

**Abschlussbericht Nr.: 1/A439/24**

**Verbundvorhaben AdHyBau  
Entwicklung additiver Verfahren und  
Faserverbund-Metall Hybridbauweisen für den  
Einsatz in tiefkalter Umgebung**

**Teilvorhaben**

**Neuartige Bauweisen für Strukturen in elektrischen Antrieben mit kryogener Kühlung**

Projektleiter: Prof. Dr.-Ing. habil. Maik Gude  
Autoren: Dipl.-Ing. Martin Pohl, M. Sc. Wikentij Koshukow,  
Dipl.-Ing. Richard Grothe

Förderkennzeichen: 20M1904C

Datum: 06/2024  
Förderungszeitraum: 01.05.2020 – 31.12.2023  
Berichtszeitraum: 01.05.2020 – 31.12.2023

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Kurzdarstellung .....</b>	<b>3</b>
1.1	Aufgabenstellung .....	3
1.2	Voraussetzungen .....	3
1.2.1	Expertise des Institutes.....	3
1.2.2	Vorangegangene Forschungsprojekte .....	4
1.2.3	Technische Ausstattung.....	4
1.3	Planung und Ablauf des Vorhabens .....	5
1.4	Wissenschaftlicher und technischer Stand.....	6
1.4.1	Entwicklung elektrischer Motoren.....	6
1.4.2	Entwicklung hybrider Bauweisen .....	7
1.4.3	Werkstoffverhalten bei kryogenen Temperaturen .....	9
1.5	Zusammenarbeit mit anderen Stellen .....	10
<b>2</b>	<b>Eingehende Darstellung.....</b>	<b>11</b>
2.1	Verwendung der Zuwendung, erzielte Ergebnisse, vorgegebene Ziele .....	11
2.1.1	HAP1 .....	11
2.1.2	HAP2 .....	13
2.1.3	HAP3 .....	18
2.1.4	HAP4 .....	23
2.1.5	HAP5 .....	31
2.2	Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises .....	34
2.3	Notwendigkeit/ Angemessenheit geleistete Arbeit .....	35
2.4	Nutzen, Verwertbarkeit, Verwertungsplan .....	35
2.5	Fortschritt bei anderen Stellen.....	35
2.6	Veröffentlichungen .....	36
<b>3</b>	<b>Quellen.....</b>	<b>37</b>

# 1 Kurzdarstellung

## 1.1 Aufgabenstellung

Hauptziel der vom Institut für Leichtbau und Kunststofftechnik der Technischen Universität Dresden (TUD-ILK) im Verbundvorhaben AdHyBau durchgeführten Arbeiten war die Erforschung neuartiger Faserverbund-Metall-Bauweisen. Die Kombination von Hochleistungs-Faserverbundwerkstoffen mit generativ gefertigten metallischen Elementen ermöglicht die Herstellung von Strukturen die gegenüber konventionellen Bauweisen hinsichtlich ihrer Funktionalität und Leistungsfähigkeit deutlich gesteigert sind. Damit sind diese prädestiniert für den Einsatz in elektrischen Systemen mit kryogener Kühlung und liefern damit als Schlüsseltechnologie einen wichtigen Beitrag für die Mobilität der Zukunft.

## 1.2 Voraussetzungen

Das Vorhaben „Neuartige Bauweisen für Strukturen in elektrischen Antrieben mit kryogener Kühlung“ wurde unter den nachfolgenden Voraussetzungen durchgeführt.

### 1.2.1 Expertise des Institutes

Das TUD-ILK führt seit Jahrzehnten umfangreiche FuE-Arbeiten auf dem Gebiet beanspruchungsgerechter Leichtbaustrukturen und -systeme durch. Forschungsschwerpunkte sind dabei die Entwicklung von Leichtbauprinzipien, Modellierungs- und Simulationsverfahren sowie Beurteilungskriterien für Strukturen und Prozesse des Leichtbaus. Dabei fokussiert das Institut insbesondere auf analytisch-numerische Verfahren der Werkstoff- und Strukturanalyse sowie deren experimenteller Validierung, auf Modellierungs- und Simulationsmethoden für die Bereiche Werkstoff, Struktur und Prozess, auf die Bereiche Werkstoffprüfung, Strukturaufklärung, Schädigungs- und Versagensanalyse sowie auf bionisch inspirierte Struktursynthese. Dabei wird ein werkstoff- und produktübergreifender Ansatz zu Grunde gelegt, der durchgängig die gesamte Entwicklungskette vom Werkstoff über die Konstruktion, die Simulation, die Fertigung, den Prototyp, den Test, die Qualitätssicherung bis hin zu den Kosten umfasst.

Für die Auslegung von komplexen Bauteilstrukturen sowohl unter überlagerten statischen und hochdynamischen als auch zyklischen Belastungen werden am TUD-ILK im Rahmen industrieorientierter Forschungsarbeiten übergreifende Simulationsverfahren entwickelt. Ein wesentliches Arbeitsfeld am TUD-ILK ist dabei die Erarbeitung werkstoffangepasster, wirklichkeitsnaher Versagens- und Schädigungsmodelle für neuartige faser- und textilverstärkte Verbundbauteile. Dazu wurden unter anderem in verschiedenen Einzel- und

Verbundforschungsvorhaben neue physikalisch begründete Festigkeitshypothesen zur Bewertung des Versagensverhaltens ein- und mehrschichtiger faserverstärkter sowie textilverstärkter Bauteilstrukturen mit und ohne konstruktiv bedingte Ausschnitte, Kerben, Fügstellen und Kräfteinleitungen theoretisch und experimentell eingehend untersucht. Darauf aufbauend erfolgte die Entwicklung neuartiger phänomenologischer, physikalisch begründeter Schädigungshypothesen zur Bewertung des sukzessiven Versagensverhaltens. Derartige Modelle wurden am TUD-ILK bisher vorwiegend für faser- und textilverstärkte Verbundwerkstoffe mit duromerer und thermoplastischer Matrix entwickelt. Dabei konnte bereits bestätigt werden, dass diese mehrskaligen Schädigungsmodelle sowohl die äußerst komplexen Bruchvorgänge als auch das anisotrope Degradationsverhalten unter Berücksichtigung verschiedener Mechanismen der Schädigungsevolution realistisch erfassen. Diese bisher im Rahmen interdisziplinärer Grundlagenforschung zur rechnergestützten Erfassung des anisotropen Degradationsverhaltens erarbeiteten semi-analytischen Lösungsansätze bieten – im Unterschied zu Finite-Elemente-Berechnungen – den Vorteil physikalischer Deutung und Wichtung der einzelnen Konstruktionsvariablen bei hoher Genauigkeit und extrem kurzen Rechenzeiten. Damit lassen sich für grundlegende Bauteilstrukturen, wie etwa für faserverstärkte Rohre, umfassende Parameterstudien durchführen. Diese Studien ermöglichen bereits in der Vorauslegungsphase eine Abschätzung von maßgeblichen Parametern der Werkstoffkombinationen und Faseranordnung sowie Geometriedaten.

### **1.2.2 Vorangegangene Forschungsprojekte**

Wesentliche Grundlagen für die Lösungen der hier adressierten Fragestellungen wurden u.a. in den folgenden Projekten mit Beteiligung des TUD-ILK mit Bezug zu Faserverbund-Metall-Bauweisen gelegt:

- LeRaLa: Leichtbau-Radiallaufrad (IGF)
- PEP4.0: Digital synchronisierte Entwicklungsarchitektur für den Produktentstehungsprozess (LuFo)
- LEIKA: Ressourceneffiziente Mischbauweisen für Leichtbau-Karosserien (BMBF)
- SPP 1712: Intrinsische Hybridverbunde – Grundlagen der Fertigung, Charakterisierung und Auslegung (DFG)
- FueDra: Metall-FKV-Verbindung (IGF-Vorhaben)
- FuPro: Bauweisen- und Prozessentwicklung für funktionalisierte Mehrkomponentenstrukturen mit komplex geformten Hohlprofilen
- hypro: Ganzheitliche Umsetzung hybrider Bauweisen in die Serienproduktion

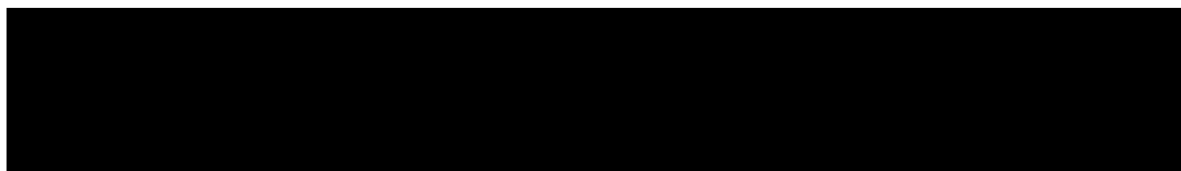
### **1.2.3 Technische Ausstattung**

Zur Herstellung von hybriden Leichtbaustrukturen stehen umfangreiche Fertigungskapazitäten zur Verfügung. Für duroplastische Faser-Kunststoff-Verbunde (FKV) wesentlich sind hier CAM-

Zuschnitttische, Wickel- und Flechtanlagen für das Preforming rotationssymmetrischer Komponenten, RTM Injektionsanlagen für das Infiltrieren von Matrixsystemen und Autoklaven für das Aushärten der Strukturen.

Für die experimentelle Werkstoffcharakterisierung von Textilverbundwerkstoffen wurden am TUD-ILK spezielle Prüftechniken für Ein- und Mehraxialversuche konzipiert und erfolgreich angewendet. Neben Bruchversuchen an Flachzugprobekörpern, wie etwa „on-axis“ und „off-axis“-Zug-, Druck- und Schubversuche, bilden Zug/Druck-Torsions-Versuche an Rohrproben, gegebenenfalls auch mit Innendruck- bzw. Außendruckbeanspruchung (Z/D-T-p-Versuch), einen Schwerpunkt der experimentellen Untersuchungen. Neben Ansatzdehnungsmessern und klassischer DMS-Technik werden zur Bestimmung des Verformungsverlaufes und des Schädigungsverhaltens auch Online-Verfahren wie etwa die Electronic-Speckle-Pattern-Interferometrie (ESPI), das Grauwertkorrelationsverfahren (GKV), die Schallemissionsanalyse sowie das Ultraschall-Immersionsverfahren eingesetzt. Darüber hinaus können bei hochdynamischen Belastungen verschiedene Hochgeschwindigkeits-Kameras, die Hochgeschwindigkeits-Grauwertkorrelations-Einheit sowie das Point-Tracking-System eingesetzt werden. Die Auslegung von Hybridverbunden und Bauteilkomponenten stützt sich ferner auf eine große Zahl von Kurzzeit-, Langzeit-, dynamischen und hochdynamischen Untersuchungen mittels multiaxialer Prüfmaschinen mit zugehöriger Thermokammer und Schnellzerreißmaschinen. Für eine Prüfung auf Subsystemebene stehen außerdem verschiedene Schleuderprüfstände bereit, bei denen mittels umfangreicher Messtechnik insbesondere Aussagen über das Versagensverhalten getroffen werden können. Darüber hinaus unterstützen zerstörende und zerstörungsfreie Prüftechniken wie etwa Schliffbildanalysen, Ultraschalluntersuchungen oder Computertomografie bei der Strukturaufklärung, Bewertung von Fehlern und Schädigungen oder auch bei der Qualitätssicherung.

### 1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens



Die Planung und der Ablauf des Vorhabens AdHyBau orientierte sich am nachfolgenden Schema:

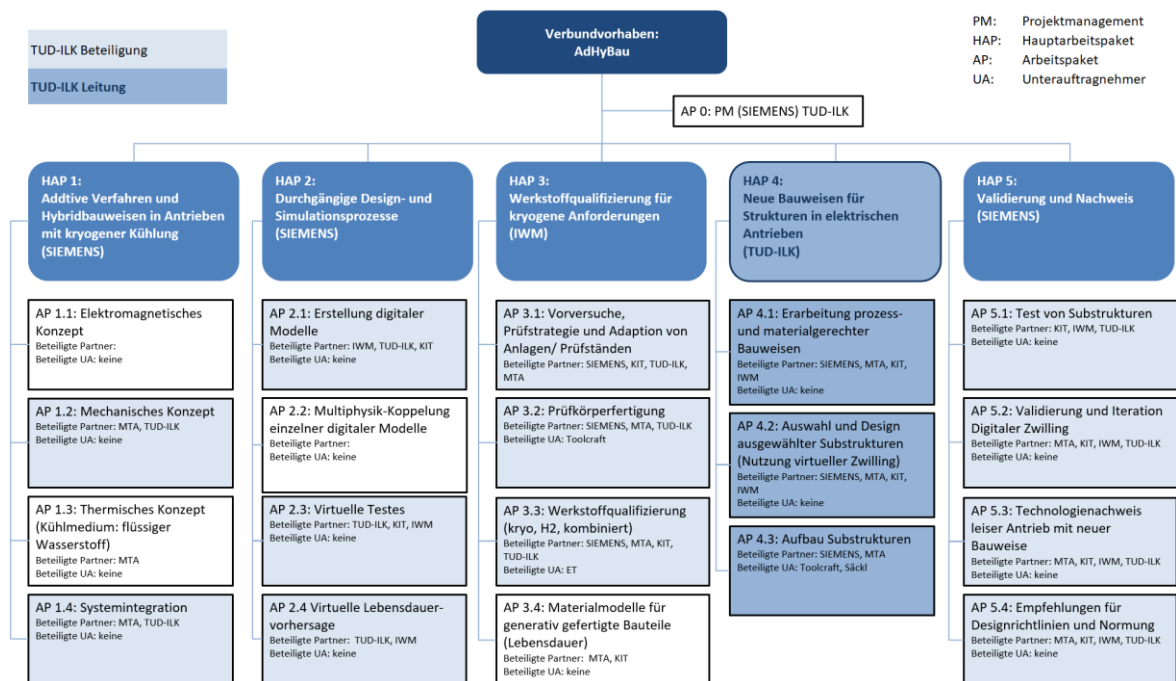


Abbildung 1: Projektstrukturplan mit hervorgehobenen Beteiligungen des TUD-ILK

## 1.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand

Nachfolgend werden die Entwicklungsstände zu den im Teilvorhaben relevanten Technologien sowie Vorarbeiten am TUD-ILK kurz dargestellt.

### 1.4.1 Entwicklung elektrischer Motoren

Zur Steigerung der Effizienz von Verkehrsmitteln werden neue elektrische Maschinen mit höherer Leistungsdichte benötigt, da das Leistungsgewicht der gängigen elektrischen Antriebe derzeit beispielsweise für kleine und mittlere Flugzeuge zu gering ist. Gefordert wird eine höhere Effizienz der Maschine und eine damit verbundene erhöhte Lastaufnahme bei gleichzeitig verringertem Gewicht. Durch den Einsatz neuer Werkstoffe kann das Leistungsgewicht verbessert werden, um etwa das elektrische Fliegen in Zukunft zu ermöglichen.

Eine höhere Leistungsdichte lässt sich unter anderem über eine Reduzierung von energetischen Verlusten erreichen. Hierfür ist es notwendig, den Bauraum so gering wie möglich zu halten

und magnetisch passive Materialien zu verwenden, um unerwünschte Effekte, wie Wirbelstromverluste und den magnetischen Widerstand, aufgrund des Luftspalts zwischen Rotor und Stator zu minimieren. Aufgrund der genannten Anforderungen solcher Antriebsstrukturen zeichnen sich FKV als geeignete Werkstoffsysteme aus. Sie verfügen über eine hohe magnetische Passivität, die eine sehr hohe Durchlässigkeit gegenüber elektromagnetischen Wellen ermöglicht. Die Werkstoffklasse der glasfaserverstärkten Kunststoffe (GFK) ist auch wegen ihrer sehr guten Isolationsfähigkeit von großer Bedeutung. Weit verbreitet ist der Einsatz von GFK bei Leiterplatten, Isolatoren und Gehäusen für Prüftransformatoren. Durch die sehr guten spezifischen Festigkeiten und Steifigkeiten in Faserrichtung sowie durch die resultierenden richtungsabhängigen Bauteileigenschaften ist es möglich, Bauteile mit sehr hoher Materialausnutzung bei gleichzeitig geringem Gewicht zu fertigen.

#### **1.4.2 Entwicklung hybrider Bauweisen**

Der sukzessiv steigende Einsatz von FKV ist das Ergebnis einer jahrzehntelangen konsequenten Entwicklung spezifischer Auslegungs- und Fertigungsmethoden. Die Eignung dieser Methoden beschränkt sich derzeit jedoch weitgehend auf großflächige und eher dünnwandige FKV-Strukturen, die i. Allg. eine geringe geometrische Komplexität wie etwa bei Flügelschalen und Stringer aufweisen.

