der Wirkungsgrad in die Region von 80%. Simulationen hatten über 95% gezeigt. Auch im niedrigen Lastbereich ist mit etwa 50% der Wirkungsgrad wesentlich kleiner als der berechnete Wert von über 80%.

Die Ursache der Abweichung zwischen Messung und Rechnung liegt vermutlich in den Streuflüssen der Toroidalwicklung in die Lagersitze und in das Gehäuse und die dadurch erzeugten Wirbelströme. Während der Load-Tests gemessene erhöhte Temperaturen an den Lagersitzen der Kugellager unterstützen diese These.

Eine weitere 3D Berechnungsschleife, anhand eines durch Analyse der jetzt vorhandenen experimentellen Daten verbesserten Modells, kann Designanpassung vorschlagen, d.h. z.B. Abstände leitender Materialien zu den Wicklungen vorgeben. Es besteht das Potential den Wirkungsgrad des Motors signifikant (5-10% Punkte) anzuheben.

Bei den Wirkungsgradauswertungen von Inverter und Motor muss beachtet werden, dass beim Ermitteln der Motoreingangsleistung messungsbedingt sehr hochfrequente Anteile rausgefiltert werden. Je nachdem, wie hoch der Anteil dieser höheren Harmonien ist, wird dadurch ein gewisser Teil der elektrischen Leistung nicht mitgemessen. Dies führt dazu, dass es eine Verschiebung zwischen Inverter- und Motorwirkungsgrad gibt. Der Inverter-Wirkungsgrad wird dabei tendenziell etwas zu niedrig ermittelt, der Motorwirkungsgrad hingegen etwas zu hoch.

Für die Berechnung des Gesamtwirkungsgrads wird daher die mechanische Antriebsleistung des Motors mit der DC-Eingangleistung des Inverters ins Verhältnis gesetzt. Dies umgeht die oben genannte Problematik und ergibt einen zuverlässigen Wert für den Wirkungsgrad des Systems Inverter + Motor. Der Gesamtwirkungsgrad ist in Abbildung 59 dargestellt. Da der Inverter-Wirkungsgrad deutlich höher liegt als der Motorwirkungsgrad, entspricht der Wirkungsgradverlauf im Wesentlichen dem Motorwirkungsgrad.



**Abbildung 59: Konturplot des elektrischen Gesamtwirkungsgrads ( $U_{DC}=520V$ )**

Die Systemtests bei IHI Charging System Intl. GmbH wurden an den erstellten A-Mustern durchgeführt, um die wichtigsten Systemmerkmale zu überprüfen: die elektromagnetischen Fähigkeiten des Motors, die thermodynamische Leistung und das thermische Verhalten des Systems sowie die dynamische Stabilität des Rotors. Begrenzte Dauerhaltbarkeitszyklen, die auf Basis von Anwendungserfahrungen und Ergebnissen der Antriebssystems simulation der TU Chemnitz definiert wurden, konnten erfolgreich durchgeführt werden. Details dazu können dem Bericht der IHI Charging Systems Intl. GmbH entnommen werden.

Die letzte und abschließende Stufe der Testkampagne bildet die Validierung des Brennstoffzellen-Gesamtsystems, welche an der TU Chemnitz durchgeführt wird und in deren Teilbericht dokumentiert ist.



### 3 Verwertbarkeit des Ergebnisses

Im Rahmen des in diesem Bericht vorgestellten Dreijahresprogramms wurde ein elektrifiziertes Luftversorgungssystem für Brennstoffzellen entwickelt, das die Technologie von Radialverdichtern und Turbinenrekuperation als energieeffizienteste Technologien für diese Zwecke nutzt. In dem werteoptimierenden Entwicklungsprojekt wurden neue technische Lösungen zur Optimierung der Produktkosten und zur Reduzierung des Produktgewichts durch größtmögliche Vereinfachung und Funktionenintegration entwickelt und einer Verifizierung sowie vorläufigen Validierung unterzogen. Die Zielvorgabe der technischen Reifgraderhöhung wurde erreicht.

Die Ausarbeitung von Fertigungskonzepten für die Produktion in hohen Stückzahlen wurde notwendigerweise eingeschränkt umgesetzt. Das Interesse von geeigneten Lieferanten, deren Expertise für eine solche Studie notwendig ist, war angesichts der Marktentwicklung teilweise wenig intensiv. Ohne eine intensive Einbindung von Lieferanten ist jedoch jede Aussage zur Kostenstruktur in hohen Stückzahlen vage. Ihr Beitrag zu einer Kostenbewertung und insbesondere zu kostengetriebenen Designoptimierung ist unverzichtbar. Bei der Bewertung der elektronischen Bauteile wurde ein Mangel in der bestehenden Lieferantenstruktur sichtbar. Entwicklungs- und Fertigungskompetenz in einer Hand sind notwendig, um neue Technologien kostenattraktiv realisieren zu können.

Der Verwertungsplan ist beeinflusst von der aktuellen Marktentwicklung für Brennstoffzellen in Antrieben für die bodengebundene Mobilität. Seit der Antragerstellung im Jahr 2021 wurde bzgl. Infrastruktur für die Zurverfügungstellung von grünem Wasserstoff für die Mobilität nur wenig Fortschritt erreicht. Insofern sind alle Anwendungen, die nicht höchste Anforderungen an Reichweite und Zuladung haben, aus dem Fokus der Fahrzeughersteller verschwunden. Zwar gibt es einzelne Projekte, die auf individuelle Mobilität abzielen – besonders bei asiatischen Herstellern -, doch diese weisen i.d.R. den Charakter einer Demonstrationsflotte auf. Solche Projekte können nur einen begrenzten Entwicklungsaufwand rechtfertigen.

