

Abschlussbericht BWPLUS

WaGuPa- Entwicklung eines Wasserstoffspeichers im T-RTM-Verfahren auf Basis von Gusspolyamid 12

von

Timo Rothenbacher, Patrick Nowakowski und Stefan Ofe

Albert Handtmann Elteka GmbH & Co. KG

Faserinstitut Bremen e.V.

Institut für Polymer- und Produktionstechnologien e.V.

Förderkennzeichen: BWZPH222113

Laufzeit: 01.01.2022-31.03.2024

Finanziert aus Landesmitteln, die der Landtag Baden-Württemberg beschlossen hat.

Juni 2024



Baden-Württemberg

MINISTERIUM FÜR UMWELT, KLIMA UND ENERGIEWIRTSCHAFT

GESAMTBERICHT WAGU-PA 2022-2024

ENTWICKLUNG EINES WASSERSTOFFSPEICHERS IM T-RTM-VERFAHREN AUF BASIS VON GUSS- POLYAMID 12

1 Inhaltsverzeichnis

1	Inhaltsverzeichnis	1
2	Kurzbeschreibung des Projekts	5
3	Grundlagen	6
3.1	Ausgangslage und Problemstellungen	6
3.2	Projektziel	6
3.3	Stand der Wissenschaft und Technik	7
3.3.1	Wasserstoffspeicherung	7
3.3.1.1	Speicherung mit Hilfe von Wasserstoffträgern	8
3.3.1.2	Kryospeicherung	8
3.3.1.3	Druckspeicherung	9
3.3.1.4	Kunststoff-Liner	10
3.3.2	Gusspolyamid 12	10
3.3.3	Faserwickeln	11
4	Projektplanung	13
4.1	Arbeitsplan	13
4.2	Projektplan	14
4.3	Aufgabenverteilung	15
5	Materialcharakterisierung	16
5.1	Lastenheft	16
5.2	Testmatrix	17
5.3	Ergebnisse der Testmatrix	18
5.3.1	Tankauslegung	18
5.3.1.1	Zugversuche	18
5.3.1.1.1	Ergebnisse Zugversuche	19
5.3.1.2	Bestimmung Schubmodul	21
5.3.1.3	Dauerlastversuche	21
5.3.1.3.1	Wassergesättigtes Lauramid B	22
5.3.1.3.2	Hicompelt mit UD-Lagenaufbau	22
5.3.1.3.3	Hicompelt mit quasiisotropen Lagenaufbau	22
5.3.1.4	Permeationsprüfung	23

5.3.1.4.1	Kristallinitätseinfluss.....	24
5.3.1.4.2	Alterungseinfluss	25
5.3.1.4.3	Temperatureinfluss	25
5.3.1.4.4	Dickeneinfluss.....	25
5.3.1.4.5	Druckeinfluss	25
5.3.1.4.6	Erkenntnisse aus Permeationsprüfungen	26
5.3.1.4.7	Prüfungen FIBRE	26
5.3.1.5	Wärmeausdehnung	29
5.3.1.6	Impactverhalten	31
5.3.1.6.1	Erste Prüfreihe.....	31
5.3.1.6.2	Zweite Prüfreihe	32
5.3.1.7	Flammschutztests	35
5.3.2	Anwendungsbezogene Tests	35
5.3.2.1	Verbindungstechnik.....	35
5.3.2.2	Materialschnittstellen- Zugscherprüfungen	37
5.3.3	Verarbeitungsrelevante Tests.....	38
5.3.3.1	Untersuchungen zur Polymerisationskinetik.....	38
5.3.3.2	Untersuchungen des Infiltrationsverhaltens	45
5.3.4	Kryogene Tests.....	46
5.3.4.1	Permeationsversuche im kryogenen Bereich	46
5.3.4.2	Tiefemperatur-Zugversuche Lauramid.....	46
6	Konstruktion Wasserstofftank	48
6.1	Benchmark.....	48
6.2	Vorgaben aus Use-Cases	49
6.3	Konstruktion Wasserstofftank.....	50
6.3.1	Aufbau und Funktionen Wasserstofftank.....	50
6.3.2	Patentrecherche	52
6.3.3	Entscheidungsfindung Konstruktion Wasserstofftank	52
6.4	Wickeln	55
6.5	Berechnung Wasserstofftank	56
6.5.1	Erstauslegung	56
6.5.2	Ermittlung Lagenaufbau	57
6.5.3	Anpassung Lagenaufbau.....	59
6.6	Einfrierung Konstruktionsstand 19.12.2022.....	61
7	Infiltrationsversuche.....	63
7.1	Plattenversuche.....	63

7.1.1	Instrumentierung T-RTM-Plattenwerkzeug.....	63
7.1.2	Versuchsplanung	64
7.1.3	Versuchsdurchführung	65
7.1.4	Versuchsergebnisse	66
7.1.4.1	Temperaturerhöhung	66
7.1.4.2	Infiltrationsgeschwindigkeit	67
7.1.4.3	Niederdruckversuche.....	67
7.2	Demonstrator- Tankversuche.....	68
7.2.1	Konstruktion T-RTM-Werkzeug Demonstrator-Tank	68
7.2.2	Wickeln Tankpreform	69
7.2.3	Infiltrationsversuche.....	71
7.2.4	Versuchsergebnisse	72
7.2.4.1	Abdichtkonzept:.....	72
7.2.4.2	Entformung:.....	72
7.3	Prototypen-Tank-Versuche	73
7.3.1	Prototypentank-Preform	74
7.3.2	Werkzeugkonstruktion	75
7.3.3	Versuchsergebnisse	76
7.3.3.1	Versuch 1	76
7.3.3.2	Versuch 2	78
7.3.3.3	Versuch 3	80
8	Entwicklung eines Fertigungskonzeptes für die Serienproduktion von Wasserstoffspeichern	81
8.1	Ableitung eines wirtschaftlichen Serien-Fertigungsprozesses	81
8.1.1	Prozessschema	81
8.1.2	Produktlenkungsplan.....	82
8.1.3	Prozess-FMEA	84
8.1.4	Kostenanalyse.....	84
8.2	Erarbeitung eines Qualitätssicherungskonzeptes	87
8.2.1	Zerstörende Prüfungen.....	87
8.2.2	Zerstörungsfreie Prüfverfahren	90
8.2.2.1	Röntgenanalyse bzw. Computertomographie.....	90
8.2.2.2	Ultraschallprüfung	91
8.2.2.3	Wirbelstromprüfung.....	93
8.3	Automatisierungsmöglichkeiten der Prozesskette	95
8.4	Untersuchung des Recyclingpotenzials	96
9	Ausblick und weitere Vorgehensweise	101

10	Abbildungsverzeichnis	102
11	Tabellenverzeichnis	104
12	Literaturverzeichnis	105
13	Anhang	106

2 Kurzbeschreibung des Projekts

Entsprechend der Wasserstoff-Roadmap Baden-Württemberg trägt dieses Projekt dazu bei, den Auf- und Ausbau einer Wasserstoffwirtschaft regional zu begleiten, um Baden-Württemberg national wie auch international als führenden Standort der Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Industrie zu entwickeln. Derzeit gibt es dringenden Forschungsbedarf zum Transport von Wasserstoff mittlerer Mengen über lange Strecken über Schifffahrt, Schiene oder Straße, zur Speicherung und zum Einsatz in Fahrzeugen. Hierzu müssen insbesondere Lösungen für die kleinskalige Speicherung von Wasserstoff in Fahrzeugen, den Transport (Schiff-, Zug- und LKW-Transport) und das Umfüllen dieses Energieträgers unter Berücksichtigung von Kosten und Technikfolgen entwickelt werden.

Derzeitige state-of-the-art Wasserstoffspeicher haben vergleichsweise hohe Material- und Fertigungskosten. Darüber hinaus existieren für diese Duromer-basierten Verbundwerkstoffe keine Recyclingkonzepte, so dass Stoffkreisläufe nach dem Produktlebenszyklus nicht geschlossen werden können. Dies steht den globalen Zielen der Energiewende und der damit verbundenen weltweiten Reduzierung der CO₂-Emissionen im Wege.

Das Ziel des Verbundprojektes besteht in der Entwicklung eines kosteneffizienten Wasserstoffspeichers im T-RTM-Verfahren auf Basis von Guss-Polyamid 12 unter Berücksichtigung des Recyclingpotenzials der eingesetzten Materialien zur Schließung von Stoffkreisläufen. Für die Erreichung des genannten Zieles sind eine Reihe von Arbeiten auf den Gebieten der Materialentwicklung, Strukturmechanik (FEM), Industrie 4.0 gerechte Fertigungstechnik im Verbund erforderlich. Die inhaltliche wissenschaftliche und technische Vorgehensweise zur Bearbeitung der Entwicklungsaufgaben gliedert sich im Wesentlichen in 3 Aufgabenfelder:

- AP 1: Entwicklung Kohlefaser-verstärktes Verbundmaterial auf Basis Gusspolyamid 12
- AP 2: Konstruktion und Auslegung des Wasserstoffspeichersystems
- AP 3: Entwicklung eines Fertigungskonzeptes unter Berücksichtigung Recyclingpotenzials der eingesetzten Materialien

Das Forschungsvorhaben greift genau die in der Wasserstoff-Roadmap Baden-Württemberg (ZPH2) genannten Maßnahmen auf und trägt damit zur Etablierung des Landes als führenden Standort in der Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie bei.

3 Grundlagen

3.1 Ausgangslage und Problemstellungen

Die Begrenzung des Klimawandels durch die Reduzierung der weltweiten CO₂-Emissionen ist eine der zentralen Herausforderungen des 21. Jahrhunderts (Weichenhain, 2020). Dabei nimmt „Grüner“ Wasserstoff als Schlüsseltechnologie des 21. Jahrhunderts und des European Green Deal eine zentrale Rolle ein (Wolter, 05.01.2021). Für den Bereich Wasserstoff erwarten Branchenexperten bis 2030 und vor allem danach global ein signifikantes Marktwachstum. Um sich auf national und auch international auf den Märkten in Europa, den USA und Asien erfolgreich positionieren zu können müssen die einheimischen Unternehmen mit innovativen und technisch ausgereiften Produkten ihre wirtschaftlichen Potenziale nutzen (Wolter, 05.01.2021).

Entsprechend der Wasserstoff-Roadmap Baden-Württemberg (ZPH2) sollen Forschungs- und Entwicklungsprojekte zur Industrialisierung und Marktaktivierung von Technologien gefördert und der Wissenstransfer durch Kooperationen angereizt und unterstützt werden. Konkret soll durch das Förderprogramm der Einsatz von Wasserstofftechnologien in Unternehmen, insbesondere die Umsetzung von Demonstrationsprojekten und die Vorbereitung des Markthochlaufs unterstützt werden. Hierzu müssen insbesondere Lösungen für die kleinskalige Speicherung von Wasserstoff in Fahrzeugen, den Transport (Schiff-, Zug- und LKW-Transport) und das Umfüllen dieses Energieträgers unter Berücksichtigung von Kosten und Technikfolgen entwickelt werden.

Genau hier setzt auch dieses Forschungs- und Entwicklungsprojekt an. Das Ziel besteht in der Entwicklung eines kosteneffizienten Wasserstoffspeichers im T-RTM-Verfahren auf Basis von Guss-Polyamid 12 unter Berücksichtigung des Recyclingpotenzials der eingesetzten Materialien zur Schließung von Stoffkreisläufen.

Für die Herstellung von Wasserstoffdruckspeichern gibt es bereits unterschiedliche Lösungen, die mit jeweils mit Vor- und Nachteilen verbunden sind (siehe Stand der Wissenschaft und Technik). Die neueste Generation von Wasserstoffdruckspeichern sind die so genannten Typ IV Speicher. Sie bestehen aus einem Kunststoff-Liner (Polyamid oder Polyethylen) der vollständig mit einer Harz-basierten Kohlefaserwicklung ummantelt ist. Trotz seines geringen Gewichts, bei gleichzeitig hoher Belastbarkeit, haben diese Wasserstoffspeicher vergleichsweise hohe Material- und Fertigungskosten. Darüber hinaus existieren für diese Duomer-basierten Verbundwerkstoffe keine Recyclingkonzepte, so dass Stoffkreisläufe nach dem Produktlebenszyklus nicht geschlossen werden können. Dies steht den globalen Zielen der Energiewende und der damit verbundenen weltweiten Reduzierung der CO₂-Emissionen im Wege.

Im Rahmen dieses Projektes soll ein kosteneffizienter Wasserstoffspeicher im T-RTM-Verfahren auf Basis von Guss-Polyamid 12 entwickelt werden. Aus dem Anspruch heraus eine nachhaltige Lösung zu entwickeln, soll das Recyclingpotential der eingesetzten Materialien bei der Produktentwicklung berücksichtigt werden und damit die Grundlage geschaffen werden den Stoffkreislauf nach der Produktlebenszeit zu schließen.

So ein Wasserstoffspeicher stellt am Markt eine absolute Neuheit dar und bildet die Grundlage für Handtmann Elteka sich auf den nationalen und internationalen Märkten erfolgreich zu positionieren und den Wirtschaftsstandort Baden-Württemberg als Standort der Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Industrie zu stärken.

3.2 Projektziel

Das Ziel des Projektes besteht in der Entwicklung eines kosteneffizienten Wasserstoffspeichers im T-RTM-Verfahren auf Basis von Guss-Polyamid 12 unter Berücksichtigung des Recyclingpotenzials der eingesetzten Materialien zur Schließung von Stoffkreisläufen. Zur Erlangung des genannten Zieles sind eine Reihe von Arbeiten im Verbund erforderlich. Die wissenschaftlich/technischen Lösungsansätze gliedern sich in drei wesentliche Entwicklungsschritte:

1. Entwicklung eines Kohlefaser-verstärkten Verbundmaterials auf Basis Gusspolyamid 12, welches im T-RTM-Verfahren verarbeitet wird und für den Einsatz zur Speicherung von Wasserstoff geeignet ist

2. Konstruktion, strukturmechanische Auslegung und Optimierung eines Wasserstoffdruckspeichers (Typ V), der keinen extra Liner benötigt, sondern nur eine Kohlefaser-verstärkte Thermoplast-Struktur mit gradierten Materialeigenschaften aufweist, die allen qualitäts- und sicherheitstechnischen Anforderungen an einen Wasserstoffspeicher gerecht wird

3. Entwicklung eines Industrie 4.0 gerechten Fertigungskonzeptes, welches eine wirtschaftliche und qualitätsgerechte Fertigung des Wasserstoffspeichers ermöglicht und dabei gleichzeitig die zukunftsweisenden Möglichkeiten geschlossener Stoffkreisläufe berücksichtigt

Durch eine erfolgreiche Bearbeitung der oben beschriebenen Lösungsansätze wird das Gesamtprojektziel erreicht und die Grundlage für eine entsprechende Verwertung der Projektergebnisse geschaffen. Für das Unternehmen, Handtmann Elteka, bietet dieses Projekt eine große Chance, im Bereich Wasserstoffspeicherung dem in situ-Verfahren T-RTM Fuß zu fassen und eine innovative Lösung zu erarbeiten, die einzigartig auf dem Markt ist. Darüber hinaus dient dieses Projekt dem Erhalt und Ausbau von Arbeitsplätzen in der Firma Albert Handtmann und soll durch die Übertragung von Know-how in relevante Produktstückzahlen die wirtschaftliche Leistungsfähigkeit und internationale Wettbewerbsfähigkeit dieses regionalen Unternehmens stärken.

Für die Forschungspartner IPT und FIBRE biete dieses Projekt eine große Chance die bestehenden Kompetenzen zu vertiefen und auf Basis der gewonnenen Erkenntnisse neue Forschungsprojekte und Kooperationen zu akquirieren.

Damit trägt dieses Projekt entsprechend der Wasserstoff Roadmap Baden-Württemberg dazu bei, den Auf- und Ausbau einer Wasserstoffwirtschaft regional zu begleiten, um Baden-Württemberg national wie auch international als führenden Standort der Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Industrie zu entwickeln.

3.3 Stand der Wissenschaft und Technik

3.3.1 Wasserstoffspeicherung

Der Energieträger Wasserstoff kann auf unterschiedliche Arten gespeichert werden (Abbildung 1). Dabei hängt die Effektivität der Speichermethode von der realisierbaren Speicherdichte und der damit verbundenen Energiedichte ab. Grundsätzlich kann Wasserstoff sowohl im flüssigen als auch im gasförmigen Aggregatzustand gespeichert werden. Darüber hinaus kann Wasserstoff auch mit Hilfe fester oder flüssiger Wasserstoffträger gespeichert werden. Speichersysteme dieser Art werden auch als Stoffspeicher bezeichnet (Adolf, 2017).

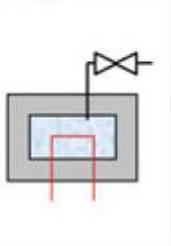
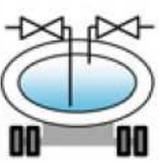
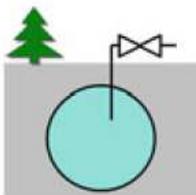
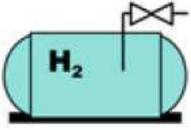
Chemisch		Flüssig		Druck	
Metallhydrid-Speicher	H ₂ -Verbindungen	Tiefkühlspeicher		Gasspeicher	
					
Stationär/ mobil / tragbar	Infrastruktur nutzen / vorhanden	Trailer- Transport	Stationäre Großspeicher	Kavernen	Stationär/ mobil/ portabel Stahl / Verbundmaterial

Abbildung 1: Speicherung von Wasserstoff (Lehmann & Luschtinetz, 2014)

3.3.1.1 Speicherung mit Hilfe von Wasserstoffträgern

Bei den zur Speicherung von Wasserstoff eingesetzten Wasserstoffträgern handelt es sich um feste oder flüssige Substanzen, an denen größere Mengen von Wasserstoff gebunden werden können (RP-Energie-Lexikon, 20.05.2021). Im einfachsten Fall kann Wasserstoff durch physikalische Adsorption an Aktivkohle oder Zeolithe gelagert werden. Diese Adsorptions-Wasserstoffspeicher erfordern jedoch Temperaturen im Bereich von ca. -200 °C und die damit erzielbaren Speicherdichten sind relativ gering (Lehmann, 2014) (RP-Energie-Lexikon, 20.05.2021). Höhere Speicherdichten lassen sich mit Metallhydridspeichern realisieren, bei denen der Wasserstoff durch eine moderat exotherme Reaktion chemisch an den Träger gebunden wird (RP-Energie-Lexikon, 20.05.2021). Diese Speicher sind bei Raumtemperatur stabil und der Wasserstoff entweicht nicht. Um den Wasserstoff nutzen zu können, müssen diese Speicher auf eine Temperatur erwärmt werden, die oberhalb der Bindungsenergie der Metallhydridbindung liegt. Der Vorteil der Metallhydridspeicher liegt in der realisierbaren Speicherdichte. Selbst bei einer Wasserstoffkapazität von nur 2 Gewichtsprozent, können bei einer Materialdichte des Speichers von ca. 7 kg/dm³ ca. 140 Gramm Wasserstoff pro Liter Materialspeichervolumen gebunden werden (Lehmann, 2014). Im Vergleich dazu; flüssiger Wasserstoff hat eine Dichte von ca. 71 Gramm pro Liter. Die hohe Masse der Metallhydridspeicher ist jedoch ein wesentlicher Nachteil dieser Speicher und schränkt die Nutzung erheblich ein.

Abgesehen von den festen Wasserstoffträgern sind auch flüssige Substanzen, neben Ammoniak insbesondere flüssige Kohlenstoff-Wasserstoff-Verbindungen, sogenannte LOHC (Liquid Organic Hydrogen Carriers), zur Speicherung von Wasserstoff geeignet. Die Aufnahme von Wasserstoff erfolgt hierbei über eine exotherme addierende Hydrierung von ungesättigten aromatischen Verbindungen. Dabei werden die Kohlenstoff-Kohlenstoff-Doppelbindungen in entsprechende gesättigte Einfachbindungen überführt. LOHCs haben den Vorteil, dass sie im technisch relevanten Temperaturbereich im flüssigen Aggregatzustand sind. Damit ergeben sich auch Vorteile in der Transportlogistik, weil die Tank- und Umfülltechnologien bereits über die gesamte globale und regionale Lieferkette verfügbar und etabliert sind (Klinger, 2020). Für die Nutzung des Wasserstoffs müssen die wasserstoffangereicherten LOHCs bei erhöhten Temperaturen dehydriert werden.

3.3.1.2 Kryospeicherung

Kryospeicher sind aufgrund ihres vergleichsweise niedrigen Innendrucks und der daraus resultierenden dünnwandigen Tanks typisch für die Raumfahrt und sind aktuell auch Gegenstand umfangreicher Untersuchungen für den Einsatz in kommenden Luftfahrzeugen (Klug, 2001). Tatsächlich sind selbst in der Raumfahrt aktuell nur Aluminium-Tanks im Einsatz und noch keine CFK-Tanks. Grund dafür sind unbeantwortete Fragen zur Vorhersage der Bildung von Mikrorissen durch mechanische und thermische Wechsellasten mit resultierender Permeation von Wasserstoff durch die CFK-Tankwandung (Grogan, 2014) (Sihn, 2007). Weiterhin ist bekannt, dass Epoxidharze als Matrix suboptimal sind bei tiefkalten Temperaturen, da sie äußerst spröde werden und nur noch geringe Bruchdehnungen aufweisen.

Die Speicherung von flüssigem Wasserstoff erfolgt bei -253 °C und Normaldruck. Aufgrund der relativ geringen Dichte (ca. 71 kg/m³) von flüssigem Wasserstoff beträgt die volumetrische Energiedichte (ca. 2,4 kWh/dm³) trotz seines hohen massebezogenen Heizwertes nur ca. ein Viertel der Energiedichte von Diesel (Lehmann, 2014) (RP-Energie-Lexikon, 20.05.2021). Darüber hinaus muss ca. ein Drittel der im Wasserstoff enthaltenen Energie für seine Verflüssigung aufgewendet werden. Das macht die Speicherung von flüssigem Wasserstoff aktuell nicht für den Massenmarkt der Mobilitätsanwendungen sinnvoll. Noch komplexer ist die Speicherung von flüssigem Wasserstoff unter zusätzlicher Druckbeaufschlagung. Zwar können damit die spezifischen Energiedichten nochmals gesteigert werden, doch damit verbunden ist ein zusätzlicher Energieaufwand. Durch auftretende Wärmeverluste beim Tanken können die hohen Speicherdichten auch nur nach einem mehrmaligen Nachtanken nach einem Teilverbrauch des Tankinhalts erreicht werden (Brunner, 2016) (Kunze, 2012). Kryospeicher benötigen darüber hinaus eine gute thermische Isolierung, um den Wärmeeintrag in das Speichersystem so gering wie möglich zu halten. Durch thermisch gut isolierte Speichersysteme kann der ständig verdampfende Anteil (Boil-off) von Wasserstoff auf einen einstelligen Prozentbereich pro Tag reduziert werden (Lehmann, 2014). Anwendungen für flüssigen Wasserstoff finden sich z. B. in der Chip-Industrie aufgrund hoher Anforderungen an die Reinheit des Stoffes (Adolf, 2017).

3.3.1.3 Druckspeicherung

Für die Massenmärkte PKW, LKW, Nutzfahrzeug und Bahn kommt die Etablierung einer Logistik und Speicher für unter Druck gespeichertem Wasserstoff aufgrund der geringeren Komplexität und des höheren Wirkungsgrads die größte Bedeutung zu. Bei der Druckspeicherung wird das Wasserstoffgas mit Hilfe von speziell für Wasserstoff geeigneten Kompressoren verdichtet und damit die Energiedichte des Energieträgers erhöht (Lehmann, 2014). Für die Speicherung des komprimierten Wasserstoffgases gibt es Druckgasflaschen und Drucktanks, die typischerweise für Drücke in der Größenordnung von einigen hundert bar ausgelegt sind (RP-Energie-Lexikon, 20.05.2021). Bei den Bauweisen hat sich mit zylindrischen Drucktanks ein gewisser Standard gebildet, der auch fertigungstechnische begründet ist. Tatsächlich könnten unter gewichtsspezifischen oder auch bauraumbedingten Randbedingungen z.B. auch Kugelpackungen oder Spiralrohr tanks sinnvoll sein (Braune, -) (Kroiss, -). Die unterschiedlichen zylindrischen Bauformen werden üblicherweise entsprechend der ISO 11439 („Gasflaschen - Hochdruck-Flaschen für die fahrzeuginterne Speicherung von Erdgas als Treibstoff für Kraftfahrzeuge“) kategorisiert (Abbildung 2).

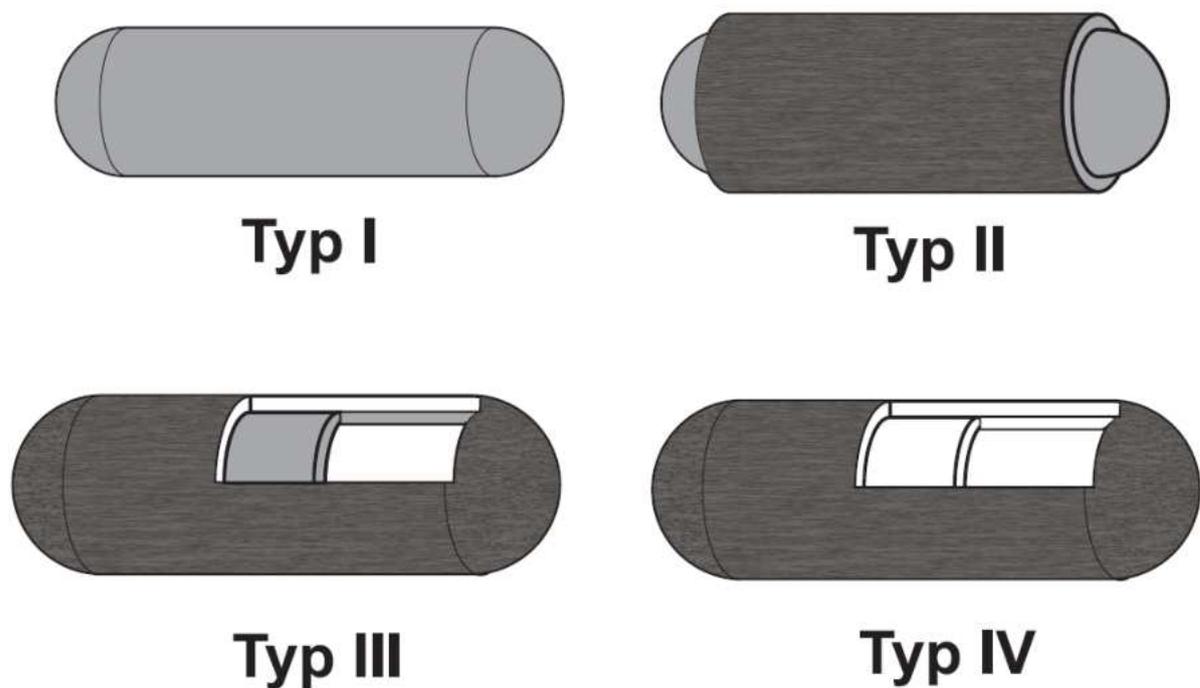


Abbildung 2: Druckbehältertypen (Schulz, 2013)

Der Typ I – Behälter ist ein rein metallischer Behälter (i.d.R. aus Stahl), dessen Nenndrücke typischerweise im Bereich von 200 bar liegen (Emcel, 23.05.2023). Der Typ II – Behälter hat einen metallischen Liner, der im zylindrischen Bereich mit einer Glas- oder Kohlefaserwicklung ummantelt ist (hoop wrapped). Aus dieser Bauform resultiert gegenüber dem Typ I – Behälter ein leichter Gewichtsvorteil sowie eine höhere Belastungsfähigkeit (Nenndrücke bis 1000 bar) (Nproxx, 23.05.2021) (Emcel, 23.05.2023). Der Typ III – Behälter hat ebenfalls einen metallischen Liner, der meist aus Aluminium besteht. Im Gegensatz zum Typ II – Behälter ist dieser Druckspeicher vollständig mit einer Kohlefaserwicklung ummantelt (fully wrapped). Bei dieser Bauform dient der metallische Liner vor allem der Dichtheit, während die Last hauptsächlich durch die Kohlefaserwicklung aufgenommen wird (Schulz, 2013). Aufgrund seiner Gewichtsvorteile gegenüber Typ I und II wird dieser Druckspeicher hauptsächlich für mobile Anwendungen (Nenndrücke 350 oder 700 bar) eingesetzt (Emcel, 23.05.2023). Typ IV – Behälter stellen die neueste Generation der Wasserstoff-Druckspeicher dar. Sie besitzen einen Kunststoff-Liner (Polyamid oder Polyethylen), der, wie der Typ III – Behälter, vollständig mit einer Kohlefaserwicklung ummantelt ist. Der Typ

IV – Behälter zeichnet sich gegenüber allen anderen Bauformen durch ein deutlich geringeres Gewicht bei gleichzeitig hoher Belastbarkeit aus, was ihn für mobile Anwendungen ganz besonders interessant macht (Nprox, 23.05.2021).

3.3.1.4 Kunststoff-Liner

Druckspeicher des Typ IV besitzen einen Kunststoff-Liner, der zum einen als Kern für den Wickelprozess dient und zum anderen die Dichtheit des Speichers gegenüber dem unter Druck stehenden Wasserstoff gewährleisten muss. Hergestellt werden Kunststoff-Liner im Rotationsintervallverfahren oder mittels Blasformen und als Werkstoffe haben sich hierfür Polyethylen und Polyamid durchgesetzt. Der Einsatz unterschiedlicher Materialkombinationen ist bei hohen Lasten und Temperaturwechseln grundsätzlich problematisch, da die unterschiedlichen Wärmeausdehnungskoeffizienten der Werkstoffe zu thermisch bedingten Eigenspannungen führen können und damit die Nutzungsdauern dieser Speicher einschränken können. Die thermische Leitfähigkeit und der Diffusionswiderstand des Kunststoff-Liners kann durch geeignete Additivierung jedoch verbessert werden.

3.3.2 Gusspolyamid 12

Gusspolyamid 12 wird durch die anionisch aktivierte Polymerisation von Laurinlactam hergestellt. Laurinlactam dient hierbei als Monomer und Ausgangswerkstoff und polymerisiert durch die Zugabe von Aktivator und Katalysator zu Polyamid 12 (PA12) aus. PA12 zeichnet sich vor allem durch seine langkettige Struktur aus, die es im Vergleich zu anderen Polyamidsorten (z.B. Polyamid 6) besitzt. Außerdem bildet der Werkstoff nach der Polymerisation eine kristalline Struktur auf, die das Material sehr widerstandsfähig machen.

Um die Polymerisation durchzuführen, muss der Ausgangswerkstoff Laurinlactam bei über 150°C aufgeschmolzen werden. In separaten Behältern wird die Laurinlactam-Schmelze mit Aktivator bzw. Katalysator angereichert, sodass die anionisch aktivierte Polymerisation zu PA12 nach Vermischen der Schmelzen im richtigen Mischungsverhältnis beginnt. Die Zusätze sind hierbei für das Öffnen des Ringmoleküls und das Wachstum der Polyamidketten verantwortlich, wodurch die typischen Eigenschaften entstehen.

Der Ausgangswerkstoff Laurinlactam besitzt eine sehr geringe Viskosität (ca. 7 mPa s), die vergleichbar mit Wasser ist. Dadurch lässt sich das Material problemlos ohne Druck in Formen gießen. Diese Werkzeugformen sind thermisch beheizt, sodass das Material zu Halbzeugen oder Formgussteilen in den Formen auspolymerisiert.

Alternativ können jedoch auch Verstärkungsfasern mit dem Material getränkt werden, sodass ein Faserverbundwerkstoff entsteht. Hierzu wird die Laurinlactamschmelze mit Aktivator und Katalysator versetzt und anschließend direkt mithilfe eines Injektionsverfahrens in die Fasern infiltriert. Dieser Prozess wird T-RTM-Prozess genannt. Das Ausgangsmaterial polymerisiert hier „in situ“, d.h. in den getränkten Fasermatten, zu Polyamid 12 aus. Im Vergleich zu anderen Harzinjektionsverfahren entsteht dadurch der große Vorteil, dass die zu infiltrierende Schmelze sehr dünnflüssig ist und dadurch die Infiltration der trockenen Fasermatten sehr einfach funktioniert.

Durch die einfache Infiltration entstehen größere Freiheiten in der Gestaltung der Bauteile. Es können sehr komplexe Strukturen infiltriert werden, bei denen eine Injektion mit zähflüssigen Materialien wie z.B. duroplastischen Harzsystemen, häufig zu ungetränkten Trockenstellen oder Faserverschiebungen führt. Es wird somit auch vermieden, dass Poren im Faserverbundbauteil entstehen, die zu einer Schwächung des Bauteils führen würden. Zudem sind sehr hohe Faservolumenanteile realisierbar, wodurch die Performance des Bauteils gesteigert wird, da ein höherer Faseranteil zu gesteigerten mechanischen Kennwerten führt und somit dünnwandigere Bauteile konstruiert werden können.

Dieser Beitrag zum Leichtbau kann noch weiter optimiert werden, da Wandstärkensprünge ebenfalls möglich sind und somit spezifische Lastpfade eines Bauteils explizit verstärkt werden können, ohne dass unbeanspruchte Bereiche ebenfalls verstärkt werden müssen.

Außerdem ist es möglich Rein-Polyamid-Bereiche zu realisieren bzw. durch Hinterspritzungen die Bauteile zu funktionalisieren. Die verwendeten Materialien zum Hinterspritzen haben meist eine Kurzfaserverstärkung und bestehen aus demselben Thermoplast. Auch metallische Inserts können sowohl formschlüssig hinterspritzt als

auch adhäsiv angebunden werden, um eine Anbindung der Bauteile an eine Anschlusskonstruktion zu ermöglichen. Dadurch werden weitere Montageschritte eingespart, da keine Verbindungselemente nachträglich angebracht werden müssen. Auch die Nacharbeit des Bauteils wird reduziert.

Zu den bereits genannten prozessspezifischen Vorteilen, kommen materialspezifische Eigenschaften des thermoplastischen Polyamid 12, die ebenfalls einen Nutzen bieten können. Durch die langkettige Struktur, die zudem ein kristallines Gefüge ausbildet, ist die Kunststoffmatrix sehr resistent gegen Chemikalien verschiedenster Art und nimmt zudem sehr wenig Wasser auf. Die geringe Wasseraufnahme verhindert ein Quellen der Bauteile, wodurch eine gute Dimensionsstabilität gegeben ist. Erfahrungsgemäß ist auch anzunehmen, dass keine Wasserstoffpermeabilität gegeben ist, wodurch sich das Material auch für die Speicherung von Wasserstoff eignen sollte.

Auch Anwendungen im kryogenen Bereich sind mit dem Material durchaus denkbar, da die sehr guten Schlagzähigkeitseigenschaften bereits bis -180°C geprüft wurden und hier nicht, wie im Vergleich zu anderen Kunststoffen, drastisch abfallen.

Aufgrund ökologischer und ökonomischer Überlegungen wird mittlerweile nicht mehr nur die Herstellung von Faserverbundbauteilen betrachtet, sondern auch die Entsorgung bzw. das Recycling. Da der Kunststoff thermoplastischer Natur ist, kann das hergestellte Material recycelt werden. Die Matrix aus Polyamid 12 kann erneut aufgeschmolzen werden, ohne dass das Material chemisch zerstört wird. Es gibt daher Möglichkeiten, das Material erneut thermisch umzuformen und dadurch wiederzuverwenden oder ein mechanisches Recycling durchzuführen. Dabei werden die Bauteile zuerst zerkleinert und anschließend für den Kurzfaserspritzguss o.ä. Verfahren verwendet.

3.3.3 Faserwickeln

Das Fertigungsverfahren Faserwickeln gehört zu den Urformverfahren und dient dem Herstellen endlos faserverstärkter Bauteile. Es wird in Duroplast- und Thermoplastwickeln unterschieden.

Die weiteren Ausführungen beziehen sich auf das Duroplastwickeln.

Entsprechend der Art der Imprägnierung: Nachimprägnierung (z. B.: RTM), On-Line-Imprägnierung und Vorimprägnierung erfolgt die Einteilung in Trockenwickelverfahren, Nasswickelverfahren und Prepregwickelverfahren (AVK, 2013) (Flemming, 1999) (Neitzel, 2014).

Die qualitätsbestimmenden Faktoren für das Wickellaminat sind: Harzviskosität, Harzgehalt des imprägnierten Rovings, geometrische Gestalt des Wickelkerns, Faserorientierung des Laminats, Faserabzugsgeschwindigkeit und –vorspannung (Flemming, 1999). Die konventionellste Prozessvariante des Nasswickelverfahrens ist das Drehbankwickelverfahren. Weitere Varianten sind beispielsweise das Polar-, Planeten- und Roboterwickelverfahren (Neitzel, 2014).

Bei konventionellen CNC-Wickelanlage wird die automatisierte Ablage des Rovings auf den Wickelkern durch die Maschinensteuerung sichergestellt. Sie übernimmt die Ansteuerung und Synchronisation der Achsen entsprechend dem hinterlegten Wickelprogramm. Weiterhin sind Spulenständer mit Rovingvorspannsystem und Imprägnierbad etabliert. Industrielle Anlagen besitzen bis zu 6-Achsen, 3 Translationsachsen und drei Rotationsachsen. Durch den Einsatz spezielle Rovingableger (Fadenauger) mit Abstreifbügel und Führungskamm wird bei der Ablage mehrerer Rovings eine gleichmäßige Verteilung und Ablagebreite gewährleistet (AVK, 2013). Die Rovingvorspannung hat Einfluss auf die Fertigungsqualität, da sie die Faserspreizung des Rovings auf dem Wickelkern, die Ablage oder auch die mitgeführte Harzmenge beeinflusst. Je nach Fasermaterial und der Filamentanzahl werden unterschiedliche Abzugskräfte empfohlen (Flemming, 1999). Die Imprägnierung des Rovings erfolgt meist per Rollen-Imprägnierung oder im Tauch-Tank üblich. Das gewickelte Bauteil wird gewöhnlich drehend bei Raumtemperatur ausgehärtet und im Anschluss getempert. Alternativ kann die Aushärtung entsprechend im Ofen erfolgen.

Folgende fertigungsbedingte Fehlstellen bzw. Imperfektionen treten im Nasswickelverfahren auf: Welligkeiten (Ondulation), Poren (Lufteinschlüsse) und Matrixanhäufungen. Durch Optimieren des Fertigungsverfahrens lassen diese Imperfektionen reduzieren. Mit entsprechenden Wickelpinleisten (Leichtbau-Zentrum Sachsen GmbH,

26.05.2021) und Wickelprogramm ist eine kreuzungspunktfreie Ablage möglich. Durch getrennte Ablage der Wickellagen beispielsweise $+45^\circ$ und -45° wird die Ondulation des Rovings innerhalb einer Lage verringert. Trocken gewickelte Bauteile, die nachträglich imprägniert werden, weisen einen geringeren Porengehalt auf.

Das Faserwickeln wird branchenübergreifend unter anderem im Automotive-Sektor, der Luft- und Raumfahrt, der Sport- und Freizeitbranche, der Druckindustrie oder Wind- und Elektroenergie eingesetzt. Die Bauteile reichen von Antriebswellen und Rohren, Druck- und Wassertanks, Rotorblättern, Schwungräder, Golfschläger hin zu Walzen.

Gegenwärtige Forschungs- und Entwicklungsfragen befassen sich mit der Funktionsintegration und der Umsetzung der Dünnschichttechnologie (Fette, 2021). Zur Gewährleistung der Mediendichtigkeit werden in Druckspeicher häufig Liner integriert. Je nach Materialkombination stellt die Anbindung oder Temperaturbeständigkeit durch unterschiedliche Wärmeausdehnungen eine Herausforderung dar. Durch Integration schubweicher Zwischenschichten können metallische Liner und duromere Verbundwerkstoffe sicher gefügt werden. Die Verwendung stoffgleicher Liner reduziert die Gefahr unerwünschter Delaminationen im Betrieb. Zusätzlich wird angestrebt den Tank als Strukturelement zu nutzen und so das Leistungspotential durch die Integration von Stützstrukturen zur Lasteinleitung (Steinbach, 2021) oder die Integration von Sensoren oder Leitungen in Schale zu erhöhen.