Für eine hybride Metall-Faserverbund-Bauweise beschäftigte sich der 2007 abgeschlossene Sonderforschungsbereich SFB 396 (Robuste, verkürzte Prozessketten für flächige Leichtbauteile) auf Grundlagenforschungsniveau und mit Schwerpunkt auf Automobilprozessen und der Verarbeitung von thermoplastischen Kunststoffen mit einer Vielzahl von Fragestellungen entlang der gesamten Prozesskette zur Herstellung flächiger Leichtbauteile. Besonders hervorzuheben sind hier die Teilprojekte von Prof. Meerkamm „Optimieren der Prozesskette durch Auswählen der bestgeeigneten Baustruktur und fertigungsgerechte Gestaltung der Bauteile (A 01)“, Prof. Kuhn „Werkstoffmechanische Analyse flächiger Leichtbau-Verbundstrukturen – Numerische Simulation und Experiment (A 02)“ und Prof. Denzel „Sensor- und modellgestützte Optimierung von Prozessketten (C 1)“. Begleitet wurde der SFB durch eine Vielzahl praxisorientierter Arbeiten in denen einzelne Aspekte der Verbindung von Kunststoff und Metall detailliert untersucht wurden. So beschreibt [Gru08] die Anwendung unterschiedlicher linearer und nichtlinearer Ansätze zur Optimierung der Struktur hybrider Bauweisen und nutzt Füllsimulationen zur Überprüfung der Fertigbarkeit. In einer weiteren praktisch ausgerichteten Arbeit beschäftigt sich [Hon09] mit der experimentell ermittelten Tragfähigkeit von Stahl-Urethan-Verbunden nach verschiedenen physikalischen und chemischen Vorbehandlungen. [Ram09] untersucht in einer experimentellen Studie den Einfluss möglicher Parameter auf die Tragfähigkeit und das Bruchverhalten im Spritzguss hergestellter Kunststoff-Metall-Verbunde unter Zugbelastung.

Weiterhin stellt der abgeschlossene Sonderforschungsbereich SFB 639 (Textilverstärkte Verbundkomponenten für funktionsintegrierende Mischbauweisen bei komplexen Leichtbauanwendungen) weitere Grundlagen und Methoden zur Entwicklung und Nutzung von Textilverbunden für Mischbauweisen bereit. Das erfolgreich abgeschlossene Ziel des Vorhabens war es, einen hohen Grad der Funktionsintegration bei gleichzeitiger Reduktion der Masse gegenüber der konventionellen metallischen Bauweise im Fahrzeugbau zu erreichen. Aktuellere Forschungsvorhaben konzentrieren sich vorrangig auf Verbindungs-technologien für Hybridverbunde mit Endlosfaserverstärkung. Zu nennen ist hier das abgeschlossene Schwerpunktprogramm SPP 1712 – Intrinsische Hybridverbunde für Leichtbaustrukturen, welches sich unter anderem mit dem Einbringen von metallischen Elementen in kohlenstofffaserverstärkte Strukturen befasste. So wurden metallische Insert- und Outsertelemente für die Krafteinleitung und -ausleitung in Faserverbundstrukturen verwendet, da diese aufgrund der isotropen Materialeigenschaften auch mehrachsige Belastungszustände zuverlässig aufnehmen und im Vergleich zu Kunststoffen eine um Größenordnungen geringere Kriechneigung aufweisen [Sch07]. Insbesondere für diese faserverstärkten Thermoplaste sind prozessintegrierbare Insertlösungen von höchster Bedeutung, da deren Einbringung auf die kurze Taktzeit und den Umform- bzw. Urformprozess des Kunststoffbauteils abgestimmt werden muss. Weiterhin ergeben sich Vorteile bei den Fertigungs- und Nacharbeitszeiten durch eine Insertintegration. Hierfür wurden bereits thermoplastgerechte Verfahren entwickelt, z.B. das thermoaktivierte Verstiften [Huf12], das prozessintegrierte Einformen metallischer Lasteinleitungselemente [Tro19, Tro23] oder auch das Thermoclinchen [Gud15, Gud19]. Bei diesen Verfahren wird die Warmumformbarkeit der thermoplastische FKV gezielt ausgenutzt, um die Fügeverbindungen herzustellen. Hierbei werden die Verstärkungsfasern in der Fügezone umoriert, wodurch eine komplexe Werkstoffstruktur in der Fügezone entsteht. Neben Inserts zur punktuellen Lasteinleitung werden auch flächige metallische Verstärkungselemente bei FKV eingesetzt, etwa in Form der Hybridbauweise. Moderne Metall-Thermoplast-FKV-Bauweisen mit großflächigen Verbindungsbereichen nutzen die positiven Eigenschaften von Metallen und FKV und kombinieren diese vorteilhaft. So können Stahlbleche beispielsweise gezielt durch eine angespritzte Kunststoffverrippung geometrisch stabilisiert werden. Zusätzlich werden derzeit Organobleche bzw. Tapes, d.h. endlosfaserverstärkte Thermoplaste, mit hervorragender spezifischer Steifigkeit und Festigkeit, als Patches in variabler Wandstärke an das Metall angepresst. Eine derartige Bauweise wurde bereits in [Kel14, Mod15] vorgestellt und zeigt das hohe Leichtbaupotenzial dieser Technologie. Untersuchungen zu stoffschlüssig verbundenen Metall-Thermoplast-FKV-Bauweisen fanden im BMBF-Projekt „Hylight“ statt. Besondere Bedeutung kommt hier der Grenzschicht zwischen Stahlblech und faserverstärktem Kunststoff zu, welche eine hohe Verbindungsfestigkeit aufweisen muss und zudem verschiedenen medialen und thermischen Belastungen ausgesetzt ist. Insbesondere prozessinduzierte, thermomechanische Belastungen aufgrund unterschiedlicher Temperaturen bei der Herstellung des intrinsischen Hybridverbundes und

unterschiedliche Wärmeausdehnungskoeffizienten erzeugen spezifische Anforderungen an die Verbindungszone und ihre Gestaltung, welche bisher noch nicht definiert sind, wodurch sich ein erheblicher und konkreter Forschungsbedarf ergibt.

Im Projekt „hypro“ konnte ein umfassendes Verständnis für thermoplastische, hybride FKV-Metallstrukturen entwickelt werden. Eine physisch-virtuelle Prozesskette bildet im Kern ein Spitzguss-Kombinationsprozess ab, bei dem die tiefgezogenen Metalleinleger mit vorkonfektionierten FKV-Patches kombiniert und mit KurzfaserverFKV umspritzt werden. Die Zusammenführung von Real- und Simulationsdaten ermöglicht daraufhin eine berechnungsgestützte zerstörungsfreie Inline-Qualitätssicherung sowie Prognose der Bauteileigenschaften. Thermoplastische endlosfaserverstärkte Hohlstrukturen wurden des Weiteren auch im Projekt „FuPro“ im Einsatz für Automobilindustrie untersucht. Das Ziel war hier die Entwicklung und Analyse eines neuartigen großserienfähigen Fertigungsprozesses für Mehrkomponentenstrukturen aus komplexen FKV-Hohlprofilen, Organoblechen und Spritzgießformmassen. Dadurch konnte ein weit über klassische Bauweisen hinausgehendes Maß an Prozess-, Struktur- und Funktionsintegration erreicht und so deutliche Gewichtsreduzierungen von Fahrzeugstrukturen ermöglicht werden. Im Rahmen des Projektes sollten die technologischen Voraussetzungen sowie das erforderliche Prozesswissen erarbeitet werden, um diese Technologie kurzfristig in die industrielle Serienanwendung zu überführen. Weiterhin wurden in [Hop13] Untersuchungen zu intrinsisch hergestellten flächigen Metall-FKV-Verbunden vorgestellt. Hierbei wurde sowohl der Ansatz einer Mikrostrukturierung der Metalloberfläche, als auch der Einsatz von Haftvermittlersubstanzen verfolgt.

Das Forschungsprojekt „ExtraLight“ zeigte bereits die Potenziale der Mikrostrukturierung von metallischen Oberflächen zum Fügen mit thermoplastischem FKV für das Erzielen guter Verbindungsfestigkeiten auf. Weitere Arbeiten untersuchten ebenfalls die Haftungsverbesserung von Kunststoff-Metall-Hybriden mittels Mikrostrukturierung der Metalloberflächen [Kur13, Reg10, Eis12].

Die durchgeführten und laufenden Projekte bilden nur einen kleinen Teil des Produktentstehungsprozesses ab und konzentrieren sich hauptsächlich auf den Verbindungsbereich. Auch hier stellen die aktuellen Arbeiten vorrangig Insellösungen auf Grundlagenforschungsniveau dar und erschweren es dem Anwender im Ingenieuralltag die Menge an hochspezialisiertem Wissen durchgängig zu verknüpfen und effizient für sein Alltagsproblem anzuwenden. Zudem setzten die Arbeiten zumeist ihren Schwerpunkt auf zwei der drei Einzeldisziplinen Konstruktion, Fertigung und Strukturauslegung.

### **1.4.3 Werkstoffverhalten bei kryogenen Temperaturen**

Die Kryogentechnik findet in unterschiedlichen Branchen Anwendung. In der Elektrotechnik kann durch das Erreichen von Tieftemperaturen der elektrische Widerstand von Werkstoffen

stark reduziert werden, sodass sogenannte Supraleiter entstehen. Für die Werkstoffwissenschaft bieten kryogene Flüssigkeiten die Möglichkeit Temperaturen, welche im Weltraum vorliegen, im Prüflabor nachzustellen. Diese Temperaturen sind nahe dem absoluten Nullpunkt bei 0 K. Die Durchführung von Versuchen im kryogenen Temperaturbereich dient zur verbesserten Abschätzung der Auslegung von Strukturbauteilen. Für Luft- und Raumfahrtbranche werden FKV in der Tieftemperaturumgebung als Struktur- und Isolationswerkstoff eingesetzt. Als kostengünstige Anwendungen werden meist GFK verwendet. Kohlenstoffverstärkte Kunststoffe (CFK) werden als Werkstoff für tragende, hochbelastete Strukturen eingesetzt.

Die Temperatur hat einen Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften eines FKV. Bei der Auswahl einer Matrix für den kryogenen Bereich ist darauf zu achten, dass bei fast allen Kunststoffen die Bruchdehnung abnimmt und diese somit verspröden [LiY23]. Die Festigkeitswerte von CFK sind auch bei sehr niedrigen Temperaturen, trotz der erhöhten thermischen Eigenspannungen, sehr hoch [Sch07]. Die Steifigkeiten hingegen steigen bei Faser und Matrix im Tieftemperaturbereich an. Neben den mechanischen Eigenschaften besitzt CFK vorteilhafte thermische Kennwerte. So ist der Wärmeausdehnungskoeffizient sehr gering, wodurch der Einsatz von Präzisionsbauteilen möglich ist. Die Wärmeleitfähigkeit nimmt im kryogenen Bereich weiter ab. Dies führt zu einer Verstärkung der wärmeisolierenden Wirkung, also zu einer Behinderung des Wärmestroms [Sch07]. In einer kompakten Kombination aus Gasturbine und Generator ist die wärmeisolierende Wirkung von CFK bedeutsam.

## 1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Das Vorhaben wurde im Verbund mit folgenden Partnern durchgeführt:

- SIEMENS AG, Erlangen (Konsortialführer)
- MT Aerospace AG, Augsburg
- Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe
- Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der angewandten Forschung e.V. (IWM), München

## 2 Eingehende Darstellung

Im folgenden Kapitel werden die wesentlichen Ergebnisse des Vorhabens dargestellt. Dabei wird auf das Erreichen der SMARTen Ziel eingegangen und die Inhalte nach den bearbeiteten Hauptarbeitspaketen gegliedert.

### 2.1 Verwendung der Zuwendung, erzielte Ergebnisse, vorgegebene Ziele

Neben dem in der Zusammenfassung formulierten Hauptziel wurden zur besseren Strukturierung Unterziele (UZ) im Antrag festgelegt. Diese werden in den folgenden Kapiteln jeweils den Hauptarbeitspaketen zugeordnet. Darüber hinaus wurden nach Vorgaben des Projektträgers SMARTe Ziele formuliert (Abbildung 2). Die formulierten Ziele wurden während der Projektlaufzeit erreicht.

Mechanische Konzepte der Einzelelemente sind erarbeitet.	Es werden Konzepte für mindestens drei Komponenten erarbeitet. Sie sind möglichst leicht und steif.	Die Konzepte sind die Basis für neue Bauweisen von Elektromotoren hoher Leistungsdichte.	Das Ziel ist mit geringem Risiko erreichbar.	Die Konzepte sind zum Meilenstein 1 erstellt.
Ausgewählte Komponenten sind für den digitalen Zwilling modelliert.	Es werden Modelle für mindestens drei Komponenten erarbeitet.	Die Modelle sind erforderlich um das Verhalten des neuen Elektromotors abbilden zu können.	Das Ziel ist mit geringem Risiko erreichbar.	Die Modelle sind zum Meilenstein 2 erstellt.
Hybrid-Prüfkörper aus Faserverbund und Metall sind gefertigt.	Es werden Prüfkörper für mindestens zwei Faserverbunde und zwei Metalle hergestellt.	Die Prüfkörper sind die Basis zur Charakterisierung der Grenzfläche zwischen beiden Werkstoffen für den digitalen Zwilling.	Das Ziel ist mit geringem Risiko erreichbar.	Die Prüfkörper sind Anfang 2022 gefertigt.
Ausgewählte Substrukturen in Faserverbund-Metall-Hybridbauweise sind gestaltet und gefertigt.	Es wird mindestens eine Substruktur detailliert ausgelegt und hergestellt.	Die Auslegung erfolgt unter Nutzung des erstellten digitalen Zwillings und ermöglicht damit dessen Validierung.	Das Ziel ist mit mittlerem Risiko erreichbar.	Die Substruktur ist zum Meilenstein 5 hergestellt.
Substruktur ist getestet.	Mindestens eine Substruktur wird getestet und erträgt die geforderten Beanspruchungen.	Der digitale Zwilling kann durch den Test der realen Substruktur an die Realität angepasst werden und liefert dann bessere Ergebnisse.	Das Ziel ist mit mittlerem Risiko erreichbar.	Die Tests sind zum Meilenstein 6 durchgeführt.

Abbildung 2: SMARTe Ziele des Vorhabens

#### 2.1.1 HAP1

UZ1: Mechanische Konzepte der Einzelelemente (Komponenten) erarbeitet

UZ2: Mechanisches Konzept der Maschine (System) erarbeitet

Zu Beginn wurden in HAP1 gemeinsam mit den Partnern die Anforderungen an den neuartigen elektrischen Motor zusammengetragen und als Demonstratorstruktur der Rotor des Motors festgelegt. Nach einer Wichtung der für den Rotor spezifischen variablen Anforderungen mittels AHP-Methode stellten sich sowohl ein möglichst geringes Gewicht, als auch eine größtmögliche Steifigkeit als wesentliche Kriterien für den Vergleich verschiedener Konzepte heraus. Zur

Erarbeitung von Einzelkonzepten wurde eine Bereichseinteilung des Rotors vorgenommen (Abbildung 3).

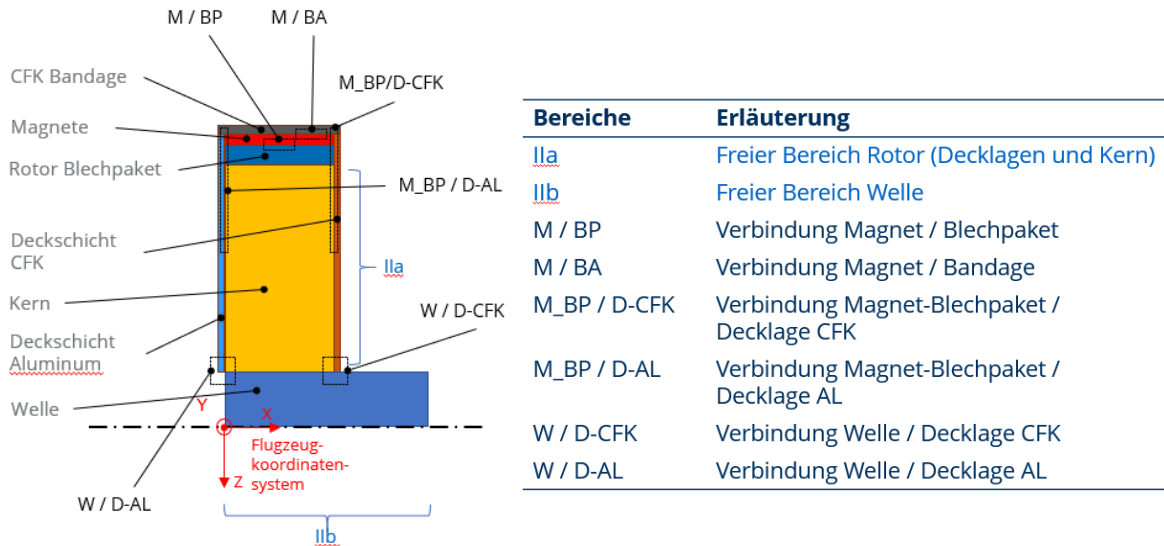


Abbildung 3: Bereichseinteilung Rotor

Dabei wurden die Bauräume für die elektromagnetisch aktiven Komponenten vom Projektpartner SIEMENS vorgegeben. Für die verschiedenen Bereiche wurden Einzelkonzepte erstellt (Abbildung 4), nach Anforderungen gewichtet, bewertet und priorisiert, somit zu einem Gesamtkonzept vereint (Abbildung 5).