Silver Atena sieht eine Verwertungschance der in diesem Vorhaben erarbeiteten Technologien, vor allem für den Hochdrehzahl-Inverter. Insbesondere im Bereich der Heavy Duty Trucks und für Long Haul oder auch Rail Anwendungen erwarten wir einen Markt für wasserstoffbezogene Technologien.

Ein Hemmnis für Wasserstoff-Mobilität ist zweifelsohne die rasante Entwicklung im Bereich der batterieelektrischen Antriebe. Auch der Ausbau der zugehörigen Lade-Infrastruktur findet im Vergleich zur Bereitstellung von grünem Wasserstoff deutlich intensiver statt. Allerdings besteht auch hier, insbesondere für energieintensive Antriebe, noch ein Mangel. Trotzdem werden mehr und mehr Marktsegmente mit batterieelektrischen Antrieben besetzt, was die Marktdurchdringung für Brennstoffzellen in der Mobilität zusätzlich erschwert.

Über die Projektanwendung hinausgehend lassen sich die hier erarbeiteten Ergebnisse auch auf andere Mobilitätssektoren übertragen und somit eine gute Anschlussfähigkeit herstellen. Insbesondere die entwickelte Wechselrichtertechnologie für hohe Wirkungsgrade im Teil- und Volllastbereich lässt sich gut in andere Anwendungsbereiche transfe-



rieren. In erster Linie ist hier der PKW-Markt zu nennen, gute Chancen sehen wir aber auch bei stationären Anwendungen oder im Luftfahrtsektor, insbesondere im Bereich „Urban Air Mobility“, in dem Silver Atena sehr aktiv ist.



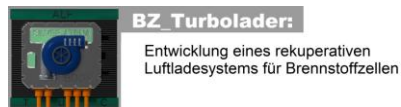
## 4 Ergebnisse Dritter mit Relevanz für das Vorhaben

Es wurden während der Projektlaufzeit keine Arbeitsergebnisse Dritter bekannt, die die Durchführung des Vorhabens beeinflussten oder die Verwertung der Ergebnisse in nächster Zeit beeinflussen könnten.

Das hier beschriebene Projekt hat eine Systemoptimierung aus dem Blick der Balance-of-Plant Komponente elektrifizierter Luftverdichter sowie der elektronischen Steuerung zum Ziel und unterscheidet sich so von anderen Systemprojekten. Es wird ausdrücklich spezifisches Know-How zur Auslegung und Optimierung der Komponenten in die Systemoptimierung eingebracht.

Im Fördercall der EU „HORIZON-JTI-CLEANH2-2024“, der inzwischen geschlossen ist, ist vorstellbar, dass ähnliche Fragestellungen bearbeitet werden, wie sie hier im Projektkonsortium bearbeitet wurden. So werden in diesem Förderrahmen Fragestellungen wie Skalierung und Optimierungen von Brennstoffzellensystemen mit Fokus auf „Balance-of-Plant“ (BoP) Komponenten adressiert. Der Luftverdichter ist die prominenteste BoP Komponente, so dass entsprechend Untersuchungen erwartet werden können.

In der Rückschau auf die Zeit der Beantragung des Förderprojekts im Jahr 2021, ist zu erkennen, dass die Anwendung von Brennstoffzellen in Antrieben für die bodengebundene Mobilität sich auf Trucks mit sehr hohen Anforderungen an Reichweite und Zuladung beschränken wird. Aus jetziger Sicht vorrausschauend, wurde die Mission für das untersuchte Brennstoffzellenfahrzeug passend definiert. Darüberhinausgehend fokussieren sich inzwischen viele Arbeiten auf andere Anwendungen, wie z.B. Industrie, Marine, Luftfahrt.



## 5 Veröffentlichungen

Mitarbeiter von Silver Atena haben an folgenden Veröffentlichungen mitgewirkt:

- [1] Arvithis, G. S., Iosifidis, G., DeSantis, R., Rode, M., Burgmair, R., & Kalfas, A. I., Novel Modeling Methodology for Thermal Evaluation of an Electrically Assisted High-Speed Turbomachine. Engineering Proceedings, 90(1), 48.  
<https://doi.org/10.3390/engproc2025090048>, 2025.
- [2] Rathke, P., Di Modica, D.-V., Fink, S. K., Filsinger, D., Burgmair, R., von Unwerth, T.: Model Based Investigation on Drive Train Performance of a Heavy-Duty Fuel Cell Truck Focusing on the Fuel Cell Air Delivery System, FC3 Fuel Cell Conference Chemnitz, 12.+13.11.2024.
- [3] Pohl, E., Wach, M., Burgmair, R., Slavic, S., Filsinger, D.: BZ\_Turbolader - Entwicklung eines rekuperativen Luftladesystems für Brennstoffzellen, Poster Ausstellung, FC3 Fuel Cell Conference Chemnitz, 12.+13.11.2024.
- [4] Rathke, P., Pohl, E., Filsinger, D., Burgmair, R., Fink, S.-K.: Investigation on Total Cost of Ownership to Assess a Heavy-Duty Truck Fuel Cell Battery Electric Propulsion System, with Emphasis on the Air Supply, in preparation.