Weiterhin lassen sich Knotenelemente, Gitter- und Rahmenstrukturen mittels Faserwickeln umsetzen.

4 Projektplanung

4.1 Arbeitsplan

Das Ziel des Projektes besteht in der Entwicklung eines kosteneffizienten Wasserstoffspeichers unter Berücksichtigung des Recyclingpotenzials der eingesetzten Materialien zur Schließung von Stoffkreisläufen. Zur Erlangung des genannten Zieles sind eine Reihe von Arbeiten im Verbund erforderlich, die nachfolgend mit Bezug zu den einzelnen Partnern beschrieben werden. Die inhaltliche wissenschaftliche und technische Entwicklungsarbeit gliedert sich hier in 3 wesentliche Aufgabenfelder:

- AP 1: Entwicklung Kohlefaser-verstärktes Verbundmaterial auf Basis Gusspolyamid 12
- AP 2: Entwicklung des Wasserstoffspeichersystems
- AP 3: Entwicklung eines Fertigungskonzeptes

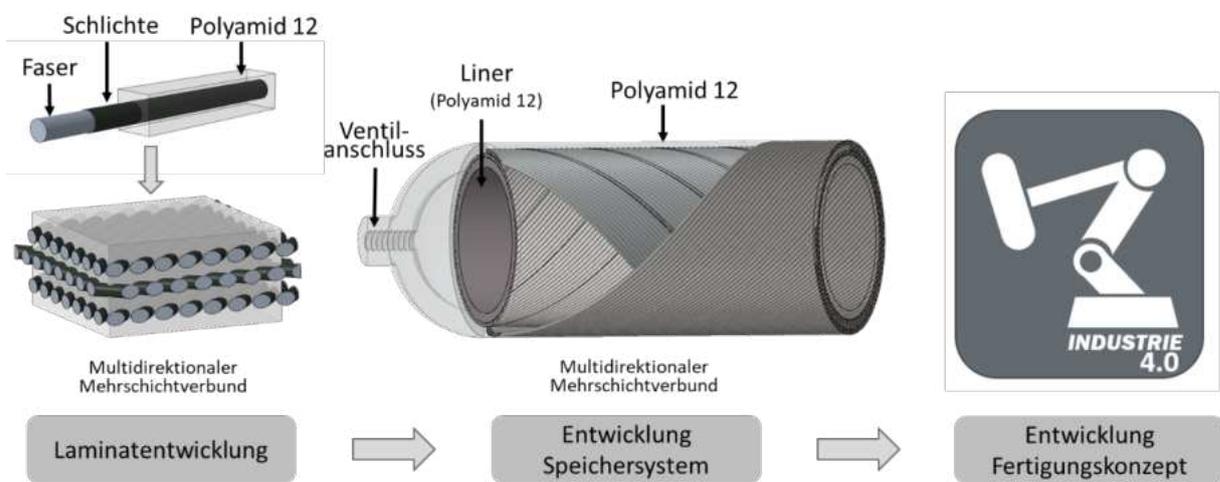


Abbildung 3: Darstellung der Entwicklungsschwerpunkte im Verbundprojekt

Es liegt ein entsprechender Grobentwurf für den Tank und seine Komponenten vor.

Sollte die Bewertung der konstruktiven und gestalterischen Arbeiten eine Umsetzung in eine industriell umsetzbare Serienfertigung nicht ermöglichen, ist das Projekt abzubrechen.

MS 3: Aufgaben in MS3 (Ende Mai 2023)

Das Fertigungskonzept erlaubt die Herstellung der Speichersysteme unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten. Dabei werden bereits die bis dahin erarbeiteten Qualitäts- und Sicherheitsstandard sowie die Automatisierung mit in die Bewertung integriert.

Sollte eine Fertigung nicht wirtschaftlich tragfähig möglich sein, ist das Projekt abzubrechen.

Der abgeschlossene Projektplan befindet sich im Anhang.

4.3 Aufgabenverteilung

Die Aufgabenverteilung wurde im Projektplan detailliert geplant. Hier allerdings eine kleine Übersicht mit den Entwicklungsschwerpunkten und den dazugehörigen Aufgaben für die 3 Projektpartner.

Tabelle 1: Darstellung der Aufgaben der Partner mit Bezug zu den Entwicklungsschwerpunkten im Verbundprojekt

	Laminatentwicklung	Entwicklung Speichersystem	Entwicklung Fertigungskonzept
Fibre	CF-Beschaffung, Bereitstellung Wickelmuster, Tieftemperaturprüftechnik, Wasserstoffdurchlässigkeit	Definition USE-Case und Spezifikation, Ableitung Konstruktionskonzept, Verbindungen, CAD-Modelle und Strukturmechanik	Ableitung Konzept wirtschaftliche Serienfertigung, Qualitätssicherungskonzepte
Handtmann	CF-Beschaffung, Labor-Infiltrationsprozess, Optimierung und Anpassung Infusion	Definition USE-Case und Spezifikation, Ableitung Konstruktionskonzept, Verbindungen, CAD-Modelle und Strukturmechanik, Demonstratorfertigung	Ableitung Konzept wirtschaftliche Serienfertigung, Qualitätssicherungskonzepte
IPT	Polymercharakterisierungen, Gefüllte / ungefüllte Systeme, Mechanische, thermische und physikalische Eigenschaften	Definition USE-Case und Spezifikation, Ableitung Konstruktionskonzept, Abgleich Polymercharakteristik	Ableitung Konzept wirtschaftliche Serienfertigung, Qualitätssicherungskonzepte, Automatisierung Industrie 4.0 Recyclingpotential

5 Materialcharakterisierung

5.1 Lastenheft

Für die Zertifizierung von Wasserstofftanks gibt es verschiedene Vorgaben und Richtlinien. Beispielsweise wird die ISO11119-3 oder die Regelung Nr. 134 der UNECE hierfür herangezogen. In diesen Normen bzw. Regelungen werden verschiedene Prüfverfahren vorgegeben, die schlussendlich am Tank durchgeführt und bestanden werden müssen.

In den Normen sind viele ähnliche Prüfverfahren beschrieben. Nichtsdestotrotz wurden beide Normen genauer betrachtet und die daraus resultierenden Anforderungen entnommen. Diese wurden in einem Lastenheft zusammengeführt, sodass übersichtlich dargestellt ist, was der Wasserstofftank können muss.

Im Lastenheft sind außerdem weitere Themen wie Funktionen, Geometrie oder auch Kosten notiert. In der letzten Spalte steht das zugehörige Dokument, aus dem die jeweiligen Anforderungen abgeleitet wurden.

Tabelle 2: Anforderungsliste

F/W	Nr.:	Bezeichnung	Werte / Daten (Vorgabe)	Normen/ Vorschriften
	<u>1.</u>	<u>Funktion</u>		
F	1.1.	Hauptfunktion: Aufnahme und Abgabe von Wasserstoff	Befüllungshäufigkeit: täglich; Anschluss: einseitig?, Innengewindeanschluss G 1 1/2	
F	1.2.	Hauptfunktion: Speicherung von Wasserstoff	Möglichst geringe Permeabilität gegenüber Wasserstoff	
W	1.3.	Nebenfunktion: Transport von Wasserstoff	Möglichst geringes Gewicht (min. 0,06 kg H ₂ /kg Behältergewicht, Gewichtsverhältnis 5,5-6,0 %) _{IVECO}	
	<u>2.</u>	<u>Geometrie</u>		
F	2.1.	Bauraum	Für Demonstratorbauteil: Ø160mm x L=640mm	
F	2.2.	Sicherheitsfaktor	S=2,25 (Vorgabe Faun: S=4,0)	ECER 134 5.1.1.
	<u>3.</u>	<u>Physikalische Eigenschaften</u>		
F	3.1.	Nennbetriebsdruck (NWP)	700bar, Minimaler Berstdruck: 2,25x700bar=1.575bar	ECER 134 5.1.1.
F	3.2.	Lebensdauieranforderung	15 Jahre, 22.000 LW bis 125% des NWP ohne Bruch, bis 11.000 LW darf keine Leckage auftreten	ECER 134 5.1.2.
F	3.3.	Erfüllung der Leistungsbeständigkeit	Druckwechselprüfung unter verschiedenen Belastungen und chemischen Einwirkungen	ECER 134 5.2.
F	3.3.1.	Impactverhalten	Fall-(Stoß-)Prüfung unter verschiedenen Fallausrichtungen aus 1,8m Höhe	ECER 134 5.2.2.
F	3.3.2.	Oberflächenbeschädigungen	Prüfung nach Erzeugung von definierten Oberflächenbeschädigungen wie Schnitte oder Pendelschläge	ECER 134 5.2.3.
F	3.4.	Beschusstest	Beschuss des Wasserstoffspeichers unter 2/3 des NWP mit einem 5,6mm Projektil mit 850m/s	ISO 11119-3:2020 8.5.10

	4.	<u>Chemische Eigenschaften</u>		
F	4.1.	Temperatureinsatzbereich	Von -35°C bis +80°C Zyklische Gasdruckprüfung unter Temperaturwechselast	ECER 134 5.3.
F	4.2.	Dichtigkeit gegenüber Wasserstoff (Permeationseigenschaften)	Max. Permeationsrate: 0,005mg/sec (3,6Nml/min), max. Wasserstoffabgabe: 46ml/h/l	ECER 134 5.3.3.
F	4.3.	Erfüllung der Leistungsbeständigkeit (Chemikalienbeständigkeit)	Druckwechselprüfung unter verschiedenen Belastungen und chemischen Einwirkungen	ECER 134 5.2.
F	4.4.	Brandbeständigkeit	Der Wasserstofftank wird unter NWP einem Feuer ausgesetzt und muss ohne Bersten den Druck kontrolliert ablassen	ECER 134 5.4.
	5.	<u>Energie</u>		
W	5.1.	Werkstoffrecycling	Vollständiges Werkstoffrecycling erwünscht	
	6.	<u>Anforderungen an Anschlusseinheiten</u>		
F	6.1.	TPRD-Anforderungen	Erfüllung der geforderten Anforderungen an den TPRD	ECER 134 6.1.
F	6.2.	Rückschlagventile und automatische Absperrventile	Erfüllung der Anforderungen an Rückschlagventile und automatische Absperrventile	ECER 134 6.2.
	7.	<u>Kosten</u>		
W	7.1.	Herstellungskosten für Anwendungsfall Faun	Ca. 4.000€ für Bauteilgröße Ø360mm x L=1960mm (900 €/kg H ₂) _{Mikrobasalt}	
	8.	<u>Kennzeichnung</u>		
F	8.1.	Kennzeichnung der Wasserstofftanks	Beachtung der Kennzeichnungspflicht auf jedem Wasserstoffbehälter	ECER 134 5.6.

Die Schwierigkeit an den beschriebenen Prüfverfahren liegt darin, dass die Prüfungen alle direkt am Tank durchgeführt werden müssen und somit vorab Prüfungen an Materialprüfkörpern nicht genau definiert sind. Um allerdings zu umgehen, dass ein Wasserstofftank hergestellt wird, bevor überhaupt K.O.-Kriterien überprüft wurden, soll eine Testmatrix erstellt werden.

Dadurch kann vorab definiert werden, welche Prüfungen durchgeführt werden müssen, um eine Aussage zur Tauglichkeit für den Tank zu bekommen. Es kann somit ausgeschlossen bzw. verifiziert werden, dass Lauramid® bzw. Hicompelt® als Material für den Wasserstofftank in Frage kommt.

5.2 Testmatrix

Um die geforderten Eigenschaften des Tanks nachzuweisen, werden Versuche an Prüfkörpern definiert, die angelehnt an die Prüfungen aus den vorgegebenen Normen sind. In der Testmatrix werden allerdings auch die Versuche zur grundlegenden Auslegung des Tanks festgehalten. Mit Zugprüfungen werden die Kennwerte ermittelt, die für die Laminattheorie benötigt werden.

Die Prüfungen werden dabei wie folgt unterteilt:

1. Tankauslegung
2. Anwendungsbezogene Tests
3. Verarbeitungsrelevante Tests
4. Kryogene Tests

Die gesamte Testmatrix mit Ergebnissen der verschiedenen Versuche ist im Anhang abgebildet.

5.3 Ergebnisse der Testmatrix

5.3.1 Tankauslegung

5.3.1.1 Zugversuche

Für die Zugversuche wurden mehrere Platten Hicompelt CL hergestellt, aus denen anschließend die Prüfkörper hergestellt wurden. Die Zugversuche wurden anschließend sowohl am IPT als auch am FIBRE durchgeführt, um eine Vergleichbarkeit zwischen den Ergebnissen herzustellen. Die doppelte Versuchsdurchführung diente der statistischen Absicherung und dem Vergleich zwischen den minimal unterschiedlichen Probenvorbereitungsverfahren.

Es handelte sich dabei um folgende Lagenaufbauten:

- UD-Lagenaufbau (0°)
- 90° -Lagenaufbau
- quasiisotroper Lagenaufbau
- Lagenaufbau $0^\circ/90^\circ/90^\circ/0^\circ$
- Tankaufbau (Lagenaufbau ca. $15^\circ/85^\circ/95^\circ/-15^\circ$)

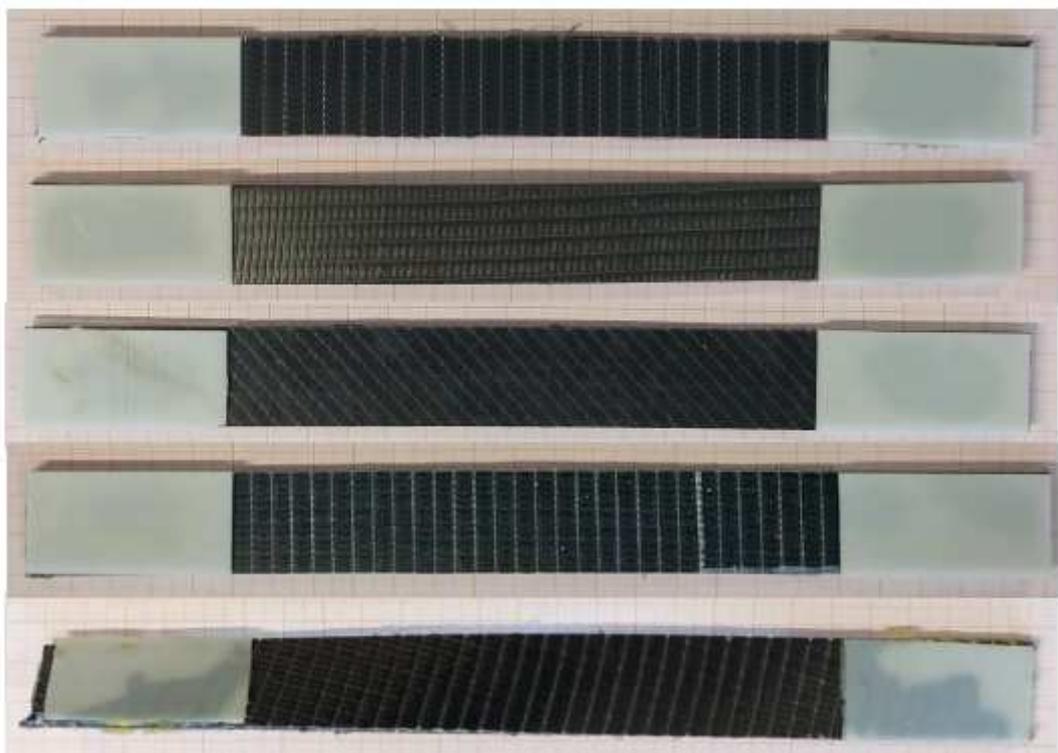


Abbildung 5: Zugprüfkörper mit verschiedenem Lagenaufbau

Für den Tank sind vor allem die UD-Prüfergebnisse interessant, da die Fasern bei einem Drucktank hauptsächlich auf Zug beansprucht werden. Im Lagenaufbau „Tankaufbau“ wird zusätzlich die Kreuzwicklung abgebildet, die im zylindrischen Teil des Tanks vorhanden ist.

Die Lagenaufbauten „90°“, „quasiisotrop“ und „0/90/90/0“ wurden gewählt, da die Prüfergebnisse Aufschlüsse für die klassische Laminattheorie ergeben. Der Lagenaufbau 0/90/90/0 ist zudem ein Standardaufbau bei der Fa. Handtmann, sodass andere Fasersysteme mit der im Projekt verwendeten Kohlefaser verglichen werden konnten.

Für die Zugversuche wurden folgende Prüfbedingungen gewählt:

- Prüfnorm: DIN EN ISO 527-4 bzw. DIN EN ISO 527-5
- Prüfgeschwindigkeit 2mm
- Prüfklima: Standard DIN EN ISO 291 (23°C/ 50% r.F.)

5.3.1.1.1 Ergebnisse Zugversuche

Die Zugversuche wurden normgerecht durchgeführt. Die Ergebnisse sind anbei detailliert dargestellt:

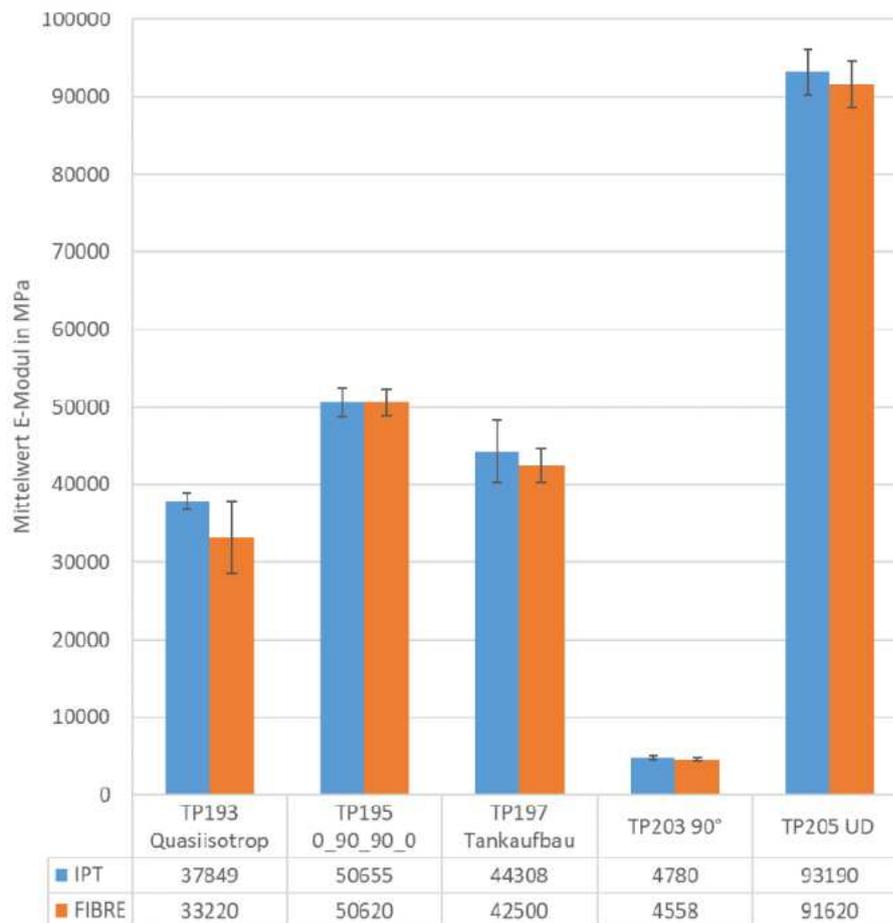


Abbildung 6: Darstellung der Prüfergebnisse am IPT und am FIBRE (E-Modul)

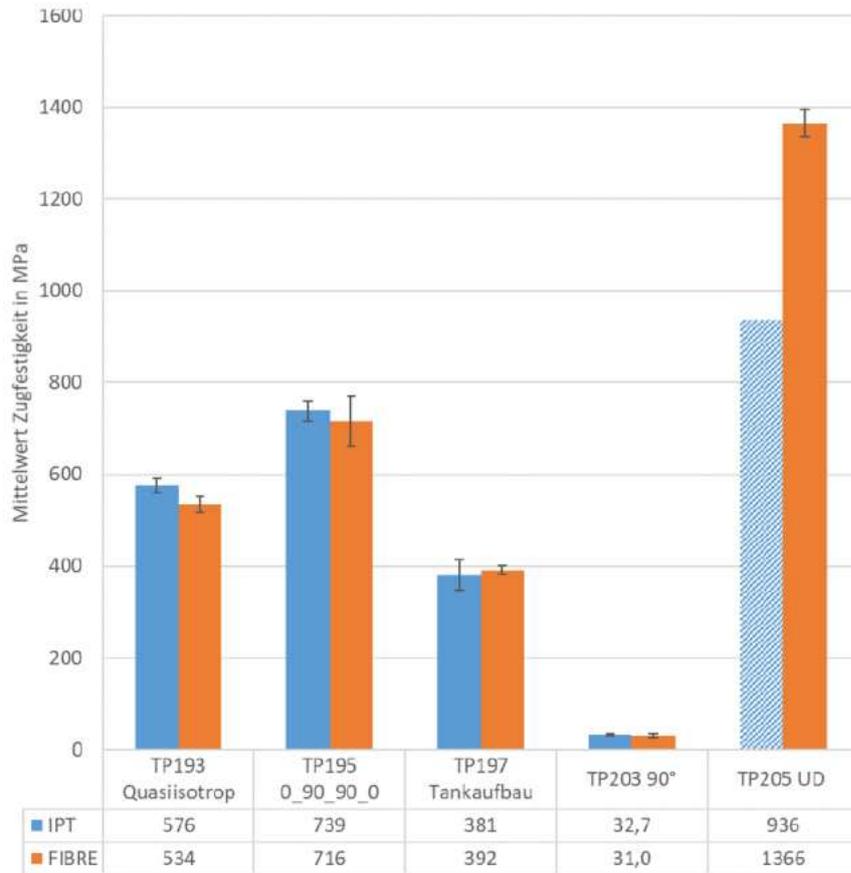


Abbildung 7: Darstellung der Prüfergebnisse am IPT und am FIBRE (Zugfestigkeit)

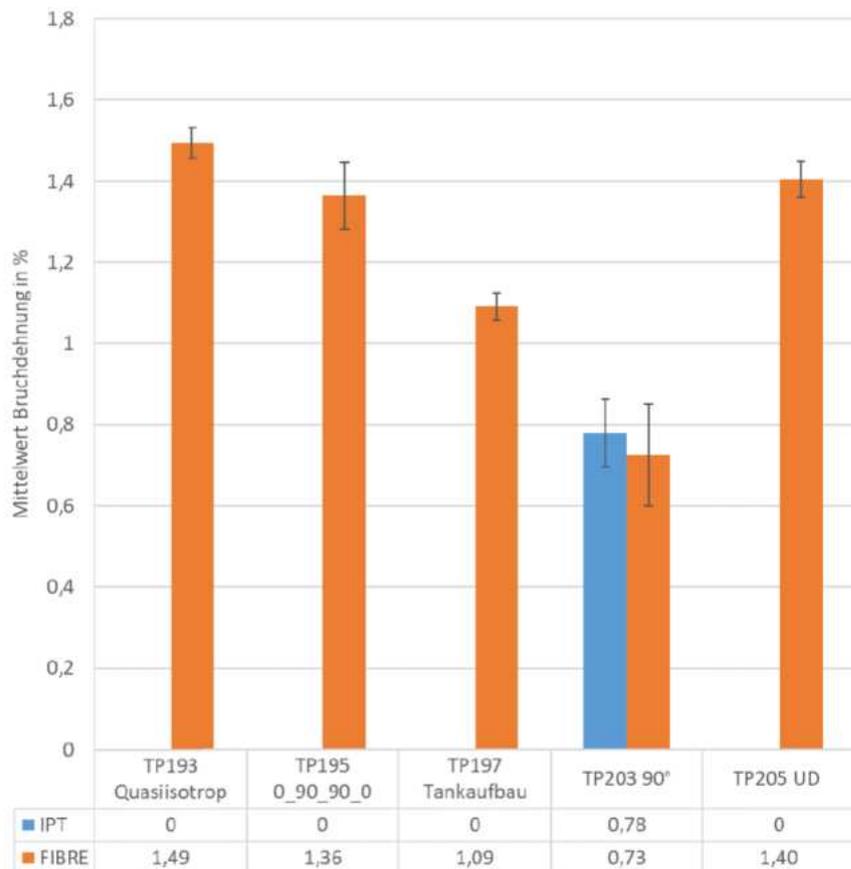


Abbildung 8: Darstellung der Prüfergebnisse am IPT und am FIBRE (Bruchdehnung)

Unter Verwendung der Materialkennwerte im FEM-Berechnungsmodell konnte somit der Lagenaufbau berechnet werden. Zuvor wurde der Lagenaufbau über die klassische Laminattheorie berechnet, um einen ersten Anhaltswert für die benötigte Wandstärke zu bekommen. Es ergab sich hier nur eine kleine Differenz zwischen den berechneten Werten, sodass eine gute Übereinstimmung mit den theoretischen Kennwerten vorhanden ist. Auch im Vergleich zu anderen CFK-Verbundwerkstoffen liegen die erzielten Materialkennwerte in einem sehr guten Bereich, sodass von einer guten Faser-Matrix-Haftung gesprochen werden kann.

Der Vergleich zwischen den Ergebnissen am IPT und am FIBRE zeigt keine großen Schwankungen auf. Einzig der Versuch mit UD-Lagen zeigt bei der Zugfestigkeit etwas Streuung. Dies liegt aber an der Probenvorbereitung, da die UD-Proben sehr hohe Festigkeiten haben und dadurch zum Durchrutschen an den Aufleimern neigen. Der Probekörper wurde daher nachträglich in der Breite angepasst, um normgerecht nach DIN EN ISO527-5 prüfen zu können.

Für die Berechnungen des Tanks wurde entschieden, dass die Materialkennwerte vom FIBRE weiterverwendet werden, da diese eine geringere Standardabweichung aufwiesen.

5.3.1.2 Bestimmung Schubmodul

Wichtig für die Berechnung des Tanks ist auch die Bestimmung des Schubmoduls. Dies wird über einen Zugversuch an einer Hicompelt-Probe mit $\pm 45^\circ$ -Lagenaufbau ermittelt. Die Prüfung wird nach der Prüfnorm DIN EN ISO 14129 durchgeführt.

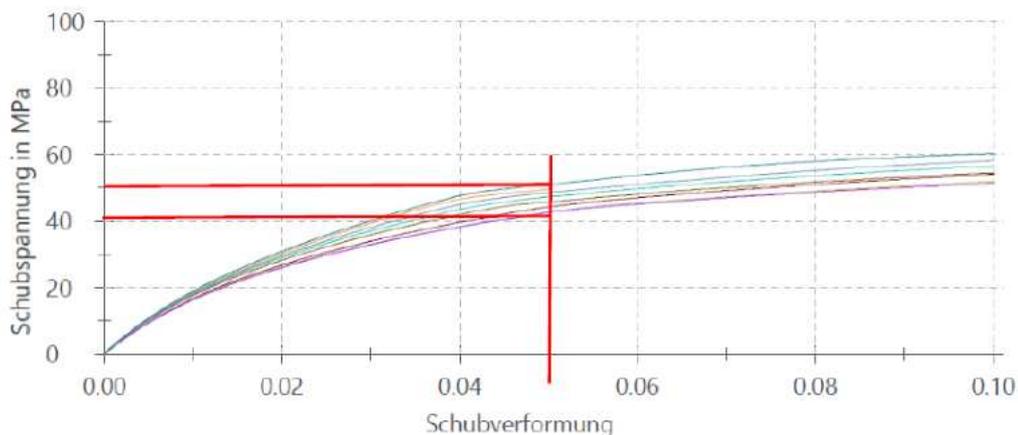


Abbildung 9: Bestimmung Schubmodul an Hicompelt

Die Prüfung wurde an 8 verschiedenen Prüfkörpern durchgeführt, die identisch zu den Zugprüfkörpern aufgebaut sind, die in 5.3.1.1 beschrieben werden. Es ergibt sich dadurch ein Schubmodul von $G_{12} = 1940 \text{ MPa}$.

5.3.1.3 Dauerlastversuche

Für den Tank ist auch entscheidend, wie lange seine Lebensdauer ist. Je länger der Tank verwendet werden kann, umso effizienter und ressourcenschonender ist der Tank in der Gesamtbilanz.

Da es relativ schwer ist von Standard-Materialuntersuchungen auf den gesamten Tank zu schließen, wurden möglichst vergleichbare Standard-Tests hergezogen. Für die Endanwendung und Zertifizierung des Tanks werden schlussendlich sowieso Lebensdauer-Tests (zyklische Druckprüfung) am Tank notwendig. Durch die Standard-Versuche bekommen wir allerdings ein Gefühl, wie sich das Material unter Dauerlast verhält.

Die Versuche wurden unter schwellender Zugbelastung durchgeführt, da dies der Belastung im Tank entspricht.

5.3.1.3.1 Wassergesättigtes Lauramid B

Die Versuche mit Lauramid B wurden unter Wassersättigung durchgeführt, um den schlechtmöglichsten Fall abzubilden. Bei sehr langen Einsatzzeiten des Tanks wird auch eine hohe Wasseraufnahme erwartet.

Folgende Ergebnisse ergaben sich bei Ermittlung der Wöhlerlinie:

Tabelle 3: Ermittelte Kennwerte der Wöhlerlinie (Grundmaterial Wanhua)

Steigungsexponent der S-N-Kurve:	56,6
σ_{\max} bei 10^6 Ladungszyklen (50% S-N-Kurve) MPa:	44,8
Regressionsgleichung (50% S-N-Kurve):	$y = 57,2 \cdot x^{-0,0177}$
Korrelationskoeffizient R^2	0,948
Koeffizient $k_{(95,95,n)}$ für $n=13$	2,74

Die Wöhlerlinie hat eine sehr geringe Steigung, d.h. die Materialkennwerte sinken nicht extrem bei Erhöhung der Lastwechselanzahl. Dies deutet auf ein sehr gutes Alterungsverhalten des Materials hin. Die Streuung der Prüfergebnisse könnte mit größerer Probenanzahl noch reduziert werden, für eine erste Aussage ist dies aber ausreichend.

5.3.1.3.2 Hicompelt mit UD-Lagenaufbau

Auch bei den Hicompelt-Proben ist die Steigung der Wöhlerlinie sehr gering, allerdings ist eine hohe Streuung vorhanden. Dies liegt einerseits an einer geringen Probenanzahl, aber auch an einer gewissen Ondulation bzw. Faserverschiebung der Fasern. Dies lässt sich beim Herstellungsprozess der Platten im Niederdruckverfahren nicht zu 100% vermeiden.

Tabelle 4: Ermittelte Kennwerte der Wöhlerlinie von Hicompelt mit UD-Lagenaufbau

Steigungsexponent der S-N-Kurve:	76,8
σ_{\max} bei 10^6 Ladungszyklen (50% S-N-Kurve) MPa:	1044,1
Regressionsgleichung (50% S-N-Kurve):	$y = 1250 \cdot x^{-0,0130}$
Korrelationskoeffizient R^2	0,232
Koeffizient $k_{(95,95,n)}$ für $n=9$	3,19

Nichtsdestotrotz sind die Ergebnisse sehr positiv und auch hier gibt es ein erstes Indiz, wie sich das Material unter Dauerlast verhält. Die Ergebnisse lassen darauf schließen, dass sehr lange Lebenszeiten des Tanks erreicht werden können.

Die Ergebnisse müssen aber natürlich durch Druckwechsel-Versuche am Tank untermauert werden. Dies ist Teil der Zertifizierung der Tanks.

5.3.1.3.3 Hicompelt mit quasiisotropen Lagenaufbau

Auch hier sind Faserverschiebungen dafür verantwortlich, dass die Wöhlerlinie eine sehr hohe Streuung hat. Trotzdem sollten auch hier erste Versuche durchgeführt werden, um den Einfluss des Lagenaufbaus zu identifizieren. Die Versuchsergebnisse können nun in Korrelation zu den Ergebnissen mit unidirektionalem Lagenaufbau gestellt werden.

Tabelle 5: Ermittelte Kennwerte der Wöhlerlinie von Hicompelt mit quasiisotropem Lagenaufbau

Steigungsexponent der S-N-Kurve:	70,2
σ_{\max} bei 10^6 Ladungszyklen (50% S-N-Kurve) MPa:	260,5
Regressionsgleichung (50% S-N-Kurve):	$y = 317,2 \cdot x^{-0,0143}$
Korrelationskoeffizient R^2	0,27
Koeffizient $k_{(95,95,n)}$ für $n=15$	2,61

5.3.1.4 Permeationsprüfung

Eine enorm wichtige Aussage für das Projekt stellt dar, wie sich Lauramid® bzw. Hicompelt® bei hohen Drücken gegenüber Wasserstoff verhält. Sollte sehr viel Wasserstoff durch das Material diffundieren können, muss das Projekt abgebrochen werden, da dann eine Tauglichkeit als Wasserstofftank nicht gegeben ist.

Bereits bevor das Projekt gestartet wurde, wurden erste Permeationsprüfungen mit Lauramid® durchgeführt. Hier wurde mit einem relativ einfachen Versuchsaufbau ein kleiner Druck (bis zu 4bar) mit Helium auf einen Lauramid®-Prüfkörper gegeben und anschließend betrachtet, ob Gasbläschen an der Oberfläche entstehen.

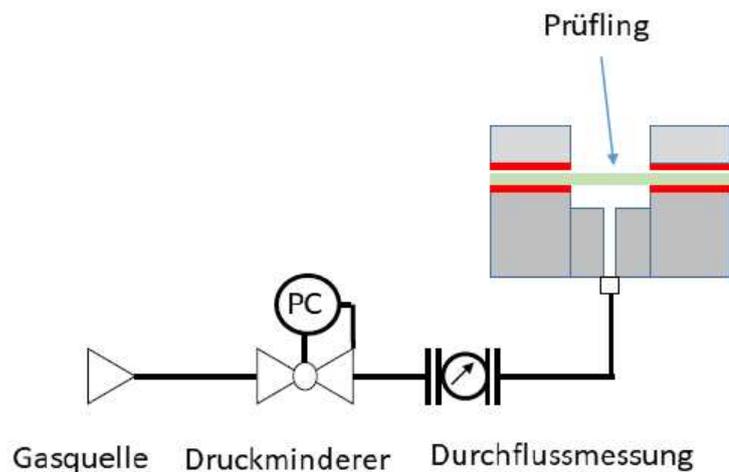


Abbildung 10: Erste Permeationsprüfungen mit Lauramid®

Bei diesen Prüfungen konnten keine Undichtigkeiten festgestellt werden. Natürlich werden bei einem Wasserstofftank deutlich höhere Drücke auf das Material wirken, allerdings werden aktuell standardmäßig bereits Polyamide als Liner-Material eingesetzt.

Um zu bewerten, was Lauramid® als Liner-Material kann, wurden Permeationsprüfungen am TesTneT München in Auftrag gegeben. Hier können Drücke von bis zu 1000bar auf den Prüfkörper gegeben werden. Dieser Druck kann explizit mit Wasserstoff als Gas aufgebracht werden. Zusätzlich können verschiedene Prüfbedingungen eingestellt und auch unterschiedliche Materialdicken geprüft werden.

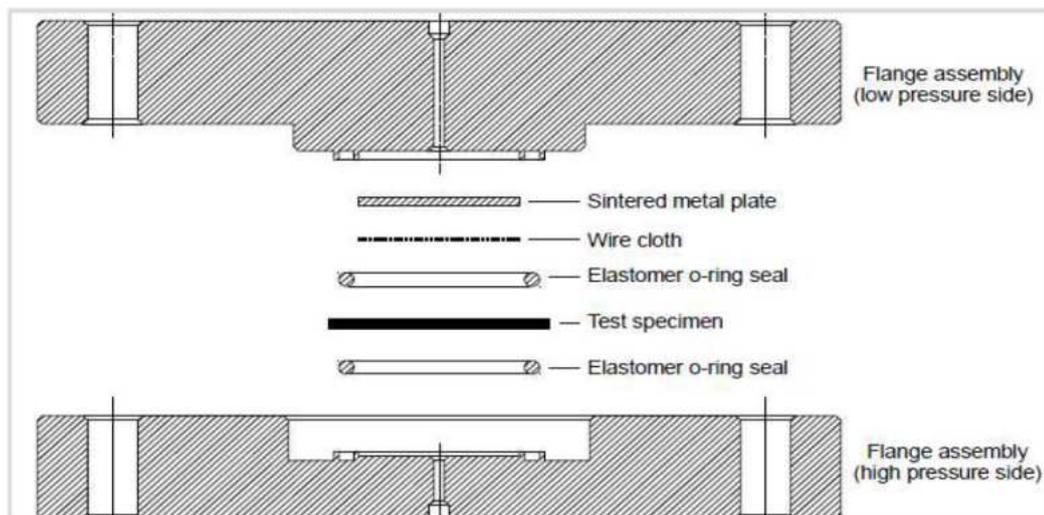


Abbildung 11: Prüfaufbau am TesTneT

Die Prüfungen wurden wie bereits erwähnt sowohl mit Hicompelt als auch mit Lauramid durchgeführt. Bei der Prüfung mit Hicompelt wurde sehr schnell klar, dass das Material nicht dicht gegenüber Wasserstoff ist. Die Permeationsrate war bereits bei Drücken um die 10bar sehr hoch:

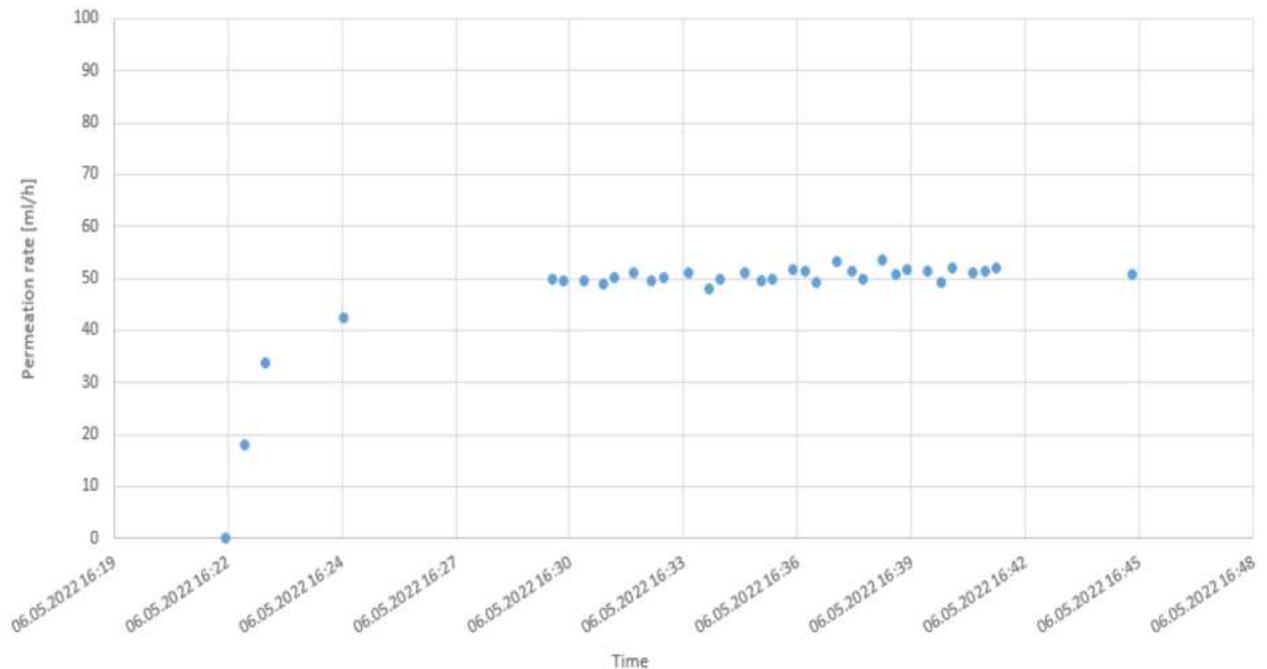


Abbildung 12: Permeationsrate von Hicompelt (2mm) bei 10bar

Dieses Ergebnis ist insofern verwunderlich, da Hicompelt ein sehr porenfreies Material ist. Daher war hier ein deutlich besseres Ergebnis zu erwarten.