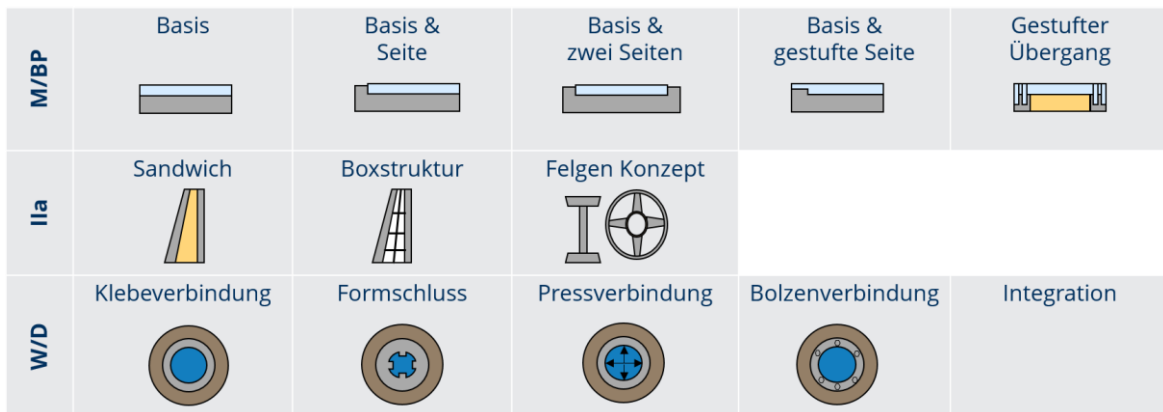


Abbildung 4: Einzelkonzepte des Rotors

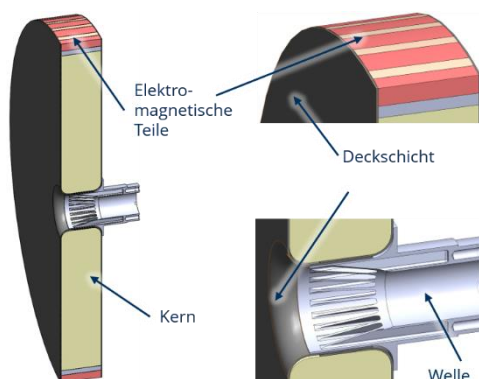


Abbildung 5: Gesamtkonzept Rotor

In einer Vorauslegung konnte so ein Rotor mit einer Masse von nur 12 kg erarbeitet werden, wovon bereits etwa 9 kg auf die elektromagnetisch aktiven Komponenten entfallen [Boe21]. Nach der Entwicklung eines Konzeptes für den Rotor des neuartigen kryogen gekühlten Elektromotors in HAP1 wurde in Abstimmung mit SIEMENS zusätzlich ein Konzept für den Stator entwickelt. Da die Konzeptphase jedoch bereits 2021 abgeschlossen wurde, wurden diese Arbeiten im Rahmen von HAP4 fortgesetzt (siehe Abbildung 6 und Abschnitt 2.1.4).

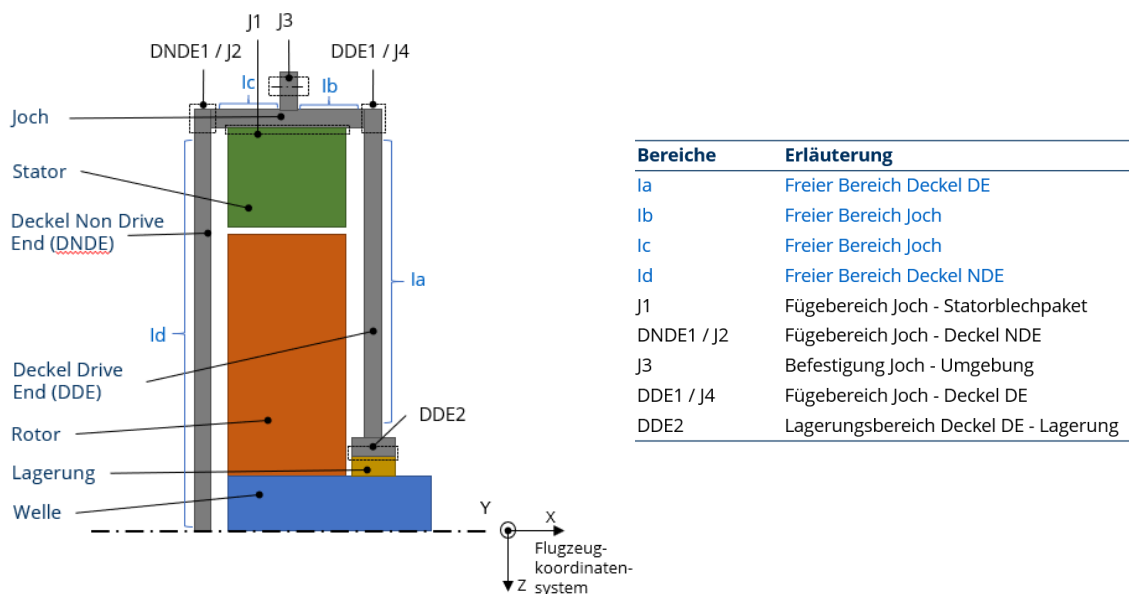


Abbildung 6: Bereichseinteilung Stator

## 2.1.2 HAP2

UZ3: Modellhafte Abbildung auf Komponenten- und Systemebene

UZ4: Vorhersage des thermomechanischen Betriebsverhaltens des Systems

UZ5: Lebensdauervorhersage auf Systemebene

Für die Durchführung eines durchgängigen Design- und Simulationsprozesses wurden in HAP2 zunächst Abstimmungen mit den Projektpartnern getroffen, um festzulegen, welche Bedingungen bei der Erstellung des digitalen Zwillings des neuartigen elektrischen Motors berücksichtigt werden sollen. Dies umfasst den Datenaustausch zwischen verschiedenen Softwaresystemen wie SIEMENS NX und COMSOL sowie die Art und Weise, wie benötigte Werkstoffkennwerte, sei es durch eigene Messungen oder durch Literaturkennwerte, softwareübergreifend zugänglich gemacht werden können.

Parallel zur Erarbeitung des Gesamtkonzeptes des Rotors in HAP1 wurde auf Basis von Rand- und Lagerungsbedingungen (Abbildung 7, links) ein digitales Modell erstellt (Abbildung 7, rechts).

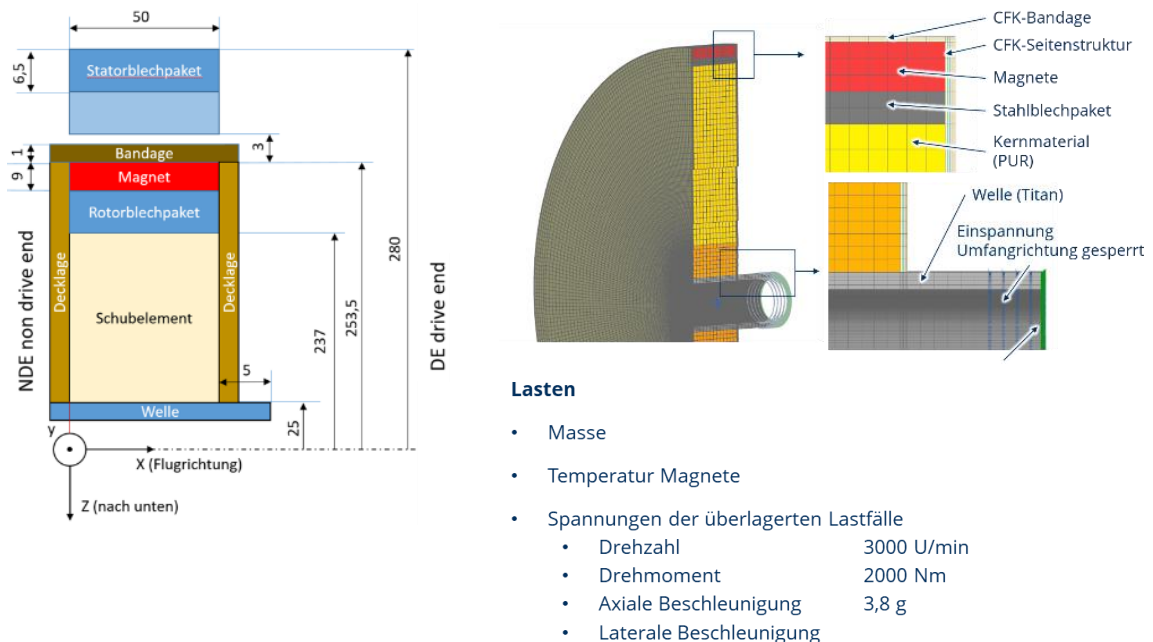


Abbildung 7: Konzept des Rotors mit Randbedingungen (links) und abgeleitetes digitales Modell (rechts)

Darüber hinaus wurden die mechanischen Auswirkungen der thermischen Verluste in den elektromagnetisch aktiven Komponenten berücksichtigt (Abbildung 8). Innerhalb der Struktursimulation musste im Programm (SIEMENS NX) auf unterschiedliche Solver zurückgegriffen werden, um alle Materialformate (PCOMP, SOLID, ...) zu berücksichtigen. Daher musste ein Umweg entwickelt werden, um die Faserverbundstrukturen auslegen zu können.

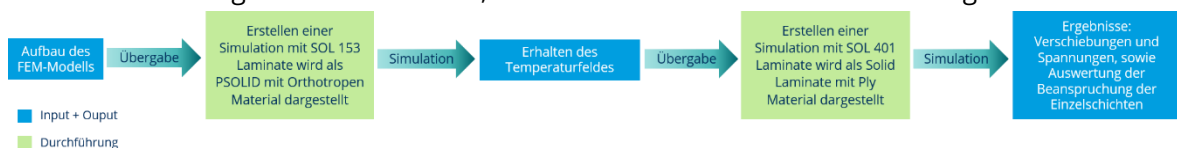


Abbildung 8: Ablauf der numerischen Auslegung für thermo-mechanische Beanspruchungen

Das entwickelte Modell ermöglicht sowohl die Ermittlung des mechanischen Verhaltens der konzipierten Struktur, als auch die Abschätzung der thermischen Verluste in den elektromagnetisch aktiven Komponenten (Abbildung 9 und Abbildung 10). Diese Erkenntnisse fließen später in die Auslegung der Demonstratoren in HAP4 ein.

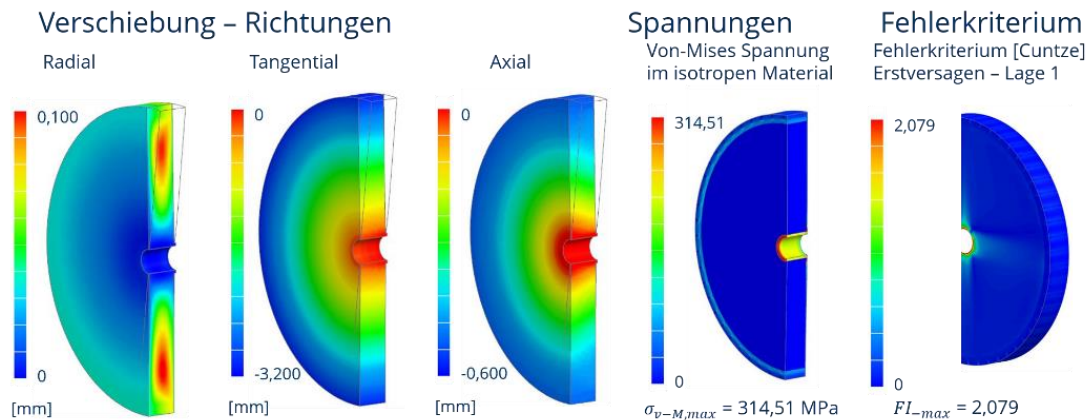


Abbildung 9: Ergebnisse der simulativen Auslegung des Rotors mit Verschiebung (links) und Auftretenden Spannungen und Fehlerkriterien (rechts)

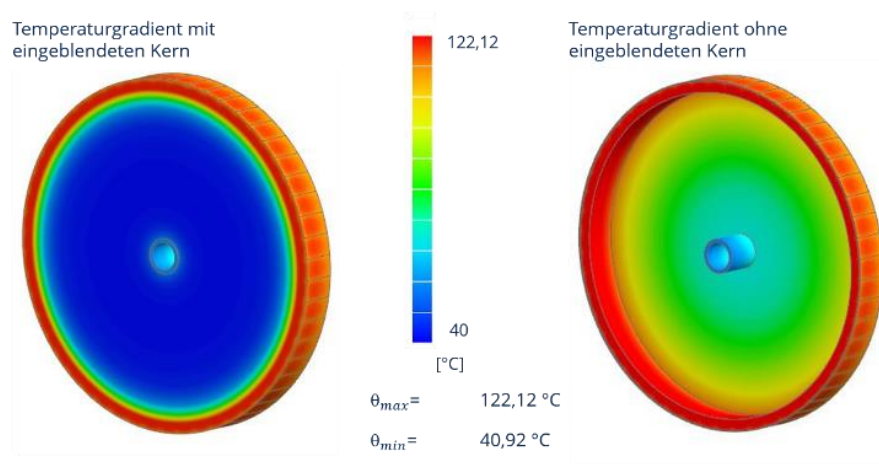


Abbildung 10: Temperaturgradient im Rotor mit (links) und ohne (rechts) eingblendetem Kern

Die Konzeption der Verbindungszone basiert auf einem entwickelten Vorgehen, welches zur Entwicklung neuer Bauweisen dient. Dieses Vorgehen unterscheidet zwei Ansätze („Top down“ und „Bottom up“) und wurde zunächst an einer Basisstruktur aus Balkenelementen unter Zugbeanspruchung getestet und erprobt (Abbildung 11).

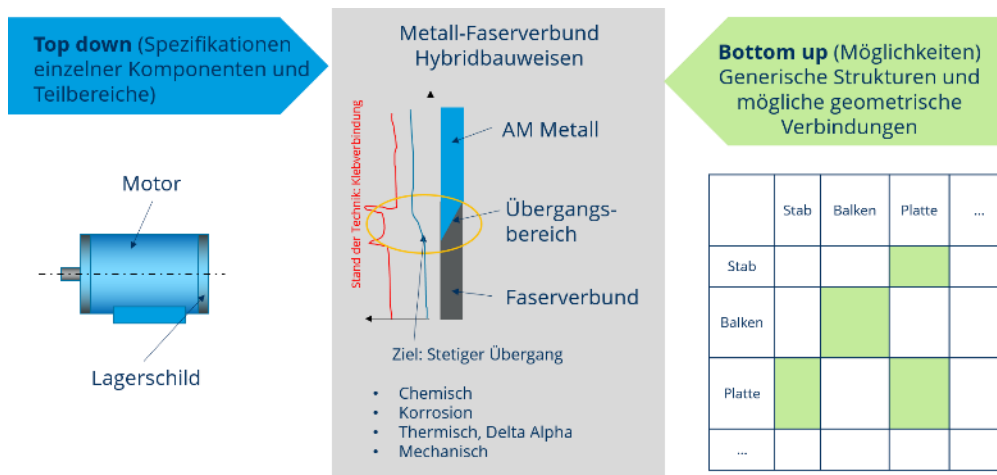


Abbildung 11: Darstellung beider Ansätze zur methodischen Entwicklung neuer Bauweisen im Beispiel der intrinsischen Schnittstelle

Im „Bottom-up“-Ansatz konnte eine analytische Methode zur Ermittlung der Materialverteilung in der Übergangzone beider Werkstoffe angewandt werden. Es zeigte sich jedoch, dass der Parameterraum zwischen möglichen geometrischen Kombinationen und theoretisch auftretenden Lastfällen zu groß für eine allgemein gültige Lösung ist. Daher wurde im „Top-down“-Ansatz eine spezifische Übergangzone aus dem Rotorkonzept aus HAP1 entwickelt (Abbildung 5). Mithilfe der digitalen Modelle aus HAP2 wurden die Beanspruchungen in der Grenzfläche ermittelt. Es wurden der allgemein gültige Designraum erörtert und grundsätzliche Verbindungsvarianten der Welle-Nabe-Verbindung zusammengetragen. Anschließend konnten die Randbedingungen geprüft und Vorgaben definiert werden. Diese Eingangsgrößen dienten dazu, die Gestalt der metallischen Komponente, mit dem Ziel das Originalvolumen der metallischen Welle um 40 % zu reduzieren, programmgesteuert zu optimieren. Das Ergebnis war eine klassische Welle-Nabe-Verbindung über eine Klebverbindung mit zusätzlichem Einsatz von Flanschverbindungen. Die Struktur der Faserverbundkomponente wurde auf Basis erfahrungsbasierter Gestaltungsgrundsätze verbessert. Eine programmgesteuerte Optimierung aller Komponenten ist aufgrund des weiten Parameterraums derzeit noch zu komplex und ineffektiv, birgt jedoch großes Potenzial. Eine finalisierte Version der angepassten Welle-Nabe-Verbindung in Hinblick auf die Schnittstelle wurde mitsamt fächerförmigen Flanschverbindungen mit geschäfteten Faserlagen konzeptioniert (Abbildung 12).

Ziel ist es eine Verbindung zu schaffen, bei welcher die additiv gefertigten Bauteile im Resin-Transfer-Molding (RTM) Verfahren im Infiltrations- und Konsolidierungsprozess direkt mit der Matrix des FKV verbunden werden und somit eine intrinsische Schnittstelle im hybriden Metall-Faserverbund-Bauteil entsteht.

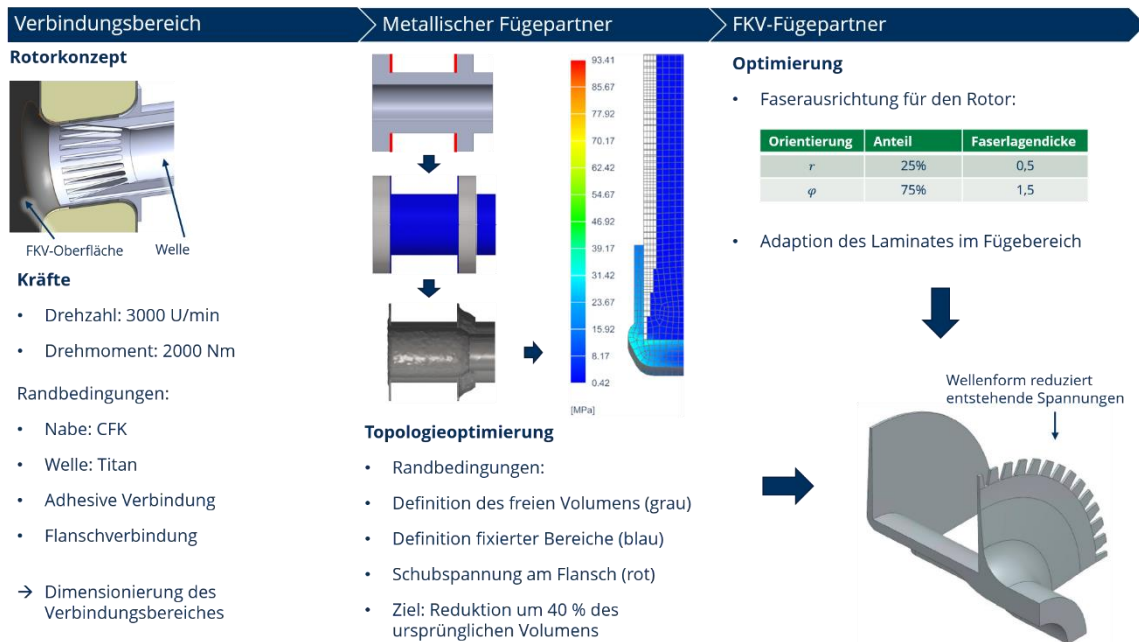


Abbildung 12: Methodische Auslegung der hybriden Verbindung

Die Ermüdung von faserverstärkten Verbundwerkstoffen erfordert interdisziplinäre Forschung und eine enge Zusammenarbeit von Materialwissenschaft, angewandter Mechanik und numerischer Simulation. Zur praxisorientierten Lebensdauervorhersage für kontinuierlich faserverstärkte Verbundwerkstoffe, unter Berücksichtigung materialspezifischer Versagensmodi und mit starker Ausrichtung auf Finite-Elemente-Methoden, wurde am TUD-ILK ein auf Dehnungsenergie basierender Ansatz entwickelt (Abbildung 13).

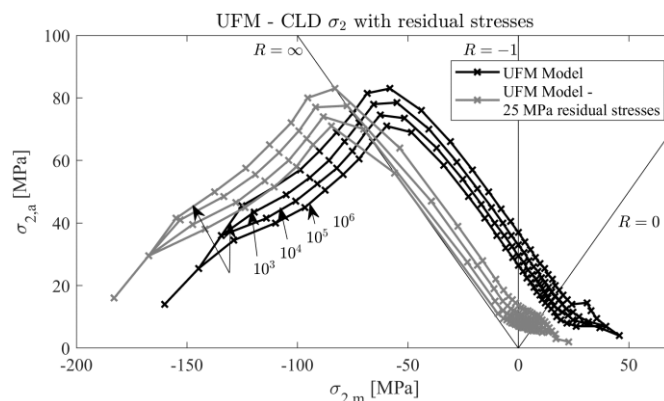


Abbildung 13: Auszug aus dem Lebensdauermodell [Tit21]

Im Einsatz der hybriden Metall-Faser-Kunststoff-Verbund-Strukturen (MFS) in der Verbindung müssen maßgeblich auftretende Eigenspannungen aufgrund unterschiedlicher Wärmeausdehnungskoeffizienten beachtet werden. Hier zeigte sich ein deutlicher Vorteil der

Harze mit geringerer Konsolidierungstemperatur. Hohe fertigungsinduzierte Spannungen ließen sich gut durch einen Verzug ebener Bauteile prüfen. Bei der Anwendung von FKV-Strukturen bei einer Prüftemperatur von 77 K und einer Einlagerung in Wasserstoff lässt sich sogar eine Zunahme des Dauerlastniveaus registrieren [Gei00].

### 2.1.3 HAP3

UZ6: Erarbeitung einer Prüfstrategie zur Ermittlung der Tieftemperatureigenschaften

UZ7: Bereitstellung prüffähiger Strukturen auf Prüfkörperebene

In HAP3 wirkte das TUD-ILK an der Erstellung der Prüfstrategie mit. Als Werkstoffe für die metallischen Bauteile wurden anhand der Anforderungen im Konsortium die drei Werkstoffe Scalmalloy, Titan (Ti6Al4) und Inconel 718 definiert. Für eine Selektion prädestinierter FKV-werkstoffe wurde eine umfassende Literaturrecherche zu Kennwerten von GFK und CFK sowie unverstärkten Hochleistungskunststoffen durchgeführt [Loh22]. Besonderes Augenmerk lag dabei auf mechanischen Kennwerten bei besonders tiefen Temperaturen (ca. 20 K) als auch unter Wasserstoffeinfluss. Für eine Vordimensionierung in der Konzeptphase lagen ausreichend Literaturdaten vor. Erst bei einer Entscheidung für ein bestimmtes Werkstoffsystem für den Demonstrator und bei endgültig festgelegten Randbedingungen für deren Einsatz muss die Entscheidung getroffen werden, ob und welche Kennwerte im Rahmen der Prüfstrategie ermittelt werden müssen.

Zur Umsetzung des Prüfprogramms in HAP3 wurde weiterhin ein Prüfkörperwerkzeug auf Basis des bereits vorhandenen TUD-ILK-Plattenwerkzeuges für Resin-Transfer-Molding (RTM) entworfen. Wesentlich ist dabei, die Dicke der damit gefertigten Prüfplatten mit einer sehr engen Toleranz herzustellen, da sonst die damit zu ermittelnden Kennwerte der Grenzfläche zwischen additiv gefertigten Metallproben und Faserverbundprüflingen einer zu großen Unsicherheit unterliegen. Bisherige Werkzeuge weisen hier Defizite in der Steifigkeit der Werkzeugformplatten auf. Im Rahmen einer studentischen Arbeit [Loh22] wurde hierzu eine neue Stützstruktur entwickelt (Abbildung 14).

Stützstruktur	IPE100 ohne Deckplatte	IPE100 mit Deckplatte	IPE120 mit Deckplatte	IPE 140 mit Deckplatte	U-Profil ohne Platte	U-Profil mit Platte	Alustreben 100x20
Gewicht [kg]	17,5	18,7	19,0	20,5	16,6	17,8	17,9
Maximale Durchbiegung [mm]	0,076	0,064	0,062	0,055	0,092	0,071	0,067
Simulationsergebnis							

Abbildung 14: Vergleich verschiedener Konzepte einer Stützstruktur für das Prüfkörperwerkzeug

Zusätzlich wurden Werkzeugdetails wie etwa Steiger und Vakuumschlüsse leicht austauschbar gestaltet und das Dichtkonzept so angepasst, dass die Dichtnuten in den

Werkzeugplatten immer auf der Oberseite eingebracht sind. Dadurch sind sie leicht zugänglich und Dichtungsschnüre können einfach gewechselt werden (Abbildung 15).

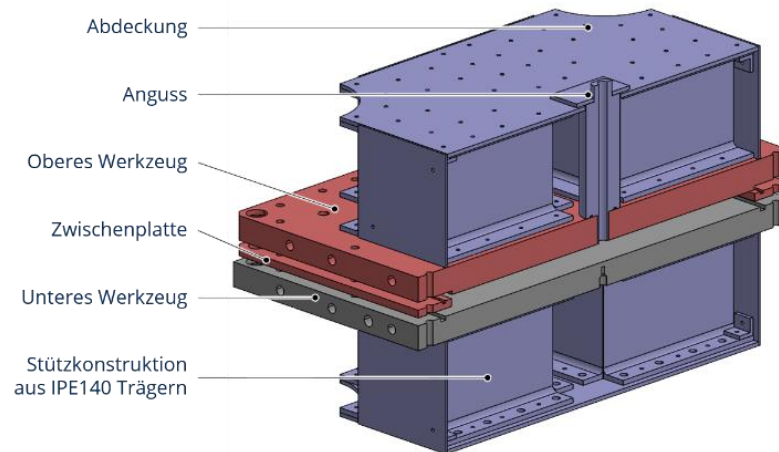


Abbildung 15: Aufbau des konzipierten Plattenwerkzeugs

Um die große Anzahl an Prüfplatten effizient herstellen zu können, wurde darüber hinaus für das Werkzeug ein eigener Arbeitsplatz mit Hebevorrichtung entwickelt. Damit ist es möglich, die obere Werkzeughälfte einfach anzuheben und ohne zusätzliche Hebezeuge neben der unteren Hälfte abzulegen. So ist die Kavität gut zugänglich und kann schnell neu bestückt werden (Abbildung 16).

Parallel dazu wurden sowohl die benötigten Halbzeuge, wie Harzsysteme, Fasermaterial und gedruckte Proben, sowie Werkzeugelemente, wie Heizpatronen und Einlegeplatten, beschafft. Eine Herausforderung dabei war die Suche nach Alternativen zu den ursprünglich nach Literaturrecherchen favorisierten Kohlenstofffasern IM7 und Glasfasern S2, die in der gewünschten textilen Bindungsart und Menge durch unterbrochene Lieferketten nicht bestellbar waren. Mit der Kohlenstofffaser IMS65 konnte eine verfügbare Type identifiziert und beschafft werden.

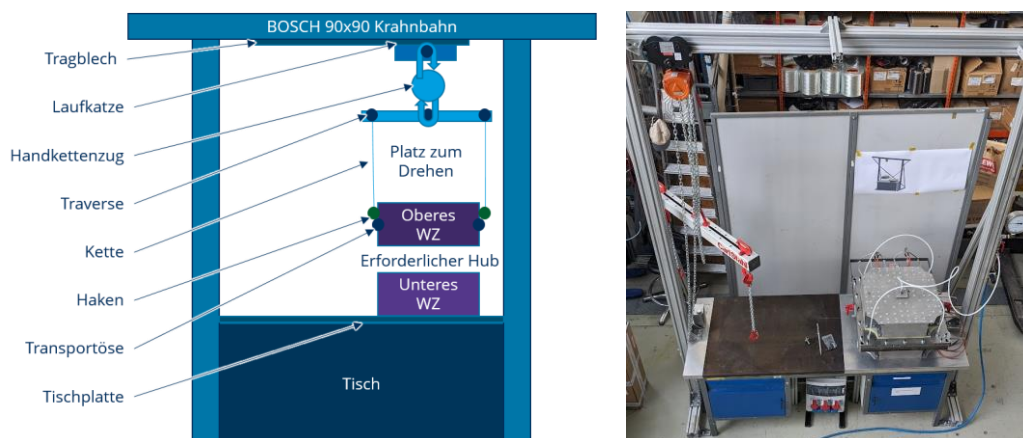


Abbildung 16: Konzept (links) und Aufbau (rechts) des entwickelten Plattenwerkzeugs

Auf Grundlage des in HAP1 entwickelten Gesamtkonzeptes für den Rotor wurde der Beitrag des TUD-ILK zur Prüfstrategie erweitert. Während bereits Materialkennwerte für die einzelnen Werkstoffsysteme vorlagen, konnten keine validen Kennwerte zur Beschreibung des Werkstoffverhaltens an der Grenzfläche zwischen FKV und generativ gefertigten Metallstrukturen in den Modellen aus HAP2 ermittelt werden. Daher wurden die notwendigen Kennwerte identifiziert, erforderliche Versuche definiert und ein Prüfprogramm erstellt (Abbildung 17). Nach der Entwicklung von Prüfkörperwerkzeugen sowie der Beschaffung von Probenwerkstoffen und Materialien begann die Umsetzung des Prüfprogramms.

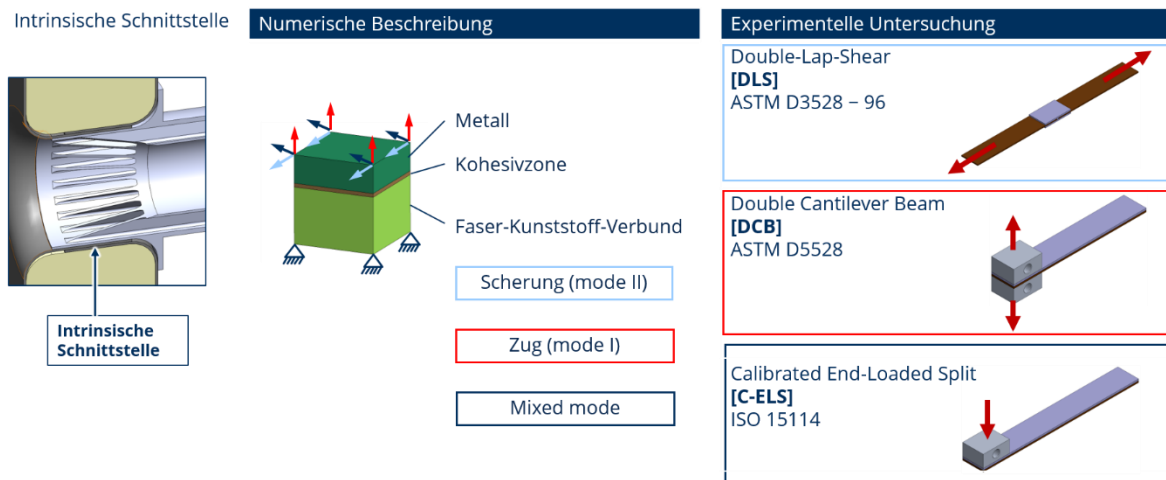


Abbildung 17: Materialversuche zur Kennwertermittlung der Grenzfläche

Die Metallproben wurden durch selektives Laserschmelzen (SLM) hergestellt. Um die Einflüsse der Parameter des additiven Fertigungsprozesses auf die Oberfläche zu verstehen, wurden zunächst Rauheitsmessungen durchgeführt. Die nachfolgende Oberflächenvorbehandlung der Metallfügeteile (Abbildung 18) basierte auf DIN EN 13887 und ASTM-D2651 und ist ein Verfahren mit einer Bearbeitungszeit von 4 Stunden, um eine industrielle Anwendbarkeit zu gewährleisten.