Durch das Ergebnis wird allerdings ein Typ 5-Tank ohne Liner aus reinem Kunststoff vorerst hinaufällig. Es sollen allerdings weitere Untersuchungen folgen, um das Materialverhalten besser erklären zu können. Evtl. können dadurch auch Optimierungen am Material durchgeführt werden, um die Permeationsbarriere zu verbessern. Hierzu wird ein Versuchsstand am FIBRE aufgebaut.

Bei Lauramid® wurden zunächst 2 Proben geprüft, um zu ermitteln, in welchem Bereich wir bei der Permeation liegen. Hierfür wurden gealterte Proben verwendet, um bereits Langzeit-Umwelteinflüsse mitzubetrachten. Bei diesen Prüfungen entstanden sehr geringe Permeationsraten von 1,24ml/h.

Aufgrund dieser Ergebnisse wurde eine kleine Versuchsreihe aufgestellt, bei der verschiedene Materialeinflüsse auf die Permeationsraten betrachtet werden:

- Kristallinitätseinfluss
- Alterungseinfluss
- Temperatureinfluss
- Dickeneinfluss
- Druckeinfluss

5.3.1.4.1 Kristallinitätseinfluss

Es gibt verschiedene Lauramid®-Varianten mit unterschiedlich hohen Kristallinitäten. Je höher die Kristallinität ist, desto geringer ist die Permeation.

Tabelle 6: Permeationsraten der unterschiedlichen Materialien

Kristallinitätseinfluss	Permeationsrate (mol/(m*s*Pa))	Permeationsrate (ml/h)
Lauramid B, neu, 55°C, 805bar, 3mm	8,40E-16	4,39
Lauramid A, neu, 55°C, 805bar, 3mm	9,44E-16	5,24
Lauramid Inject, 55°C, 805bar, 3mm	1,07E-15	9,23

5.3.1.4.2 Alterungseinfluss

Die Permeationsraten zwischen gealterten und „frischen“ Proben unterscheidet sich nicht allzu sehr. Möglicherweise wirkt sich der höhere Wassergehalt in der gealterten Probe sogar etwas positiv auf die Permeationsrate aus.

Tabelle 7: Permeationsraten der unterschiedlichen Proben

Alterungseinfluss	Permeationsrate (mol/(m*s*Pa))	Permeationsrate (ml/h)
Lauramid A, neu, 15°C, 875bar, 2mm	1,91E-16	1,72
Lauramid A, alt, 15°C, 875bar, 2mm	1,55E-16	1,24
Lauramid A, neu, 85°C, 875bar, 2mm	2,54E-15	22,7
Lauramid A, alt, 85°C, 875bar, 2mm	2,43E-15	19,5

5.3.1.4.3 Temperatureinfluss

Auch die Temperatur hat einen großen Einfluss auf die Permeationsrate. Je geringer die Temperatur ist, desto kleiner ist die Permeationsrate.

Tabelle 8: Permeationsraten bei unterschiedlichen Temperaturen

Temperatureinfluss	Permeationsrate (mol/(m*s*Pa))	Permeationsrate (ml/h)
Lauramid A, neu, -20°C, 805bar, 3mm	3,80E-17	0,21
Lauramid A, neu, 15°C, 805bar, 3mm	2,29E-16	1,26
Lauramid A, neu, 55°C, 805bar, 3mm	9,44E-16	5,24
Lauramid A, neu, 85°C, 805bar, 3mm	2,50E-15	13,64

5.3.1.4.4 Dickeneinfluss

Auch die Dicke der Lauramid®-Teile hat einen deutlichen Einfluss auf die Permeationsrate. D.h. später für den Tank, dass die Liner-Dicke variiert werden kann, um die Permeationsbarriere zu verbessern.

Tabelle 9: Permeationsraten der unterschiedlich dicken Proben

Dickeneinfluss	Permeationsrate (mol/(m*s*Pa))	Permeationsrate (ml/h)
Lauramid A, neu, 55°C, 805bar, 0,5mm	5,96E-16	20,26
Lauramid A, neu, 55°C, 805bar, 2mm	8,26E-16	6,39
Lauramid A, neu, 55°C, 805bar, 3mm	9,44E-16	5,24
Lauramid A, neu, 55°C, 805bar, 5mm	1,19E-15	3,89

5.3.1.4.5 Druckeinfluss

Natürlich spielt auch die Höhe des Drucks eine Rolle, wie stark die Permeationsrate ist. Aufgrund der Ergebnisse und auch aufgrund der Erkenntnisse der Experten am TesTneT wird aber deutlich, dass ab einem gewissen Druck die Permeationsrate auf einem gleichen Niveau verbleibt.

Tabelle 10: Permeationsraten bei unterschiedlichen Drücken

Druckeinfluss	Permeationsrate (mol/(m*s*Pa))	Permeationsrate (ml/h)
Lauramid A, neu, 55°C, 500bar, 3mm	9,78E-16	3,32
Lauramid A, neu, 55°C, 805bar, 3mm	9,44E-16	5,24
Lauramid A, neu, 55°C, 1000bar, 3mm	9,58E-16	5,25

5.3.1.4.6 Erkenntnisse aus Permeationsprüfungen

Nach Vorgabe der Norm ECE R134 ist eine maximale Permeationsrate von 46ml/h/l erlaubt. Hier wird ein Prüfdruck von 805bar und eine Temperatur von $\geq 55^\circ\text{C}$ angesetzt.

Mit Lauramid A ist unter diesen Faktoren eine Permeationsrate von 45,59ml/h/l zu erreichen. Allerdings sind hier noch viele unbekannte Faktoren dabei, die schlussendlich am Tank getestet werden müssen. Beispielsweise wird der Liner nochmal umgossen, dieser Umguss kann auch zur Permeationsbarriere beitragen. Auch die Dicke des Liners kann noch variiert werden. Allerdings können ggf. auch Materialschnittstellen als zusätzliche Leckage die Permeationsrate erhöhen.

Grundsätzlich schließen die Versuche allerdings nicht aus, dass Lauramid® in einem Tank Einsatz finden können. Es werden im Anschluss allerdings weitere Untersuchungen, auch im Vergleich zu bereits eingesetzten Materialien, durchgeführt. Dadurch soll auch der genaue Mechanismus und evtl. eine Verbesserung der Permeationsbarriere in Betracht gezogen werden.

5.3.1.4.7 Prüfungen FIBRE

Da die Prüfergebnisse darauf hindeuten, dass das Permeationsverhalten von Lauramid bzw. PA12 relativ gut ist, allerdings trotzdem noch einige Einflüsse vorhanden sind, die noch nicht bekannt sind, wurde am FIBRE ein kleiner Prüfstand aufgebaut.

Das Faserinstitut Bremen hat einen Helium Permeationsprüfstand entwickelt und aufgebaut, welcher es ermöglicht, die Helium Permeation In-Plane (In Faserrichtung) und Out-Of Plane (Quer zur Faserrichtung) zu messen. Das nachfolgende Bild zeigt den Aufbau der Prüfkammer in CAD.

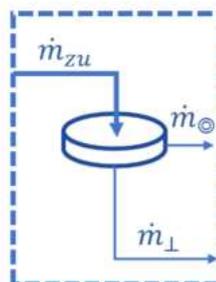


Abbildung 13: Erklärung der Masseströme

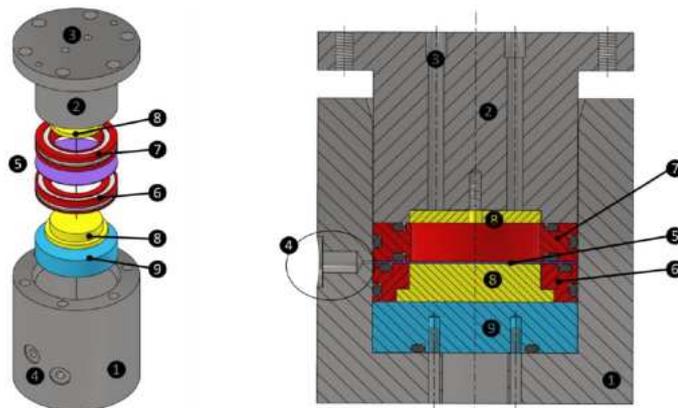


Abbildung 14: Aufbau der Prüfkammer des He-Permeationsmessaufbaus

Legende zum Bild:

1. Unterteil
2. Oberteil
3. Zulauf
4. Auslass
5. Prüfkörper
6. Ring
7. Ring
8. Stützkörper

Hierbei wird das He-Gas unter Raumtemperatur und bis maximal 10 bar am Zulauf in die Prüfkammer eingebracht. Der mit Elastomer Dichtringen abgedichtete Prüfkörper, eine kreisrunde Schibe mit Durchmesser 77mm, wird am Zulauf mit Helium Gas bedrückt. Auf der gegenüberliegenden Seite herrscht 1 bar Umgebungsdruck. Über Drucksensoren sowohl am Zulauf als auch am Ablauf wird die Dichtigkeit des Prüfkörpers gemessen. Über das bekannte Volumen und das ideale Gasgesetz kann die Permeationsrate berechnet werden.

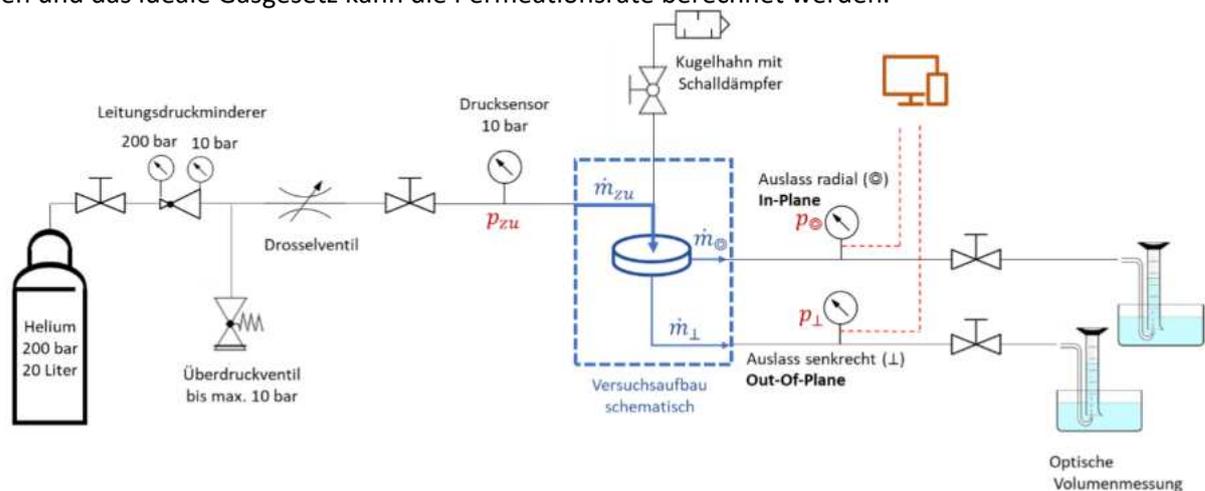


Abbildung 15: Schematischer He-Permeationsmessaufbau

Die in den Versuchen geprüften Prüfkörper sind in der nachfolgenden Tabelle aufgelistet. Hierbei wurde zum einen reines Lauramid geprüft, verschiedene Lagenaufbauten von Hicompelt mit unterschiedlichen Fertigungsdaten und ein Prüfkörper, der vom IPT nachträglich mit Lauramid Inject beschichtet wurde.

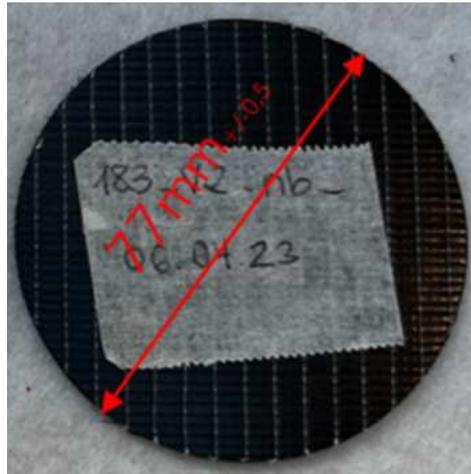


Abbildung 16: Prüfkörpergeometrie

Tabelle 11: Prüfkörperplanung

Testplatte (Datum)	Material	Lagenaufbau	Dicke	Anzahl
146 (16.06.2018)	Hicompelt® CL	0/90/90/0	2 mm	2
182 (05.03.2020)	Hicompelt® CL	0/90/90/0	2 mm	2
183 (08.05.2020)	Hicompelt® CL	0/90/90/0	2 mm	2
219 (27.09.2022)	Hicompelt® CL	0/90	8 mm	2
215 (29.08.2022)	Hicompelt® CL mit Laura- mid® Inject Überzug	0/90	3 mm	2
213 (30.05.2022)	Hicompelt® CL	Unidirektional	2 mm	3
Keine Angabe	Reines Lauramid® B	0% FVG	2 mm	2

Die Ergebnisse aus den Permeationsmessungen wurden mit Werten aus der Literatur verglichen, womit auch der Messaufbau qualifiziert werden konnte.

Tabelle 12: Ergebnisse der Permeationsmessungen

Testplatte (Datum)	Lagenaufbau	PK	Dicht	Permeabilität	
				In-Plane P_{radial} in mol/(m s Pa)	Out-of-Plane $P_{\text{senkrecht}}$ in mol/(m s Pa)
146 (16.06.2018)	0/90/90/0	V1	undicht	5,3377e-11	1,9789e-12
		V2	undicht	1,5474e-10	5,0045e-12
182 (05.03.2020)	0/90/90/0	V1	undicht	1,2577e-10	4,0690e-12
		V2	undicht	1,6393e-10	5,3815e-12
183 (08.05.2020)	0/90/90/0	V1	undicht	5,1222e-11	1,9823e-12
		V2	undicht	1,6312e-10	5,5769e-12
213 (30.05.2022)	Unidirektional	V1	dicht	3,3841e-14	5,9164e-16
		V2	dicht	2,1797e-13	7,6608e-16
		V3	dicht	1,0852e-14	6,6338e-17
215 (29.08.2022)	0/90 (Überzug)	V1	dicht	3,7359e-15	1,2473e-15
		V2	dicht	2,7660e-13	2,2226e-16
219 (27.09.2022)	0/90 (8mm)	V1	dicht	3,5260e-14	4,7430e-15
		V2	dicht	6,6570e-14	2,9051e-16
Lauramid® B	0% FVG	V1	dicht	4,2361e-15	1,2274e-15
		V2	dicht	1,9450e-14	6,2376e-16

Im weiteren Schritt wurden ausgewählte Prüfkörper thermischen induzierten Spannungen ausgesetzt. Hierbei wurden die Prüfkörper in eine Gitterbox gelegt und in einen mit flüssigem Stickstoff gefüllten Kryostaten getaucht und innerhalb von 2 Minuten und 230 Sekunden auf -196°C abgekühlt. Anschließend wurden die Prüfkörper in einem Backofen auf 77°C erwärmt womit ein Temperaturdelta von 273°C erreicht wurde. Nach jedem thermischen Zyklus, welcher bis zu 5-mal wiederholt wurde, wurde eine erneute Permeationsmessung gemacht, um die Rissausbildung in Korrelation zur Permeationsrate zu bringen.

In den nachfolgenden Materialuntersuchungen wurden neben μCT -Aufnahmen auch Schlibfbilder und REM-Aufnahmen durchgeführt.

Im nachfolgenden Bild ist ein Vergleich eines Standard Hicompelt Prüfkörpers mit einem Lagenaufbau von $[0/90/90/0]$ zu einem mit Lauramid Inject beschichteten Prüfkörper mit gleichem Lagenaufbau zu erkennen. Beide Prüfkörper wurden 5 thermischen Zyklen ausgesetzt und weisen Faser/ Matrix Risse auf. Mit dem Unterschied, dass der beschichtete Prüfkörper keine Risse in der Beschichtung aufzeigt und somit auch in den Permeationsmessungen als weiterhin dicht definiert werden konnte.

Diese Erkenntnis spricht für das stoffschlüssige System von Liner und dem im T-RTM Verfahren als Matrixmaterial infiltrierten PA12.

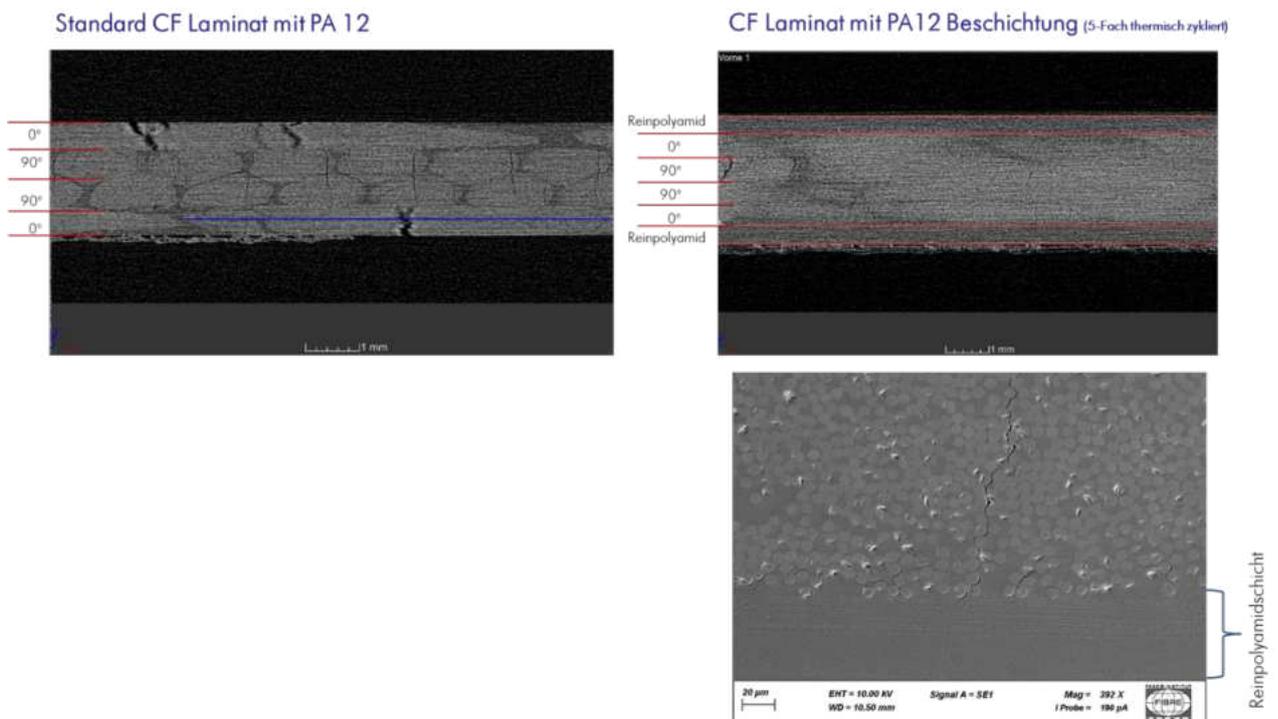


Abbildung 17: μCT und REM-Aufnahmen von einem Hicompelt-Prüfkörper mit und ohne Reinpolyamidbeschichtung

5.3.1.5 Wärmeausdehnung

Die thermische Ausdehnung wurde mittels eines Schubstangendilatometers ermittelt. Mit diesem Gerät können Messungen im Temperaturbereich von -180 bis $+1000^{\circ}\text{C}$ durchgeführt werden. Es werden sowohl Proben ohne Faserverstärkung als auch UD-kohlefaserverstärkte Proben in 0° und 90° geprüft.

Folgende Messparameter wurden hierzu gewählt:

Tabelle 13: Messparameter Wärmeausdehnung (@Netzsch)

Probenhalter	Quarzglas
Proben thermoelement	TYP K
Anpresskraft des Fühlstempels	0,05 N
Atmosphäre	Helium, 50 ml/min
Kalibrierstandard	SiO2*
Temperaturprogramm	-40 bis 850°C mit 5 K/min -40 bis 1200°C mit 5 K/min
Probenlänge	~25 mm

* Die Ausdehnung des Probenhalters wurde über eine Kalibriermessung korrigiert. Die Kalibriermessung wurde unter den gleichen Versuchsbedingungen durchgeführt wie die Probenmessungen.

Bei der Messung dehnen sich die Proben über den gesamten Messbereich nahezu kontinuierlich aus. Die kohlefaserverstärkten Proben haben 90°-Richtung eine deutlich höhere Wärmeausdehnung. Dies liegt an der Orientierung der Kohlefaser, da sich die Faser an sich eine sehr geringe Wärmeausdehnung besitzt.

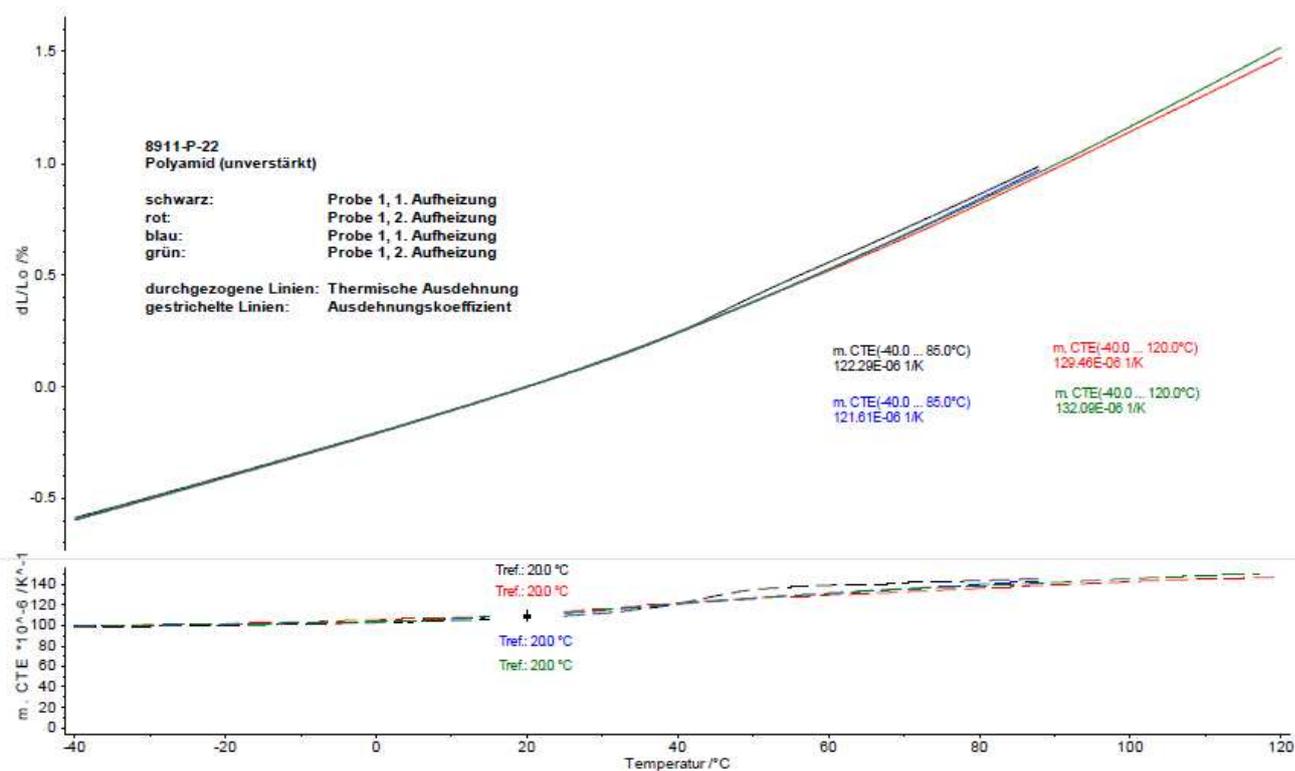


Abbildung 18: Wärmeausdehnung Lauramid (@Netzsch)

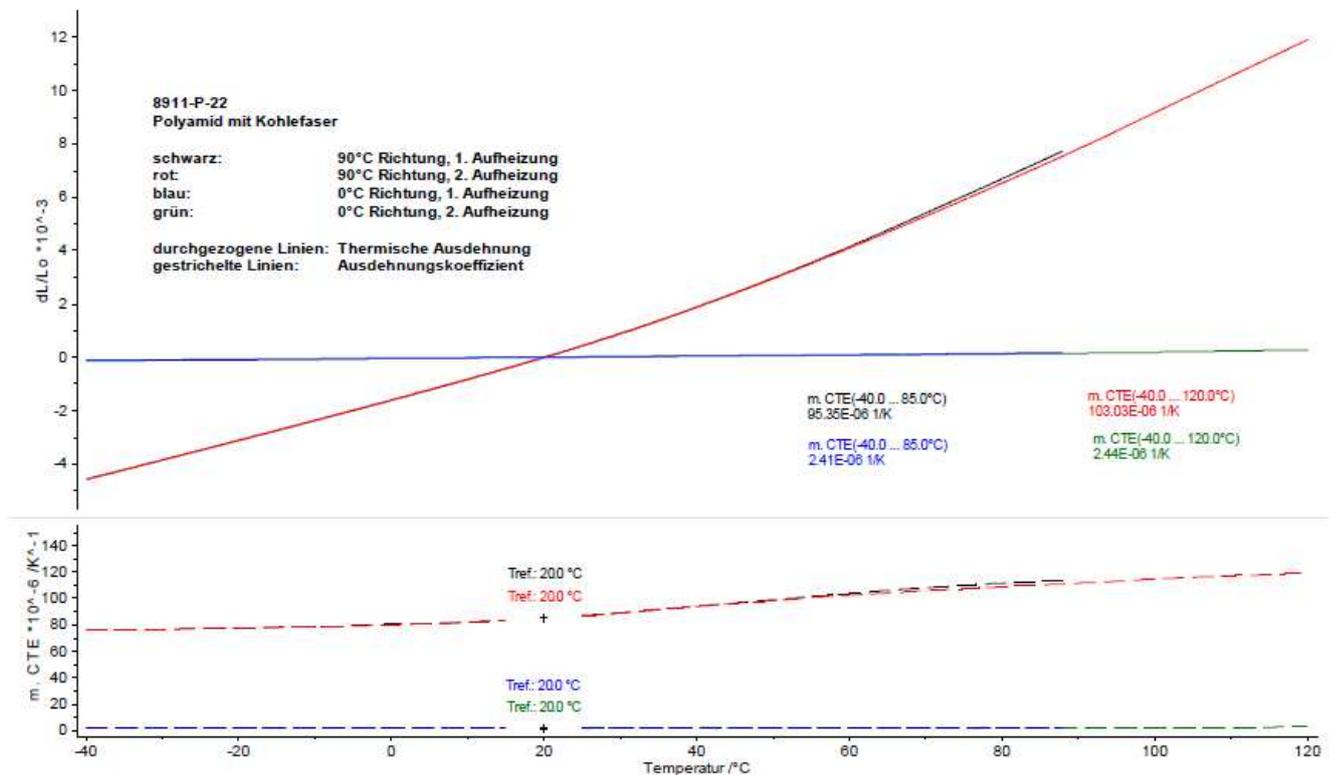


Abbildung 19: Wärmeausdehnung UD-Hicompelt CL in 0° und 90° (©Netzsch)

5.3.1.6 Impactverhalten

Die Impactversuche an Hicompelt wurden am Fraunhofer IMWS durchgeführt. Hier ist ein Fallturm vorhanden, mit dem unterschiedliche Aufprallenergien erzeugt werden können. Die Prüfung wurde in Anlehnung an die ASTM D7136 durchgeführt.

5.3.1.6.1 Erste Prüfreihe

Die Prüfparameter hierzu sind folgende:

- Durchmesser Impactor: 16mm
- Impact-Gewicht: 5,048kg
- Fallbolzen: 22kN
- Prüftemperatur 23°C

Tabelle 14: Fallhöhen für die unterschiedlichen Versuche (©Fraunhofer IMWS)

Energie in J	Fallhöhe in mm	Geschwindigkeit in m/s
5	101	1,41
10	202	1,99
15	303	2,44
20	404	2,82

Es wurde hier eine Probe mit einem Lagenaufbau ähnlich dem schlussendlichen Tank gewählt (Lagenaufbau - 15°/85°/95°/15°). Natürlich entspricht dies bei einer Platte nicht genau dem, was bei einem Wickelprozess erzeugt wird, so wird allerdings eine gewisse Vergleichbarkeit hergestellt.

Die Schadensfläche wurde anschließend per Ultraschall inspiziert und vermessen.

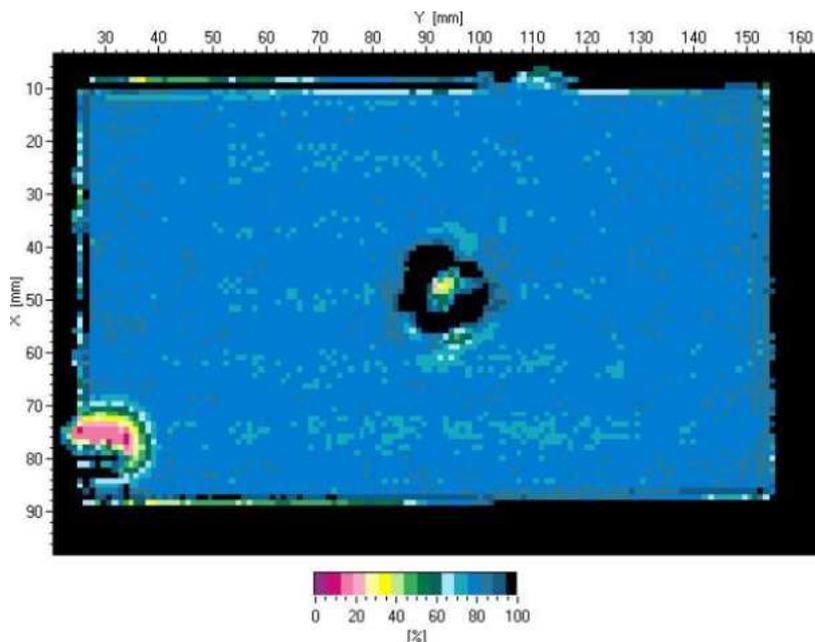


Abbildung 20: Ultraschallbild der größten Schadensfläche (Probe 4.2-20Joule) (©Fraunhofer IMWS)

Tabelle 15: Zusammenfassung der Ergebnisse (©Fraunhofer IMWS)

Probe	Durchmesser 1 in mm	Durchmesser 2 in mm	Schadensfläche in mm ²	Bemerkung
1-1	8	2	12,57	Kaum Schädigung im US sichtbar
1-2	7	5	27,49	Kaum Schädigung im US sichtbar
2-1	13	9	91,89	
2-2	15	11	129,59	
3-1	16	14	175,93	
3-2	16	10	125,66	
4-1	19	22	328,30	
4-2	19	18	268,61	

5.3.1.6.2 Zweite Prüfreihe

Im zweiten Schritt wurde eine weitere Impactversuchsreihe hinzugefügt. Hier wurde eine Vergleichbarkeit zu einer EP-Harz-Matrix hergestellt.

Es wurden TFPs mit dem identischen Lagenaufbau hergestellt, die anschließend mit Lauramid und EP-Harz infiltriert wurden. D.h. der Lagenaufbau ist identisch, jedoch ist das Matrixmaterial unterschiedlich. Natürlich mussten unterschiedliche Fasern verwendet werden, diese hatten aber auch den gleichen Aufbau, lediglich eine andere Schichte auf der Oberfläche, um die Kompatibilität zur Matrix zu geben.

Die Impact-Versuche wurden identisch wie zuvor beschrieben durchgeführt, allerdings wurden die Energien auf 8J und 15J angepasst.

Tabelle 16: Prüfparameter Versuchsreihe 2

Energie in J	Fallhöhe in mm	Geschwindigkeit in m/s
8	399	2,80
15	748	3,83

Anbei sieht man vergleichend die Ergebnisse zwischen EP-Harz und Lauramid als Matrixmaterial.

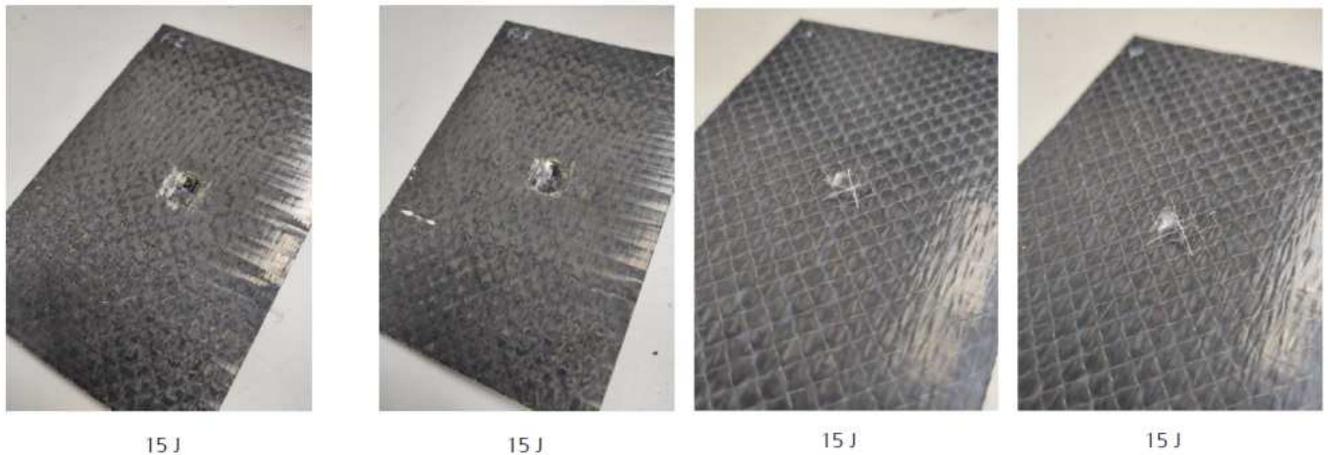


Abbildung 21: Impactversuche 15J (2 Platten links mit EP-Harz, 2 Platten rechts mit Lauramid)

Schon rein optisch lässt der Versuch erkennen, dass die Hicompelt-Platten mit Lauramid-Matrix deutlich weniger geschädigt werden. Dies liegt vor allem an der hohen Schlagzähigkeit des Materials aufgrund der langen Molekülketten und der hohen Kristallinität des Materials. Die Platten wurden allerdings noch im Ultraschall miteinander verglichen, um die Ergebnisse nochmal zu verdeutlichen.

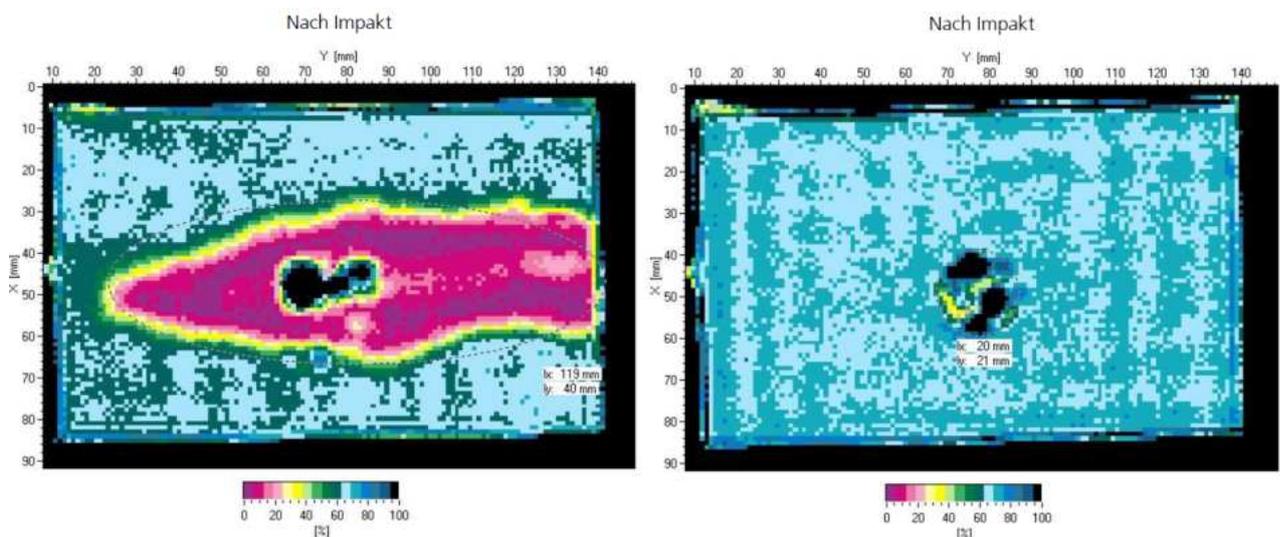


Abbildung 22: Vergleich der Ultraschallergebnisse mit EP-Harz (links) und Lauramid (rechts) bei 15J

Auf den Tank bezogen könnte ein großer Vorteil sein, dass beim Hicompelt-Tank keine Schutz-Endkappen notwendig sind, um den Falltest zur Zertifizierung zu bestehen. Dies vereinfacht wiederum die Konstruktion, verringert den Aufwand und zusätzlich das Gewicht des Tanks.

Das Faserinstitut Bremen hat die Schädigungsstelle nach dem Versuch zusätzlich im μ CT untersucht. Hierbei ist das Schädigungsverhalten sehr deutlich in den nachfolgenden Bildern zu erkennen. Dabei ist das Impactverhalten im Allgemeinen von Hicompelt gegenüber dem auf RTM 6 basierten Composite deutlich besser.

Das auf RTM 6 basierte System weist bereits bei einer Energieeinleitung von 8 Joule Faser-Matrix Schäden und Delamination auf. Das HICOMPELT weist bei gleicher Energie nur leichte Faser Matrix Brüche auf der Seiter gegenüber der Impactstelle auf.

Bei einer Energie von 15 Joule ist das RTM 6 basierte Composite völlig zerstört. Demgegenüber weist das HICOMPELT in der untersten Lage eine Delamination auf und erste Faser-Matrix Brüche.