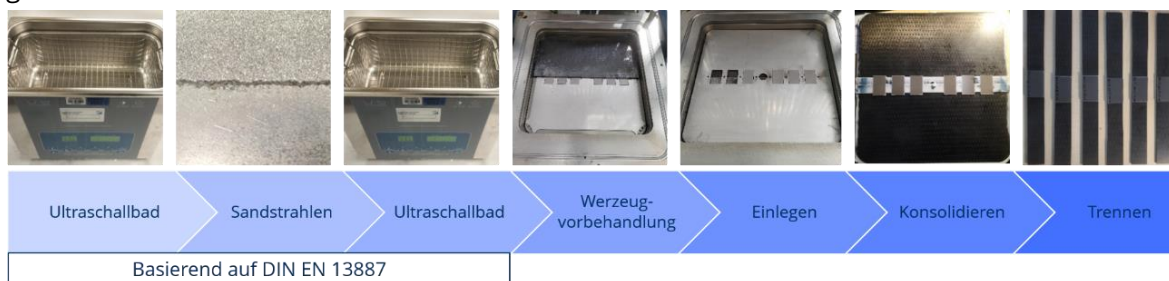


Abbildung 18: Ablauf der Vorbehandlung und Probenherstellung

Der Herstellungsprozess umfasst zunächst die Vorbehandlung der Metallwerkzeuge und Beilegebleche (Anpassung der Probendicke), das Einsetzen der Justierplatten in das Werkzeug für den RTM-Prozess. Abbildung 19 (a) zeigt das Konzept zur Fertigung der *Double Lap Shear*-Proben (DLS) mitsamt der Justierplatten und eingefügten Metallfügeteilen. Auf den metallischen Platten wurden die Faserlagen und ein Silikonstreifen zur Trennung platziert (b) und darauf die zweite Schicht der metallischen Platten eingelegt (c). Anschließend erfolgte die Epoxidharzinfiltration über den Ringanguss (d).

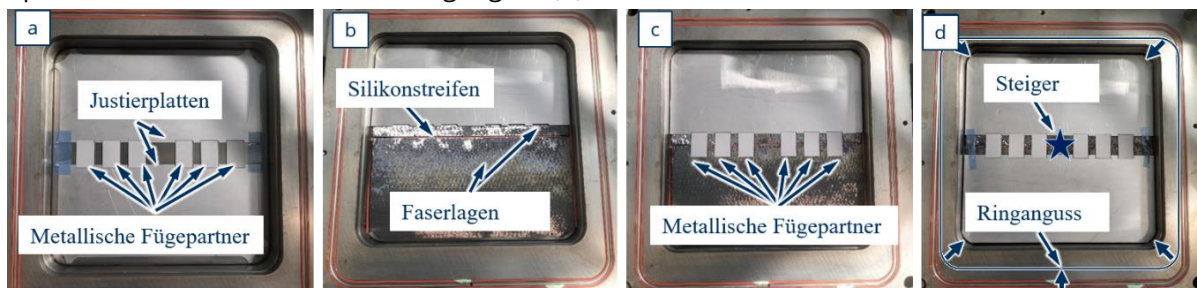


Abbildung 19: Werkzeugaufbau mit Justierplatten (a), eingefügten Faserlagen und einer Metallplatte (b), eingefügten Metallfügeteilen (c) und der oberen Metallplatte mit skizzierter Einspritzvorrichtung (d).

Die Rauheiten der Metallteile wurden vor und nach der Vorbehandlung mit einem Profilometer gemäß ISO 4287 im Bereich gemäß Abbildung 20 gemessen (siehe Tabelle 1).

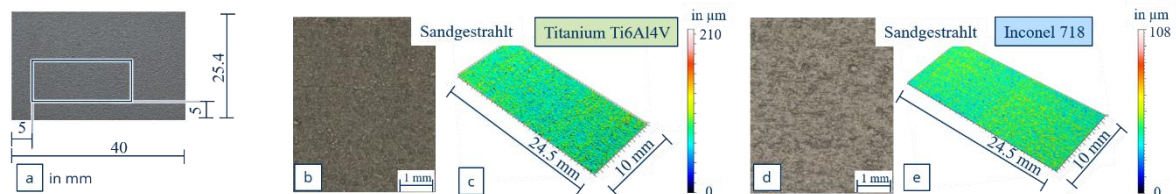


Abbildung 20: Untersuchte sandgestrahlte Oberfläche (a) und Verteilung der Rauheit für Ti6Al4 (b und c) und Inconel 718 (d und e)

Tabelle 1: Oberflächenrauheit der Metallfügeteile vor und nach dem Sandstrahlen

Material	Titanium Ti6Al4 Unbehandelt	Titanium Ti6Al4 Sandgestrahlt	Inconel 718 Unbehandelt	Inconel 718 Sandgestrahlt
Ra in µm	7,77	6,58	4,85	3,70

Abbildung 21: zeigt eine DLS-Probe mit unidirektionalen Verbundschichten und Metallteilen. Zusätzlich wurde die Fügezone zwischen Metall und FVK der DLS-Proben mikroskopisch analysiert.

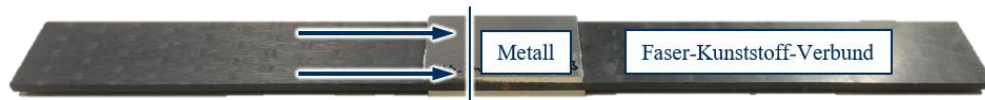


Abbildung 21: DLS-Probe mit Schnittansicht für die Mikroskopie

Die mikroskopische Untersuchung (Abbildung 22) ergab keine signifikanten Defekte wie Lufteinschlüsse oder Kontaktverlust zwischen Epoxidharz und Metalloberfläche.

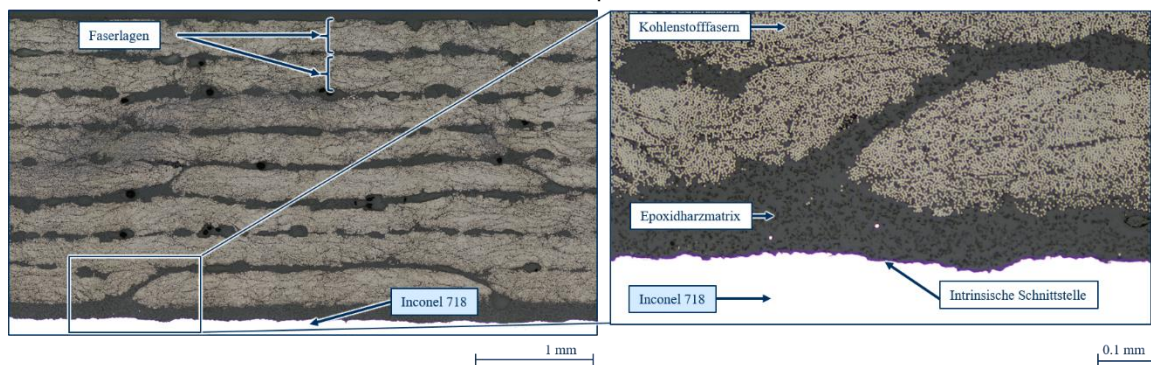


Abbildung 22: Mikroskopische Aufnahme der intrinsischen Fügezone zwischen Inconel718 und FKV

Zwei der nach ASTM D3528 geprüften Proben sind exemplarisch in Abbildung 23 dargestellt. Während der Untersuchung wurden zwei unterschiedliche Versagensmodi an den Schnittstellen deutlich. Proben, die niedrigen Temperaturbedingungen ausgesetzt waren (b), zeigen adhäsives Versagen, während diejenigen, die höheren Temperaturen (Raumtemperatur und 370 K) ausgesetzt waren, kohäsives Versagen (a) mit Faseraustrissen aus der FRP-Matrix aufweisen. Diese Dualität unterstreicht das komplexe Zusammenspiel der Einflussfaktoren aus der Fertigung, welche die Ergebnisse beeinflussen.

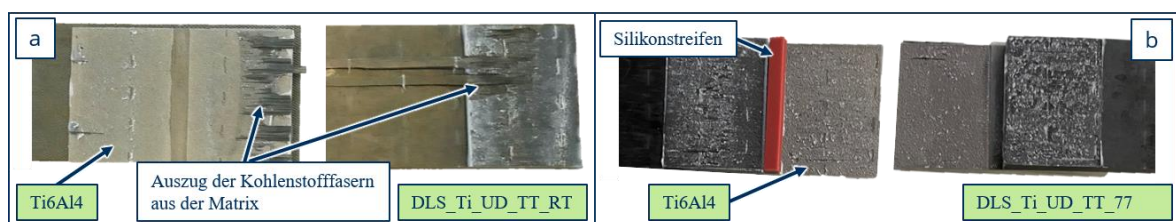


Abbildung 23: Geprüfte Proben (ASTM D2528) bei Raumtemperatur (a) und bei 77 K (b)

Die Untersuchung zielte darauf ab, eine robuste Verbindung zwischen FKV und additiv gefertigten Metallen zu erzeugen und erste charakteristische Werte für die Finite-Elemente-Methode zu ermitteln. Die Verbindung konnte ohne Defekte wie Lufteinschlüsse generiert und anschließend getestet und untersucht werden. Der komplexe Herstellungsprozess konnte mithilfe bestehender Normen und neuer Werkzeuge reproduzierbare Ergebnisse liefern.

**2.1.4 HAP4**

UZ8: Erarbeitung neuartiger Bauweisen zu Einsatz in tiefgekühlten Antrieben (Komponenten- und Systemebene)

UZ9: Gestaltung und Auslegung der FKV-Metall Hybridbauweisen

UZ10: Umsetzung prüffähiger Strukturen auf Komponentenebene

In HAP4 wurde mit einer Untersuchung möglicher hybrider Metall-Faserverbund-Strukturen begonnen [Fuc21]. Dabei stellt die Übergangszone von einem zum anderen Werkstoff (intrinsische Verbindung) das Kernelement der Hybridstrukturen dar. Wesentlich für die hier festzulegende Anordnung und Verteilung der beiden Werkstoffe ist ein homogener Spannungszustand in der gesamten Übergangszone und der Vermeidung von Spannungsspitzen. Dies kann etwa durch lokal gleiche Dehnungen in den einzelnen Werkstoffen erreicht werden. Für die Erarbeitung der neuen Bauweisen wurde ein Basiskonzept erstellt. Hier kann mit konkreten Randbedingungen einer ausgewählten Komponente (Top-down Ansatz) oder auf Basis möglicher geometrischer Kombination mechanischer Grundelemente, wie etwa Stäbe, Balken, Platten oder Scheiben (Bottom-up Ansatz, siehe Abbildung 24) begonnen werden.

**Mechanische Elemente:**

- Stab
- Balken
- Platte
- Scheibe

**Mechanik Kräfte:**

- Spannung
- Druck
- Scherung
- Biegung
- Torsion
- Kombinationen

- Sinnvolle Kombinationen nicht anhand von Lastfällen filterbar
- Begrenzung auf eine überschaubare Menge schwierig

→ **Entwicklung der Methodik an immer komplexeren Beispielen, Übergang zum Top-Down-Ansatz**

	Stab	Balken	Platte / Scheibe
Stab			
Balken			
Platte / Scheibe			

Abbildung 24: Zusammenstellung möglicher Kombinationen mechanischer Elemente in einer intrinsischen Schnittstelle

Das erarbeitete Basiskonzept zur Konzeption neuer Bauweisen wurde zunächst an einer Basisstruktur aus Balkenelementen und einer Zugbeanspruchung erprobt. Mit einer erweiterten Mischungsregel wurden die Anteile beider Materialien im Verlauf der intrinsischen Schnittstelle bestimmt (Abbildung 25 Teil 1). Anschließend wurden verschiedene Konzepte zur Gestaltung der Grenzfläche aufgestellt und miteinander verglichen (Teil 2). Je nach Randbeding

kann hier eine gewünschte Übergangslänge ausgewählt werden. Exemplarisch wurde am ersten Konzept eine erfolgreiche numerische Überprüfung des analytischen Ansatzes durchgeführt (Teil 3). Somit kann diese Auslegungsmethode für einfache Strukturen und Lastfälle angewandt werden.

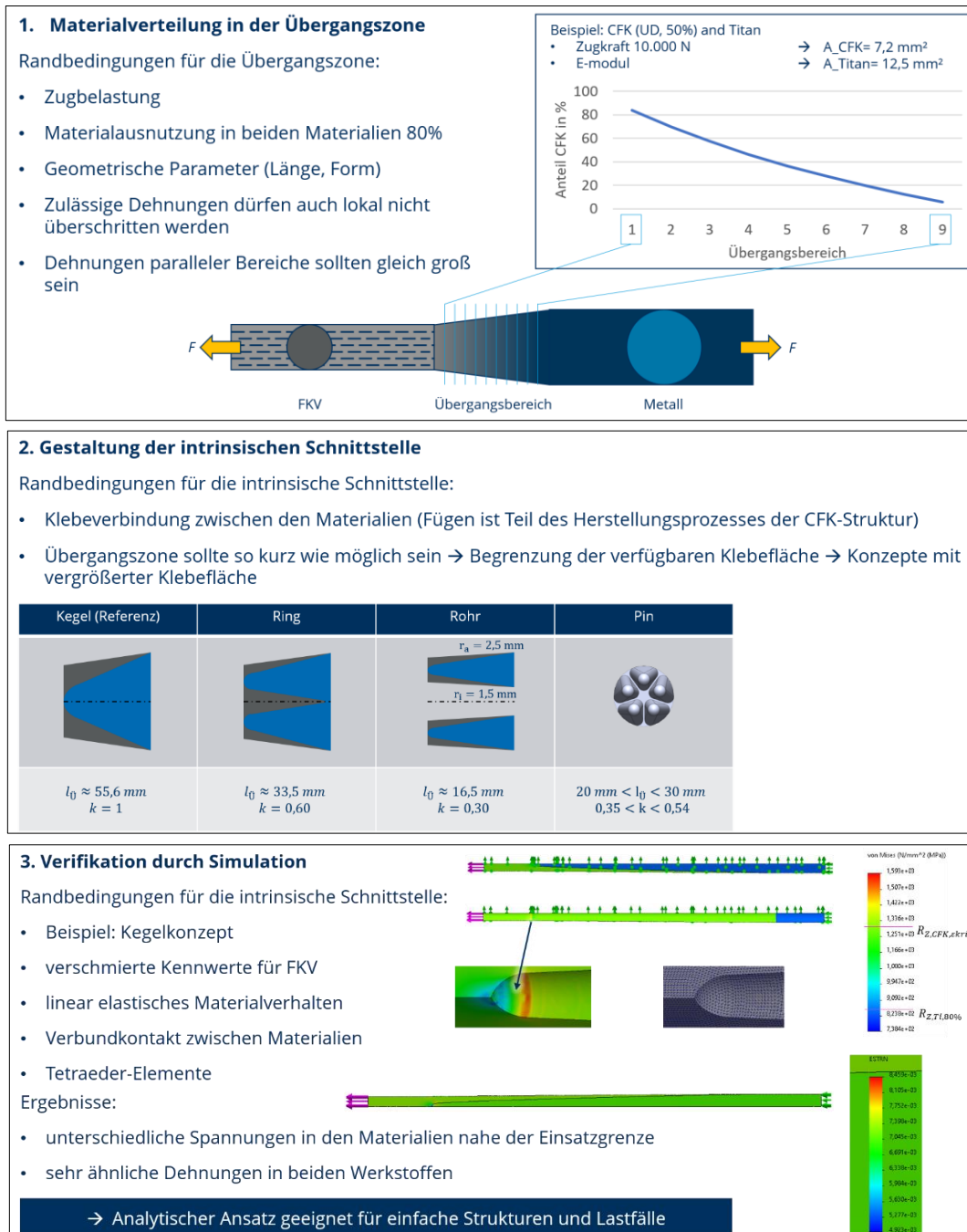


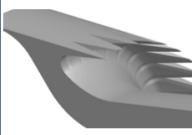



Abbildung 25: Schritte zur Konzipierung einer intrinsischen Schnittstelle mit Bottom-Up Ansatz. 1) Materialverteilung; 2) Gestaltung der Grenzschicht; 3) Numerische Betrachtung

Es zeigte sich jedoch auch, dass der Parameterraum zwischen möglichen geometrischen Kombinationen und theoretisch auftretenden Lastfällen zu groß für eine Aufstellung allgemeiner gültiger Lösungen ist. Daher wurde anschließend im „Top-down Ansatz“ eine spezifische Übergangszone aus dem Rotorkonzept aus HAP1 gestaltet (Abbildung 12). Mit einem numerischen Überschlag anhand des Modells aus HAP2 wurden die Spannungen an den Grenzflächen ermittelt. Da später hier eine Geometrie beider Verbindungspartner gefunden werden soll, die zu einer gleichmäßigen Spannungsverteilung führt, wurden die auftretenden Spannungen gemittelt und als Ausgangsgröße für die Optimierung der Verbindungspartner genutzt. Zunächst wurde so eine Gestaltoptimierung mit ALTAIR Hyperworks an der metallischen Welle vorgenommen. Anschließend wurde mit einem erfahrungsbasierten Ansatz ein Laminataufbau für die FKV-Komponente ausgewählt und überprüft. Hier zeigten sich trotz linearem Übergang noch Spannungsüberhöhungen am äußeren Durchmesser der intrinsischen Schnittstelle. In einem letzten Schritt wurden die durch eine wellenförmige Gestaltung des Randes der metallischen Komponente wesentlich reduziert.