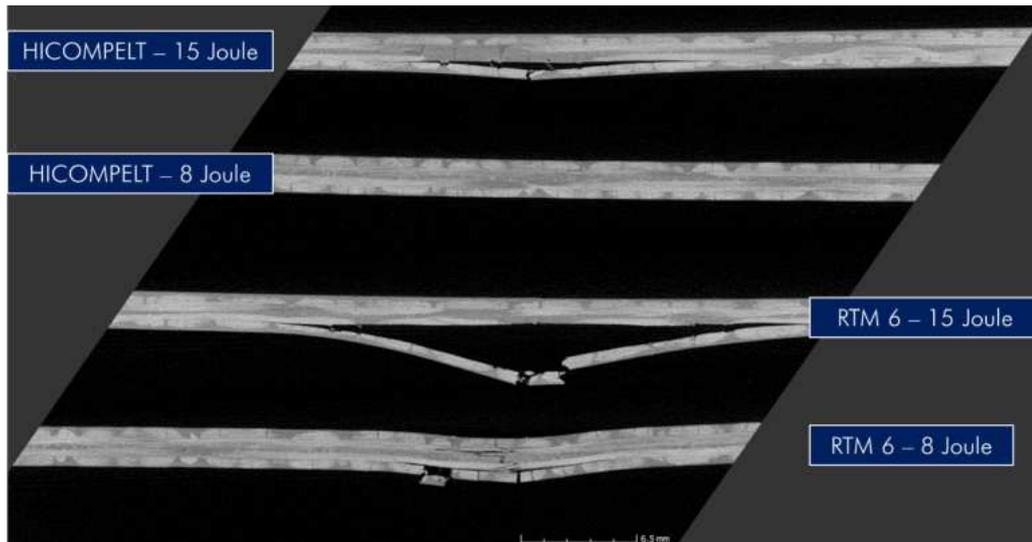


Abbildung 23: μ CT-Aufnahme von der Impact Stelle der Prüfkörper bei unterschiedlich induzierten Energien (Bild 1)

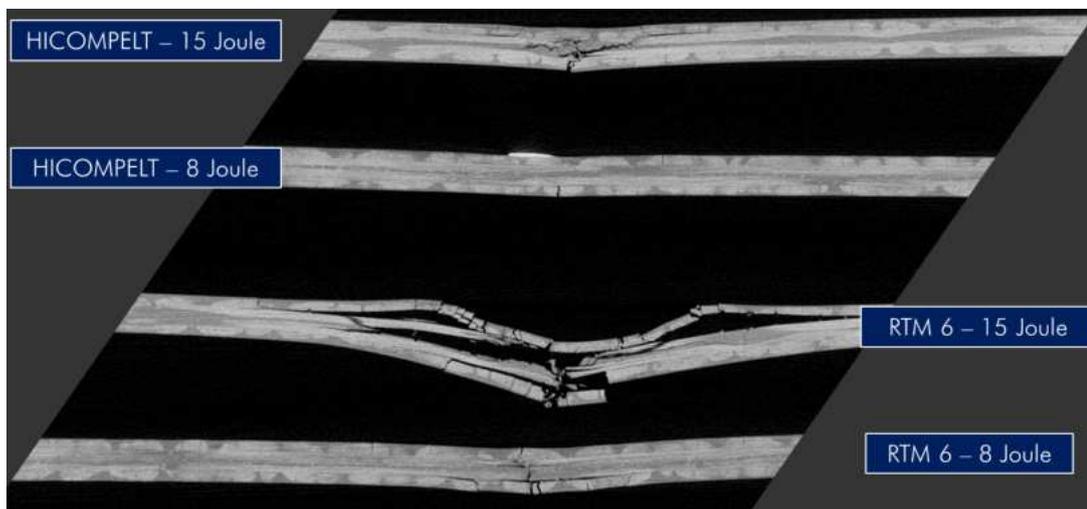


Abbildung 24: μ CT-Aufnahme von der Impact Stelle der Prüfkörper bei unterschiedlich induzierten Energien (Bild 2)

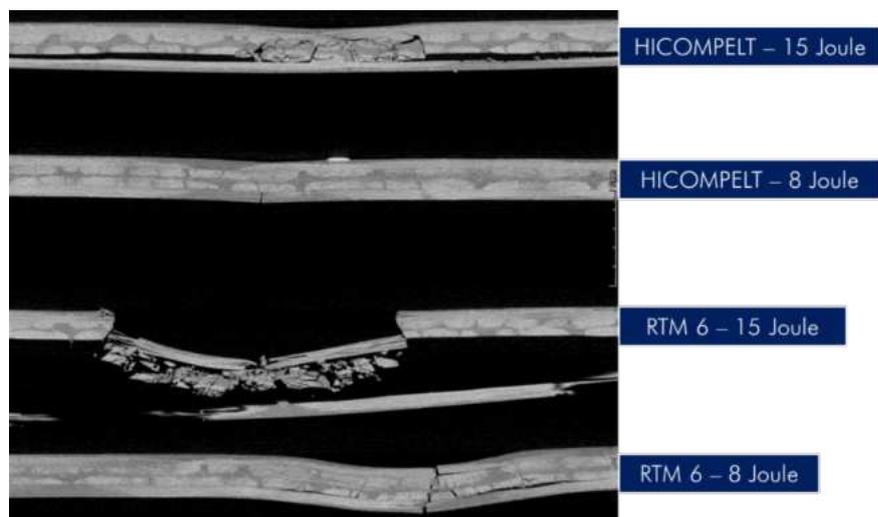


Abbildung 25: μ CT-Aufnahme von der Impact Stelle der Prüfkörper bei unterschiedlich induzierten Energien (Bild 3)

5.3.1.7 Flammstutztests

Um die Flammstutzbeständigkeit von Hicompelt zu untersuchen, wurde die Brennbarkeitsprüfung nach UL94V gemäß IEC60695-11-10, Verfahren B- Vertical Burning Test durchgeführt. Dies ist eine allgemein gültige Flammstutznorm.

Bei dem Versuch werden vertikal angeordneten Prüfkörper mit einem Bunsenbrenner beflammt, wobei die Flammhöhe von 20mm den Prüfkörper jeweils 10 Sekunden beflammt. Die Beurteilungsparameter sind die Brenndauer und die Gesamtbrennzeit, sowie ggf. brennend abfallende Teile.

Tabelle 17: Flammtestergebnisse mit Hicompelt CL

0°	Probe 1	Probe 2	Probe 3	Probe 4	Probe 5
t ₁ [s] Nachbrennen nach ersten 10s	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
t ₂ [s] Nachbrennen nach zweiten 10s	1,0	0,0	1,0	1,0	0,0
t ₃ [s] Nachglimmen nach zweiten 10s	1,0	0,0	0,0	0,0	0,0
90°					
t ₁ [s] Nachbrennen nach ersten 10s	1,0	2,0	3,0	4,0	5,0
t ₂ [s] Nachbrennen nach zweiten 10s	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
t ₃ [s] Nachglimmen nach zweiten 10s	1,0	1,0	0,0	1,0	1,0
t ₃ [s] Nachglimmen nach zweiten 10s	0,0	1,0	0,0	0,0	0,0

Das Material erreicht durch die Ergebnisse die Klassifizierung 94V-0.

5.3.2 Anwendungsbezogene Tests

Punkt 2.1 der Testmatrix konnte leider nicht realisiert werden. Hier war geplant Faser-Matrix-Haftungs-Tests durchzuführen, allerdings stellt sich die Problematik der Probenherstellung. Die Matrix muss reaktiv aufgegeben werden, um ein repräsentatives Vergleichsergebnis zu erhalten. Einen solchen Tropfen unter Ausschluss von Sauerstoff bei 160°C aufzubringen und auspolymerisieren zu lassen übersteigt die aktuellen technischen Möglichkeiten. Es wurde intensiv darüber diskutiert, wie dieses Problem gelöst werden könnte. Die hohen Kosten für den Versuch könnten allerdings durch den geringen Nutzen nicht gerechtfertigt werden. Daher wurde dieser Versuch gestrichen.

5.3.2.1 Verbindungstechnik

Es gibt Überlegungen Bauteile durch Reibschweißen zu Verbinden. Es handelt sich hier beispielsweise um die Endkappen des Liners, die mit einem Rohr zum fertigen Liner verbunden werden müssen. Es gibt außerdem Ideen, einen Typ 5-Tank mit einem CFK-Rohr herzustellen, wobei die Endkappen aus reinem Lauramid sind.

Daher soll in dieser Versuchsreihe geprüft werden, welche Festigkeiten in einer Reibschweißverbindung erzielt werden können. Hierzu wurden Lauramid-Körper mit Hicompelt- bzw. Lauramid-Platten im Reibschweißverfahren verbunden. Die Parameter hierzu sind bereits bei der Fa. Handtmann bekannt.



Abbildung 26: reibgeschweißte Platten aus Lauramid bzw. Hicompelt

Aus diesen gefügten Platten wurden anschließend Zugprüfkörper entnommen, um die Festigkeit in der Verbindungsstelle zu ermitteln.

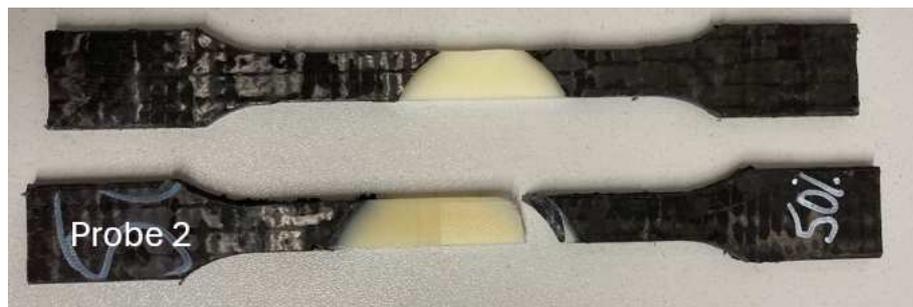


Abbildung 27: Zugprüfkörper mit Reibschweißverbindung in der Mitte

Die Kennwerte der Zugprüfkörper sind sehr gut und bewegen sich im Standard-Lauramid-Bereich. Dies ist unabhängig davon, ob Lauramid oder Hicompelt (auch mit unterschiedlichen Faservolumengehalten), als Basismaterial verwendet wird.

Zu beachten bei den Ergebnissen ist die etwas größere Fläche der Verbindungsstelle durch den kreisförmigen Verlauf. Daher müssten die Ergebnisse etwas korrigiert werden. Da die Ergebnisse aber in einem sehr hohen Bereich liegen, deutet alles auf eine optimale Verbindung der Bauteile hin.

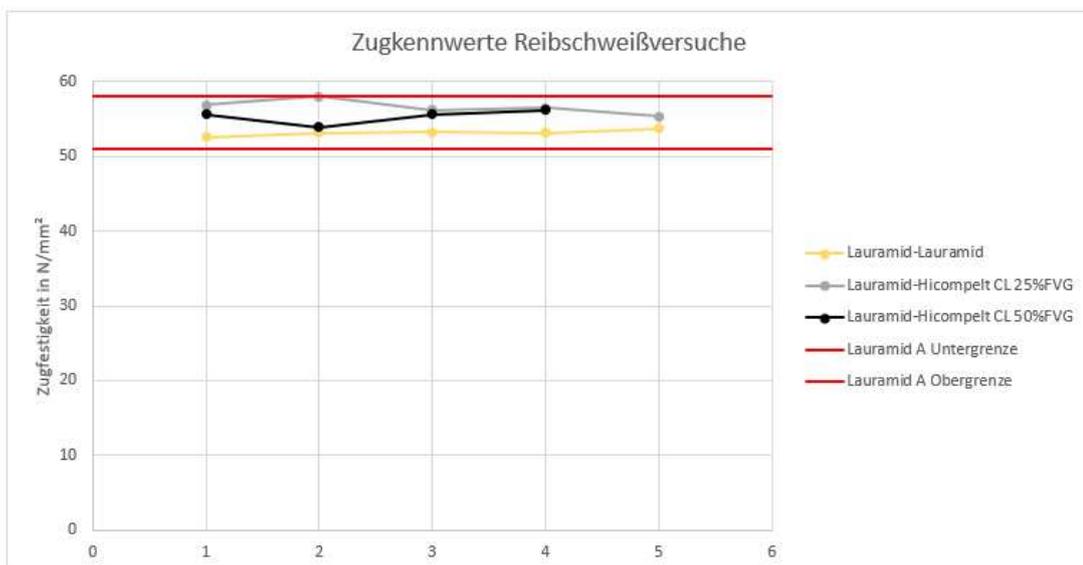


Abbildung 28: Zugkennwerte Reibschweißversuche

5.3.2.2 Materialschnittstellen- Zugscherprüfungen

Um die Materialchnittstelle zwischen Liner und CFK-Außenhülle zu prüfen, wurden mit dem Plattenwerkzeug Prüfplatten in 2 Stufen hergestellt. Zuerst wurde eine CFK- Platte und eine Lauramid-Platte in 2mm Wandstärke hergestellt. Diese wurde anschließend wieder ins Werkzeug gelegt und mit trockenen Fasern belegt. Nach Infiltration dieser Fasern ist die Platte an die vorherig eingelegt Platte angebunden, analog zum nachträglichen Umgießen des Liners.

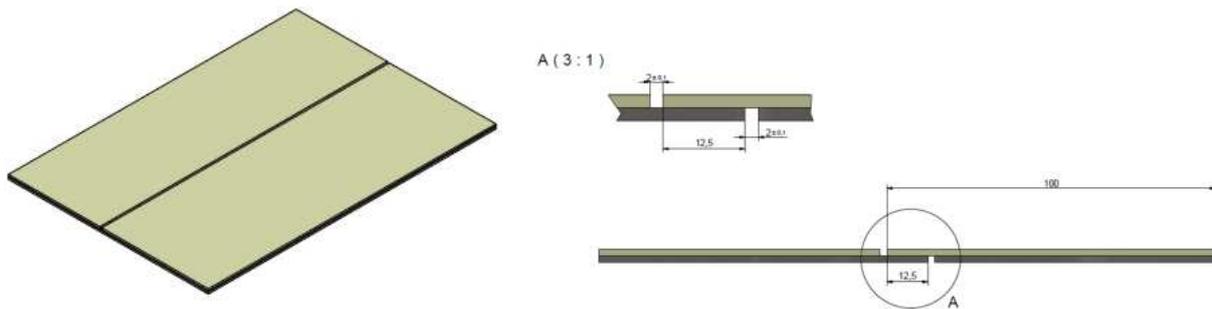


Abbildung 29: Platten angegossen (Lauramid® auf Hicompelt®)

Dadurch, dass diese Versuche am Plattenwerkzeug durchgeführt werden, können Zugscherprüfkörper hergestellt und die Materialchnittstelle genau untersucht werden. Die Zugscherprüfung erfolgt anschließend in Anlehnung an die DIN65148.

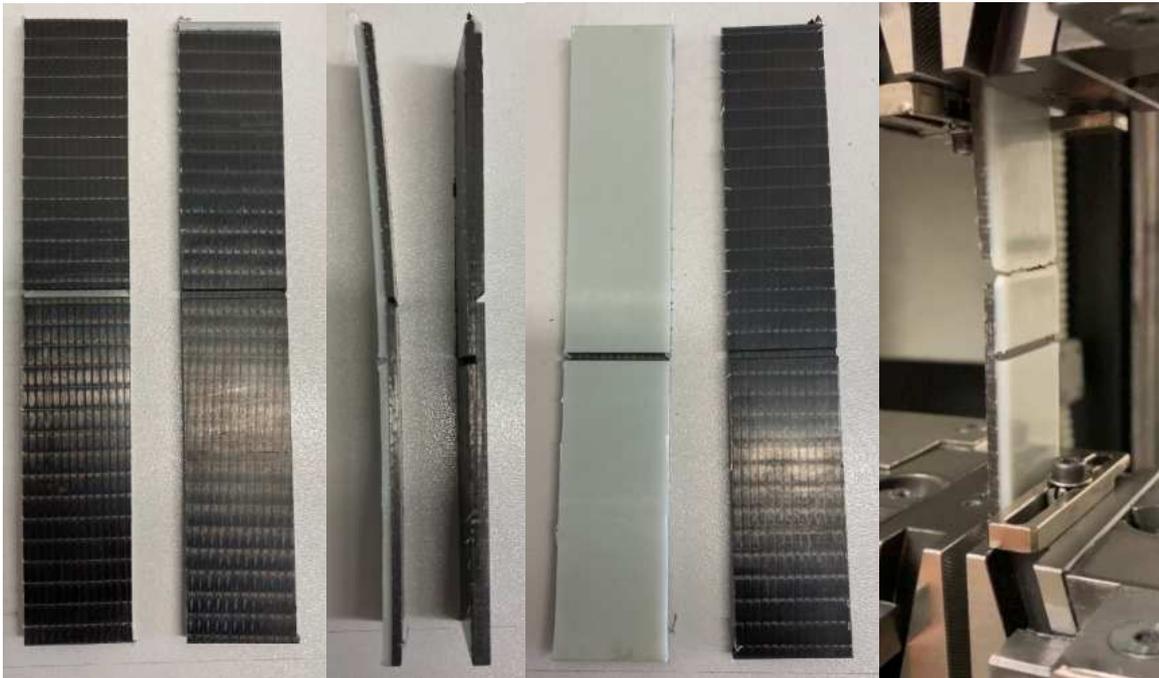


Abbildung 30: Zugscherprüfkörper

Mithilfe dieser Zugscherprüfkörper können unterschiedliche Materialkombinationen geprüft werden. Der Versuch wurde zuvor bereits an reinen Hicompelt-Proben durchgeführt. Dadurch erhalten wir einen Vergleichswert zwischen der Anbindung innerhalb des Bauteils im Vergleich zur Anbindung an der Materialchnittstelle.

- Reines Hicompelt®: $\tau_{ils} = 26,2 \text{ N/mm}^2$
- Hicompelt® auf Hicompelt®: $\tau_{ils} = 20,9 \text{ N/mm}^2$
- Hicompelt® auf Lauramid®: $\tau_{ils} = 10,3 \text{ N/mm}^2$ *

Die Werte bei reinem Hicompelt® liegen etwa 20% höher als in der Materialschnittstelle zwischen Hicompelt®-Hicompelt®. Dieser Wert ist sehr gut und für die Schnittstelle mehr als ausreichend. Bei aktuell verwendeten Typ 4-Tanks verbindet sich der Liner gar nicht mit der Außenhülle, d.h. es ist keine Anbindung vorhanden. Gerade auf lange Sicht gesehen, ist dies für den Dauerbetrieb eine hervorragende Eigenschaft des Materials.

Bei Hicompelt®-Lauramid® ist der Wert nochmals um 50% verringert. Wie man in der vorherigen Abbildung ganz rechts allerdings erkennen kann, bricht der Prüfkörper im reinen Lauramid®, d.h. die Schnittstelle ist noch in Takt*.

Es wurde entschieden hier keine weitere Prüfung durchzuführen, da die ermittelten Werte bereits mehr als ausreichend für die Schnittstelle zwischen Liner und Außenhülle sind.

Für die Schnittstellen zwischen Boss und Lauramid bzw. Boss und Hicompelt wurden ebenfalls keine Versuche durchgeführt, da hierfür parallel andere Forschungsvorhaben gelaufen sind. Auch hier sind tolle Ergebnisse entstanden, die ggf. über das Projekt „SmartPro“ oder das Projekt „TheDi“ eingesehen werden können.

5.3.3 Verarbeitungsrelevante Tests

In diesem Unterpunkt der Testmatrix soll die Materialqualität nach Infiltration sowie das Infiltrationsverhalten beurteilt werden. Da hier vor allem das IPT Wismar sehr viel Erfahrung in der Materialanalytik hat, wurden sehr viele Untersuchungen mit Lauramid bzw. Hicompelt durchgeführt.

5.3.3.1 Untersuchungen zur Polymerisationskinetik

Zur Untersuchung der Polymerisation des reaktiven Monomersystems Laurinlactam zur Polyamid 12 in Hinblick auf die durch die Verarbeitung beeinflusste Materialqualität, wurden im ersten Schritt thermische Analysen mittels dynamischer Differenzkalorimetrie (dynamischer Wärmestrom-Differenzkalorimetrie, Gerät: DSC 214 Polyma der Firma NETZSCH-Gerätebau GmbH) an bereitgestellten Materialmustern durchgeführt. Nachfolgende DSC-Diagramme von Lauramid A und Lauramid B zeigen das thermoplastische Schmelz- bzw. Kristallisationsverhalten unter Normprüfbedingungen (DIN EN ISO 11357). Durch die Variation von Prozessparametern (Temperatur und Heizdauer) bei der Infiltration können in Bauteilen unterschiedliche Materialqualitäten erzeugt werden, welche sich im Wesentlichen durch den resultierenden Kristallisationsgrad ergeben.

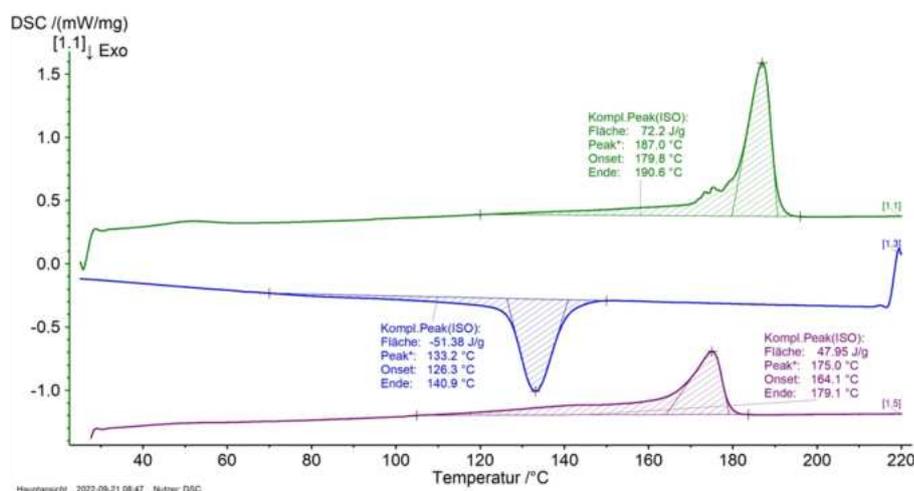


Abbildung 31: DSC-Diagramm Lauramid A mit einer Kristallinität von 34,4 % (grün: 1. Aufheizkurve, blau: Abkühlkurve, lila: 2. Aufheizkurve)

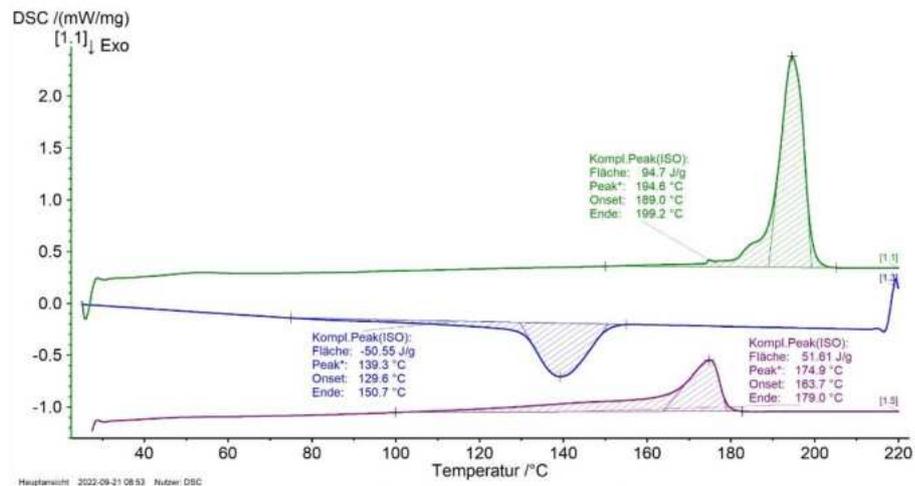


Abbildung 32: DSC-Diagramm Lauramid B mit einer Kristallinität von 45,1 % (grün: 1. Aufheizkurve, blau: Abkühlkurve, lila: 2. Aufheizkurve)

Im Rahmen weiterführender Untersuchungen wurden zur Erzeugung einer Datenbasis sowie zur Identifizierung und Ableitung von Korrelationsfunktionen von Einflussfaktoren auf die Polymerisation und somit auf die Materialeigenschaften umfangreiche Analysen an bereitgestellten Materialproben mit unterschiedlicher Verarbeitungshistorie durchgeführt. Nachfolgendes Foto zeigt Materialproben deren Polymerisationsdauer (üblicherweise 7 Stunden Haltezeit im Ofen bei 160 °C) verkürzt wurde, um die resultierende Polymerisationsqualität definierte (stufenweise) zu reduzieren.

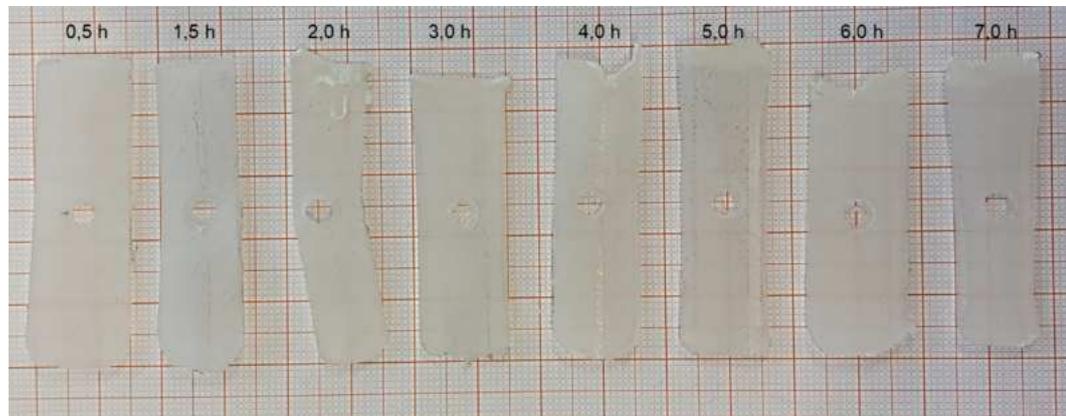


Abbildung 33: Materialproben / Variation der Polymerisationsdauer / zentrale Entnahme der DSC-Probe (keine Oberflächeneffekte)

Im Ergebnis der thermischen Analysen kann festgestellt werden, dass durch die Reduzierung der Haltezeit (keine vollständige Polymerisation) der Schmelz-Peak (1. und 2. Aufheizung) sowie die Kristallisation zu deutlich tieferen Temperaturen verschoben werden.

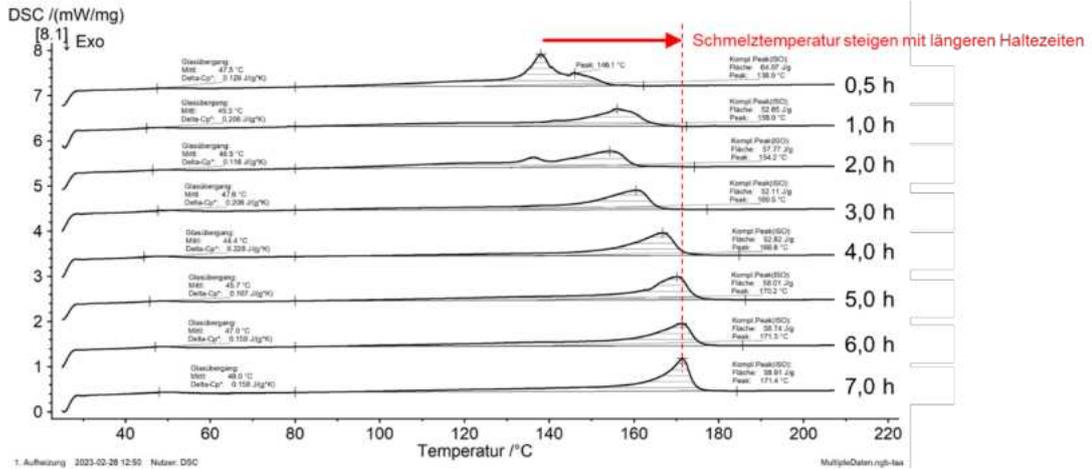


Abbildung 34: Vergleich DSC-Kurven (1. Aufheizung) / Proben: Variation von Haltezeit bei der Polymerisation

Die untersuchten Materialproben zeigen aufgrund der Abkühlbedingungen bei der Herstellung im Vergleich zum Standardmaterial ein zu geringe Schmelzenthalpie.

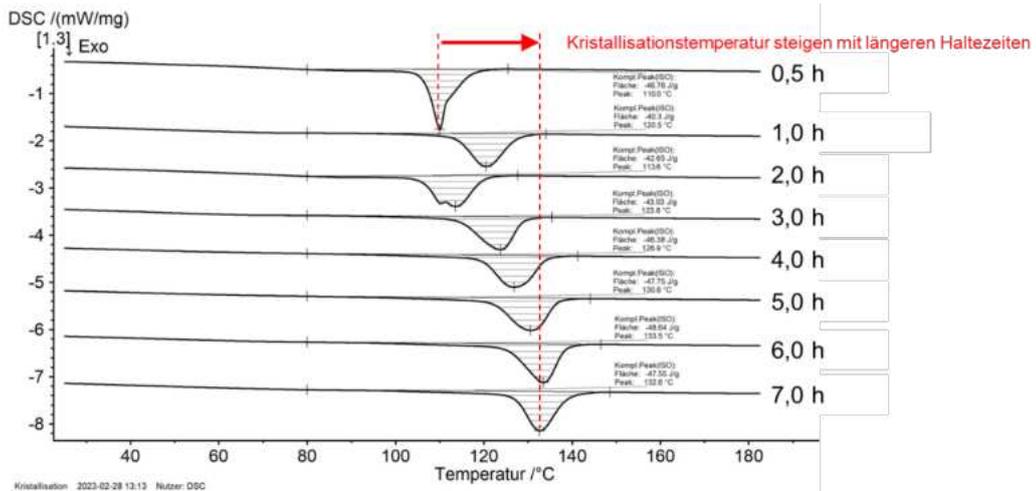


Abbildung 35: Vergleich DSC-Kurven (Abkühlung) / Proben: Variation von Haltezeit bei der Polymerisation

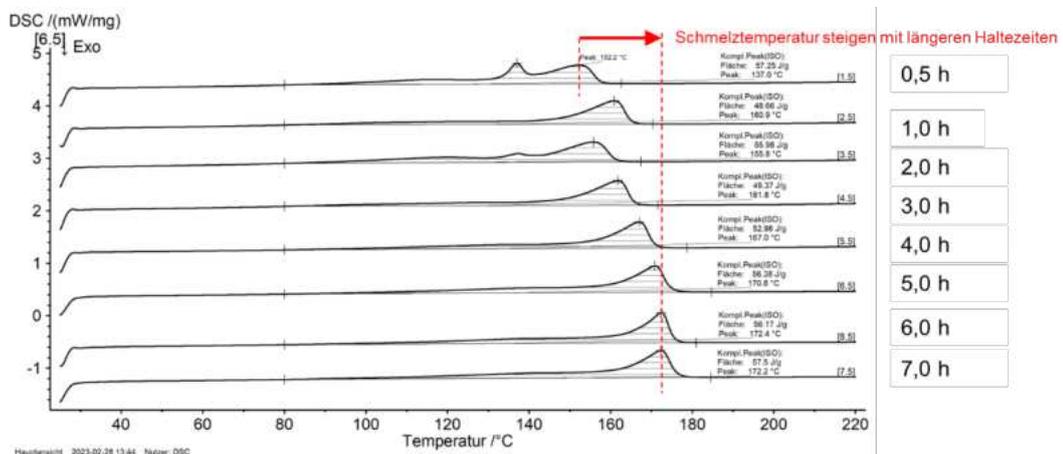


Abbildung 36: Vergleich DSC-Kurven (2. Aufheizung) / Proben: Variation von Haltezeit bei der Polymerisation

Auf Basis der gewonnenen Daten wurden Korrelationsfunktionen erzeugt, welche im Verlauf des Projektes für das zu erarbeitende Qualitätssicherungskonzepte weiterentwickelt wurden. Als Beispiel hierfür zeigen die nachfolgenden Diagramme der ermittelten Peak-Temperaturen die Abhängigkeit der bei der Probenherstellung angewendeten Ofenzeiten.

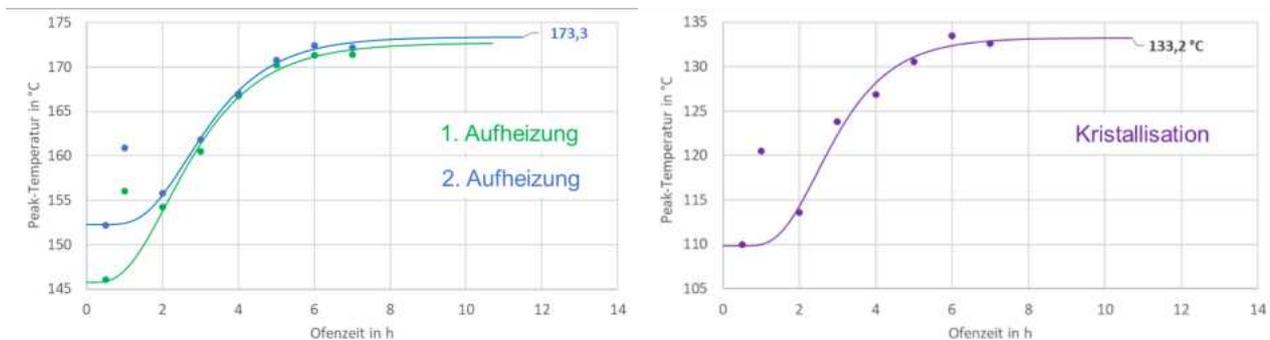


Abbildung 37: DSC-Peak-Temperaturen die Abhängigkeit der Ofenzeit (Polymerisationszeit bei der Probenherstellung) / links: Schmelz-Peak-Temperaturen aus 1. und 2. Aufheizung / rechts: Kristallisations-Peak-Temperatur aus der Abkühlung

Ein weiterer Arbeitsschwerpunkt fokussierte auf die Live-Dokumentation und definierten Beeinflussung der Polymerisation mittels DSC. Hierzu wurde versucht die aus der Literatur bekannten DSC-Methoden für PA 6 (beschrieben z.B. in „Kalorimetrische und rheologische Untersuchung der anionischen Polymerisation von ε-Caprolactam zu Polyamid-6“, Samet Kurt, 2021) auf PA 12 zu übertragen, um die Polymerisationskinetik unter idealen Bedingungen zu untersuchen und Reaktionsmodelle für den Reaktionsfortschritt abbilden. Im Rahmen des Projektes wurden mit unterschiedlichen Herstellungsmethoden versucht reaktive Materialproben für derartige DSC-Analysen zu erzeugen (siehe nachfolgende Fotos).

Trockenmischung von zwei pulverförmigen Laurinlactam-Vormischungen unter Argon und Abfüllung in DSC-Tiegeln



Abbildung 38: Probenpräparation unter Argon

Heißmischung (160 °C) der reaktiven Laurinlactam-Rezeptur wird in PE-Schlauch befüllt und Abgeschreckt (Unterbrechung der Reaktionskinetik)



Abbildung 39: Entnahme einer DSC-Probe aus dem PE-Schlauch

In Anlehnung an den in der Literatur beschriebenen Verfahren für PA 6, wurden die so erzeugten Materialproben unter Anwendung von dynamischen und isothermen DSC-Prüfmethoden untersucht.

A: dynamische DSC-Methode

Hier wird die Materialproben kontinuierlich mit einer Heizrate (5, 10 oder 20 K/min) von 10 °C auf 220 °C erwärmt. Bei Überschreiten von 160 °C schmilzt das Monomersystem und die Polymerisation startet theoretisch. In den nachfolgenden dynamischen Programmschritten der Methode werden bei 10 K/min resultierende thermische Materialeigenschaften ermittelt.

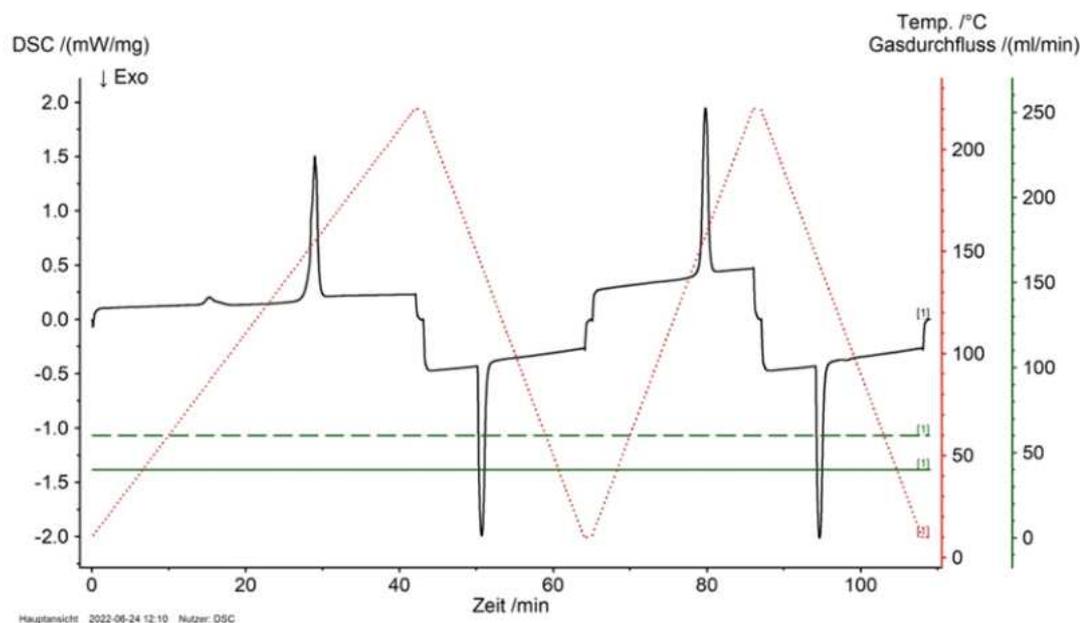


Abbildung 40: Temperaturprogramm der dynamischen DSC-Methode (Beispiel: Heizrate 5 K/min)

Als Ergebnis sind im nachfolgenden Diagramm die 3 DSC-Kurven der 2. Aufheizung vergleichend dargestellt.

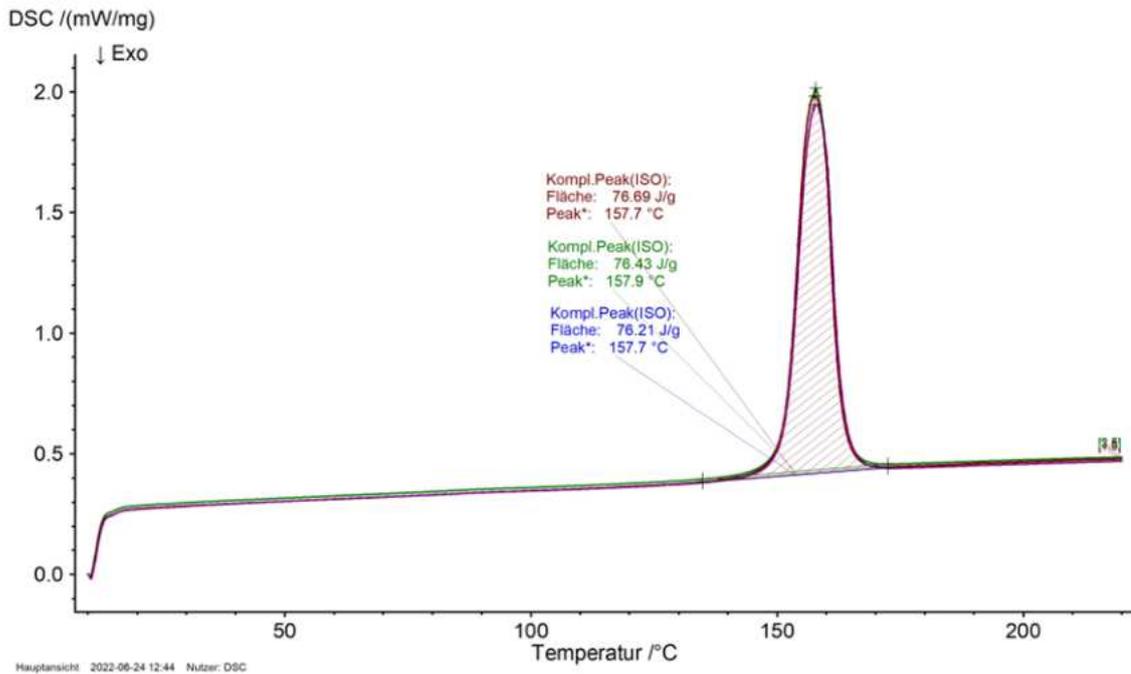


Abbildung 41: Vergleich DSC-Kurven reaktive Proben nach Polymerisation unter verschiedenen Heizraten (5, 10 und 20 K/min)

Die ermittelten Kennwerte der Schmelze-Peaks zeigen, dass keine Polymerisation stattgefunden hat. Die DSC-Kurven entsprechen den Aufschmelzverhalten von Laurinlactam.

B: isotherme DSC- Methode

Hier wird die Materialproben kontinuierlich mit einer Heizrate (500 K/min) von 10 °C auf eine definierte Halte-temperatur (155, 160, 165 °C) erwärmt und gehalten (Variation: 30 min bis 7 Stunden). In den nachfolgenden dynamischen Programmschritten werden bei 10 K/min resultierende thermische Materialeigenschaften ermittelt.

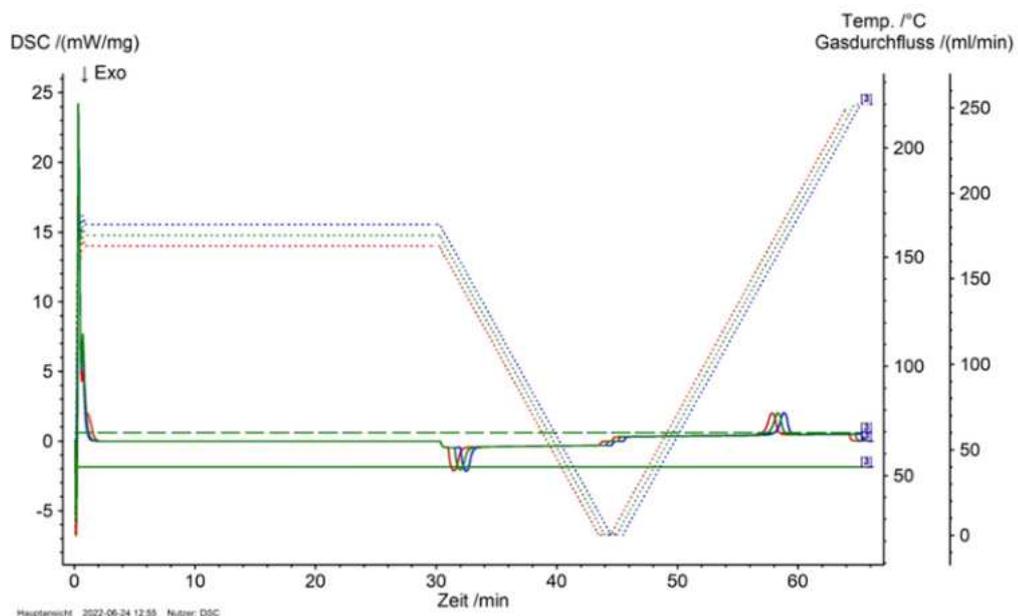


Abbildung 42: Temperaturprogramm der isothermen DSC-Methode (Beispiel: 155, 160 und 165 °C für 30 min)

Auch mit der isothermen Methode zeigt die Auswertung von unterschiedlichen Materialproben (aus Probenherstellung 1 und 2) keine Polymerisationsreaktion. Die DSC-Kurven der 2. Aufheizung zeigen den Charakter von Laurinlactam und nicht von GPA 12.

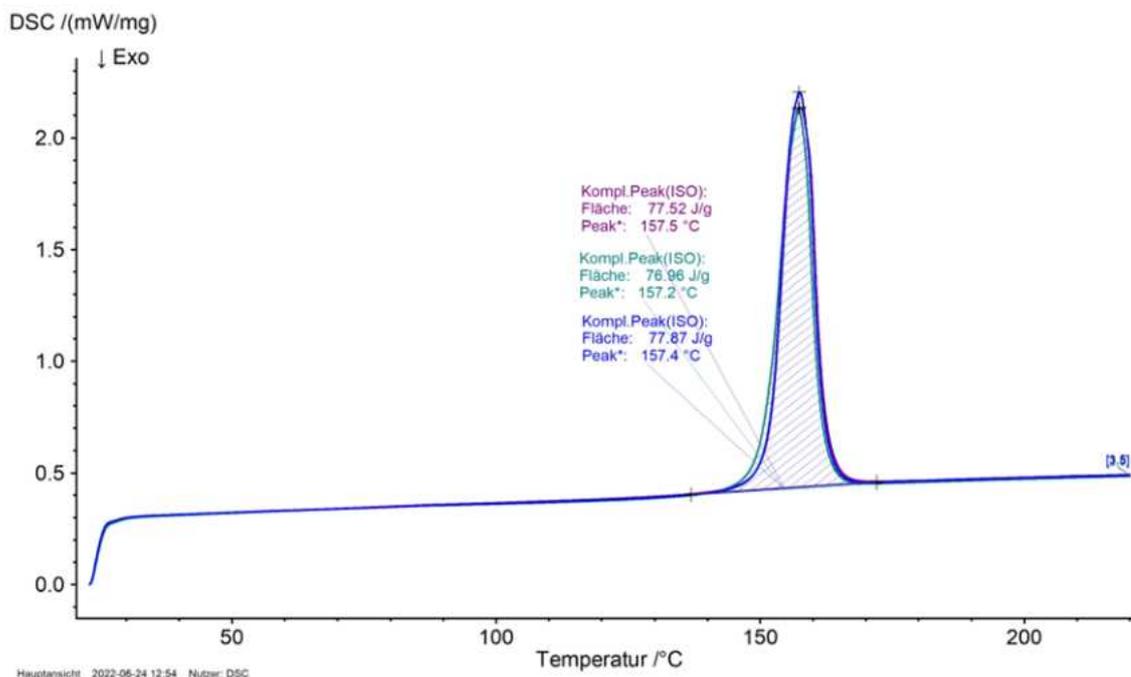


Abbildung 43: Vergleich DSC-Kurven reaktive Proben nach Polymerisation unter verschiedenen Haltetemperaturen

Im Rahmen des Projektes ist es nicht gelungen reaktive Materialproben herzustellen und in der DSC zu Polymerisieren. Weiterführende Untersuchungen an monomeren Laurinlactam-Proben waren dennoch insofern relevant, da diese für die Eignung von Prüfmethode und Kennwerten als „schlecht“ Probe dienen. So zeigen nicht polymerisierte Materialproben in der thermogravimetrischen Analyse (TGA) ein deutlich früheres Einsetzen der thermischen Zersetzung bzw. Proben-Massenverlust. Das nachfolgende TGA-Diagramm zeigt das Verdunstungsverhalten (Siedetemperatur: 348 °C bei 1013 hPa) von Laurinlactam (blau), nicht polymerisierten Probe (grün) und die thermische Degradation von GPA 12.

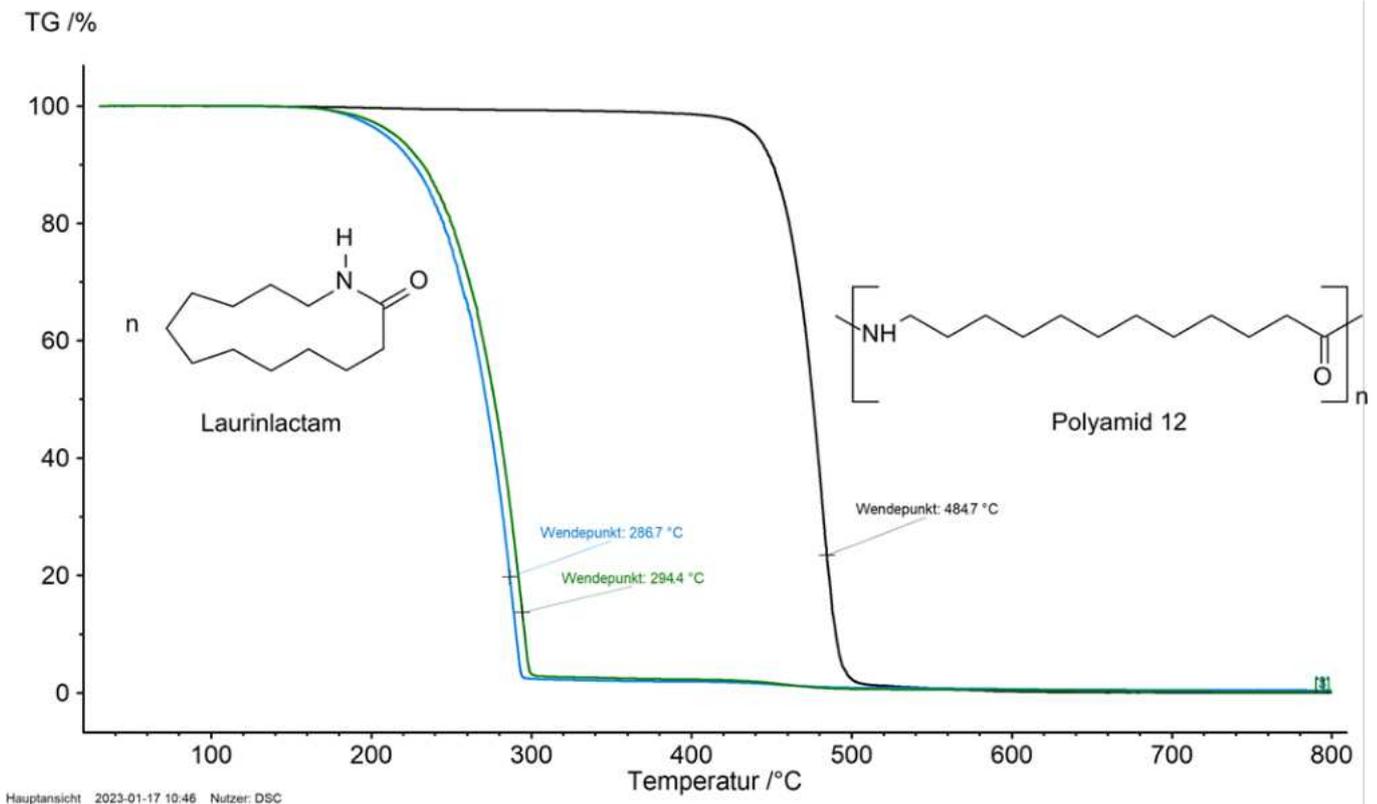


Abbildung 44: Vergleich TG-Kurven von Laurinlactam und GPA12

Des Weiteren zeigen sich bei der Fourier-Transformations-Infrarot-Spektroskopie (FTIR) an Laurinlactam und GPA12 deutliche Unterschiede der NH-Deformationsschwingung im Wellenzahlbereich von 740 bis 650 1/cm. Auch diese zerstörungsfreie Prüfmethode zeigt Potential für ein späteres Qualitätssicherungskonzeptes.

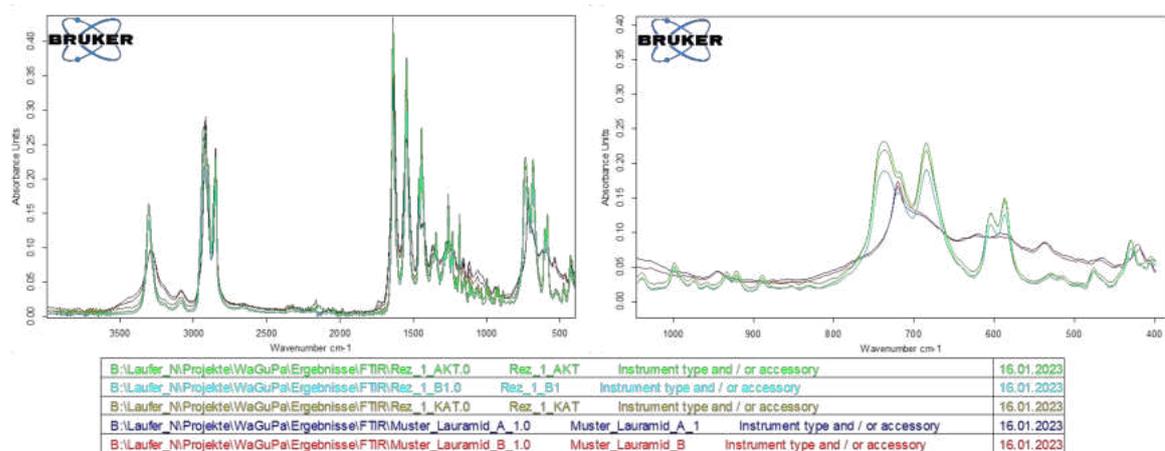


Abbildung 45: FTIR an Laurinlactam und GPA12

5.3.3.2 Untersuchungen des Infiltrationsverhaltens

Diese Versuche waren sehr aufwändig und werden deshalb ausführlich in einem extra Kapitel behandelt (siehe Kapitel 6).

5.3.4 Kryogene Tests

Im Projekt WaGuPa soll zwar ein Wasserstofftank betrachtet werden, der Wasserstoff in gasförmiger Art unter Druck speichert, nichtsdestotrotz werden ein paar Nebenuntersuchungen im kryogenen Bereich durchgeführt. Dies bedeutet, dass der Werkstoff im tiefkalten Bereich abgeprüft wird, um die Möglichkeit zum Einsatz als Material für Flüssigwasserstofftanks zu überprüfen. Bei der Speicherung von Flüssigwasserstoff herrschen Temperaturen von ca. -250°C , die Werkstoffe, die hier eingesetzt werden, müssen auch noch bei dieser Temperatur funktionsfähig sein.

Es ist bereits bekannt, dass Lauramid sich bei tiefen Temperaturen sehr gut verhält. Es wurden hierzu Kerbschlagzähigkeitsversuche durchgeführt, die mit Flüssigstickstoff durchgeführt wurden, d.h. bei ca. -196°C . Die Kerbschlagzähigkeit sinkt nur geringfügig. Weitere Versuche, die im Projekt WaGuPa durchgeführt wurden, werden in Punkt 5.3.4 vorgestellt.

5.3.4.1 Permeationsversuche im kryogenen Bereich

Zu Projektbeginn war geplant, Permeationsversuche bei sehr tiefen Temperaturen durchzuführen. Hierfür waren auch Ideen für einen Prüfstand vorhanden, allerdings ließ sich dies nicht so einfach wie gedacht umsetzen. Außerdem deuten die bisherigen Versuche darauf hin, dass bei tiefen Temperaturen eine Wasserstoffpermeation durch Lauramid sehr gering sein wird und somit vernachlässigt werden kann.

Auch durch verschiedene Literaturen kann dies bestätigt werden. Deswegen wurden diese Versuche nicht durchgeführt und vorerst aufgeschoben, wobei sich die Frage stellt, ob diese aufwändigen Prüfungen überhaupt aufgebaut und durchgeführt werden müssen.

5.3.4.2 Tieftemperatur-Zugversuche Lauramid

Wie bereits erwähnt, wurden bereits Tieftemperatur-Kerbschlagversuche mit Lauramid® durchgeführt, allerdings noch keine Zugversuche. Da die Kennwerte aus Zugversuchen sehr aussagekräftig sind und für verschiedenste Berechnungen herangezogen werden, wurde ein Zugversuch in Flüssigstickstoff bei -196°C durchgeführt. Am Faserinstitut Bremen ist eine neue Universalzugprüfmaschine vorhanden, die einen Kryostat besitzt, in dem die Probe unter Flüssigstickstoff geprüft werden kann. Zukünftig soll es auch möglich sein, mit Flüssigwasserstoff zu arbeiten. Während der Projektlaufzeit war dies allerdings noch nicht möglich.

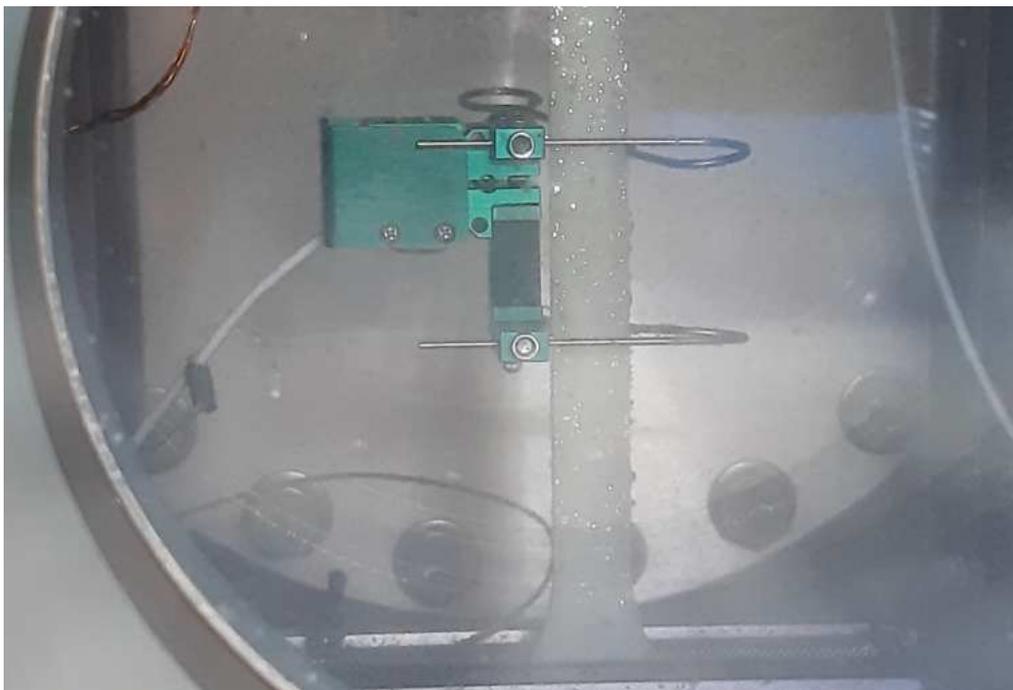


Abbildung 46: Zugprüfung unter Flüssig-Stickstoff

Der Prüfaufwand ist sehr hoch, es können maximal 3 bis 4 Proben am Tag geprüft werden. Dies liegt an der aufwändigen Probenvorbereitung. Es muss außerdem vermieden werden, dass sich der Flüssigstickstoff zu schnell erwärmt und dadurch verdampft, d.h. die Prüfkammer muss sehr gut abgedichtet werden.

Der Prüfkörper ist der Standardzugprüfkörper nach DIN EN ISO 527-4 und es wurden folgende Prüfparameter gewählt:

- Vorkraft 50N
- Prüfgeschwindigkeit: 2mm/min
- Messlänge Standardweg: 25mm

Das Spannungs-Dehnungs-Diagramm beim Versuch verhält sich typisch für einen spröden Werkstoff. Die Spannung steigt bis zu einem gewissen Punkt an, bei der die Probe dann direkt bricht. D.h. Das Material versprödet bei den tiefen Temperaturen, was zu erwarten war. Trotzdem sind sehr gute mechanische Kennwerte erzielt worden:

- E-Modul: 5.380N/mm²
- Zugfestigkeit: 139N/mm²
- Bruchdehnung: 2,79%

Das Material versprödet zwar, hat aber deutlich höhere Festigkeitskennwerte als bei Raumtemperatur. Dies liegt an der geringeren Molekülbeweglichkeit bei den tieferen Temperaturen, wodurch die Molekülketten schlechter aneinander vorbei gleiten.

6 Konstruktion Wasserstofftank

6.1 Benchmark

Da die Entwicklung eines Wasserstofftanks auf kohlefaserverstärktem Material nichts komplett Neues ist, soll untersucht werden welche Tanks bereits existieren und auch schon auf dem Markt etabliert sind. Natürlich gibt es hier die verschiedensten Tanks, von Typ 1 bis Typ 4 (Erläuterung siehe Punkt 2.3.1.3) ist alles erhältlich. Diese Benchmark soll daher aufzeigen, wo sich unser Wasserstofftank einordnen kann.

Hierfür wurden zuerst aus den verschiedensten Anwendungsbereichen unterschiedliche Konstruktionen und deren produktspezifischen Eigenschaften in einer Matrix gesammelt.

Anbei 2 Beispiele aus der Matrix:

Tabelle 18: Eigenschaften des Nproxx-Tanks

Firma	Angeborene Produkte	Angeborene Leistungen	Druckbehälter	Volumen Druckbehälter	Volumen Speichersystem	Außen-Ø	Länge	Betriebsdruck	Material	Zertifizierung	Bewertung Handtmann (1-10)
NPROXX (früher unter EMS bekannt)	- Druckbehälter in Containern für den Transport von H2 - stationäre Wasserstoffspeicher		Typ IV (auch Typ III möglich) Nenn- druck 300/ 500bar					300/ 500bar	Compo- site	ADR: Internationale Bestimmungen zur Beförderung gefährlicher Güter DIN EN 12245: Ortsbewegliche Gasflaschen ISO 11119-3: Gasflaschen aus Verbundwerkstoffen EC 79: Fuel Tanks UNR134: Fuel Tanks	9



Abbildung 47: Typ 4 Tanks von Nproxx (DB Netze, 2020)

Nproxx ist mit der Herstellung von Typ 4 Tanks sehr weit und auch serienreif. Es werden bereits relativ große Tanks hergestellt und teilweise auch zu ganzen Containern zusammengeschlossen.

Auf der Hannover-Messe 2022 stellte sich außerdem die Fa. Plastic Omnium vor, die ebenfalls interessante Tanks vom Typ 4 anbietet. hier werden überwiegend PE- und PA-Liner eingesetzt und verschiedene Durchmesser angeboten. Die Herstellung findet hier (wie auch bei Nproxx) im Nasswickelverfahren statt, d.h. es werden überwiegend Epoxyd-Harze als Matrixsystem für die CFK-Hülle verwendet.

Tabelle 19: Eigenschaften des Plastic Omnium-Tanks

Firma	Angebote- tene Pro- dukte	Ange- botene Leis- tungen	Druckbe- hälter	Volumen Druckbe- hälter	Volu- men Spei- cher- system	Außen- ø	Länge	Be- triebs- druck	Mate- rial	Zertifizierung	Bewer- tung Handt- mann (1-10)
Plastic Omnium	Wasser- stofftanks vom Typ IV mit PE- oder PA-Li- ner, Her- stellung im Nasswi- ckelverfah- ren	Her- stel- lung von Tanks	Typ IV bis 700bar	Bis 237Liter		448mm/ 363mm/ 120- 190mm	2011mm/ 870mm/ 800- 2400mm	700bar	CFK mit EP- Harz- matrix und PE- oder PA-Li- ner		8

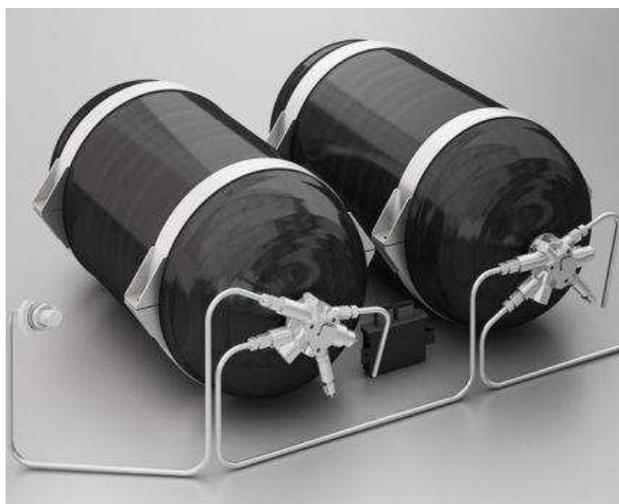


Abbildung 48: Typ 4 Tanks von Plastic Omnium (Leichtbauwelt, 12.02.2024)

Nach dem die Benchmark ermittelt wurde, sollten Use-Cases für unser Produkt ausfindig gemacht werden. Hierzu wurde Kontakt zu potenziellen Kunden aufgenommen, um die Bedürfnisse an das Produkt zu ermitteln.

6.2 Vorgaben aus Use-Cases

Durch verschiedenen Kontakte der Fa. Handtmann und auch vom FIBRE Bremen wurde Kontakt zu potenziellen Kunden für die Wasserstofftanks aufgenommen. Hier wurde im Austausch diskutiert, welche Anforderungen an die Tanks gestellt werden. Dadurch konnten die Vorgaben geklärt werden, die parallel zu den Vorgaben aus den verschiedenen Normen betrachtet wurden.

Hieraus ergab sich folgende Spezifikation für den Wasserstofftank-Demonstrator:

Tabelle 20: Tankanforderungen für Demonstrator aus Use-Cases

Anforderungen an den Tank	Wert	Einheit	F/W
Allgemein: Demonstartorbauerteil (angelehnt an UseCases)			
Betriebsdruck (p)	700	bar	F
Sicherheitsfaktor	2,25		F
Anzahl Tanks	1	Stk.	w
Bauraum für alle Tanks	-	mm ³	F
Tankdurchmesser (D)	160	mm	F
Tanklänge (L)	640	mm	F
Volumen (V)	-	l	F
Temperaturbereich	-40 bis 80	°C	F
max. Verkaufspreis	-	€	w
spez. Gewicht	min. 0,06	kg H ₂ /kg Tank	w
Dichtigkeit (max. Leckage)	46	ml/h/l	F
Befüllungshäufigkeit	täglich		F
Anschluss	beidseitig		F
Anforderungen Boss			
Anschlussart	Innengewinde		F
Innengewindeanschluss	1 1/2"-12 UNF		F
Dichtigkeit (max. Leckage)	46	ml/h/l	F

Ziel ist es, mit dem Demonstrator-Tank die Vorgaben zu erfüllen. Sollten während dem Projekt Probleme auftreten, diese Anforderungen erfüllen zu können, muss beurteilt werden, ob diese Abweichung für andere Anforderungsfälle geeignet ist.

6.3 Konstruktion Wasserstofftank

In einem Konstruktionsworkshop wurden verschiedene Ideen für die Konstruktion des Wasserstofftanks entwickelt. Die kritische Stelle ist vor allem der Übergang vom Boss in den Liner, da diese Stelle abgedichtet werden muss. Die einzelnen Einheiten des Wasserstofftanks werden im anschließenden allerdings nochmal genauer beschrieben.

Zudem wurde eine Patentrecherche durchgeführt, sodass keine Konstruktion gewählt wird, die bereits geschützt ist.

6.3.1 Aufbau und Funktionen Wasserstofftank

Ein Wasserstofftank besitzt verschiedene Bauteile, die jeweils unterschiedliche Funktionen haben. Die wichtigsten Teile werden in diesem Abschnitt kurz vorgestellt.

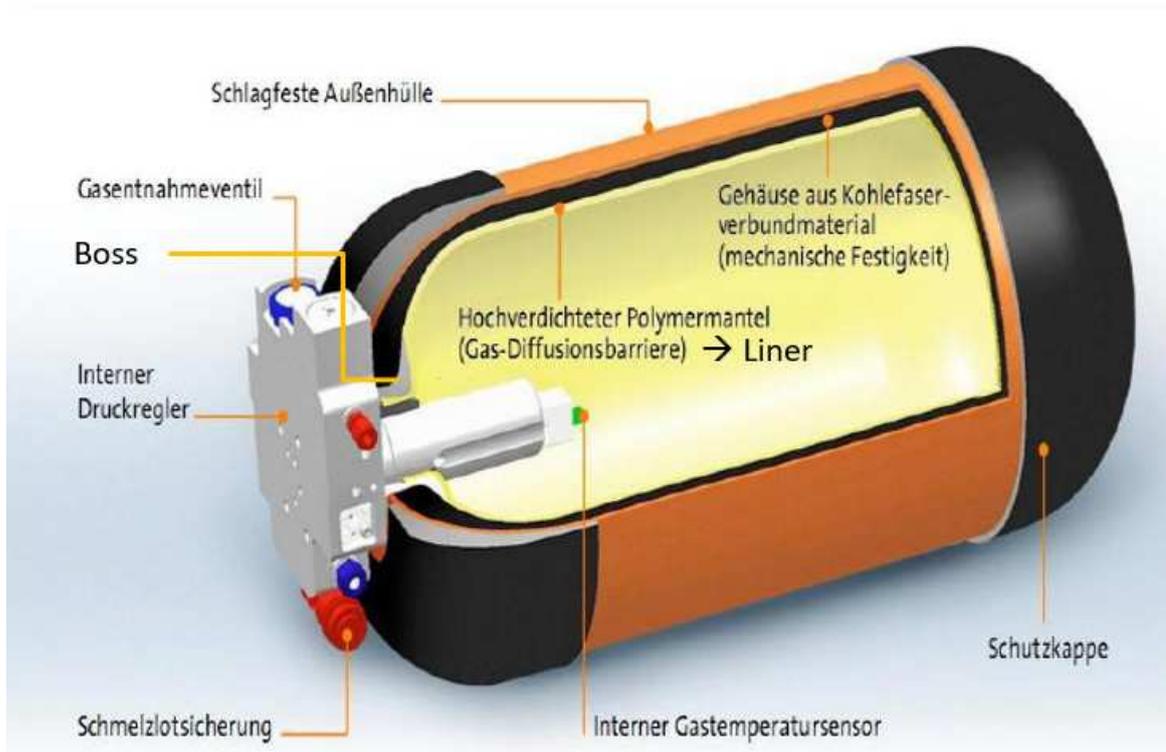


Abbildung 49: Aufbau Wasserstofftank (BS19 Hamburg, 2019)

Boss:

Der Boss ist bisher immer metallisch, zumeist aus Aluminium und bildet die Schnittstelle zwischen Tankinnerem und Ventileinheit. Er stellt die Öffnung des Tanks dar, über die der Tank befüllt wird. Der Boss ist direkt an den Wasserstofftank angebunden und besitzt ein Gewinde, sodass die Ventileinheit angeschraubt werden kann. In vielen Fällen sitzt die Dichtfläche für den O-Ring der Ventileinheit ebenfalls im Boss. Zusätzlich stellt der Boss die Aufnahme des Liners für den Wickelprozess dar. Dies ist allerdings nur eine Nebenfunktion und könnte theoretisch auch anders gelöst werden.

Liner:

Der Liner ist sozusagen der „Innentank“ der kompletten Tankkonstruktion. Er besteht bisher immer aus reinem Kunststoff bei Typ 4 Tanks oder aus Metall. Seine Hauptfunktion ist die Speicherung des Wasserstoffs, d.h. das Material des Liners muss dicht gegenüber dem kleinsten Molekül Wasserstoff sein. Die Permeationseigenschaften spielen daher bei dieser Anwendung eine große Rolle. Zudem dient der Liner als Wickelkern. Auf ihn werden die Kohlefasern aufgewickelt, die nachher die Festigkeit des Tanks realisieren.

Außenhülle:

Die Außenhülle nimmt die hohe Belastung durch den vorherrschenden Innendruck auf. Daher müssen hier teilweise sehr hohe Kräfte aufgenommen werden, was in diesem Fall über die Kohlefaser realisiert wird. Der Liner, der sich bei den hohen Drücken sehr stark verformen würde, wird an die CFK-Hülle angedrückt und überträgt die Kraft auf die eingebetteten Kohlefasern. Die Außenhülle fixiert durch ihre Stabilität auch die Teilkomponenten wie z.B. den Boss. Außerdem dient die Außenhülle als Schutz vor äußeren Einwirkungen, wie z.B. Kratzern, Schlägen, Beschuss, Flammen oder auch chemischen Substanzen. Es ist daher von Vorteil, wenn die Kunststoffmatrix, in die die Kohlefasern eingebettet sind, ein sehr widerstandsfähiges Material ist.

Ventileinheit:

Im Bild ist die Ventileinheit etwas genauer beschrieben, aber die Hauptfunktion der Ventileinheit ist das Befüllen und Entleeren des Tanks. In der Ventileinheit sind jedoch viele verschiedene Schutzvorrichtungen integriert, wie beispielsweise auch das TPRD (thermal pressure relief device = Temperaturdruckablassventil). Dieses dient dazu

den Wasserstoff kontrolliert bei einer Überhitzung des Tanks abzulassen, um eine schlagartige Explosion zu vermeiden. Für die Ventileinheit gibt es spezielle Hersteller, die die Schnittstelle zum OTV (On Tank Valve) klar vorgeben. In diesem Projekt soll daher dieses Element nicht genauer betrachtet werden, da es als Kaufteil erworben wird.

Schutzkappe:

Um den Tank vor schlagartigen Beanspruchungen und anderen äußeren Einwirkungen zu schützen, besitzen manche Tanks Schutzkappen. Evtl. kann bei einer stabilen CFK-Matrix auf diese Schutzkappen allerdings verzichtet werden.

6.3.2 Patentrecherche

Es gibt bezüglich Wasserstofftanks sehr viele Patente, die auf verschiedene Funktionen abzielen. Der kritische Bereich ist jedoch die Boss-Liner-Verbindung, für die auch sehr viele Patente vorhanden sind. Vor allem die Abdichtung der Verbindung zwischen Boss und Liner ist kritisch, da der Wasserstoff sehr klein ist und bei jeder kleinsten Undichtigkeit entweichen kann.

Die Ergebnisse der Patentrecherche wurden zusammengetragen und in einer Liste gesammelt. Teilweise sind die Patente sogar bereits abgelaufen. Bei Entscheidungsfindung bzgl. der Konstruktion unseres Wasserstofftank-Demonstrators aus Lauramid® bzw. Hicompelt® muss daher diese Patentrecherche miteinbezogen werden, sodass keine Patentrechte verletzt werden.

6.3.3 Entscheidungsfindung Konstruktion Wasserstofftank

Wie bereits erwähnt wurde für die Ideenfindung ein Konstruktionsworkshop durchgeführt. Die verschiedenen Ideen wurden teilweise als Zeichnungen oder auch als Konzeptidee schriftlich festgehalten.

Um die Ideenfindung anzukurbeln, wurden die verschiedenen Funktionen der Tankbauteile exakt aufgelöst und in einer Tabelle festgehalten. Außerdem wurden die anschließenden Ideen in einem morphologischen Kasten aufgelistet.

Tabelle 21: morphologischer Kasten

Bauteil	Konstruktions- variante 1	Konstruktions- variante 2	Konstruktions- variante 3	Konstruktions- variante 4	Konstruktions- variante 5	Konstruktions- variante 6
Liner	CFK-Liner	blasgeformter Liner	kurzfaserver- stärkter Liner	zweiteiliger, reibgeschweiß- ter Liner	metallischer Liner	ohne Liner (Verlorener Kern)
	Boss aus rei- nem Lauramid	Boss aus LMV	separate Ab- dichtung d es Bosses	thermisches Einbetten des Metallbosses	komplette isotensoide Form aus Metallboss	
Anzahl Bosse	einseitiger Anschluss	beidseitiger Anschluss				
Außenhülle	Wicklung nach Sicherheits- faktor 2,25 (ECE R134)					
Aufprallschutz + Beschichtung	Flammschutz- beschichtung + Aufprallschutz	keine Beschichtung + Aufprallschutz	keine Beschichtung + kein Aufprallschutz			
Ventileinheit	Verwendung	Verwendung OTV700 + zu- sätzliche TPRD				

Es wurde aber schnell deutlich, dass der morphologische Kasten als Bewertungsmittel schlecht bzw. nicht geeignet ist, da wir lediglich 2 Hauptfunktionen haben: der Boss und der Liner. Die Außenhülle ist durch unseren Fertigungsprozess klar vordefiniert. Außerdem ist durch die Permeationsversuche auch klar geworden, dass ein Liner bei unserem Tank nicht aus CFK bestehen kann und somit ein Lauramid®-Liner notwendig ist.

Die einzige Stelle der Konstruktion, die variabel ausgeführt werden kann ist die Schnittstelle zwischen Boss und Liner. Wie bereits bei der Patentrecherche beschrieben, gibt es hier bereits viele verschiedene Ausführungen auf dem Markt und auch viele patentrechtlich geschützte Konstruktionen. Daher wird vor allem die Ausführung diese Schnittstelle betrachtet, wodurch sich auch die Peripherie um diese Anbindung herum dementsprechend während der Konstruktion anpassen wird.

Es wurden daher verschiedene Konstruktionsideen gesammelt und anschließend bewertet. Dabei stellte sich schnell heraus, dass folgende Konstruktionsvariante am besten für uns geeignet ist:

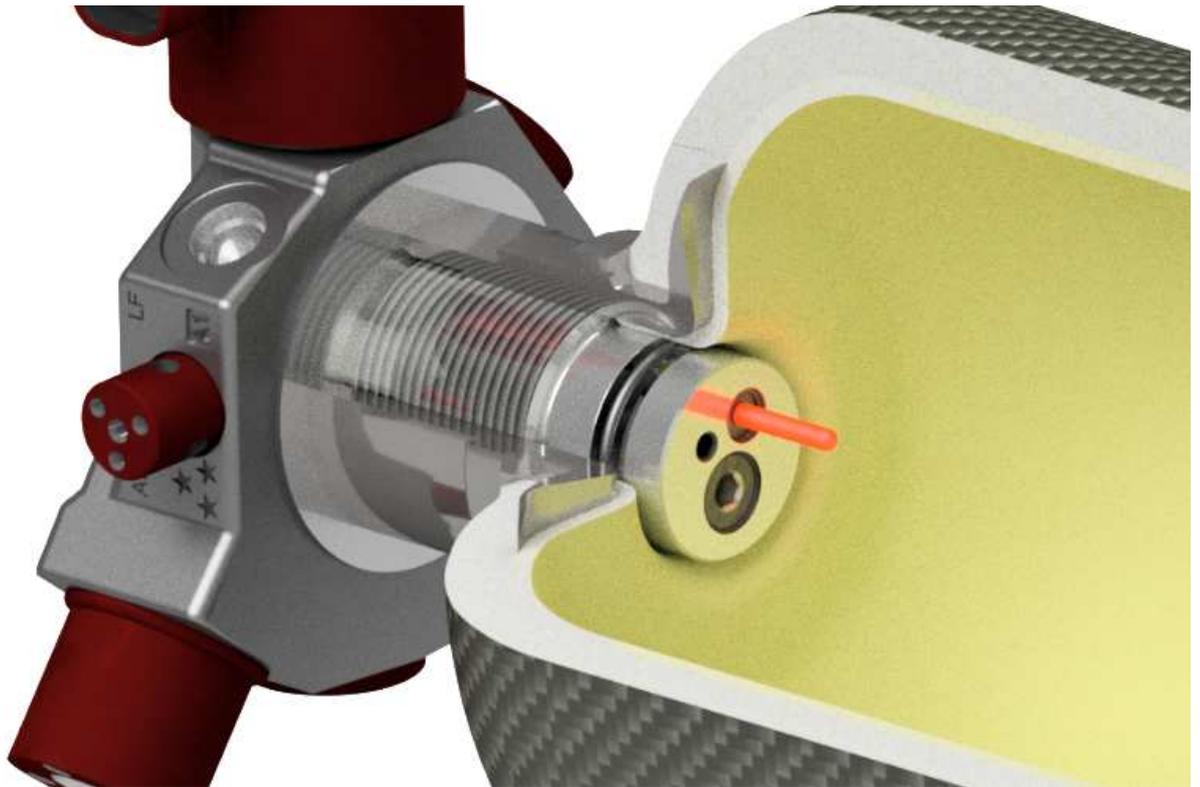


Abbildung 50: Konstruktionsvariante Boss-Liner-Verbindung

Bei dieser Konstruktionsvariante liegt die Dichtstelle zwischen OTV-Ventileinheit und dem Tank im Bereich des Kunststoffliners. Dies wird dadurch erreicht, dass der Liner eine Verlängerung in den Bossbereich besitzt, an dem die Dichtung des OTV sitzt. Auf diese Konstruktionsvariante wurde keine Patentanmeldung gefunden.

Folgende Vorteile ergeben sich durch die Konstruktion:

- Dadurch, dass die Dichtstelle zwischen OTV und Liner sitzt, ist nur eine Dichtstelle vorhanden. Der Liner muss an sich dicht sein und in dieser Schnittstelle. Würde diese Schnittstelle zwischen Boss und OTV sitzen, müsste zusätzlich der Boss zum Liner abgedichtet werden, was sich oftmals als sehr schwierig erweist.
- Die Konstruktion ist recht einfach gehalten. Der Boss hat nur die Aufgabe den OTV sauber anzubinden und kann daher sehr einfach und auch leicht ausgeführt werden. Es darf lediglich nicht zu großen Aufweitungen am Dichtbereich kommen, sodass die Schnittstelle dicht bleibt.
- Die Konstruktion kann ggf. bei Undichtigkeit schnell und einfach dahingehend angepasst werden, dass der Boss aufgedickt wird und dadurch die Schnittstelle wiederum zwischen Boss und OTV sitzt. Dann muss im Bereich zwischen Liner und Boss ein zusätzlicher Dichtring eingesetzt werden, der die Konstruktion allerdings wieder aufwändiger macht. Es gibt jedoch Alternativen bei „Nichtfunktion“ dieser Schnittstelle.

Der einzige Nachteil dieser Variante ist, dass nicht sicher gegeben ist, wie sich die Dichtstelle zwischen Dichtring des OTV und der Liner-Oberfläche verhält. Dies muss jedoch am realen Bauteil untersucht werden.

Es können hierzu jedoch vorab FEM-Berechnungen durchgeführt werden, um die Konstruktion so anzupassen, dass sich die Aufweitung des Bereichs in einer akzeptablen Größenordnung befindet. Dies muss im Anschluss betrachtet werden.