Eine programmgesteuerte Optimierung zur zukünftigen Auslegung intrinsischer Schnittstellen ist hier wegen eines weiten Parameterraums noch zu komplex und ineffektiv, birgt aber großes Potential.

Im Rahmen der Entwicklung neuer Bauweisen wurde durch Unterstützung einer weiteren studentischen Arbeit [Sta22] zusätzliche Varianten der Verbindung zwischen Rotorwelle und Deckschicht untersucht (Abbildung 26). Im Fokus standen hier vor allem Verbindungen am Umfang der Welle, da dies bei der Montage im Rotor Vorteile gegenüber der bisher untersuchten Variante mit zwei flanschseitigen Verbindungen aufweist.

Variante	V1 und V2	V3	V4	V5
Spezifikation	Radius und <u>Kragarm</u>	Flansch	Umfangsstruktur	Topologie
Abbildung				
Eigenschaften	<u>Kragarm</u> mit zusätzlicher Analyse vom Einfluss des Radius	Verlagerung der Beanspruchung zur Scherbelastung	Additiv gefertigter struktureller Übergang	Reduktion von Masse bei individueller Anpassung der Steifigkeit

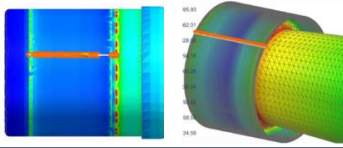
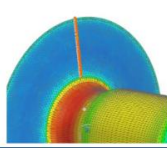
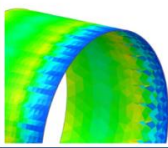
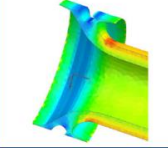
Variante	V1 und V2	V3	V4	V5
Spezifikation	Radius und Kragarm	Flansch	Umfangfläche	Topologie
Abbildung				
(bisheriges) Fazit	Hinsichtlich FEM geringer Einfluss der Radien und geringe Beanspruchung des Kragarms	Reduzierung der Spannung möglich	Veränderung der Struktur bewirkt keine Verbesserung	Reduzierung der Spannungsspitzen

Abbildung 26: Neue Bauweise am Beispiel der Rotorwelle; oben: Konzepte; unten: numerische Überprüfung

Im Ergebnis konnte mit Variante 5 eine Form ermittelt werden, die eine gut ertragbare und gleichmäßige Spannungsverteilung aufweist (Abbildung 27).

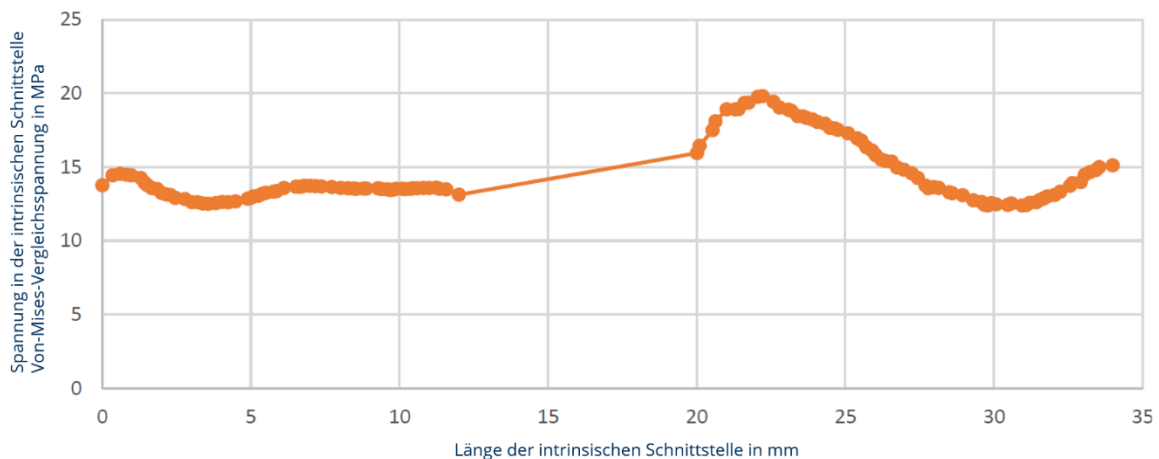


Abbildung 27: Lastverteilung in der intrinsischen Schnittstelle für Variante 5

In HAP4 wurde das Rotorkonzept aus HAP1 weiterentwickelt. So wurden auf Basis der globalen Berechnungen mit dem Digitalen Zwilling aus HAP2 zusätzliche Anforderungen abgeleitet, die zu detaillierteren Konzepten in den einzelnen Bereichen führten. Eine besondere Herausforderung sind hier die erhöhten Temperaturen im Bereich der Magnete, die zu geringeren Festigkeiten der einzusetzenden Klebstoffsysteme führen. Dieses kann durch größere Verbindungsflächen zur FKV-Deckscheibe ausgeglichen werden. Um die in den Magneten entstehende Wärme besser über eine große Fläche abzuleiten, wurde auf Basis der Berechnungen in HAP2 entschieden, eine der beiden Deckschichten mit einem Außenring aus Aluminium zu versehen (hybride Deckscheibe). Um eine Vorspannung von der Stirnseite der Magnete und dem Blechpaket an den Ring aus Aluminium der hybriden Deckscheibe zu erreichen wurde eine Schraubverbindung angewandt. Als Verbindung der Deckschichten mit

den Magneten wurde eine Schraubverbindung angewandt. Zusätzlicher Halt für die Magnete wird über eine Bandage hergestellt, dies war weniger durch die wirkenden Beanspruchungen erforderlich, sondern primär aus der Erfahrung von SIEMENS abgeleitet, da so bei Montagevorgängen von Rotoren ein besserer Schutz für die Magnete gegeben ist (Abbildung 28). Die Form der Welle wurde von Variante 5 der Untersuchungen der Welle abgeleitet.

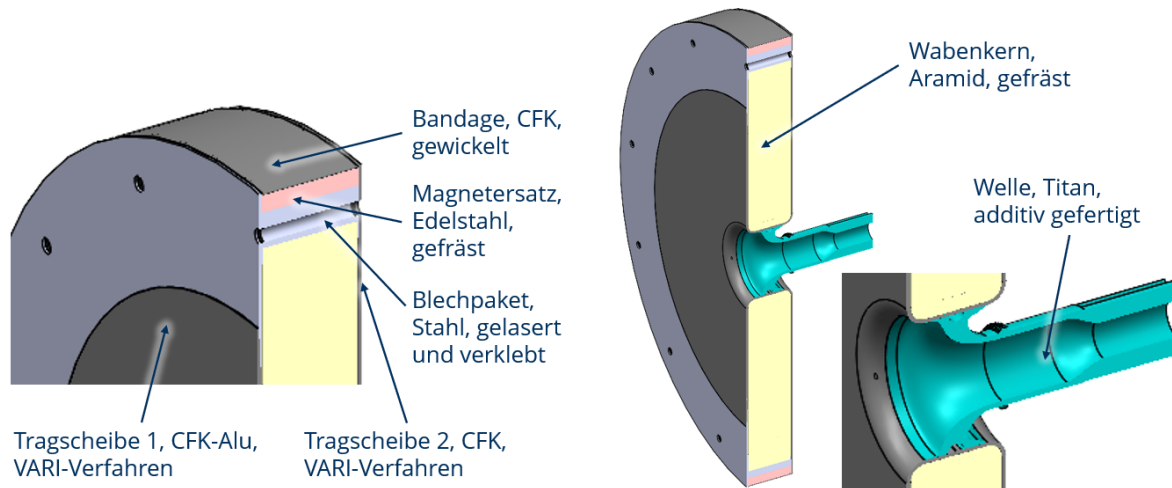


Abbildung 28: Finales Konzept des Rotors

In einer weiteren studentischen Arbeit [Toe22] wurde ein Konzept für den Stator erstellt. In einer Bereichseinteilung wurden zunächst alle erforderlichen Komponenten angeordnet (Abbildung 29).

- Lagerung Rotor
- Wärmetransport Stator  
→ Wasserstoffverteiler
- Isolation thermisch, elektrisch
- Lösbare Verbindung zum Flugzeug
- Luftspalt Rotor Stator 3 mm
- Statortemperatur -100 °C

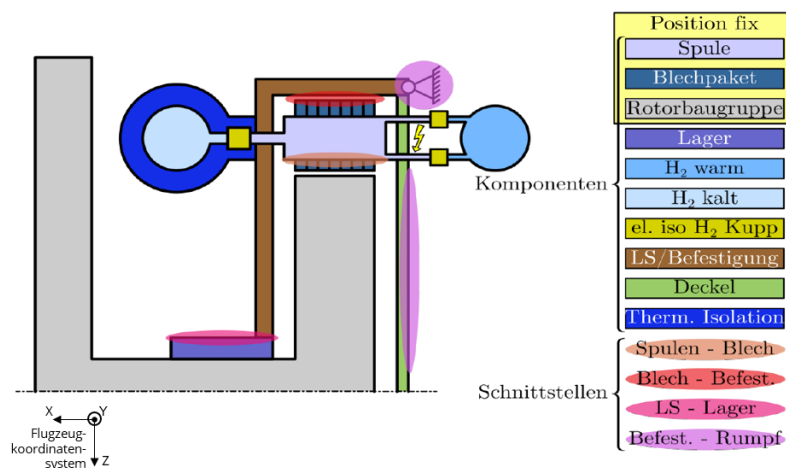


Abbildung 29: Bereichseinteilung des Stators

Eine große Herausforderung stellt dabei die Schrumpfung des Blechpaketes dar, wenn der kryogene Wasserstoff die Spulen abkühlt. Es muss hier eine Lagerung gefunden werden, die sowohl das Gegendrehmoment infolge der Drehung des Rotors an die Flugzeugstruktur

überträgt als auch die großen Schrumpfungen ausgleichen kann. Als Lösung konnte hier eine Anordnung von Blattfedern erarbeitet werden, die das Drehmoment in Form einer Zugspannung aufnehmen und die Verschiebung in Form einer Durchbiegung gut ertragen können (Abbildung 30).

Freier Bereich:

- Biegeweich zum Ausgleich der thermischen Dehnung
- Zugfest zur Übertragung des Drehmomentes
- Biegesteif in Flugrichtung

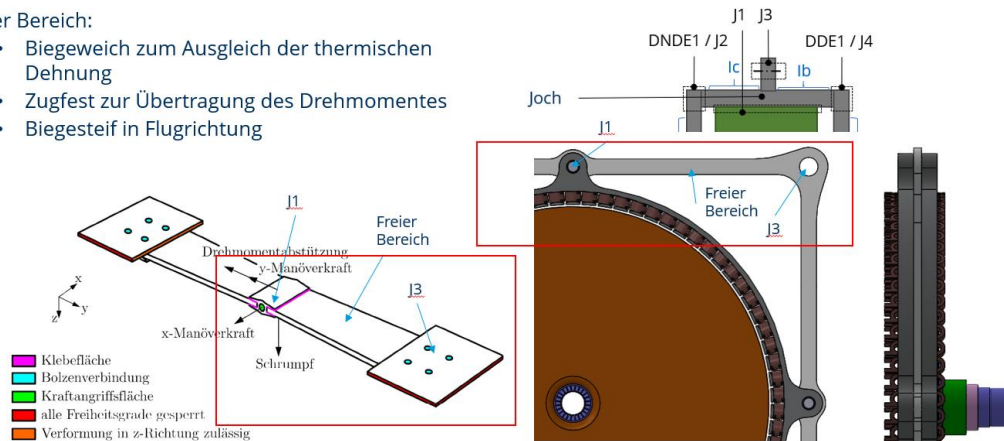


Abbildung 30: Konzept zur Lagerung des Rotors

Das Gesamtkonzept aus Rotor und Stator (Abbildung 31) konnte anschließend zusammengesetzt werden. In Summe wiegen die elektrisch erforderlichen Teile ca. 27 kg, der gesamte Motor 32 kg. Damit wurde die Zielmarke von 50 kg deutlich unterschritten.

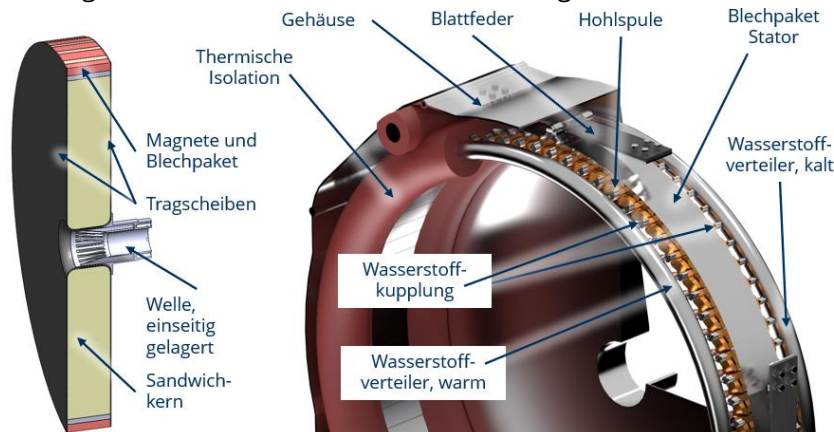


Abbildung 31: Gesamtkonzept des AdHyBau-Motors

Die Umsetzung der prüffähigen Struktur für HAP5 begann mit der Detaillierungsphase. Nach der Gestaltung und Beschaffung der Komponenten wie etwa Blechpakete, Magnetersatzkörper (massegleich zu den Magneten), Sandwichkerne, die metallischen Komponenten für die Deckscheiben und die Wellen aus Titan wurde bei den Wellen je ein Design für den Demonstrator und ein Design für den Test mit Anschlüssen zur Einspannung in der Prüfmaschine erarbeitet (Abbildung 32).

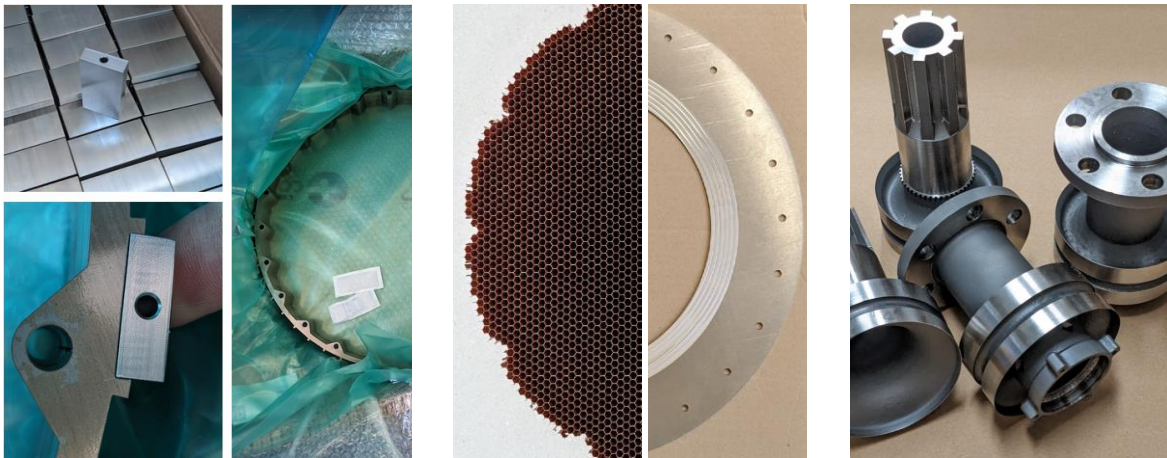


Abbildung 32: Komponenten für den Demonstrator in Hybridbauweise; links: Magnetersatzkörper und Blechpaket; mittig: gefräster Wabenkern und Ring aus Aluminium für hybride Deckscheibe; rechts: additiv gefertigte Wellen aus Titan mit sowohl mit Keilwelle und Aufnahme­flansch für die Prüfmaschine

Zur Fertigung der Deckscheiben im „vacuum assisted resin infusion“ (VARI) Prozess wurde ein Fertigungswerkzeug konstruiert und gefertigt. Anschließend wurde auf Basis der Berechnungen in HAP2 ein Lagen- und Zuschnittplan abgeleitet und in Drapierversuchen evaluiert. Anschließend wurden reine FKV und hybride FKV-Aluminium Deckscheiben hergestellt.