Aus diesen Gründen soll diese Konstruktionskonzept verfolgt werden. Die Ausdetaillierung der Schnittstelle findet in der folgenden Konstruktionsphase statt.

6.4 Wickeln

Im Rahmen des Projektes wurde die Wickelanlage am FIBRE mit einer elektronisch gesteuerten Abspuleinheit (EGA) von der Firma TEXMER GmbH erweitert. Mit dieser Vorrichtung wird die Fadenspannung über den gesamten Wickelprozess konstant gehalten, wodurch eine reproduzierbare Wickelqualität erreicht wird.

Diese EGA setzt sich aus einer Steuerung, einem elektrischen Motor, einer Spulenaufnahme, mehreren Topocrom beschichteten Rollen und einem Mini Messrad System zusammen.

Über die Steuerung wird die Fadenspannung, die am Motor anliegt, festgelegt. Über das „Mini Messrad“, wird der zurückgelegte Weg des Rovings in Abhängigkeit der Zeit berechnet, wodurch der Motor die Spule in Echtzeit bremsen oder beschleunigen kann. Die Topocrom Beschichteten Rollen reduzieren die Reibung an den sensiblen C-Faser Rovings, wodurch kaum Faserbrüche während der Zuführung zum Wickelkern entstehen.

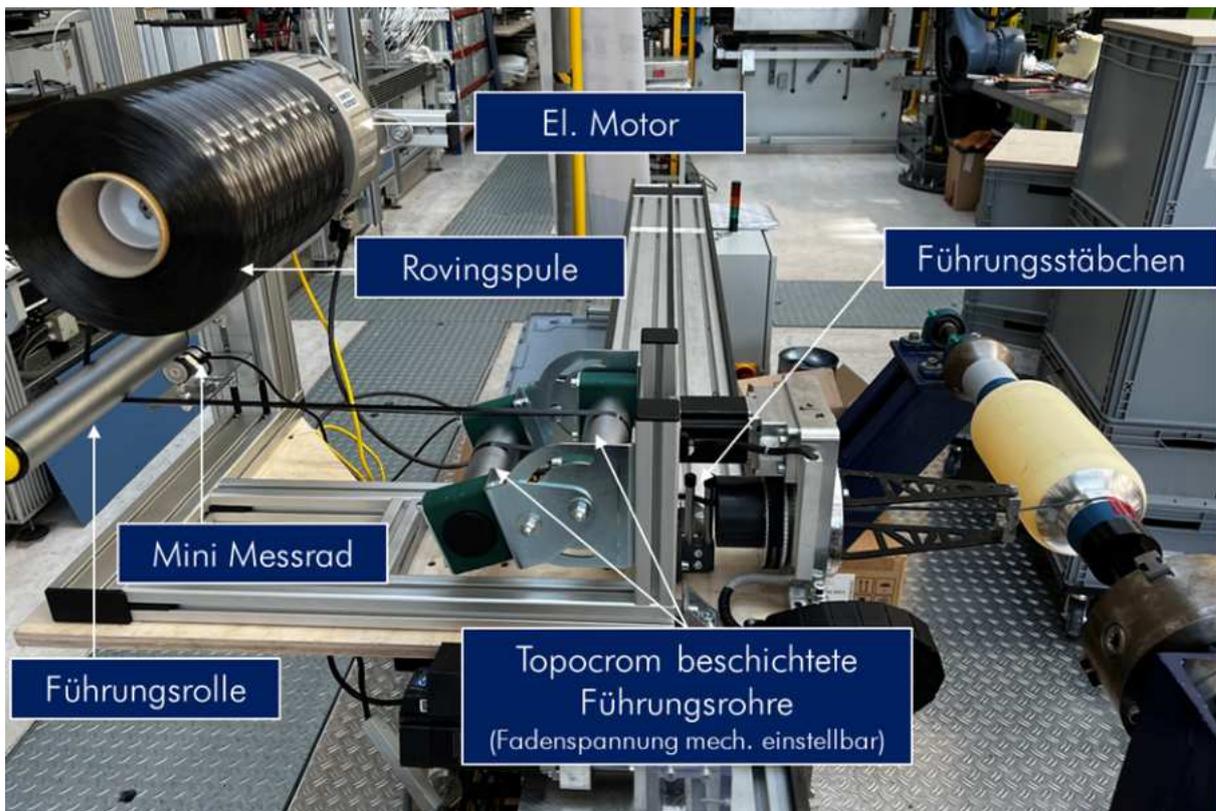


Abbildung 51: EGA und Führungssystem an der FIBRE Wickelanlage

Am Wickelkopf befindet sich zudem eine kleine mit Topocrom beschichtete Rolle und ein Fadenauge aus hochpolierter Keramik, um auch direkt bei der Rovingablage die Faserbrüche zu reduzieren. Das Fadenauge hält den Roving für die Ablage am Wickelkern zudem in Position.

In der nachfolgenden Abbildung ist die Rovingablage über den Wickelkopf zu erkennen.



Abbildung 52: Wickelkopf der Wickelanlage beim FIBRE

6.5 Berechnung Wasserstofftank

Auf Basis der ermittelten Materialkennwerte kann der Tank ausgelegt werden. Hier spielen vor allem die Faser-
verläufe eine große Rolle, da sich das Material anisotrop verhält. Der Lagenaufbau ist daher entscheidend für die
Festigkeit des Tanks und muss mit den Möglichkeiten des Wickelprozesses abgeglichen werden.

6.5.1 Erstausslegung

Bevor überhaupt Materialprüfungen durchgeführt wurden, wurde eine erste Abschätzung mithilfe der klassi-
schen Laminattheorie durchgeführt. Dadurch ergab sich eine grobe Vorahnung bzgl. Lagenaufbau und Wand-
stärke des Tanks bei den gegebenen Lasten, die aus den Use-Cases resultieren.

Die Erstausslegung wird später durch FEM-Berechnungen genauer untersucht. Die Vorauslegung soll vorab ledig-
lich eine grobe Richtung vorgeben, in welche Materialdicken die Überlegungen gehen müssen.

Die Berechnungen wurden vereinfacht über eine Excel-Tabelle dargestellt. Hierbei ergaben sich folgende Daten:

- Wickelwinkel Hoop Layers (zylindrischer Bereich): 85°
- Wickelwinkel Helical Layers (zylindrischer Bereich + Dom-Bereich): ca. 15°
- Wandstärke der Tank-Außenhülle: ca. 12mm

Für die Berechnung wurde die Kesselformel herangezogen. Die Belastung ist optimal geeignet für eine CFK-Struk-
tur, da prinzipiell auf die Fasern nur eine Zugbelastung wirkt.

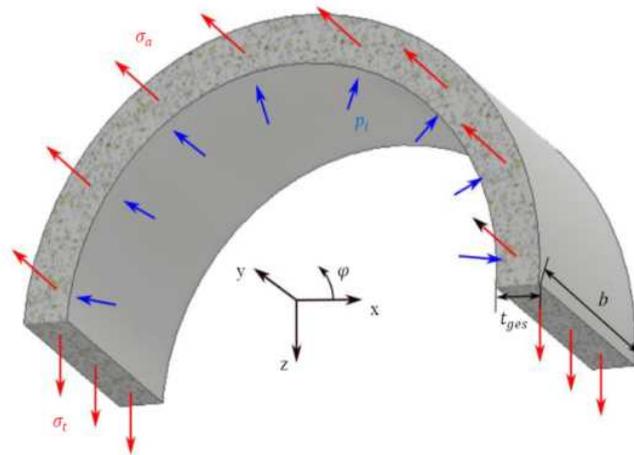


Abbildung 53: Spannungen auf einen Drucktank nach der Kesselformel

6.5.2 Ermittlung Lagenaufbau

Um den Lagenaufbau exakt zu bestimmen, wurden FEM-Berechnungen durchgeführt. Hierzu muss ein spezielles Modell aufgebaut werden. Folgende Annahmen wurden beim Modellaufbau getroffen und durch mehrere Berechnungen angepasst:

- Tanklänge 640mm
- Tankdurchmesser 140mm
- Schalenelemente für Composite Tank
- Alu-Bosse wurden modelliert
- Einspannung über die Alu-Bosse
- Innendruck von 1750bar (Sicherheitsfaktor 2,5)
- Drei Faserwinkel: 89° im zylindrischen Bereich, 34° und 54° im zylindrischen Bereich und in den Dom-Bereichen

Für die Berechnung wurden außerdem die in AP1 ermittelten Materialkennwerte herangezogen:

Tabelle 22: Für die Berechnung verwendete Materialkennwerte

Steifigkeiten:					
E1	E2	Nu12	G12	G13	G23
91700	4520	0,2825	1940	1940	1940
Festigkeiten:					
Longitudinal Tensile Strength	Longitudinal Compressive Strength	Transverse Tensile Strength	Transverse Compressive Strength	Longitudinal Shear Strength	Transverse Shear Strength
1370	975	25,1	40	54	54

Der Lagenaufbau wurde speziell über die Software Cadwind aufgebaut, um die Faserondulierung zu berücksichtigen. Diese Software ist speziell für gewickelte Bauteile ausgelegt.

Bei der FEM-Berechnung wurde schnell deutlich, dass eine dritte Faserwicklungsrichtung notwendig wird: die die Knuckle-Lagen. Diese minimieren die Spannungsspitzen an den Übergängen vom zylindrischen Teil in den Dom-Bereich. In der folgenden Abbildung sind alle Lagen beschrieben:



Abbildung 54: Beschreibung der Hoop- (a), Knuckle- (b) und Helicallagen (c)

Durch die FEM-Berechnung wurde folgender Lagenaufbau für den Tank ermittelt:

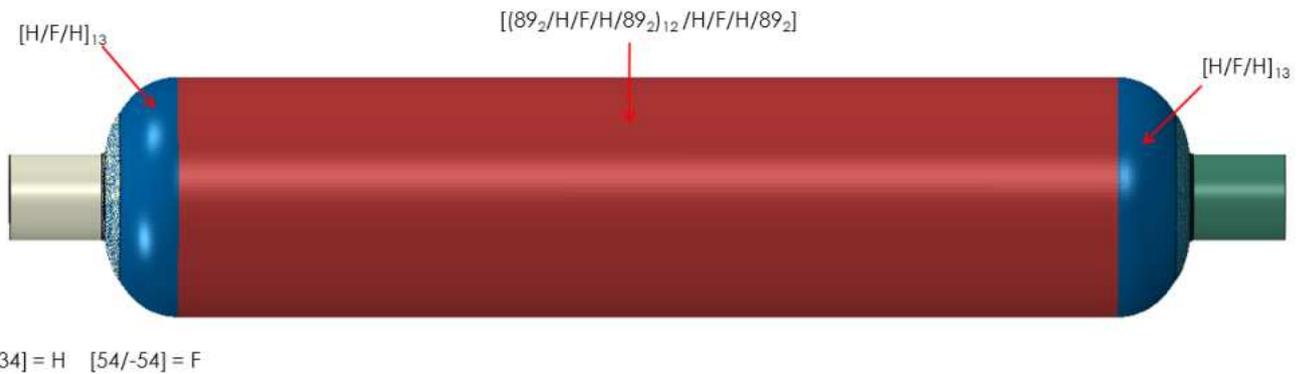


Abbildung 55: berechneter Lagenaufbau des Tanks

Es werden 50 Lagen 89°, 26 Lagen ±34° und 13 Lagen ±54° verwendet. Jede Lage ergibt eine Dicke von 0,14mm, wodurch wir bei einer Gesamtdicke der CFK-Außenhülle von ca. 18mm landen. Der Dombereich ist etwas dünner, da hier die Hoop-Lagen nicht abgelegt werden, sodass dieser im dünnsten Bereich ca. 10mm Wandstärke hat.

Der Dombereich ist hierbei durch eine isotoisoide Kontur ausgeformt, da diese sich bzgl. der Festigkeit optimal verhält. Dabei geht die Wandstärke von 18mm im zylindrischen Bereich langsam in die 10mm im dünnsten Dombereich über.

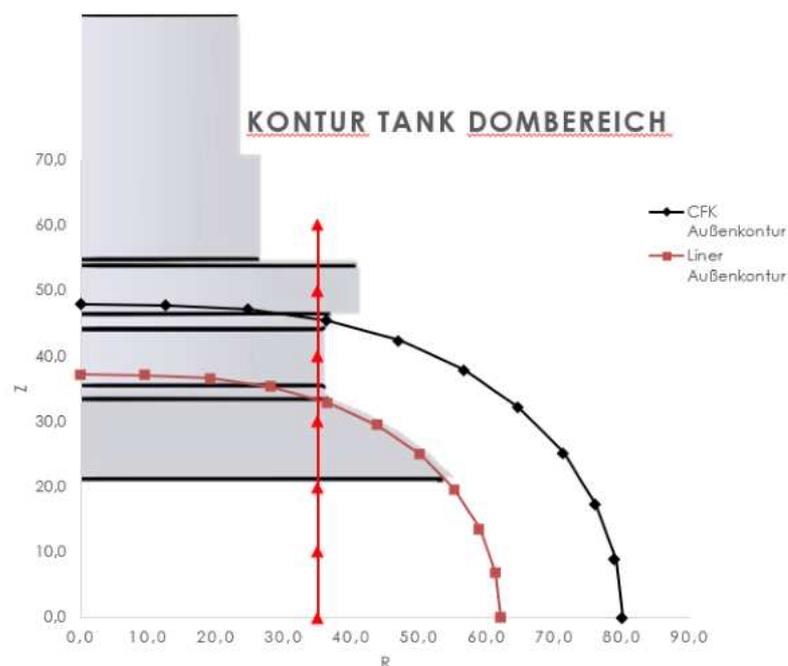


Abbildung 56: isotoisoide Kontur der Dombereiche des Tanks

Bei dem berechneten Lagenaufbau sind keine Bedenken bzgl. Faserbruch vorhanden. Hierzu wurde der Hashin-Index ermittelt. Im kritischsten Bereich, was in diesem Fall dem zylindrischen Bereich entspricht, ist ein Sicherheitsfaktor von 3,7 vorhanden.

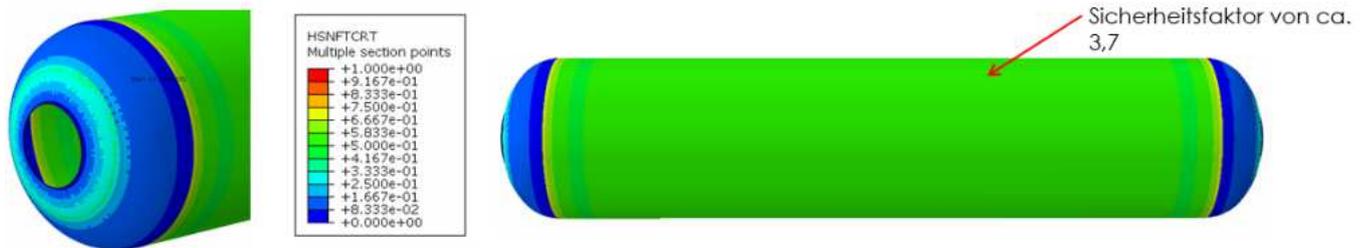


Abbildung 57: Hashin-Index unter Zugbelastung

6.5.3 Anpassung Lagenaufbau

Auf Grundlage der ermittelten Materialkennwerte aus den Materialprüfungen und der Erfahrung aus den Wickelversuchen mit dem kleineren Drucktank konnte der finale Drucktank ausgelegt werden.

Der finale Drucktank wurde auf Grundlage der analytischen und simulativen Berechnung des ursprünglich im Projekt geplanten Drucktankgeometrie mit einer Länge von 640mm und einem Lineraußendurchmesser von 140mm ausgelegt.

Die ersten Berechnungen haben gezeigt, dass im Übergangsbereich von Zylinder zu Dom, verstärkungslagen in 54° gelegt werden müssen, um die Spannungsüberhöhungen zu reduzieren. Diese wurden daher auch im finalen Tank berücksichtigt.

Folgende Randbedingungen wurden für den finalen Drucktank Demonstrator festgelegt:

Tabelle 23: Randbedingungen für den finalen Drucktank Demonstrator

Tanklänge	640 mm
Liner Außendurchmesser	200 mm
Boss Außendurchmesser	70 mm
Innendruck	700 bar
Sicherheitsfaktor	2,25

Aus der Geometrie ergeben sich zudem folgende Faserwinkel:

Tabelle 24: Faserwinkel

	Wickelwinkel	Lagenanzahl
Hoop Lagen (Radial Lagen)	89°	48
Helical Lagen (Axial Lagen)	21°	48
Knuckle Lagen (Axial Lagen)	54°	24

H = +21/-21 F = +54/-54

Folgende Materialkennwerte, die 2023 am Faserinstitut experimentell ermittelt wurden, wurden in die Simulation mit eingepflegt.

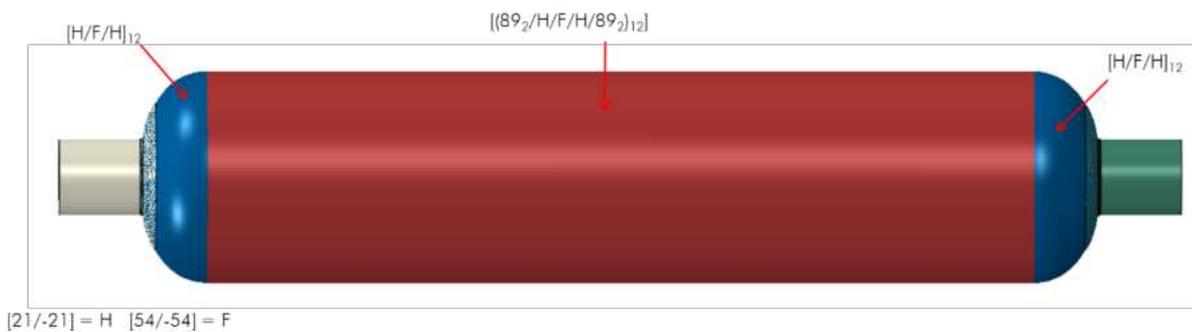
Tabelle 25: Experimentell ermittelte Materialkennwerte

Steifigkeiten:					
E1	E2	Nu12	G12	G13	G23
91700	4520	0,2825	1940	1940	1940
Festigkeiten:					
Longitudinal Tensile Strength	Longitudinal Compressive Strength	Transverse Tensile Strength	Transverse Compressive Strength	Longitudinal Shear Strength	Transverse Shear Strength
1370	975	25,1	40	54	54

Analytisch hat sich hieraus eine Wandstärke von 17,2 mm ergeben, wobei die analytische Berechnung Verstärkungslagen in 54° nicht berücksichtigt.

Auf Basis vorangegangener FEM-Simulationen wurden als Wandstärke 20mm definiert. Bei einer Lagendicke von 0,17 mm entspricht dies insgesamt 120 Lagen. Auf Grundlage der Erfahrungswerte aus vorangegangenen Simulationen wurde folgender Lagenaufbau definiert: $[(89_2/H/F/H/89_2)_{12}]$

In der nachfolgenden Darstellung ist das Model und die Bereiche mit entsprechenden Lagen definiert.



Bei diesem Lagenaufbau liegen die zulässigen Zug- und Druckspannungen unter den Grenzwerten, die in den Bildern in Abb. ... dargestellt sind:

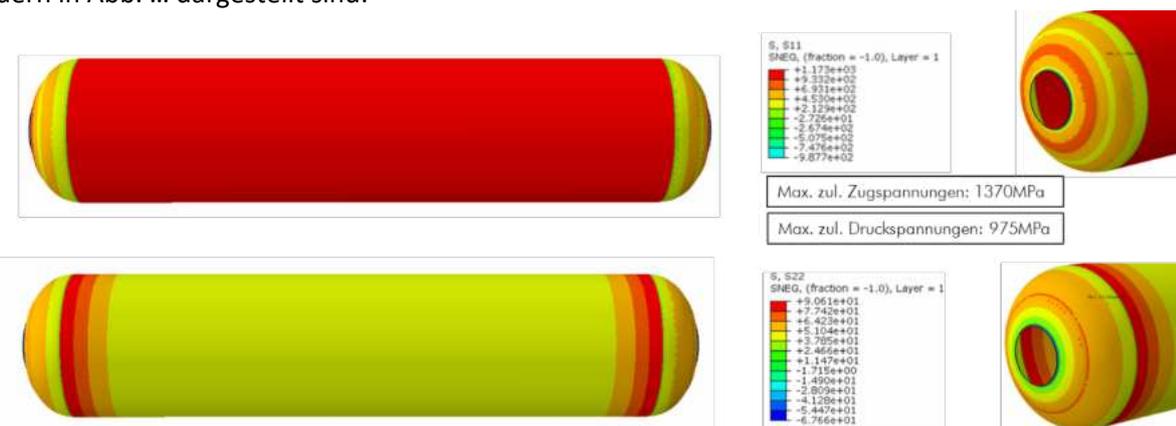


Abbildung 58: Darstellung der Zug- und Druckspannungen in und quer zur Faserrichtung

Anhand des Hashin Kriterium können verschiedene Ausfallmodi für Faserverbundmaterialien identifiziert werden. Der kritische Ausfall ist im Falle eines Drucktanks der Faserausfall durch Zugbeanspruchung. Im zylindrischen Teil des Drucktanks erfährt das Material die höchsten Spannungen. Anhand der FEM-Berechnung konnte in dem Fall ermittelt werden, dass bei dem definierten Lagenaufbau im zylindrischen Bereich ein Sicherheitsfaktor von über 3,7 eingehalten werden kann.

Dies ist hiermit zu begründen, dass der Wickelprozess ein kontinuierlicher Prozess ist und somit auch die im 21° und 54° gelegten Fasern teilweise Radialspannungen aufnehmen können. Da diese jedoch in einer definierten

Menge für die Aufnahme von Axialspannungen benötigt werden, ist der Tank im zylindrischen Bereich strukturell überausgelegt.

Eine Optimierung wurde in dem Fall nicht weiter durchgeführt.

Der Lagenaufbau wurde in einem G-Code für die Wickelanlagensteuerung geschrieben, wodurch die Fasern dem Liner Lastgerecht abgewickelt werden konnten. In den nachfolgenden Bildern sind die einzelnen Lagenwinkel dargestellt.



Abbildung 59: gewickelte Hoop- (89°) und Helical- (21°) Lagen



Abbildung 60: Gewickelte Knuckle- (54°) und Helical- (21°) Lagen

6.6 Einfrierung Konstruktionsstand 19.12.2022

Zum 19.12.2022 wurde der Konstruktionsstand eingefroren, um mit Infiltrationsversuchen starten zu können. Da wir den Schritt gewählt haben, zuerst Infiltrationsversuche mit einem verkürzten Tank durchzuführen, können ggf. Änderungen an der Konstruktion für den Demonstrator später im Projektverlauf noch angestrebt werden.

Die kritische Stelle bei der Konstruktion ist die Boss-Liner-Verbindung. Bei den hohen Drücken von 700bar ist eine Aufweitung des Bosses incl. Liner nicht komplett zu vermeiden. Dadurch wird die Dichtwirkung des Dichtrings der Ventileinheit verschlechtert.

Es wurde hierzu eine FEM-Berechnung durchgeführt. Dabei ergab sich bei der vollen Druckbelastung eine Aufweitung des Bosses incl. Liner im Bereich der Dichtung von 0,2mm.

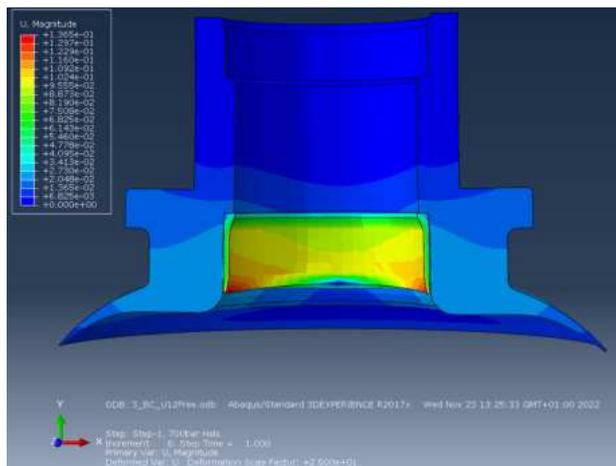


Abbildung 61: FEM-Berechnung Aufweitung Boss bei 700bar

Diese kritische Stelle der Konstruktion muss im Anschluss nochmal betrachtet werden. Nichtsdestotrotz wurde der Konstruktionsstand in diesem Status eingefroren, um wie bereits erwähnt in die ersten wichtigen Infiltrationsversuche einsteigen zu können.

Die Konstruktion sieht aktuell folgendermaßen aus:



Abbildung 62: Eingefrorener Konstruktionsstand des verkürzten Wasserstofftanks

7 Infiltrationsversuche

Um die Infiltration des Tanks simulieren zu können, werden Permeabilitätskonstanten notwendig. Diese sind für das Material Hicompelt® aktuell noch unbekannt.

Vorab sollen Versuche mit dem Plattenwerkzeug durchgeführt werden, sodass anschließend darauf aufbauend an einem verkürzten Tank-RTM-Werkzeug ebenfalls Infiltrationsversuche durchgeführt werden können.

7.1 Plattenversuche

Standardmäßig werden Infiltrationsversuche an Plattenwerkzeugen durchgeführt. Ein solches ist bei der Fa. Handtmann vorhanden und soll dementsprechend angepasst werden, sodass Infiltrationsversuche durchgeführt werden können.

Beim T-RTM-Werkzeug für den Tank soll ein Ringanguss (= Linienanguss) verwendet werden.

7.1.1 Instrumentierung T-RTM-Plattenwerkzeug

Das vorhandene Platten-Werkzeug muss instrumentiert werden, d.h. es sollen Druck- und Temperatursensoren angebracht werden, mit deren Hilfe der Schmelzefortschritt beobachtet werden kann.

Die Drucksensoren werden hierbei auf der Werkzeuoberhälfte angebracht und die Temperatursensoren auf der Werkzeugunterhälfte. Im CAD-Modell sieht das Plattenwerkzeug von oben wie folgt aus:

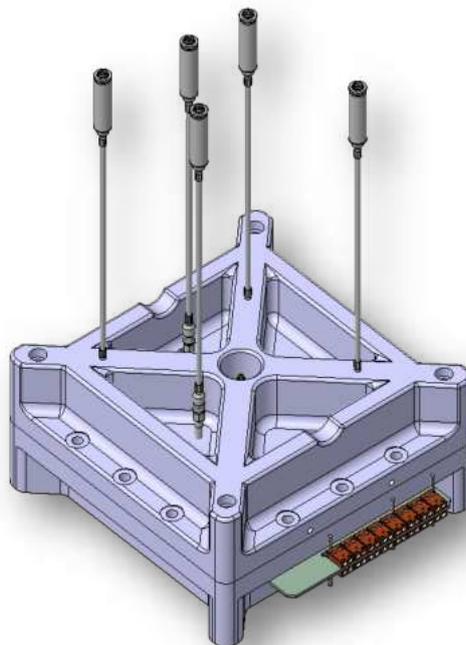


Abbildung 63: instrumentiertes T-RTM-Plattenwerkzeug

Die Temperatur- und Drucksensoren müssen hierbei nummeriert werden, damit immer von den gleichen Messdaten gesprochen wird.

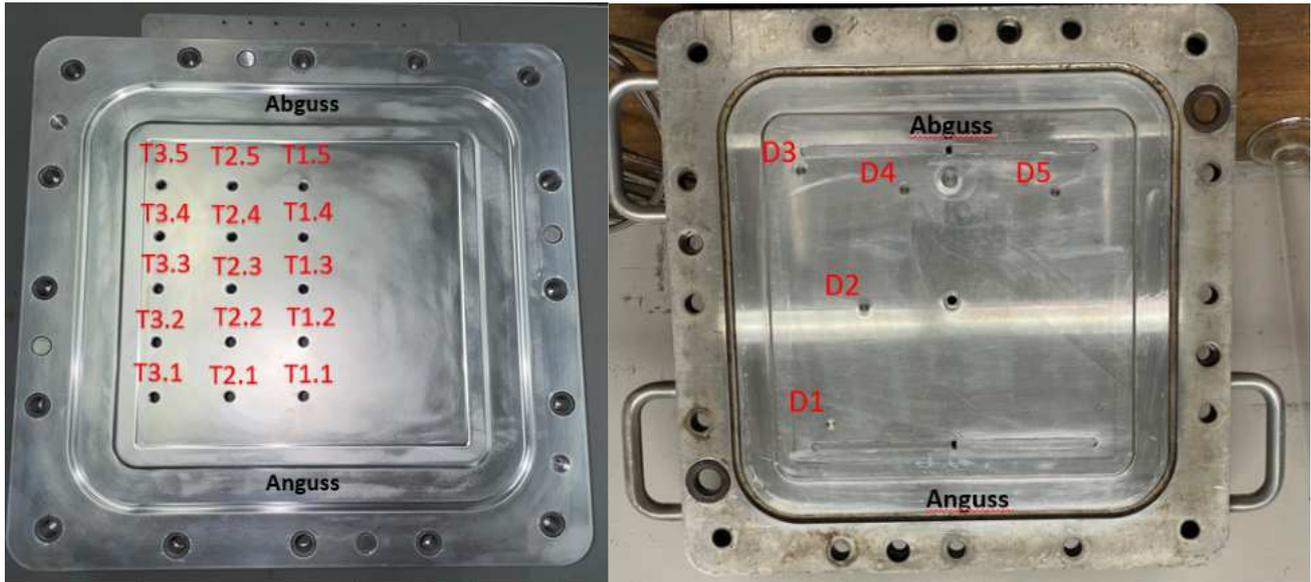


Abbildung 64: Sensornummerierung auf Werkzeugunter- und -oberhälfte

Die Anordnung der Temperatursensoren wurde gewählt, damit eine Werkzeughälfte komplett abgedeckt ist. Die andere Werkzeughälfte ist dementsprechend symmetrisch hierzu.

Die Drucksensoren wurden in Abständen gewählt, dass sie sowohl für den mittigen Punktanguss als auch für die seitlichen Linienangüsse geeignet sind.

7.1.2 Versuchsplanung

Bei den Versuchen wird von einem Standversuch ausgegangen. Dieser Versuch entspricht auch den Standardversuchen bei der Fa. Handtmann.

Der Standardversuch ist wie folgt aufgebaut:

- Materialdicke: 2mm
- Faserlagenaufbau: 0/90/90/0
- Faservolumengehalt: 50%
- Materialvariante: Lauramid A-Qualität
- Infiltrationsdruck: 7bar
- Angussart: Linienanguss

Bei jedem weiteren Versuch soll nach Möglichkeit nur ein Parameter geändert werden, sodass der Einfluss dieses Parameters deutlich wird. Dadurch ergab sich folgende Versuchsmatrix:

Tabelle 26: Versuchsplan Infiltrationsversuche

Versuch	Materialstärke	Faserlagen	Faservolumengehalt	Materialvariante	Druck	Anguss
Standard	2mm	0/90/90/0	50%	Standard	7 bar	Linienanguss
1. Versuch: Materialstärke	1,5mm	0/90/0	50%	Standard	7 bar	Linienanguss
2. Versuch: Materialstärke	5mm	0/90/90/0//0/90//0/90/90/0	50%	Standard	7 bar	Linienanguss
3. Versuch: Faserlagen	2mm	Rein Lauramid	0%	Standard	7 bar	Linienanguss
4. Versuch: Faserlagen	2mm	DU-Gelege 0/0/0/0	50%	Standard	7 bar	Linienanguss
5. Versuch: Faserlagen	2mm	Tankaufbau 15/85/95/-15	50%	Standard	7 bar	Linienanguss
6. Versuch: Faservolumengehalt	2mm	0/90/0	37%	Standard	7 bar	Linienanguss
7. Versuch: Materialstärke + FVG	4mm	0/90/0/90/90/0	37%	Standard	7 bar	Linienanguss
8. Versuch: Materialvariante	2mm	0/90/90/0	50%	-----	7 bar	Linienanguss
9. Versuch: Druck	2mm	0/90/90/0	50%	Standard	1 bar	Linienanguss
10. Versuch: Druck	2mm	0/90/90/0	50%	Standard	3 bar	Linienanguss
11. Versuch: Druck	2mm	0/90/90/0	50%	Standard	5 bar	Linienanguss
12. Versuch: Anguss	2mm	0/90/90/0	50%	Standard	7 bar	Punktanguss seitlich
13. Versuch: Anguss	2mm	0/90/90/0	50%	Standard	7 bar	Punktanguss seitlich
14. Versuch: Anguss + Faserlagen	2mm	UD-Gelege 0/0/0/0	50%	Standard	7 bar	Punktanguss seitlich

7.1.3 Versuchsdurchführung

Die Versuchsdurchführung ist durch den Labor- Herstellungsprozess gegeben. Hier wird die Schmelze in 2 Rundkolben vorbereitet und anschließend im Ofen im dafür vorgesehenen Drucktopf vermischt. Dieser Drucktopf wird anschließend verschlossen Druck auf die Schmelze gegeben. Sobald die Abklemmung unterhalb vom Drucktopf geöffnet wird, infiltriert die Schmelze ins Werkzeuginnere. Sobald die Schmelze aus dem Werkzeug (aus dem Ofen) austritt, wird der Abgusskanal verschlossen.

- Schritt 1: Beginn der Aufzeichnung
- Schritt 2: Öffnen Ofentür
- Schritt 3: Vermischen der Schmelze
- Schritt 4: Infiltrationsbeginn
- Schritt 5: Schmelzeaustritt

Anbei ist beispielhaft eine Temperaturreihe dargestellt:

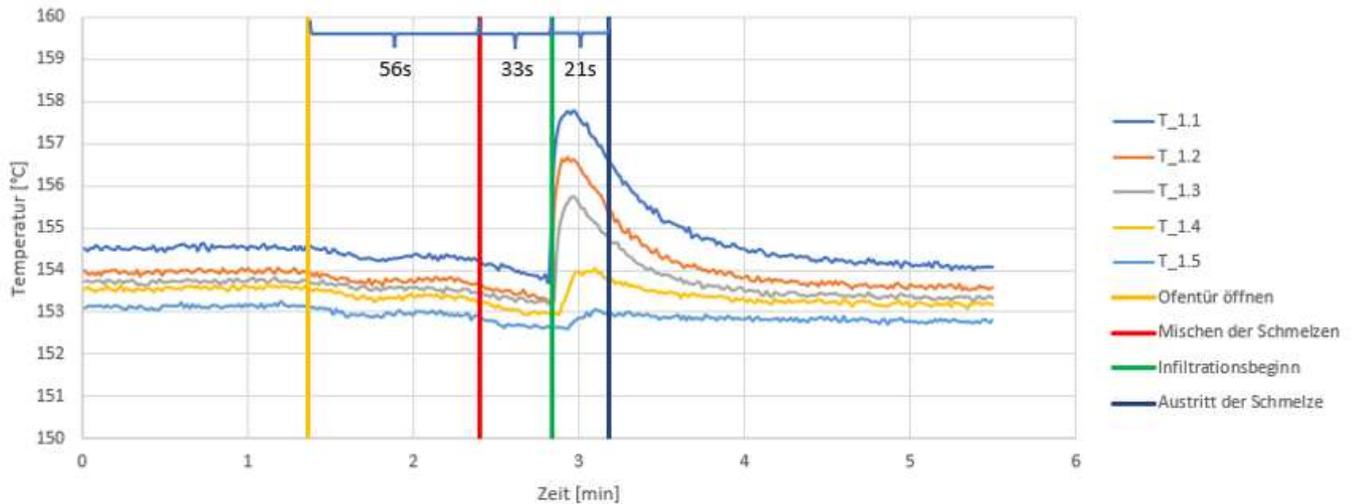


Abbildung 65: Versuchsdurchführung Infiltrationsversuch

7.1.4 Versuchsergebnisse

Aus den Versuchen können verschiedene Erkenntnisse gezogen werden. Diese werden nun nacheinander vorgestellt.

7.1.4.1 Temperaturerhöhung

Die Temperaturerhöhung an den Temperatursensoren ist nur sehr gering. Meist kann nur an den vorderen Sensoren eine Veränderung erkannt werden. Es sei denn, der Faservolumengehalt verringert, dann ist an jedem Sensor eine Temperaturveränderung zu erkennen.

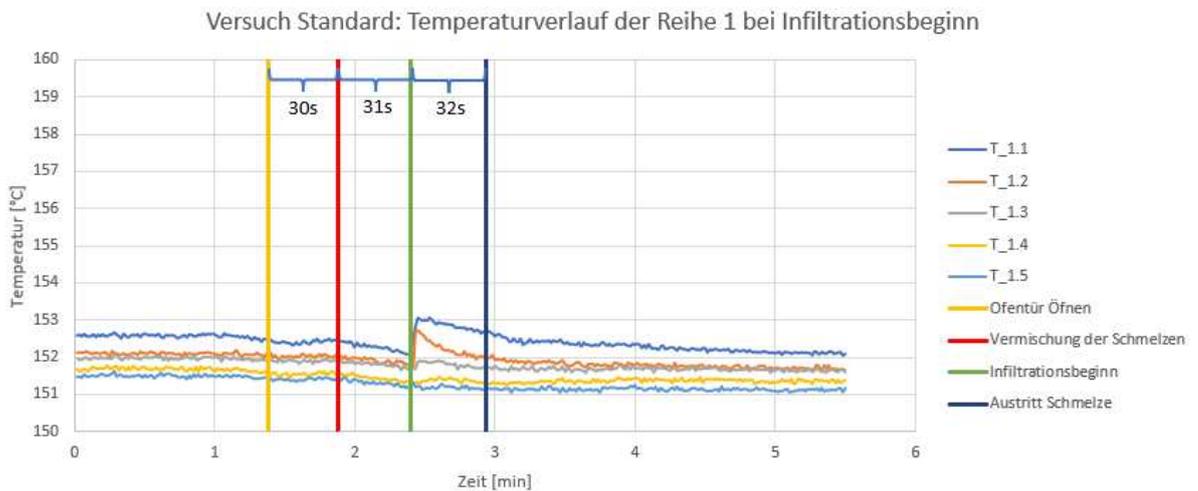


Abbildung 66: Temperaturverlauf bei Infiltrationsbeginn (Standard-Versuch)

Die Kohlefaser ist ein sehr guter Wärmeleiter. Dadurch passt sich die Schmelztemperatur schnell an die Werkzeugtemperatur an. Bei niedrigeren Faservolumengehalten dauert dieser Prozess etwas länger, weswegen auch größere Temperatursprünge zu erkennen sind.

7.1.4.2 Infiltrationsgeschwindigkeit

Je höher der Druck und je niedriger der Faservolumengehalt ist, desto schneller wird das Bauteil infiltriert. Etwas irreführend bei den Versuchen mit niedrigem faservolumengehalt war, dass die Drucksensoren sehr schnell anspringen, jedoch die Schmelze erst später austritt. Dies liegt daran, dass es zu Faserverschiebungen kommt und dadurch der Abgusskanal sozusagen verstopft wird.

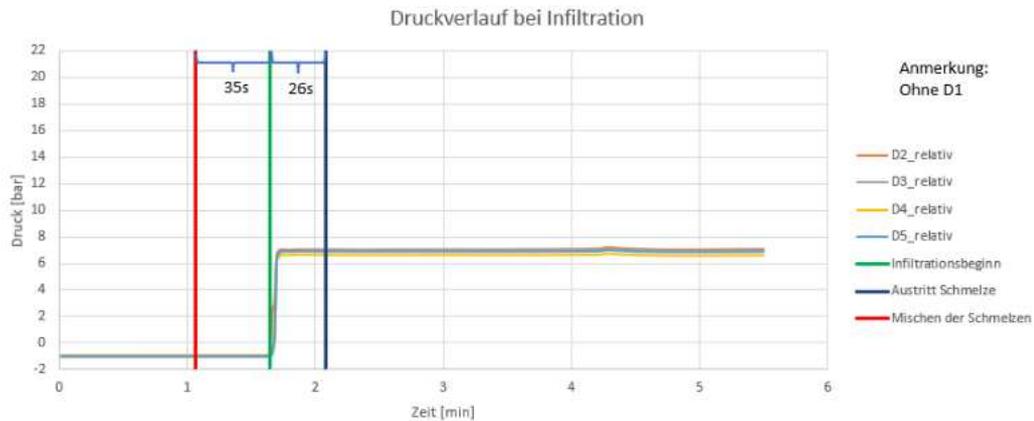


Abbildung 67: Druckverlauf bei niedrigem Faservolumengehalt (ca.37%)

7.1.4.3 Niederdruckversuche

Die Versuche mit sehr niedrigem Infiltrationsdruck (1bar) wurden nicht komplett infiltriert. Dadurch ergab sich auch hier ein interessanter Druckverlauf. Zu Beginn findet ein Druckausgleich im Werkzeug statt. Bei dem Drucksensor D1, der sich sehr nahe am Anguss befindet, baut sich hier schnell der Druck aus, die anderen Drucksensoren kommen nicht auf den vollen Druck, was dafür spricht, dass diese Bereiche schlechter getränkt sind. Die Schmelze verteilt sich trotzdem im Werkzeug. Allerdings ist die Viskosität der Schmelze nach einer gewissen Zeit so hoch, dass das Material nicht mehr nachfließen kann. Dadurch baut sich der Druck wieder ab.

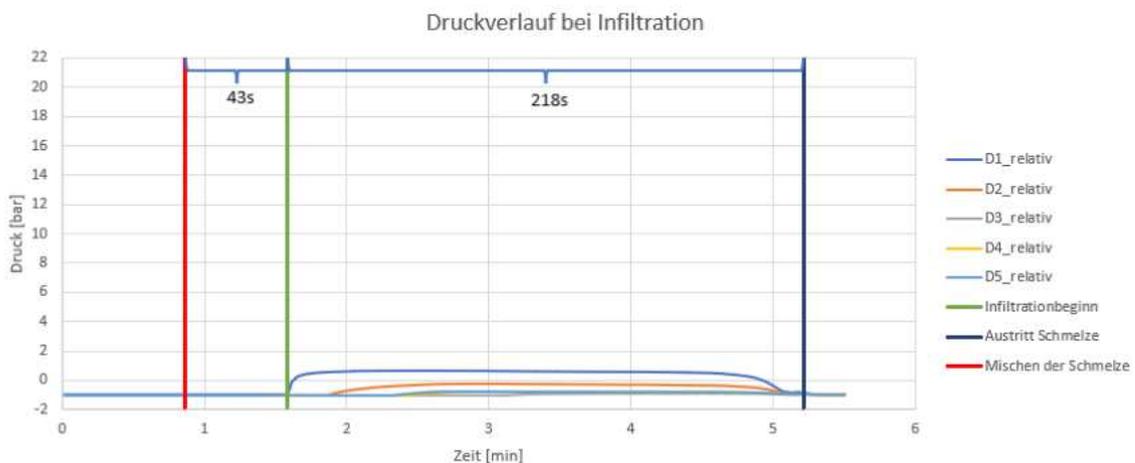


Abbildung 68: Druckverlauf bei geringem Infiltrationsdruck (1bar)

Wäre die Platte komplett befüllt, wären alle Drucksensoren irgendwann bei 1bar Überdruck. Diese Druckkurve ist auch typisch für eine Vakuuminfusion, bei der der Hahn nicht geschlossen wird. Auch hier kann der Druck irgendwann abfallen, wenn der Angusskanal verschlossen wird.

7.2 Demonstrator- Tankversuche

Da die Infiltrationsversuche am Plattenwerkzeug zwar eine Permeabilitätskonstante ergeben, diese aber auch abhängig von Geometrie und Lagenaufbau ist, sollen Vorversuche an einem verkürzten Demonstrator-Tank durchgeführt werden. Hier sollen die geplanten Angussysteme, das Werkzeugkonzept und die Tiefeninfiltration des Bauteils in einem kleineren Maßstab betrachtet werden.

Die Konstruktion des verkürzten Werkzeugs war zu Projektbeginn nicht geplant, erscheint aber sinnvoll, um die Kinderkrankheiten des Prozesses im kleinen Maßstab ausbessern zu können. Dadurch werden teure Nacharbeiten und Änderungen am T-RTM-Werkzeug für den Prototypen-Tank vermieden.

7.2.1 Konstruktion T-RTM-Werkzeug Demonstrator-Tank

Wichtig ist bei diesem Werkzeug die gleiche Vorgehensweise wie beim geplanten größeren Werkzeug zu wählen. Eine große Herausforderung stellt die Infiltration des dicken Lagenpakets dar. Die Schmelze ist beim Infiltrationsprozess zwar extrem dünnflüssig, allerdings steigt die Viskosität nach einer gewissen Zeit an, sodass die Infiltration nicht zu lange dauern darf. Daher soll mit Ringangüssen gearbeitet werden, wodurch die Schmelze sehr schnell rund um den Tankumfang verteilt wird und dadurch eine saubere Fließfront in beide Richtungen ausbilden kann.

Im verkürzten Werkzeug soll die Fließfront in eine Richtung explizit betrachtet werden, um die Länge zwischen den Angusskanälen für das Prototypen-Werkzeug überprüfen zu können. Es werden zwischen dem An- und Abguss Drucksensoren installiert, sodass die Schmelzefront beobachtet bzw. nachvollzogen werden kann.

Ein weiterer wichtiger Punkt ist das Abdicht- und Entformungskonzept des Tanks. Es dürfen keine Hinterschnitte vorhanden sein, die die Entformung des Tanks unmöglich machen. Auch Schwindungsthemata müssen hier berücksichtigt werden, vor allem wenn Reinpolyamidbereiche angebracht werden. Das Werkzeug muss für die Infiltration sauber abgedichtet werden. Hier spielt auch das Abdichtkonzept zum Tankinneren eine wichtige Rolle, da die Infiltration der dünnflüssigen Schmelze auch den Nachteil mit sich bringt, dass die Schmelze über jeden kleinsten Spalt ins Tankinnere dringen kann.

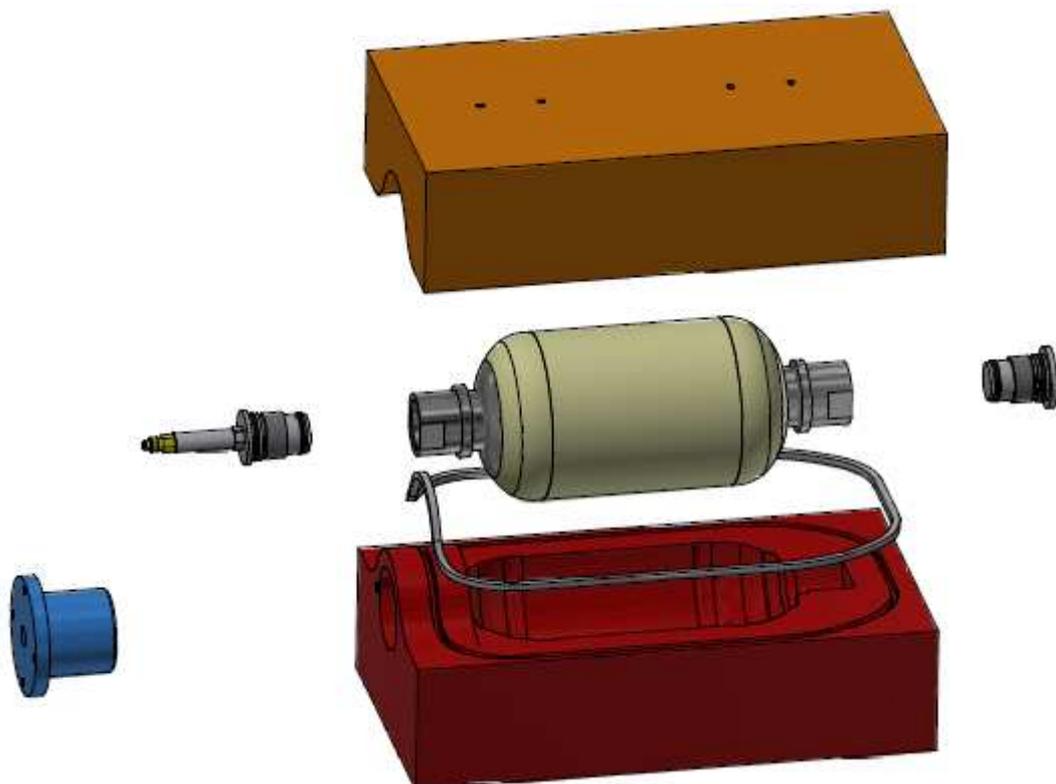


Abbildung 69: Werkzeugkonzept verkürzter Tank

Um die Infiltration der Schmelze ins Tankinnere zu verhindern, werden 2 Endverschlüsse verwendet, die wie die Ventileinheit bzw. der EndPlug den Tank verschließen. An einer Seite wird zusätzlich ein Druckluftanschluss vorgesehen, sodass der Tank während der Infiltration von Innen bedruckt werden kann. Dies ist notwendig, da der Liner bei 160°C, also bei Infiltrationstemperatur, an Wärmeformstabilität verliert. Dadurch laufen wir Gefahr, dass der Liner bei Infiltration und Aufbringung des Drucks in sich kollabiert und dadurch die Geometrie des Tanks nicht gehalten wird.

Daher sollen verschiedene Versuche gefahren werden, wie dies vermieden werden kann. Entweder muss der Infiltrationsdruck gleich groß wie der Innendruck sein oder es kann ein höherer Infiltrationsdruck gewählt werden, um die Infiltration etwas zu verbessern. Die Wärmeausdehnung des Liners wird die Fasern vermutlich auch etwas spannen und ggf. den Faservolumengehalt etwas erhöhen, wodurch wiederum die Infiltration erschwert wird.

Das Abdichtkonzept des Werkzeugs ist so gewählt, dass nur 2 Formhälften zueinander abgedichtet werden müssen. Die Brücke, die auf dem Bild des Werkzeugkonzepts zu sehen ist, ist notwendig, um den Druckluftanschluss ins Tankinnere anbringen zu können. Hier entsteht eine zusätzliche Dichtstelle, die über einen seitlichen Flansch realisiert wird. Wichtig ist jedoch, dass keine 3 Formhälften zueinander abzudichten sind.

Auch die Entformung wurde bei dem Werkzeugkonzept berücksichtigt. Nach Entnahme des seitlichen Flanschs sollte es möglich sein, den Tank etwas anzuheben. Anschließend kann er Richtung seitlichem Flansch bewegt und schließlich zur anderen Seite schräg herausgenommen werden. Dabei sind im Werkzeug keine Hinterschnitte, die die Entformung behindern.

Zusätzlich wurden in das Werkzeug 5 Drucksensoren integriert, um die Infiltration verfolgen zu können. Hierzu wurden die identischen Drucksensoren, wie bei den Infiltrationsversuchen am Plattenwerkzeug verwendet.



Abbildung 70: Zusammengebautes RTM-Werkzeug mit 5 Drucksensoren

7.2.2 Wickeln Tankpreform

Der Lagenaufbau des Tanks wurde am FIBRE berechnet. Anschließend wurde in einer Wickelsoftware der Lagenaufbau simuliert, sodass die Endkontur des trocken gewickelten Tanks vor dem Wickelprozess abgebildet werden kann. Diese Geometrie war Basis für die Auslegung der Kontur des T-RTM-Werkzeugs.

Nach den ersten Wickelvorgängen wurde allerdings schnell deutlich, dass die tatsächliche Geometrie der Tankpreform sich beim Wickeln anders verhält, als simuliert. Vor allem im Dombereich war eine deutliche Aufdickung des Tanks zu erkennen.



Abbildung 71: trocken gewickelter Tankpreform

Nach Bereitstellung des Tanks wurden erste Einlegeversuche der Tanks in das Werkzeug unternommen. Dabei wurde klar, dass die Geometrie so stark abweicht, dass ein Einlegen der Tankpreforms unmöglich ist. Auch ein Abwickeln von ein paar Lagen würde kein Sinn machen, da die Lagen im zylindrischen Bereich dann fehlen würden.

Vor allem im Bossbereich konnte eine deutliche Verlängerung des Tanks ausgemacht werden. Daher entstand hier zwischen Werkzeug und Tankpreform eine Kollision, wodurch ein sauberes Einlegen unmöglich wurde.



Abbildung 72: Tankkollision im Dombereich

Daher wurde der Tank im nächsten Schritt über eine Streifenlichtprojektionsmessung optisch vermessen. Hierzu wird der Tank mit einem gräulichen Markierspray eingesprüht, sodass der Glanz der Kohlefaser die Messung nicht verfälscht. Nach der Messung können die Daten ins CAD überspielt und ausgewertet werden, sodass die Kontur des Werkzeugs angepasst werden kann.

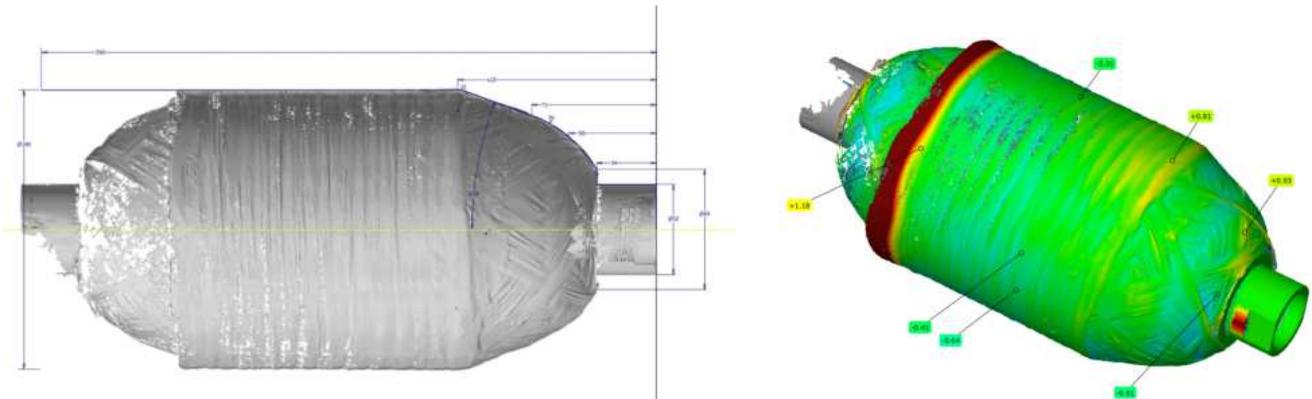


Abbildung 73: Messergebnisse aus der Streifenlichtprojektionsmessung

Nach der Auswertung im CAD wird deutlich, dass die Kontur nicht dem entspricht, was bei der Wickelsoftware ermittelt wurde. Wie bereits zuvor erkannt, ist vor allem der Dombereich deutlich verlängert.

Um die Streuung bei der Messung zu bewerten, wurde ein zweiter Tank gewickelt und vermessen. Die Konturen passen allerdings sehr gut zueinander, sodass die Kontur für die Werkzeuganpassung eindeutig ist. Es ist jedoch so, dass am Übergang vom zylindrischen in den isotensoiden Bereich eine Konturverkleinerung vorhanden ist. Dies kann nachträglich am Werkzeug nicht geändert werden. Daher wurden hier Überlegungen angestrebt, dass der Hohlraum mit losen Fasern gefüllt wird oder eben alternativ als Reinpolyamidbereich am Bauteil bleibt.

7.2.3 Infiltrationsversuche

Die Vorgehensweise zur Infiltration ist wie folgt:

1. Gewickelte Tank-Preform vorbereiten:
Auf der Preform soll sich möglichst wenig Bindernetz befinden, da dies an der Oberfläche zu kleineren Störungen führen kann. Außerdem sind überstehende Fasern, die durch den Transport o.ä. gelöst wurden, zu entfernen oder an den Tank anzubringen.
2. Adapterstücke anbringen:
Die Adapterstücke an den beiden Tankenden müssen eingeschraubt werden, sodass der Tank nach innen abgedichtet ist.
3. Tank-Preform einlegen:
Die Tank-Preform wird nun incl. Der Adapterstücke ins Werkzeug eingelegt. Hierbei ist darauf zu achten, dass man vorsichtig vorgeht und nicht an den Kanten hängen bleibt, da dies zu Faserablösungen führen kann. Wenn der Tank sauber in der Form sitzt, können mögliche Abfaserungen an den Tank angelegt oder abgeschnitten werden.
4. Seitlicher Dichtflansch anbringen:
Der seitliche Flansch muss an der Seite des Druckluftanschlusses des Tanks angebracht werden, sodass das Werkzeug zu dieser Seite abgedichtet ist, der Druckluftanschluss allerdings angebracht werden kann.
5. Werkzeug schließen:
Nun kann die Werkzeuoberhälfte auf die Werkzeugunterhälfte gesetzt werden. Zuvor werden in der Werkzeuoberhälfte die Drucksensoren eingesetzt sowie die Angüsse angebracht. Das Werkzeug wird nach dem Schließen über die dafür vorgesehenen Schrauben miteinander verschraubt.
6. Anbringen Druckluftschläuche und Drucktopf:
Jetzt können die Druckluftschläuche an die dafür vorgesehenen An- und Abgüsse angebracht werden und dementsprechend verbunden werden. Der Drucktopf wird ans Werkzeug bzw. den Werkzeugwagen angebracht, sodass das Werkzeug mit Drucktopf verbunden ist.
7. Aufheizen des Werkzeugs:

Ist alles richtig verbunden, kann das Werkzeug in den Ofen und auf Betriebstemperatur erhitzt werden. Hierfür ist ein Temperatursensor im Werkzeug angebracht, um die Werkzeugtemperatur zu kontrollieren. Erfahrungsgemäß benötigt die Aufheizung des Werkzeugs min. 3 Std. Währenddessen kann die Schmelze vorbereitet werden. Eine Stunde vor Abguss können die Zusätze zugegeben werden. Während des Aufheizvorgangs wird am Werkzeug Vakuum gezogen.

8. Infiltration:

Wenn die Schmelze aufbereitet ist, kann diese im Drucktopf vermischt werden. Dieser wird nach dem Vermischen geschlossen, Druck aufgebracht und die Abklemmung unterhalb des Drucktopfs gelöst. Dadurch wird die Schmelze in das Werkzeug bzw. in die Fasern infiltriert. Sobald die Schmelze aus dem Abguss austritt, wird die Abklemmung angebracht, da ansonsten die Schmelze durch das Bauteil schießen würde.

9. Temperzeit:

Ist die Infiltration abgeschlossen verweilt das Werkzeug vor seine vorgegebene Temperzeit im Ofen bei der vorgeschriebenen Temperatur von 160°C. In dieser Zeit polymerisiert und kristallisiert das Monomer in den Fasern zum fertigen Polyamid aus.

10. Entformung:

Sobald das Werkzeug abgekühlt ist, wird das Werkzeug in umgekehrter Reihenfolge vom Zusammenbau geöffnet und das Bauteil entformt. Dafür sind Abdrückschrauben am Werkzeug vorgesehen, um die Entformung zu erleichtern. Beim Entformen wird der infiltrierte Tank nach oben gehoben, in Richtung Druckluftanschluss geschoben und anschließender zur anderen Seite aus der Form gekippt.

7.2.4 Versuchsergebnisse

7.2.4.1 Abdichtkonzept:

Das Abdichtkonzept funktioniert wie geplant. Es sind keine undichten Stellen vorhanden, der Tank ist zur Innenseite dicht und die Infiltration kann durchgeführt werden. Die seitlichen Adapterstücke lassen sich nach der Infiltration auch relativ einfach lösen, lediglich der Adapter im Werkzeug wird mit Lauramid umschlossen und ist daher mit etwas erhöhtem Reinigungsaufwand verbunden.

Da das Abdichtkonzept bei den Versuchen sehr gut funktioniert, soll dies auch beim Prototypen-Werkzeug angewandt werden.

7.2.4.2 Entformung:

Bei der Entformung sind leider Probleme entstanden. Dies lag allerdings daran, dass sich die Kontur des CFK verändert hat. Durch die Verlängerung bzw. Aufdickung des Materials direkt am Boss, wurde der Tank um einiges länger. Dies wurde nachträglich an der Werkzeugform angepasst. Dadurch ragt der CFK nach der Bearbeitung allerdings in den Bereich der „Brücke“ für die Dichtung, wodurch wiederum ein Hinterschnitt entsteht.

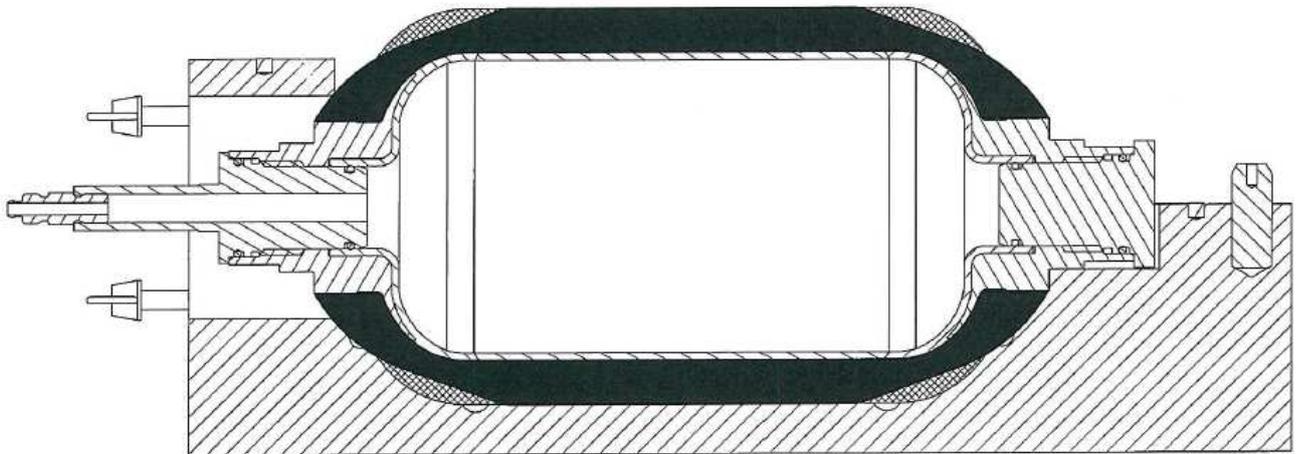


Abbildung 74: Neue CFK-Struktur nach Wickeln

Der erste infiltrierte Tank ließ sich dadurch nur mit starker Krafteinbringung und Verformung des Bauteils entformen. Anschließend wurde die Form nochmals angepasst und in dem Bereich des Hinterschnitts die Brücke verkleinert. Der wegbearbeitete Bereich wurde durch einen Einsatz aufgefüllt, der nach der Infiltration entfernt werden kann. Mit dieser Korrektur konnte der Tank bei den folgenden Versuchen problemlos entformt werden. Das Konzept funktioniert so, wie es zuvor geplant war.

Daher kann ich das Entformungskonzept auf den Prototypen-Tank angewandt werden, vorausgesetzt der Dombereich reicht nicht in den Bereich der Brücke, was allerdings bei normaler Auslegung und keiner Veränderung der Wickelgeometrie nicht der Fall sein wird.

7.3 Prototypen-Tank-Versuche

Auf Basis des Werkzeugs für den Demonstratortank und den Erfahrungen aus den Infiltrationsversuchen wurde ein vergrößertes Werkzeug für einen Prototypentank konstruiert.

Hier wurden allerdings auch die Erfahrungen aus den ersten Wickelversuchen berücksichtigt, weswegen die ursprünglich geplante Kontur nochmal etwas korrigiert wurde, um ein problemloses Wickeln garantieren zu können. Das Durchmesser-Längen-Verhältnis spielt hier eine Rolle, da die trockene Faser leider Gefahr läuft während dem Wickelvorgang abzurutschen. Die Geometrie, die auf Basis der Use-Cases definiert wurde, ist hierbei nicht in Stein gemeißelt und wurde daher aufgrund der besseren Verarbeitung beim Wickeln angepasst (wie bereits in Punkt 6.7 beschrieben). Auf dem folgenden Bild ist der Tank nach dem Vermessen zu erkennen. In grau ist die Werkzeugkontur dargestellt und in grün sind real vermessenen Fasern zu erkennen. Die Konturen passen daher sehr gut überein.

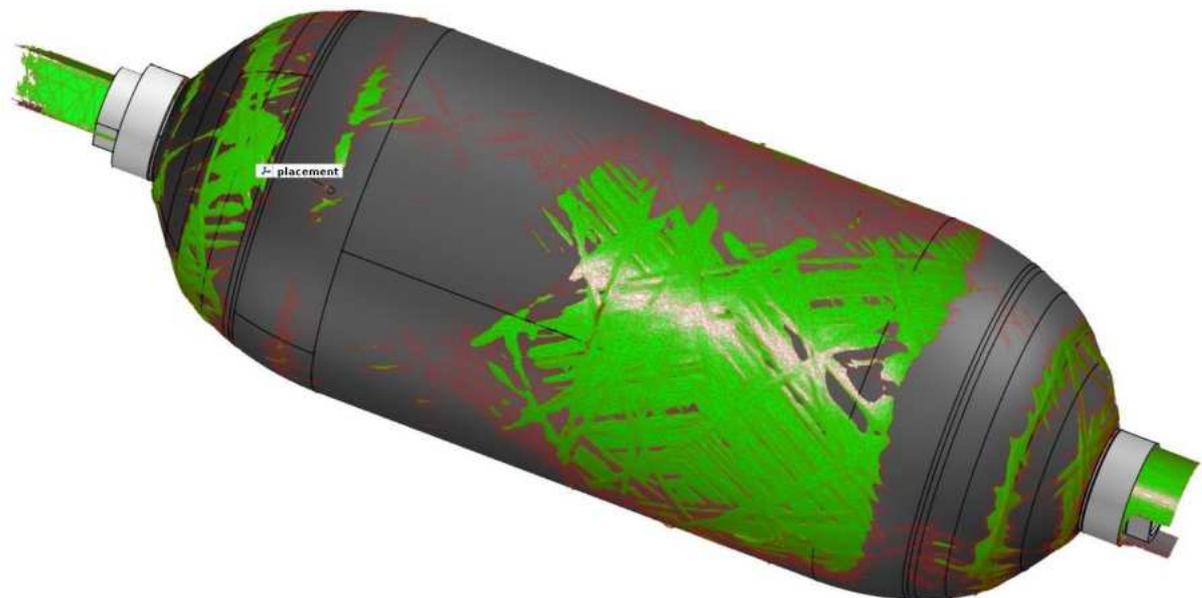


Abbildung 75: Prototypentank-Kontur nach dem Vermessen

Der Prototypentank wird so bezeichnet, da er auch funktionsfähig sein soll. Eine Erfahrung aus dem verkürzten Werkzeug bzw. Tank war, dass die Geometrie aus dem Wickelprozess stark zur geplanten Wickelgeometrie abweichen kann. Damit keine Lagen abgewickelt oder eingespart werden müssen und wirklich alle Lagen infiltriert werden können, soll zuerst eine Tankpreform gewickelt und vermessen werden, bevor das Werkzeug gefertigt wird. Sollte die Geometrie abweichen kann dadurch in der Konstruktion darauf reagiert werden und die Werkzeuggeometrie angepasst werden.

7.3.1 Prototypentank-Preform

Um schnellstmöglich einen ersten Wickelversuch durchführen zu können, wurde ein erster Liner benötigt. Die schnellste Herstellung ist dadurch möglich, dass ein Vollmaterial verwendet wird, an dem die Kontur des Liners abgebildet wird.

Dies wurde sehr schnell bei der Fa. Handtmann umgesetzt und dem FIBRE zur Verfügung gestellt, wodurch diese Schritte sehr schnell abgewickelt werden konnten.



Abbildung 76: Prototypen-Wickelliner aus Vollmaterial

Am Wickelliner wurden auch die Bosse im Kunststoff abgebildet. Hier wurden Rillen angebracht, um einen Formschluss zwischen Boss und CFK-Struktur zu erzielen. Überlegungen gingen auch dahin, dass diese Rillen schräg angebracht werden könnten, um eine Verdrehsicherung zu erhalten. Dies kann im zweiten Schritt immer noch optimiert werden, die Herstellung war auf diese Weise allerdings einfacher und schneller zu realisieren. Es kann somit betrachtet werden, ob die Rillen negativen Einfluss auf den Wickelprozess haben.

Nach dem Wickelprozess wird der Tank wieder mit dem Markierspray eingesprüht, um die optische Vermessung zu ermöglichen.



Abbildung 77: Markierter Tank-Preform für die optische Vermessung

Die Kontur aus der Messung wird wieder ins CAD übertragen und dient somit als Soll-Kontur für den gewickelten Tank. Wichtig ist hierbei zu beachten, dass die Wickelparameter nicht geändert werden. Der Lagenaufbau soll identisch gewählt werden, sodass sich die Kontur nicht verändert. Auch die Fadenspannung soll gleichbleibend gewählt werden, da diese sich ebenfalls auf die Kontur des Wickelpreforms auswirken kann.

7.3.2 Werkzeugkonstruktion

Auf Basis des verkürzten Werkzeugs für den Demonstrator-Tank wird die Konstruktion für den Prototypen-Tank erstellt. Die Versuche für die Demonstrator-Herstellung haben größtenteils sehr gut funktioniert, weswegen nicht viel verändert werden muss. Im Prinzip geht es hauptsächlich um eine Hochskalierung der Werkzeuggeometrie.

Die Geometrie wird auf Basis der zuvor gemessenen Tank-Preforms ermittelt. Dabei ist vor wichtig, dass kein Hinterschnitt entsteht, wie beim Demonstrator-Tank. Die Ursache hierfür war allerdings die Konturänderung des

Tankpreforms, wie zuvor bereits beschrieben. Daher kann bei diesem Werkzeug ein solcher Fehler ausgeschlossen werden.

Das Angussystem wird auf 5 Kanäle ausgeweitet. Die Abstände zwischen den Angusskanälen werden hierbei so gut wie möglich beibehalten, um die gleichen Fließwege zu haben. Zwischen den Angusskanälen werden Drucksensoren gesetzt, um die Infiltrationsdrücke und den Druckverlauf während der Polymerisation und Kristallisation zu beobachten.

Die Größe des Werkzeugs muss mit der vorhandenen Ofengeometrie abgestimmt werden. Das Werkzeug wird vermutlich nur knapp in den Laborofen passen. Auch der Anschluss des Drucktopfs muss so angebracht werden, dass das Werkzeug (inklusive Drucktopf) in den Ofen passt. Sollte es nicht möglich sein, mit dem Laborofen zu arbeiten, so muss eine Alternative in der Gießerei gefunden werden. Im Optimalfall wird die Laborlösung allerdings bevorzugt, da hier die optimalen Begebenheiten für den Versuch vorherrschen.

Auch die Konstruktion mit dem seitlichen Flansch und der „Brücke“ im Werkzeugunterteil hat sich bewährt. Es entstehen keine Dichtkanten, die 3 Werkzeughälften zueinander abdichten müssen. Die obere und untere Werkzeughälften werden zueinander abgedichtet, der seitliche Anschlussflansch dichtet lediglich mit der unteren Werkzeughälfte. Dadurch ist es möglich einen Innendruck ins Werkzeug einzubringen, der notwendig ist, um das Kollabieren des Liners bei Infiltrationsdruck zu vermeiden.

Die Adapterstücke zur Abdichtung des Liners zur Infiltrationsseite haben sich ebenfalls bewährt. Nach Polymerisation sind die Bereiche zwar teilweise mit Lauramid gefüllt, dieses Material kann allerdings zur Qualitätskontrolle hergezogen werden und lässt sich leicht entformen bzw. entfernen. Beim Adapterstück an der Hinterseite (gegenüber des Druckanschlusses) wird auf die Unterseite eine leichte Schräge angebracht. Dadurch soll die Entformung erleichtert werden, was beim ersten Werkzeug etwas problematisch war. Ansonsten hat das Entformungskonzept sehr gut funktioniert und wird beibehalten. Hierfür wird mit Abdrückschrauben gearbeitet. Die „Brücke“ stellt auch keine Problematik fürs Entformen dar.

7.3.3 Versuchsergebnisse

Es stehen für die Versuche 4 Liner zur Verfügung. Es wurden 5 Liner und die zugehörigen Bosse gefertigt, leider musste einer hiervon als Ausschuss gebucht werden, da der Liner aus der Einspannung gezogen wurde.

Daher können in diesem Projektrahmen max. 4 Versuche durchgeführt werden.

7.3.3.1 Versuch 1

Bei Versuch 1 wurde der Lagenaufbau unplanmäßig etwas geändert, da die Wickelmaschine während dem Wickelprozess immer wieder ausgestiegen ist und dadurch immer wieder mit einer Hoop-Lage gestartet werden musste. Dies macht sich wie befürchtet darin bemerkbar, dass die Kontur nicht zur Werkzeuggeometrie passt und dadurch die Tank-Preform nicht eingesetzt werden kann.



Abbildung 78: Überstehende Fasern an unterer Formhälfte

Die Fasern stehen vor allem im Dom-Bereich über, wodurch das Werkzeug nicht bzw. nur mit einer starken Faserquetschung incl. Werkzeugschädigung geschlossen werden kann. Daher müssen für Versuch 1 ein paar Faserlagen abgewickelt werden. Es werden 8 Lagen abgewickelt, anschließend passt die Preform in das Werkzeug.



Abbildung 79: Abwickeln der Fasern

Die Infiltration des Werkzeugs hat gut funktioniert. Es wurde aber nach einer gewissen Zeit deutlich, dass auch Luft ins Werkzeug kam. Nach dem Versuch konnte ein Kollabieren des Liners erkannt werden, weswegen mehr Schmelze ins Werkzeug fließt als eigentlich notwendig. Das Kollabieren des Liners entsteht dadurch, dass der Innendruck des Tanks und der Infiltrationsdruck gleichzeitig erhöht wird. Der Infiltrationsdruck steht schneller an, da das Volumen im Drucktopf kleiner ist als im Tank. Daher entsteht kurzzeitig ein Überdruck an den Einspritzpunkten, wodurch der Liner an dieser Stelle eingedrückt wird. Dies kann dadurch vermieden werden, dass beim nächsten Versuch der Innendruck sofort aufgebracht wird, sodass kein Überdruck im Außenbereich (CFK-Bereich) entstehen kann.

Außerdem ist im Röntgenbild zu erkennen, dass der Liner gestaucht wurde. Vermutlich will sich der Liner ausdehnen, wird aber durch die Fasern behindert, die durch das Werkzeug abgestützt werden.

Auch hierfür kann Abhilfe geschaffen werden. Die Preform kann durch den seitlichen Adapter im Werkzeug unterschiedlich stark verspannt werden. Nach dem Einlegen der Preform im nächsten Versuch wird Druck in den Tank aufgegeben, sodass dieser sich etwas ausdehnen kann. Anschließend soll der seitliche Adapter angelegt werden. Dadurch wird ein gewisses Spiel im Tank erzeugt, das sich bei der Wärmeausdehnung des Liners ausgleichen kann. Dadurch soll das Einknicken des Liners vermieden werden.

Die restliche Infiltration des Tanks sieht sehr gut aus, auch im extrem dicken Dombereich.

7.3.3.2 Versuch 2

Bei diesem Versuch gab es keine Probleme an der Wickelanlage, wodurch der Lagenaufbau wie geplant aufgebracht werden konnte. Die Reproduzierbarkeit im Vergleich zum ersten Wickelversuch mit dem Liner-Dummy ist sehr gut, die Tank-Preform passt gut in das Werkzeug, ohne Fasern abwickeln zu müssen. Es wurde hier der Spalt zwischen Liner und Werkzeug auch vermessen, um anschließend bewerten zu können, ob ein vergleichbarer Reinpolyamidbereich auf dem Tank verbleibt.

Wie in Versuch 1 beschrieben, wurde im geöffneten Werkzeug der Tank-Preform eingelegt und Druck aufgebracht. Dadurch ergab sich ein Abstand des seitlichen Anschlusses von 6mm, der bei den künftigen Versuchen

eingehalten werden soll, um das Einknicken des Liners zu vermeiden. Dies wurde mit 2 Abstandshaltern mit jeweils 3mm realisiert.

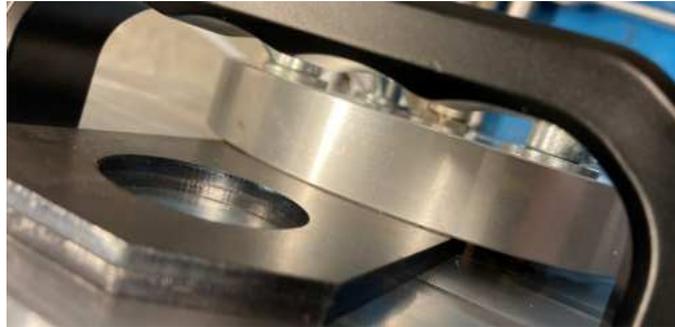


Abbildung 80: Abstandshalter am seitlichen Flansch

Die Infiltration hat bei diesem Versuch erneut sehr gut funktioniert. Allerdings ist wie beim Versuch zuvor zu erkennen, dass Luft ins Werkzeug gelangt und der Drucktopf somit leer gefahren wurde. Daher ist die Befürchtung, dass der Liner erneut kollabiert ist.

Nach Entnahme des Tanks und Inspektion in der Röntgenanlage wird allerdings deutlich, dass der Liner nicht kollabiert ist. Trotzdem ist Luft in den Tank gelangt. Dies lässt Rückschlüsse zu, dass er Faservolumengehalt des Bauteils deutlich geringer ist als zuvor angenommen.



Abbildung 81: Tankoberseite und Tankunterseite nach Infiltration

Der Tankpreform wurde vor Infiltration gewogen, nach Vergleich der Gewichte vor und nach Infiltration wird deutlich, dass der Faservolumengehalt nicht wie angenommen 50% beträgt, sondern lediglich bei 40% liegt. Dadurch ergibt sich das Problem, dass das Volumen des Drucktopfs nicht ausreichend ist, um den Tank komplett zu infiltrieren. Daher wird im nächsten Schritt der Drucktopf um einen Liter im Volumen vergrößert.

7.3.3.3 Versuch 3

Für diesen Versuch wurde das Infiltrationsvolumen angepasst, sodass ausreichend Schmelze für die Infiltration vorhanden ist. Wie zuvor beschrieben, musste der Drucktopf vergrößert werden, um die Schmelzemenge bereitstellen zu können.

Durch die Anpassung des Schmelzevolumens war der Tank komplett infiltriert.



Abbildung 82: Infiltrierter Prototypentank

Auch nach Begutachtung in der Röntgenanlage waren keine Fehlstellen, Einfallstellen o.ä. zu erkennen, sodass dieser Tank für einen ersten Berstdruckversuch herangezogen werden soll. Anschließend können Schnitte erstellt werden, mithilfe denen die Infiltrationsqualität in Linernähe betrachtet und bewertet werden kann.

Bis zum Projektabschluss konnten 3 Versuche durchgeführt werden. Es war jedoch möglich, innerhalb der Projektlaufzeit einen funktionsfähigen Tank herzustellen.

Der letzte verfügbare Liner wird nach Projektende gewickelt und im Anschluss infiltriert. Hier werden kleinere Optimierungen durchgeführt. Der Tank kann anschließend ebenfalls für erste Versuche verwendet werden.

8 Entwicklung eines Fertigungskonzeptes für die Serienproduktion von Wasserstoffspeichern

Wichtiger Bestandteil des Projekts ist auch die Entwicklung eines möglichen Fertigungskonzepts von Wasserstoffspeichern, unter Berücksichtigung einer nachhaltigen Serienproduktion. Die Qualitätssicherung der Bauteile sowie Automatisierungsmöglichkeiten sollen hier ebenfalls berücksichtigt werden. Zudem soll auch der große Vorteil des thermoplastischen Tank-Systems betrachtet werden und die Möglichkeiten bzgl. Tank-Recycling betrachtet werden.

8.1 Ableitung eines wirtschaftlichen Serien-Fertigungsprozesses

Da die Herstellung aktuell im Labor-Maßstab durchgeführt wird, soll auch ein möglicher serienreifer oder zumindest seriennaher Fertigungsprozess betrachtet werden. Es gibt hierzu Erfahrung bei der Fa. Handmann aus vorangegangenen Projekten, in denen Bauteile seriennah hergestellt wurden.