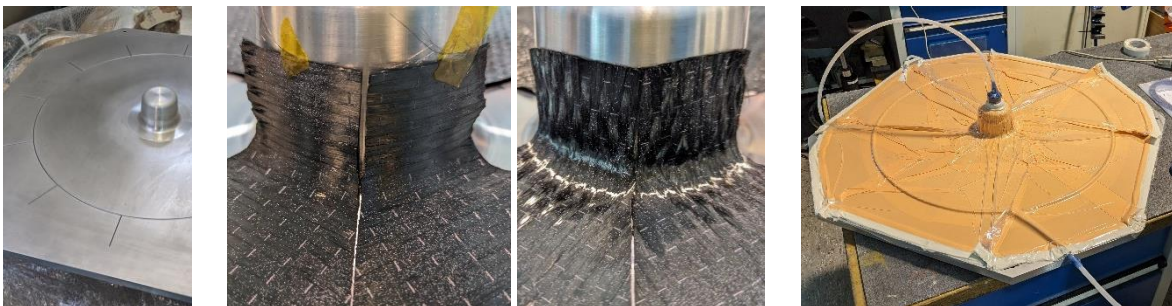


Abbildung 33: Fertigung von Deckscheiben: links: Werkzeug; mittig: Drapierversuche mit radialer und axialer Orientierung der Lagen; rechts: Aufbau bereit für Harzinfusion

Danach erfolgte die Montage der Komponenten mit der Verklebung der Magnetersatzkörper im Blechpaket, der Einsatz Wabenkern in das Blechpaket und die Montage der geschäfteten Randbleche des Blechpaketes. Anschließend wurden die FKV-Deckscheiben besäumt und gebohrt und gemeinsam mit der hybriden Deckscheibe auf den Wabenkern geklebt. Dabei wurde der Klebstoff an der FKV-Deckscheibe vollflächig, an der hybriden Deckscheibe nur im Bereich des Wabenkerns aufgetragen, um den späteren guten Wärmeübergang zwischen dem Ring aus Aluminium, der Stirnseite der Magnete und dem Blechpaket nicht zu verschlechtern. Es folgte die Fixierung alle Komponenten mittels Schrauben und das Einkleben der Wellen.

Durch Hilfslehren konnte eine bestmögliche axiale und zur Rotorebene senkrechte Lage der Wellen erreicht werden.



Abbildung 34: Endmontage des Demonstrators: links: Magnetersatzkörper, Wabenkern und geschäftete Bleche auf beiden Seiten; mittig: Klebstoffauftrag auf FKV-Deckscheibe; rechts: fertiger Demonstrator mit eingeklebter Welle

Parallel zu den Entwicklungen am TUD-ILK verfolgte auch SIEMENS ein Rotorkonzept auf Basis metallischer additiv gefertigter Strukturen. Aufgrund von Limitierungen beim Bauraum der zur Verfügung stehenden Anlagen wurde hier einer auf die Hälfte skaliertes Rotor entworfen und dabei die Lasten so angepasst, dass die Beanspruchungen in der Struktur identisch bleiben. Die Verbindungen zwischen Welle, Drehmomentübertragungselement und Blechpaket wurden als Presssitz ausgelegt. Die mechanische Nachbearbeitung und der Zusammenbau des vollständigen Testrotors wurden am TUD-ILK durchgeführt. Dies beinhaltete das Verkleben der Magnetersatzkörper, das Wickeln und auf Maß drehen der FKV-Bandage und eine anschließende Versiegelung (Abbildung 35). Auf diese Weise wurden vier Testrotoren gefertigt, je zwei mit einem massiven äußeren Ring und zwei mit einer aufgelösten Struktur und hohlen Schaufeln.



Abbildung 35: Fertigung der SIEMENS-Testrotoren: v.r.n.l.: Ausgangszustand nach der additiven Fertigung, mechanisch bearbeitete Passflächen innen und außen, Rotor vormontiert mit Blechpaket und Welle, Kleben der Magnetersatzkörper, Wickeln der FKV-Bandage; mechanische Endbearbeitung

### 2.1.5 HAP5

UZ11: Nachweis der Funktionsfähigkeit der Substrukturen in Laborumgebung

UZ12: Validierung der Strukturmodelle

UZ13: Nachweise der Funktionsfähigkeit im Gesamtsystem

UZ14: Überführung der Modellierungs- und Bauweisenansätze in handhabbare Empfehlungen

In HAP5 wurde durch SIEMENS und den assoziierten Partner Additive Drives eine Statorspule mit integrierter Kühlleitung entwickelt und gefertigt. Das TUD-ILK hat hier mit einer CT-Analyse unterstützt (Abbildung 36). Dabei war zu erkennen, dass der Kühlkanal durchgehend ausgebildet ist, jedoch an vielen Stellen noch Pulver im Kanal verblieben ist.

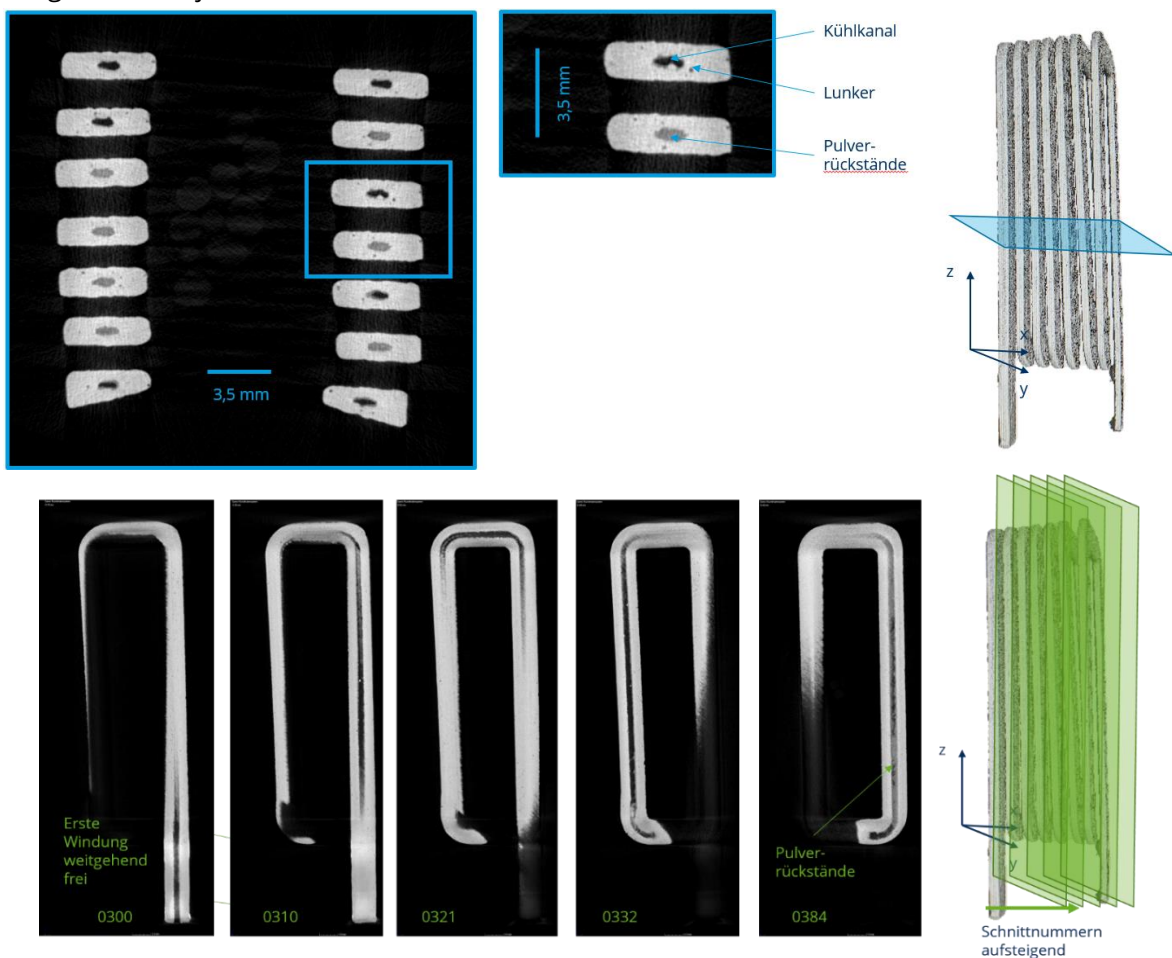


Abbildung 36: CT-Untersuchung an 3D-gedruckter Spule aus Kupfer mit integriertem Hohlleiter

In einer weiteren Untersuchung mit Scans in zwei unterschiedlichen Ausrichtungen der Spule konnte gezeigt werden, dass sowohl Bereiche mit lockerem Pulver als auch Bereiche mit verklumptem Pulver vorhanden sind (Abbildung 37 links). Dies gab wertvolle Hinweise auf eine zukünftige Gestaltung der Wendebereiche der Spule. Darüber hinaus wurde überprüft, welche

Abweichungen sich durch die additive Fertigung der Spule ergeben. Dies unterstützte die Berechnung der Kühlleistung der Spule vom idealen, zum tatsächlichen Querschnitt (Abbildung 37 rechts oben). Eine geometrische Rekonstruktion des Spulenquerschnittes kann für die zukünftige Auslegung der Spule genauere Ergebnisse bei der Ermittlung von Strömungsverlusten liefern (Abbildung 37 rechts unten).

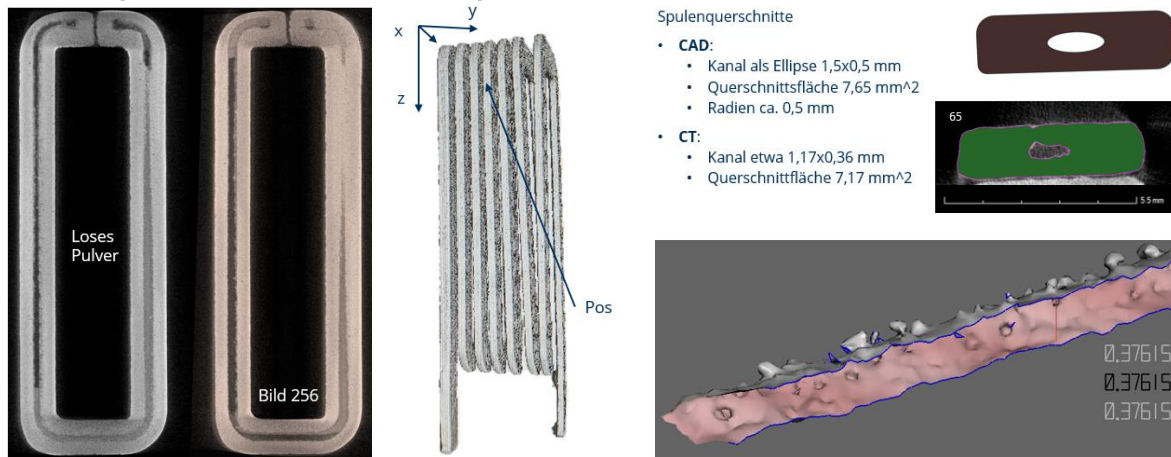


Abbildung 37: Detailliertere Auswertung der CT-Untersuchung: links: Vergleich zweier identischer Bereiche der Spule zur Identifikation von lockerem Pulver; rechts oben: Vergleich konstruierter und gefertigter Spulenquerschnitt; rechts unten: rekonstruierter Kühlkanal in der Spule

Darüber hinaus unterstützte das TUD-ILK den Partner MT Aerospace bei der Qualitätsüberprüfung eines additiv gefertigten Wärmetauschers, um ebenfalls mittels CT Pulverrückstände in den Kavitäten zu identifizieren.

Für die Untersuchung des Testrotors von SIEMENS wurde gemeinsam im Konsortium festgelegt, Beanspruchungen von Drehmoment und Drehzahl separat zu prüfen. Das Drehmoment lässt sich auf einer am TUD-ILK vorhandenen multiaxialen servohydraulischen Prüfmaschine aufbringen, die Drehzahl in einem ebenfalls zur Ausstattung gehörenden Schleuderprüfstand. In beiden Versuchen können während der Durchführung neben den Drehmomenten und Drehzahlen auch Dehnungen mittels Dehnungsmessstreifen (DMS) ermittelt werden. Darüber hinaus kann beim Test des Drehmomentes die Dehnung auch über ein Kamerasystem flächig ermittelt werden.

Zur Befestigung in den Prüfmaschinen wurde die Welle des Testrotors mit einem passenden Flansch versehen und auf der anderen Seite eine Aufnahme konstruiert, um den zur Übertragung der DMS-Signale während des Schleuderversuches erforderlichen Telemetrieadapter befestigen zu können (Abbildung 38 links). Weiterhin wurde gemeinsam mit SIEMENS eine Einspannung entwickelt, um das erforderliche Drehmoment im Bereich der Magnetersatzkörper in die Struktur einleiten zu können (Abbildung 38 rechts). Diese musste so gestaltet werden, dass eine genügend große Lücke zwischen oberer Einspannung und dem

Testrotor bleibt. Nur so kann das optische Messsystem ein ausreichend großes Sichtfeld zur Ermittlung der Dehnungen erhalten.

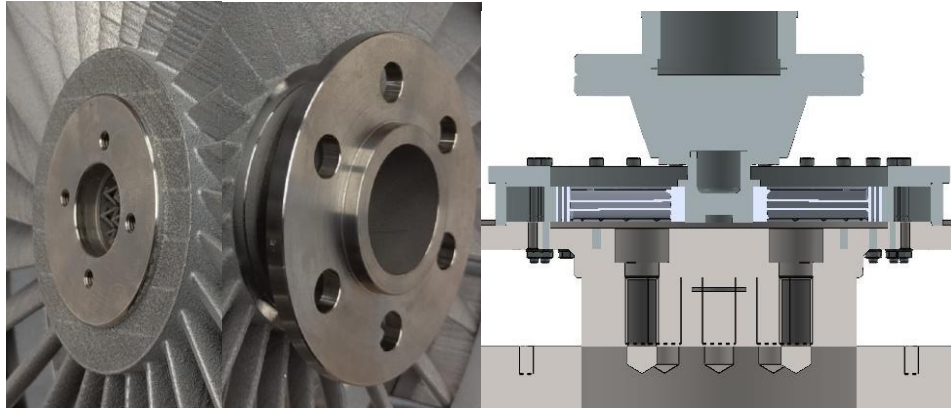


Abbildung 38: Links: Welle des Testrotors; rechts: Prüfaufbau Drehmomenttest

Es wurden zunächst Drehmomenttests an den Rotoren 113 (massive Wandung) und 114 (aufgelöste Wandung) durchgeführt. Dabei wurde schrittweise die Last erhöht (125, 250, 500, 1000, 2000, 4000 Nm). Bei einem Drehmoment von 2351 Nm versagte die Klemmverbindung zwischen Drehmomentübertragungselement und Welle bei Rotor 113. Bei einer Wiederholung des Versuches wurde die gleiche Grenze wieder erreicht. Bei einem anschließenden zyklischen, schwellenden Test mit 500 Nm Amplitude wurden 100 Zyklen ohne sichtbare Schäden ertragen. Bei Rotor 114 wurde das Rutschen bereits bei einem Drehmoment von etwa 1100 Nm beobachtet. Dies Last ließ sich jedoch unter weiterem Rutschen bis 1800 Nm steigern und erreichte dann ohne weiteres Rutschen die Testgrenze bei 2000 Nm.

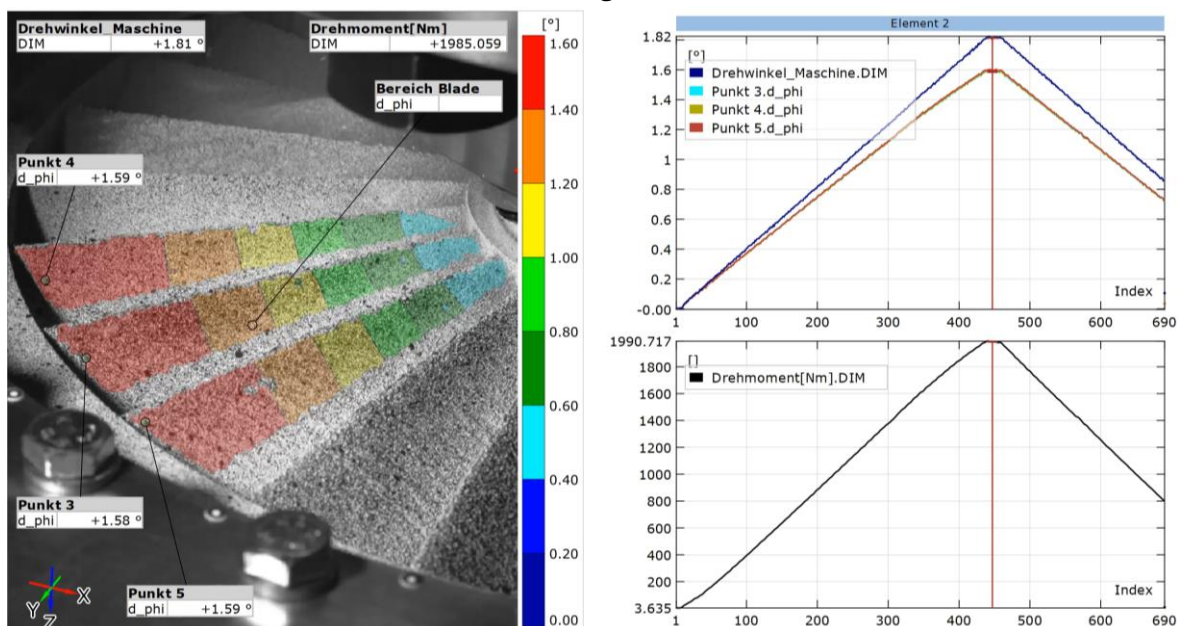


Abbildung 39: Ergebnisse Drehmomentprüfung Rotor 113: links: optische Verschiebungsmessung; rechts: Drehwinkel und Drehmoment der Prüfmaschine

Für die Drehzahltests der Rotoren 115 (aufgelöste Wandung) und 117 (massive Wandung) wurden zunächst beide Rotoren gewuchtet, mit Ausgleichsgewichten versehen und mit DMS instrumentiert. Es folgte der Test bei Drehzahl 8000 1/min, ohne relevante Schädigung des Bauteils. Somit konnten bis 7000 1/min Messungen mit Telemetriesystem unternommen werden (Abbildung 40). Anschließend erfolgten Berstversuche mit den jeweiligen Grenzdrehzahlen von 12800 1/min (Rotor 115 hohl) und 12500 1/min (Rotor 117 voll). Beim Bersten weitete sich das Blechpaket so stark, dass die Klemmkraft in der Pressverbindung nicht mehr ausreichte und es vom Rest des Rotors rutschte. Vermutlich durch die Bandage blieb das Blechpaket mit den Magnetersatzkörpern weitgehend intakt.

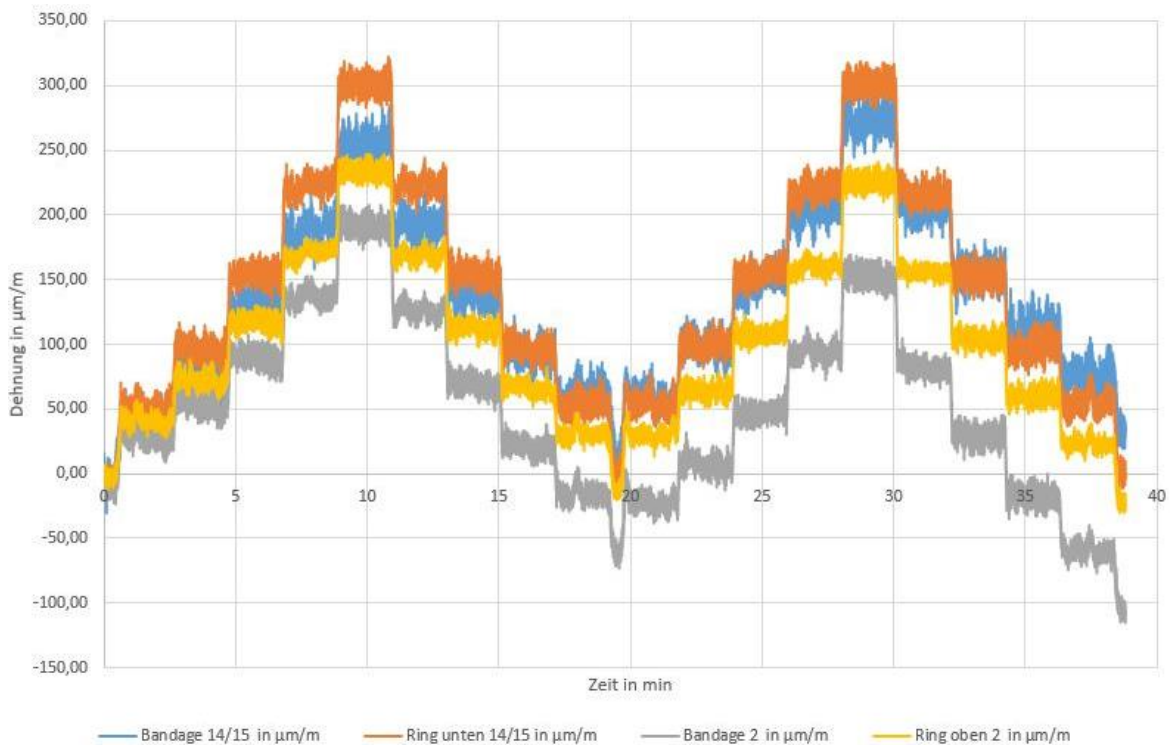


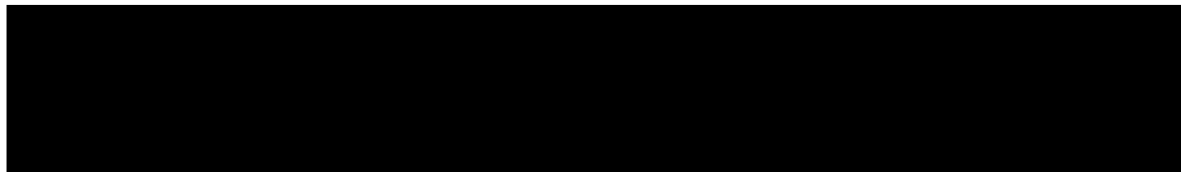
Abbildung 40: Ergebnisse der DMS-Messung bei Rotor 115 (hohl)

Bei diesem metallischen Rotor kann mittels der Pressverbindungen ein gutmütiges Bauteilverhalten erreicht werden. Die Ergebnisse des Vergleichs der Tests mit den Daten des digitalen Zwillings finden sich im Verwendungsnachweis von SIEMENS.

## 2.2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises



## 2.3 Notwendigkeit/ Angemessenheit geleistete Arbeit



## 2.4 Nutzen, Verwertbarkeit, Verwertungsplan

### Integration in die Lehre

Integration der Metall-Faserverbund Hybridbauweise in die Lehrveranstaltung „MW-MB-LB-15: Berechnen und Konstruieren von Leichtbaustrukturen“ der Studienrichtung Leichtbau.

### Studentische Arbeiten

Diplomarbeit Jonas Böhm: Entwicklung einer Rotorbauweise für den Einsatz in Hochleistungs-Elektromotoren zur Steigerung ihrer Funktionalität und Leistungsfähigkeit

Diplomarbeit Robert Fuchs: Entwicklung homogener intrinsischer Verbindungen für Metall-Faserverbund-Hybridstrukturen in elektrischen Antrieben mit kryogener Kühlung

Diplomarbeit Linus Tönnishoff: Auslegung und Entwicklung eines mechanischen Konzeptes für den Stator eines wasserstoffgekühlten Leichtbau-Elektromotors

Forschungspraktikum Jan Lohregel: Entwicklung eines Werkzeugsystems für Hybrid-Probekörper mit enger Dickentoleranz

Fachpraktikum Patrick Staub: Welle-Nabe-Verbindung zwischen additiv gefertigter metallischer Welle und Faser-Kunststoff-Verbund Rotor eines Hochleistungs-Elektromotors für Luftfahrtantriebe

## 2.5 Fortschritt bei anderen Stellen

Das Thema der elektrischen Antriebe für die Luftfahrt hat während des Vorhabens deutlich an Aktualität gewonnen. Einen guten Überblick lieferte dabei die Tagung CEC/ICMC2023. Hier stellten wesentliche Akteure aus dem pazifischen Raum ihre Ansätze, Konzepte und zum Teil auch schon Prototypen vor. Wesentlich war deren Fokus auf zum Teil deutlich größere Leistungsklassen als hier im Vorhaben. Weiterhin wurde auch Wasserstoff als wesentliche

Energiequelle benannt. Eine „doppelte“ Verwendung des Wasserstoffes als Kühlmedium und als Energieträger, wie hier im Konsortium konzipiert, wurde jedoch nicht beobachtet.

## 2.6 Veröffentlichungen

**EASN2021:** Intrinsic interfaces between additively manufactured metal and composite structures for use in electric propulsion engines; Martin Pohl et al.

**DLRK 2022:** Additive Verfahren und Metall/Faser Kunststoff Verbund Bauweisen für Antriebe mit kryogener Kühlung; Martin Pohl et al.

**VDI Welle-Nabe Verbindung 2022:** Welle-Nabe-Verbindung zwischen additiv gefertigter metallischer Welle und Faser-Kunststoff-Verbund Rotor eines Hochleistungs-Elektromotors für Luftfahrtantriebe; Martin Pohl et al.

**ICMC2023:** New concept for cryogenic gaseous hydrogen-cooled lightweight electric engine; Martin Pohl et al. (eingereicht)

**AJP2023:** Characterization of intrinsic interfaces between fibre reinforced composites and additively manufactured metal for designing hybrid structures; Richard Grothe et al.

### 3 Quellen

- [Boe21] Böhm, J.: Entwicklung einer Rotorbauweise für den Einsatz in Hochleistungs-Elektromotoren zur Steigerung ihrer Funktionalität und Leistungsfähigkeit, Diplomarbeit, TUD-ILK; 2021
- [Eis12] Eiselen, S.; Labranche, B.; Gay, D.; Schmidt, M.: Lasermikrostrukturierung mit Nano- und Pikosekundenlasern – Neue Möglichkeiten durch variable Pulsformung; Tagungsband der Tagung Laser in der Elektronikproduktion & Feinwerktechnik (LEF 2012), Bamberg, Meisenbach Verlag 2012, S.137-154
- [Fuc21] Fuchs, R.: Entwicklung homogener intrinsischer Verbindungen für Metall-Faserverbund-Hybridstrukturen in elektrischen Antrieben mit kryogener Kühlung; Diplomarbeit, TUD-ILK; 2021
- [Gei00] Geiss, G.; Einfluss von Tieftemperatur und Wasserstoff auf das Versagensverhalten von Glasfaser-Verbundwerkstoffen unter statischer und zyklischer Belastung; Dissertation, Universität Karlsruhe (TH); 2000
- [Gud15] Gude, M.; Hufenbach, W.; Kupfer, R.; Freund, A.; Vogel, C.; Development of novel form-locked joints for textile reinforced thermoplastics and metallic components; Journal of Materials Processing Technology 216 (2015) 140–145; 2015
- [Gud19] Gude, M.; Vogel, C.; Gröger, B.: Simulation-aided development of a robust thermoclinching joining process for hybrid structures with textile reinforced thermoplastic composites and metallic components. Materialwiss. Werkstofftech., 50 (2019), pp 1027–1038; 2019
- [Gru08] Grujici, M.: Application of Topology, Size and Shape Optimization Methods in Polymer Metal Hybrid Structural Lightweight Engineering, Multidiscipline Modeling in Materials and Structures, Volume 4; 2008
- [Hop13] Hopmann, C.; Böttcher, A.; Fischer, K.: Untersuchungen von Haftverbundansätzen und Haftfestigkeit zur intrinsischen Herstellung flächig verbundener Hybride aus endlosfaserverstärktem Thermoplast und Metall. Journal of Plastics Technology 9; 2013
- [Hon09] Honkanen, M.: Metal-Plastic Adhesion in Injection-Molded Hybrids, Journal of Adhesion Science and Technology, Volume 23; 2009
- [Huf12] Hufenbach, W. A.; Kupfer, R.; Hornig, A.: Thermoactivated Pinning - a novel joining technique for thermoplastic composites. Solid State Phenomena, Vol. 188 (2012), pp 176-18; 2012
- [Kel14] Kellner, P.; Knothe, P.; Steinbach, K.; Irmler, C.; Lepper, M.; Wenzel, H.; Adam, F.; Maaß, J.: Die 3D-Hybrid Leichtbautechnologie - Eine neuartige Stahl-GFK-Hybridbauweise für höchstbelastete Karosseriestrukturen. 18. Internationales Dresdner Leichtbausymposium 26.-27.06.2014, Dresden; 2014

- [Kur13] Kurtovic, A.; Eiselen, S.; Amend, P.; Mertens, T.; Maier, H.J.; Schmidt, M.: Laserinduzierte Nano- und Mikrostrukturierung von Titan- und Aluminiumlegierungen für hochwertige Klebeverbindungen. In: Schmidt, M.; Roth, S.; Amend, P. (Hrsg.): Tagungsband der Tagung Laser in der Elektronikproduktion & Feinwerktechnik (LEF 2013), Bamberg, Meisenbach Verlag (2013), S. 205-218; 2013
- [LiY23] Li Y., Meng J., Luo J., Wang P., Ma J., Zhao Z., Lei H.; Cryogenic mechanics and damage behaviors of carbon fiber reinforced polymer composites, Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, Volume 169, ISSN 1359-835X; <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2023.107484>; 2023
- [Loh22] Jan Lohrengel: Entwicklung eines Werkzeugsystems für Hybrid-Probekörper mit enger Dickentoleranz, Forschungspraktikum TUD-ILK; 2022
- [Mod15] Modler, N.; Adam, F.; Maaß, J.; Kellner, P.; Knothe, P.; Geuther, M.; Irmeler, C.: Intrinsic lightweight steel-composite hybrids for structural components. Materials Science Forum Vols 825-826 (2015) pp 401-408; (2015) Trans Tech Publications, Switzerland; 2015
- [Ram09] Ramani, K.: Thermoplastic bonding to metals via injection molding for macro-composite manufacture, Polymer Engineering & Science 38, 870-877; 1998
- [Reg10] Reg, Y.; Kägeler, C.; Schmidt, M.: Experimental studies on effects at micro-structuring of highly reflecting metals using nano- and picosecond-lasers. In: Proceedings of the 6th LANE2010 Laser Assisted Net Shape Engineering, Erlangen, 21.-24.09.2010, Physics Procedia Volume 5, Part 1, S. 245-253, Elsevier B.V. Amsterdam; 2010
- [Sch07] Schürmann, H.: Konstruieren mit Faser-Kunststoff- Verbunden, 2. Aufl. Berlin: Springer Verlag; 2007
- [Sta22] Patrick Staub: Welle-Nabe-Verbindung zwischen additiv gefertigter metallischer Welle und Faser-Kunststoff-Verbund Rotor eines Hochleistungs-Elektromotors für Luftfahrtantriebe, Fachpraktikum TUD-ILK; 2022
- [Tit21] K. Tittmann, I. Koch and M. Gude, Validation of an Energy-Based Fatigue Life Model for Fibre Reinforced Plastics under Different Stress Ratios, in: WCCM-ECCOMAS2020; <http://dx.doi.org/10.23967/wccm-eccomas.2020.356>; 2020
- [Toe22] Linus Tönnishoff: Auslegung und Entwicklung eines mechanischen Konzeptes für den Stator eines wasserstoffgekühlten Leichtbau-Elektromotors, Diplomarbeit TUD-ILK; 2022
- [Tro19] Troschitz, J.; Kupfer, R.; Gude, M.: Process-integrated embedding of metal inserts in continuous fibre reinforced thermoplastics, Procedia CIRP, Volume 85 (2019), pp 84-89; 2019
- [Tro23] Troschitz, J.; Vorderbrüggen, J.; Gude, M.; Meschut, G.: Clinching and resistance spot welding of thermoplastic composites with metals using inserts as joining interfaces. 23rd International Conference on Composite Materials, Belfast; 2023