Um die verschiedenen Schritte besser planen und bewerten zu können, wurde ein Produktlenkungsplan erstellt, in dem jeder Prozessschritt fein aufgegliedert ist. Ein Produktlenkungsplan, auch als Produktsteuerungsplan bekannt, ist ein Dokument, das von Unternehmen, insbesondere in der Fertigungs- und Automobilindustrie, verwendet wird, um die Qualität von Produkten während des gesamten Herstellungsprozesses sicherzustellen. Der Plan stellt außerdem sicher, dass alle Phasen der Produktion kontrolliert und überwacht werden, um die Einhaltung von Qualitätsstandards zu gewährleisten. Es können auch Features wie Risikoanalysen integriert werden, wobei in diesem Projekt eine FMEA durchgeführt wurde.

FMEA steht für "Failure Mode and Effects Analysis", also Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse. Es handelt sich um eine systematische Methode zur Identifizierung potenzieller Fehler in einem Produkt, Prozess oder System, bevor sie auftreten, mit dem Ziel, diese Fehler zu verhindern oder die Risiken, die mit ihnen verbunden sind, zu minimieren.

Durch diese Tools kann der Serienprozess des Tanks geplant und potenzielle Prozessproblematiken ausfindig gemacht werden.

8.1.1 Prozessschema

Zu Beginn der Planungen wurde ein Prozessschema aufgestellt, an dem sich orientiert werden kann. Das Prozessschema ist zu Beginn ein „lebendiges“ Dokument, an dem immer wieder Änderungen vorgenommen werden können und müssen.

Prozessschema Herstellung Wasserstofftank

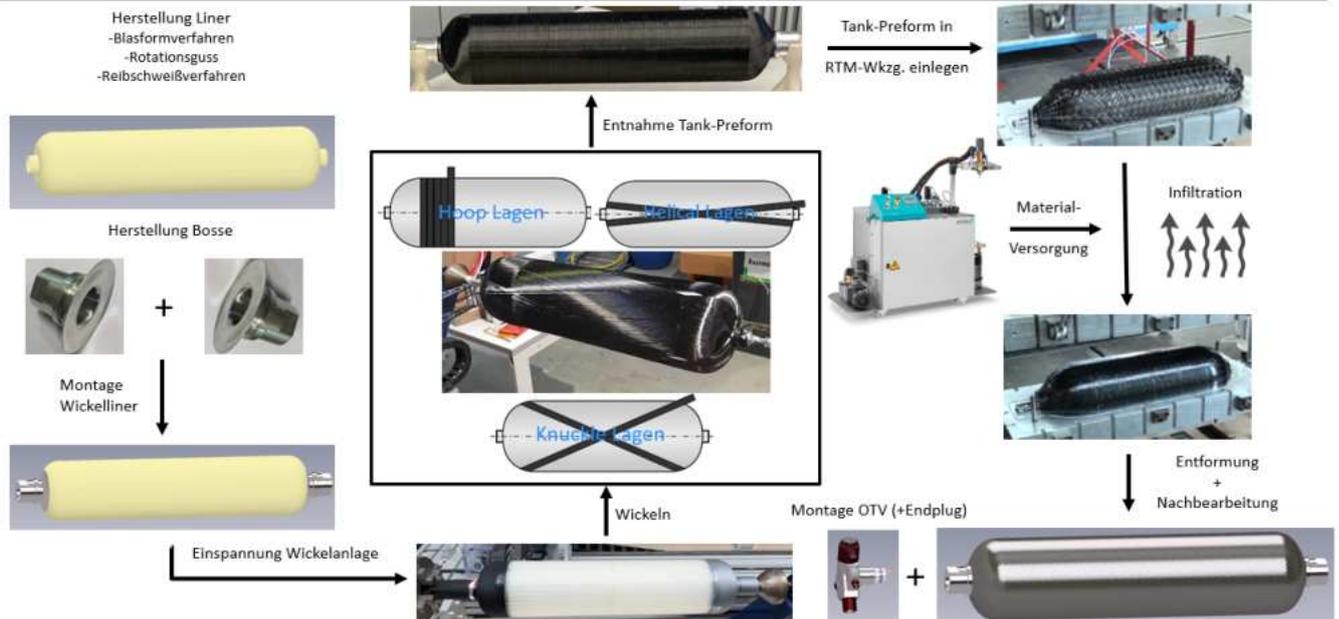


Abbildung 83: Prozessschema Serienherstellung Wasserstofftank

Auf Basis dieses Prozessschemas wird ein Produktlenkungsplan erstellt, der bei jedem Prozessschritt ins Detail geht. Im Prozessschema werden keine konkreten Parameter erwähnt, sondern nur der komplette Herstellungsprozess visualisiert, um eine Orientierung zu besitzen.

8.1.2 Produktlenkungsplan

Auf Basis des Prozessschemas wird der Produktlenkungsplan (PLP) erstellt. Auch diese Datei ist ein „lebendiges“ Dokument, an dem immer wieder Anpassungen vorgenommen werden.

Prinzipiell ist der PLP eine tabellarische Auflistung der verschiedenen Prozessschritte, indem zu jedem Schritt auch die notwendigen Merkmale und Spezifikationen festgehalten werden können. Dadurch wird die Planung des Prozesses etwas detaillierter und es wird verdeutlicht, wo noch Problemstellungen vorhanden sind bzw. was bereits im Betrieb vorhanden ist.

Anbei ist ein Ausschnitt des PLP zu sehen, in dem der Prozess der Herstellung der Wickelpreform aufgezeigt wird.

Tabelle 27: Produktlenkungsplan für den Prozessschritt "Herstellung Wickel-Preform"

Prozessschritt	Merkmal	Spezifikation	Prüfsystem	Umfang	Frequenz
P [1] Herstellung Wickel-Preform					
[1.1] Herstellung Liner [Extern] -Blasformverfahren -Rotationsguss -Reibschweißverfahren	Qualität der Ausgangsmaterialien (Liner)	Lieferanten 3.1-Prüfzeugnis oder Materialdatenblatt	Produktmerkmal: DSC-Messungen FTIR-Spektrometrie	An Opferbauteilen	Jeder Liner
[1.2] Herstellung Bosse [Extern]	Qualität der Ausgangsmaterialien (Bosse)	Lieferanten 3.1-Prüfzeugnis	Härtemessungen	Über kompletten Bossequerschnitt	Stichproben/ Messzyklen
[1.3] Montage Wickelliner Wareneingangsprüfung Zuganker (Lieferant Pauly Stahlhandel)	Fügung der Einzelbauteile Positionierung Kraft-Weg-Aufnahme Ausrichtung durch Formschluss	Zuordnung Liner+ Bosse zu Tank (über QR-Code/ Seriennummer) Beschriftungs-/Lesemöglichkeiten Norm ECE R134 gibt Möglichkeiten vor	QR-Code-Beschriftung Kraft-Weg-Messsystem	Zuordnung über QR-Code am Boss	Zuordnung: Jedes Bauteil
[1.4] Einspannung Wickelliner	Positionierung	Bauteilausrichtung über Aufnahmesystem			

Folgende Ziele werden durch den PLP für die Herstellung des Wasserstofftanks verfolgt:

1. **Prozessanalyse:** Beschreibung und Dokumentation des Herstellungsprozesses
2. **Identifizierung kritischer Prozessschritte:** Bestimmung von Prozessschritten, die kritisch für die Qualität des Endprodukts sind.
3. **Festlegen von Qualitätsmerkmalen:** Definition der Produkt- und Prozessmerkmale, die wichtig für die Erfüllung der Kundenanforderungen sind und die kontrolliert oder überwacht werden müssen.
4. **Risikobewertung:** Beurteilung potenzieller Risiken oder Fehlerquellen im Produktionsprozess. Allerdings wird hier separat noch eine zusätzliche Prozess-FMEA durchgeführt.
5. **Entwicklung von Kontrollmethoden:** Entwicklung und Implementierung von Kontrollmethoden zur Überwachung und Steuerung der kritischen Prozess- und Qualitätsmerkmale.

Auch im Fall einer späteren Serienfertigung wird der PLP immer weiter gepflegt, um kritische Themen zu dokumentieren oder auch Toleranzen und Spezifikationen festlegen zu können. Das Dokument wächst somit zusammen mit dem Erfahrungsschatz zum Wasserstofftank und betreut den Herstellungsprozess.

Um auf die möglichen Fehlerursachen explizit einzugehen, wurde zusätzlich eine FMEA durchgeführt. Diese wird im folgenden Punkt beschrieben. Prinzipiell könnte diese Aufgabe auch vom PLP übernommen werden, die FMEA geht aber nochmal sehr viel mehr ins Detail.

8.1.3 Prozess-FMEA

Die Prozess-FMEA (Failure Mode and Effects Analysis) ist eine analytische Methode, die im Rahmen des Qualitätsmanagements eingesetzt wird, um potenzielle Fehler in Produktionsprozessen zu identifizieren, zu bewerten und zu verhindern. FMEA ist eine präventive Maßnahme, die darauf abzielt, Risiken zu minimieren, bevor sie zu tatsächlichen Problemen oder Fehlern führen.

Es kann sich in diesem Schritt nur um eine erste Planung handeln, da viele unerwartete Probleme und Fehler noch auftreten werden. Nichtsdestotrotz können durch die Erstellung einer FMEA viele Fehler bereits frühzeitig erkannt und vermieden werden.

Die Prozessschritte werden aufgelistet und mögliche Fehlfunktionen mit Fehlerursache und Fehlerfolge dokumentiert. Dadurch kann in jedem Prozessschritt beschrieben werden, was bei der Herstellung beachtet bzw. vermieden werden muss. Das gesamte Dokument ist in tabellarischer Form im Anhang abgebildet.

1. **Identifikation potenzieller Fehlerquellen:** Untersuchung jedes Schrittes im Prozess, um mögliche Fehlerursachen zu identifizieren, die die Qualität oder Zuverlässigkeit des Produkts beeinträchtigen könnten.
2. **Analyse der Fehlerfolgen:** Bewertung der potenziellen Auswirkungen dieser Fehler auf den Kunden oder das Endprodukt, einschließlich der Schwere der Folgen.
3. **Bewertung der Fehlerwahrscheinlichkeit:** Einschätzung der Wahrscheinlichkeit, dass ein Fehler auftritt, basierend auf der aktuellen Prozessgestaltung und Erfahrungswerten.
4. **Bewertung der Fehlerentdeckung:** Bestimmung der Wahrscheinlichkeit, dass ein Fehler entdeckt wird, bevor das Produkt den Kunden erreicht oder der Prozess abgeschlossen ist.
5. **Priorisierung von Risiken:** Verwendung der Risikoprioritätszahl (RPZ), die sich aus den Faktoren Schwere, Auftretenswahrscheinlichkeit und Entdeckungswahrscheinlichkeit zusammensetzt, um Risiken zu priorisieren.
6. **Entwicklung von Maßnahmen zur Fehlervermeidung:** Erstellung von Aktionsplänen, um Fehler zu verhindern oder die Wahrscheinlichkeit ihres Auftretens zu reduzieren.
7. **Implementierung von Verbesserungen:** Umsetzung von Maßnahmen zur Risikoreduzierung, einschließlich der Anpassung von Prozessschritten, der Einführung neuer Kontrollen oder der Änderung von Designmerkmalen.
8. **Überwachung und Steuerung:** Festlegung von Verfahren zur Überwachung der Wirksamkeit der umgesetzten Maßnahmen und zur kontinuierlichen Überprüfung des Prozesses.
9. **Dokumentation:** Sorgfältige Dokumentation der FMEA-Ergebnisse, einschließlich der identifizierten Risiken, der durchgeführten Analysen und der getroffenen Maßnahmen.
10. **Kontinuierliche Verbesserung:** Nutzung der FMEA-Erkenntnisse als Teil eines kontinuierlichen Verbesserungsprozesses, um das Risiko von Fehlern in der Zukunft weiter zu minimieren.

Auch dieses Dokument wird bei einer späteren Serienherstellung immer weiterwachsen und fortführend gepflegt, um die zuvor genannten Punkte einhalten zu können. Es gleicht einem kontinuierlichen Verbesserungsplan, um den Herstellungsprozess und somit die Qualität der Bauteile stets einzuhalten bzw. zu verbessern.

8.1.4 Kostenanalyse

Natürlich spielen auch die Kosten des Tanks eine wichtige Rolle, um für den Tank eine Marktakzeptanz zu erhalten. Daher wurde mit den aktuellen Möglichkeiten eine Kostenanalyse durchgeführt, bei der allerdings einige Annahmen getroffen werden mussten. Nichtsdestotrotz liefert dies eine erste Aussage, in welcher Preisregion der Tank anzusiedeln ist.

Im Vergleich zum Nasswickelverfahren wird sich positiv auf den Prozess auswirken, dass schneller gewickelt werden kann. Beim Nasswickeln ist man auf maximale Umfangsgeschwindigkeiten von ca. 1,5m/s beschränkt, da bei höheren Drehzahlen das Harz durch die Fliehkraft abfliegt. Ohne das Harz können Umfangsgeschwindigkeiten von bis zu 5m/s realisiert werden, wobei hier Entwicklungen für höhere Geschwindigkeiten laufen.

Negativ für die Herstellung im T-RTM-Verfahren wirkt sich der zusätzliche Infiltrationsprozess aus. Es kann zwar schneller gewickelt werden, jedoch ist die Faser noch nicht infiltriert. Daher muss der zusätzliche Prozessschritt berücksichtigt werden.

Als Basis für die Kostenbetrachtung wird die Veröffentlichung des „Department of Energy“ (DOE) aus den USA herangezogen. Hier wurden die Kosten eine Typ 4 Wasserstofftanks betrachtet. Die Kosten, die für uns aktuell unbekannt sind, wurden aus dieser Studie übernommen, um eine Vergleichbarkeit zu schaffen. Daher wurden auch die Stückzahlen an den in der Studie betrachteten Tank angepasst.

Folgender Tank wurde in der Studie betrachtet:

- Tank für Toyota Mirai
- Typ 4 Tank
- 700bar
- Di= 396mm, Li=1189mm
- Speicherbarer H₂: 5,6kg
- Liner Material: HDPE, 5mm dick
- Vinyl Ester Harz, 64,7% FVG
- Design safety factor 2,25; Effective Safety Factor 2,57

Tabelle 28: Ausschnitt aus Kostenbetrachtung des Department of Energy (DOE, 25.11.2019)

	Einheiten	Ziel 2025	Endgültiges Ziel	Statuts 2013	Status 2015	Status 2019
Gravimetrische Kapazität	kWh/kg System	1,8	2,2	1,5	1,4±0,04	1,48±0,04
Volumetrische Kapazität	kWh/L System	1,3	1,7	0,8	0,81±0,01	0,83±0,01
Kosten bei 500.000 Stk./Jahr	2016\$/kWh	10	8	18,0 [-0,8/+3,2]	15,8 [-0,9/+1,8]	14,2 [-0,5/+1,5]
	2007\$/kWh	10	8	16,8 [-0,8/+3,3]	14,8 [-0,8/+1,7]	13,3 [-0,5/+1,4]
Kosten bei 100.000 Stk./Jahr	2016\$/kWh	-	-	22,1	18,0 [-0,9/+1,8]	15,7 [-0,6/+1,5]
	2007\$/kWh	-	-	20,4	16,6 [-0,8/+1,7]	14,6 [-0,6/+1,4]

In der Studie des DOE sind die Kosten für die jeweiligen Zubehörteile bzw. Prozessschritte aufgelistet.

Tabelle 29: Kosten für Zubehör und Prozessschritte bei Herstellung eines Wasserstofftanks

	Einheiten/Jahr	10.000	30.000	80.000	100.000	500.000
Boss	\$/Tank	39	32	29	28	28
Blasformen Liner	\$/Tank	62	34	25	24	22
Linermaterial	\$/Tank	44	14	8	10	8
Kohlefaser	\$/Tank	1655	1655	1589	1523	1457
Harz	\$/Tank	127	127	127	127	127
Nasswickelprozess	\$/Tank	184	172	171	170	170
Vorhärten	\$/Tank	20	6	5	6	5
Aushärten	\$/Tank	77	15	8	11	9
Bersttest	\$/Tank	18	11	10	9	9
Lecktest	\$/Tank	63	25	21	18	18
Ventileinheit	\$/System	295	262	223	219	201
Sonstige Ventile	\$/System	425	347	302	288	250
Balance of Plant	\$/System	952	675	516	486	338
Zusammenbau	\$/System	13	12	11	11	11
Gesamt	\$/System	3974	3387	3045	2931	2653
Gesamt	\$/kWh	21,25	18,11	16,29	15,67	14,19

Um einen Vergleich zu unserem Tank ziehen zu können, wurden abweichende Kosten ermittelt und in die Kostenberechnung miteinbezogen. Unbekannte Kosten wurden aus der Studie entnommen. Der Lagenaufbau wurde auf das Bauteile überschläglich umgerechnet, sodass die passende Faser- und Matrixmenge ermittelt werden konnte. Die Stückzahl wurde ebenfalls aus der Studie entnommen, hier wurden 100.000Stk. als sinnvolle Menge herangezogen. Dadurch ergibt sich folgende Kalkulation mit den zugehörigen Kosten:

Tabelle 30: Kostenkalkulation Wasserstofftank im T-RTM-Prozess für 100.000Stk.

	Kosten in €	Kostenanteil in %
Kohlefasern	1648,60	55,9
Matrixmaterial	230,10	7,8
Liner	30,90	1,0
Bosse	25,50	0,9
Prozesskosten Wickeln	63,50	2,2
Prozsskosten T-RTM-Verfahren	24,80	0,8
Ventileinheit	199,30	6,8
Druckregler	262,10	8,9
Balance of Plant	442,30	15,0
Prüfverfahren	24,60	0,8
Gesamtkosten Tank in €	2951,60	
Tankkosten/ kWh in €/kWh	15,80	
Tankkosten/kg H2 in €/kg H2	527,10	

Aus der Veröffentlichung der DOE ist 2019 ein Preis für den Wasserstofftank von 15,70\$/kWh bei 100.000Stk. ermittelt worden. Nach unserer Kalkulation entsteht ein Preis von 15,80€/kWh, wobei hier einige Annahmen getroffen werden mussten. Trotzdem scheint der T-RTM-Prozess nicht zu stark ins Gewicht zu fallen, was eine wichtige Aussage aus der Kostenanalyse ist, da dies der kritische Punkt ist. Hauptkostentreiber ist nach wie vor die Kohlefaser aufgrund des hohen Materialpreises. Der zusätzliche Prozessschritt durch die Infiltration des Tanks im T-RTM-Prozess kann außerdem vermutlich über den schnelleren Wickelprozess kompensiert werden.

8.2 Erarbeitung eines Qualitätssicherungskonzeptes

Von großer Bedeutung ist auch die Sicherstellung der Tankqualität nach dem Herstellungsprozess, da es sich um ein sicherheitsrelevantes Bauteil handelt. Es gibt verschiedene Möglichkeiten, die Qualität des Tanks zu überprüfen. Es muss vorab identifiziert werden, welche Merkmale des Tanks gegeben sein müssen, dass die Funktionalität des Tanks gegeben ist.

Zu überprüfende Merkmale:

- Polymerisations- und Kristallisationsgrad der Matrix
- Infiltration des Tanks
- Faserverläufe des Tanks

Wenn die zuvor genannten Merkmale nach Spezifikation erfüllt wurden, ist der Tank als in Ordnung zu bewerten. Natürlich müssen hierzu vorab Tests durchgeführt werden, um die Spezifikation der Kennwerte zu definieren. Nichtsdestotrotz soll hier betrachtet werden, wie diese Kennwerte überprüft werden können.

8.2.1 Zerstörende Prüfungen

Bei zerstörenden Prüfungen müssen Prüfkörper am bzw. vom Tank entnommen werden, da die Prüfteile danach nicht mehr verwendet werden können. Die Entnahme ist beispielsweise an An- /Abgussbereichen möglich oder es werden spezielle Materialpolster definiert am Tank angebracht, um Material zu entnehmen.

Um die Polymerisations- und Kristallisationsqualität der Probe betrachten zu können, wurde im Rahmen des Projekts ein Prüfverfahren entwickelt, welches für zukünftige Qualitätskontrollen von Bauteilen genutzt werden kann.

Am Beispiel von zwei Materialmusterplatten (TP201 „gute Platte“ und TP64 „schlechte Platte“ siehe Foto), wird das Prüfverfahren und deren Ergebnisse zur Bewertung der Materialqualität in Abhängigkeit der Infiltrationsweglänge vom Angusspunkt erläutert. Die schlecht polymerisierte Platte weist deutliche Restmonomerstellen auf, wie auf dem folgenden Bild rechts zu erkennen. Man kann sogar die Fließfront der Schmelze bei der Infiltration auf der Platte im Nachgang sehen. Es werden somit beim Infiltrationsprozess Verschmutzungen bzw. Störungen aus dem Fasergelege herausgespült. Die gute Platte besitzt wenige bis keine Störstellen auf der Oberfläche, daher wurde diese als „Gute-Platte“ deklariert. Bei den DSC-Untersuchungen ließen sich die Unterschiede zwischen gut und schlecht polymerisierter Platte nachweisen.

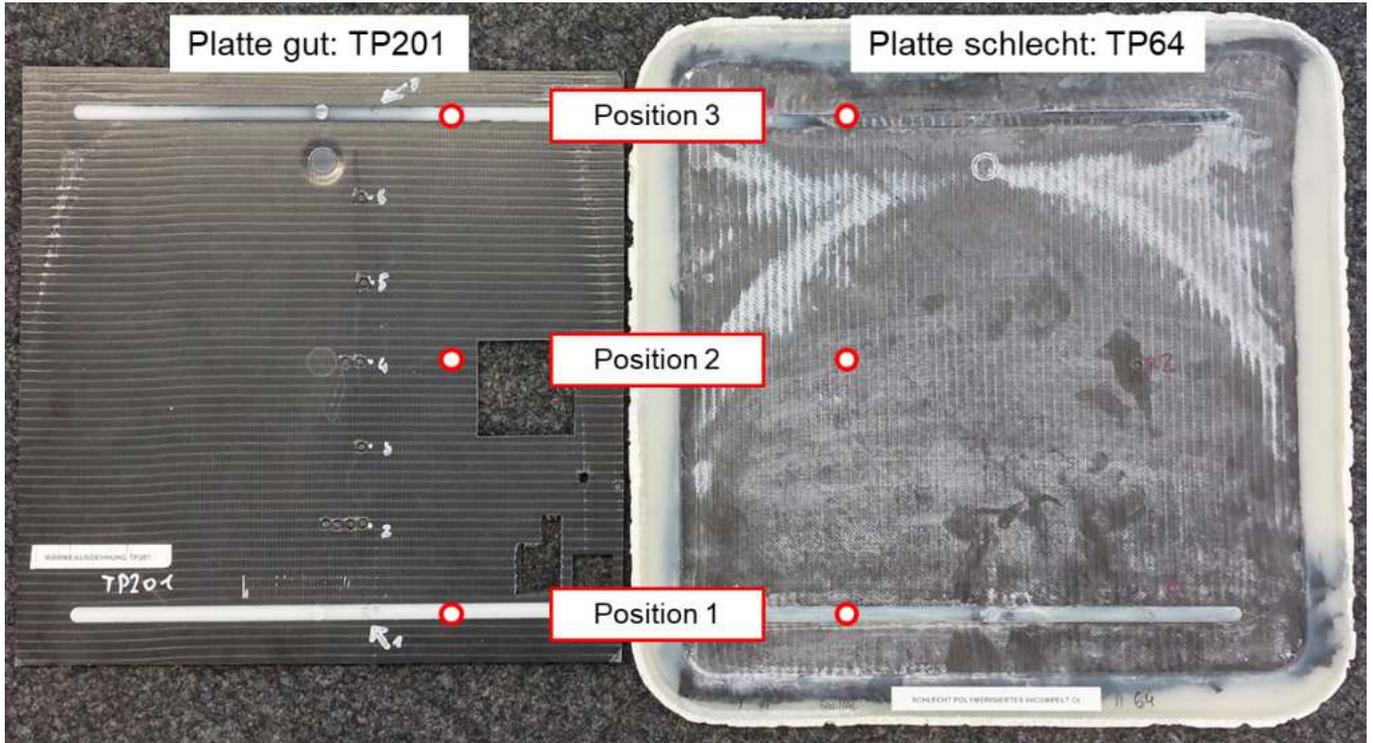


Abbildung 84: Probenentnahmepositionen von Testplatte 201 und 64

Folgende Schritte sind notwendig:

- Probenentnahme (Zylinderprobe, ca. 5 mg) an variabler Bauteilposition mit bekannter Entfernung zum Anguss / Die Proben können einen variablen Kohlefaseranteil besitzen
- Bestimmung von Schmelz- und Kristallisationsenthalpie sowie die zugehörigen Peak-Temperaturen mittels normgerechte zweistufiger DSC
- Bestimmung des Fasergewichtsanteils mittels thermogravimetrischer Analyse (TGA) an den zuvor untersuchten DSC-Proben (5 mg)
- Berechnung der Kristallinität der GPA 12 Matrix aus Schmelzenthalpie ($H_0 = 210 \text{ J/g}$) und Fasergewichtsanteil

Nachfolgend sind beispielhaft die Ergebnisse von DSC und TGA von jeweils 3 Proben pro Platte dargestellt.

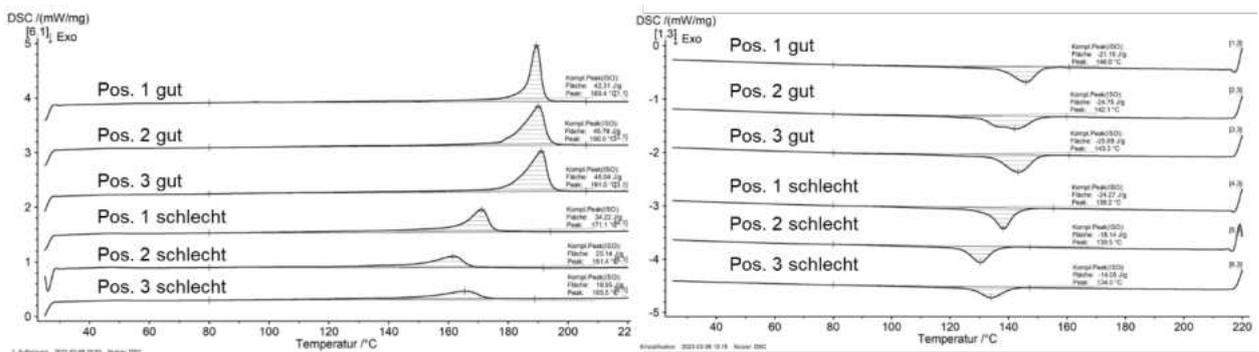


Abbildung 85: Vergleich DSC-Kurven der 1. Aufheizung (links) und Abkühlung (rechts)

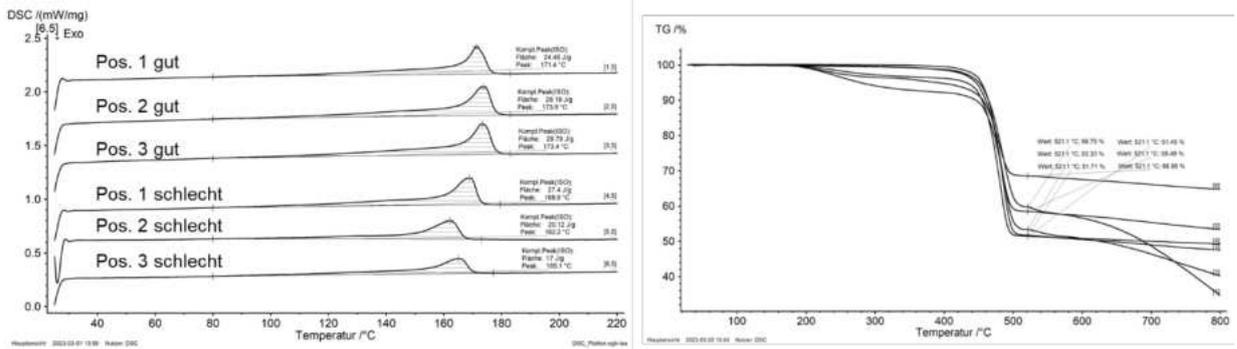


Abbildung 86: Vergleich DSC-Kurven der 2. Aufheizung (links) und TGA (rechts)

Wie zu erwarten, zeigen die Proben aus der „schlechten“ Platte in der DSC zu geringeren Temperaturen verschobene Schmelz- und Kristallisations-Peaks. Die TGA an diesen Proben zeigt im Vergleich zur „guten“ Platte zusätzlich ein früheres Einsetzen einer thermischen Abbaureaktion (Probenmassenverlust) der nicht polymerisierten monomeren Restbestandteile ab ca. 220 °C.

Die ermittelten Kennwerte können nun mit der Datenbasis verglichen bzw. in die abgeleiteten Korrelationsfunktionen übertragen werden. Als Beispiel hierfür wurden die Schmelztemperaturen (aus DSC 2. Aufheizung) in die Ofenzeit-Polymerisationsqualität-Funktion integriert. So können prozentuale Vergleichswerte für die Erreichung von Qualitätskennwerten ermittelt und zukünftig Grenzwerte für QS definiert werden.

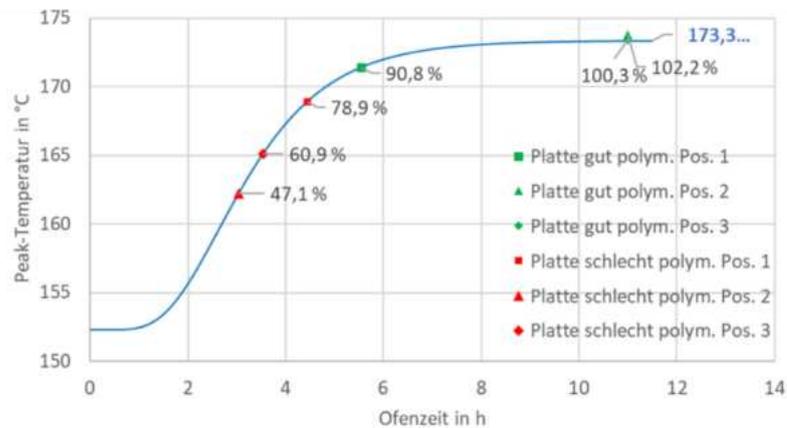


Abbildung 87: Ofenzeit-Polymerisationsqualität-Funktion mit integrierten Messwerten

Des Weiteren kann auf Basis der Prüfergebnisse aus DSC und TGA die Kristallinität der GPA 12 Matrix aus Schmelzenthalpie ($H_0 = 210 \text{ J/g}$) und Fasergewichtsanteil berechnet werden.

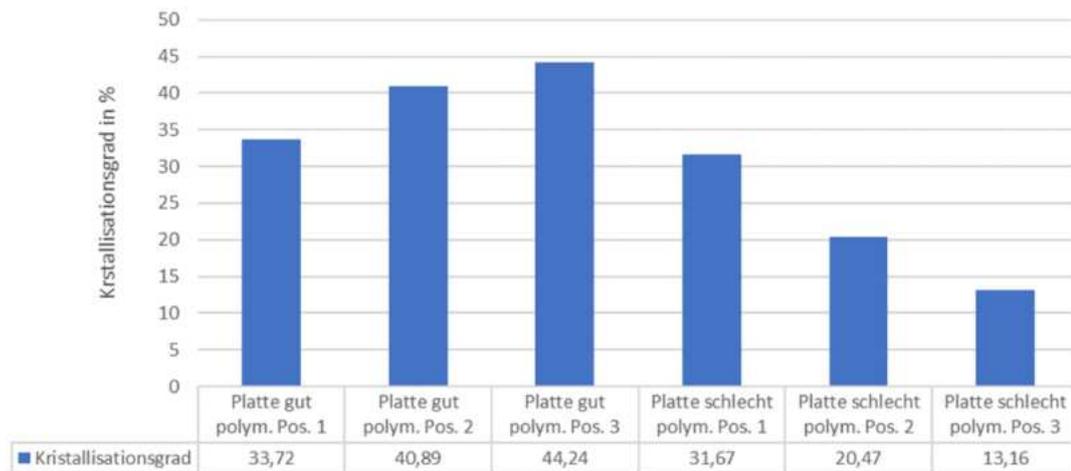


Abbildung 88: berechneter Kristallisationsgrad der Polymermatrix

8.2.2 Zerstörungsfreie Prüfverfahren

Die zerstörungsfreie Prüfverfahren haben den großen Vorteil, dass das Bauteil nach Prüfung verwendet werden kann. Das heißt das Bauteil wird während der Prüfung nicht zerstört oder geschädigt. Da es eine Vielzahl an Prüfvarianten gibt, sollen in diesem Projekt ausgewählte Prüfverfahren betrachtet werden. Vor allem muss hier die Infiltrationsqualität und der Faserverlauf kontrolliert werden.

8.2.2.1 Röntgenanalyse bzw. Computertomographie

Die Röntgenprüfung ist eine nicht-invasive medizinische Bildgebungstechnik, die verwendet wird, um die innere Struktur von Prüfkörpern zu betrachten. Sie basiert auf der Anwendung von Röntgenstrahlen, einer Form elektromagnetischer Strahlung. Wenn Röntgenstrahlen durch einen Körper geschickt werden, werden sie je nach Dichte des Materials unterschiedlich absorbiert. Die Röntgenaufnahme ist besonders nützlich zum Erkennen von inneren Schädigungen eines Bauteils, wie z.B. Lunker, Einschlüsse, Delamination o.ä.

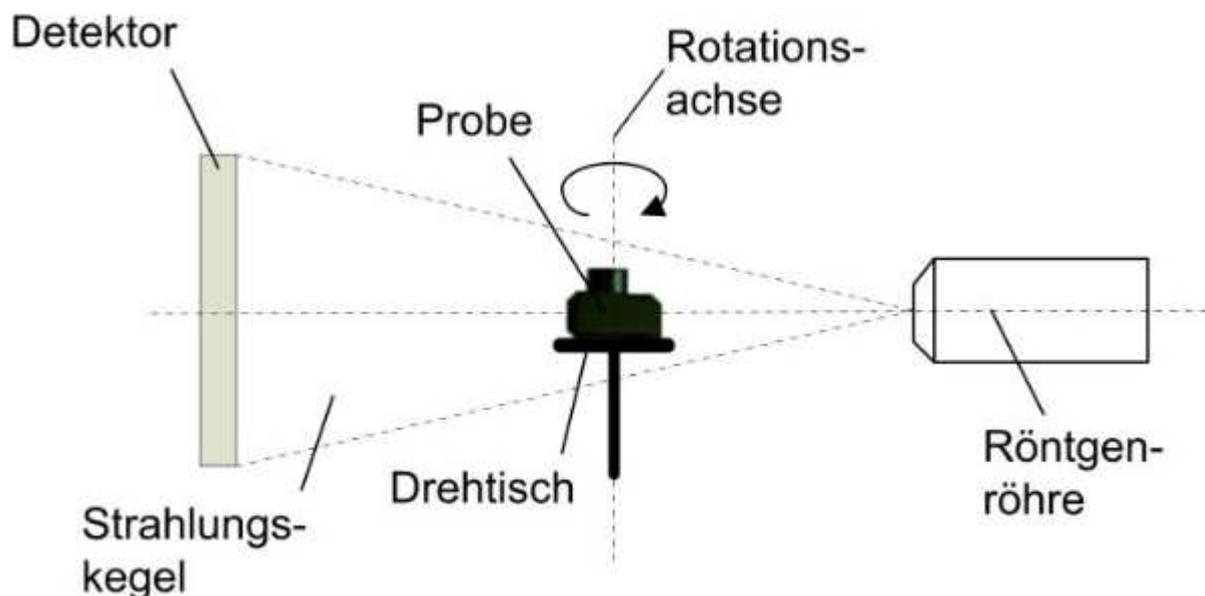


Abbildung 89: Funktionsweise Röntgenprüfung (All-Electronics, 10.03.2016)

Die industrielle CT nutzt ebenfalls Röntgenstrahlen, um das Innere von Objekten detailliert darzustellen, ohne diese zerstören zu müssen. Sie ermöglicht es, die innere Struktur von komplexen Bauteilen dreidimensional zu visualisieren und zu analysieren. Die erzeugten Bilder sind hochauflösend und können zur Untersuchung von Werkstoffen, zur Analyse von Fertigungsabweichungen, zur Fehlererkennung oder zur Überprüfung von Bauteilgeometrien verwendet werden.

Mit dem Tankdemonstrator wurden CT-Aufnahmen erstellt, um die Möglichkeiten mit dieser Methode ausfindig zu machen.

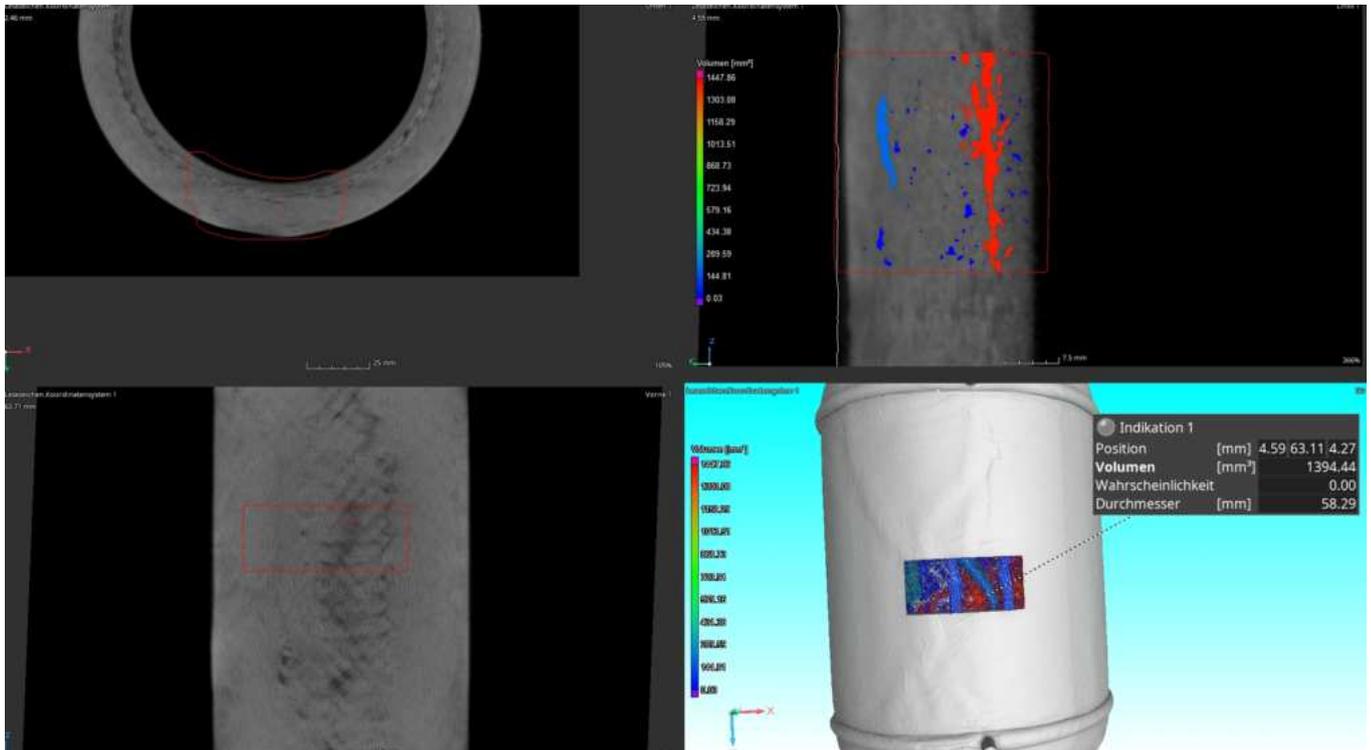


Abbildung 90: CT-Aufnahme des ersten infiltrierten Demonstrators mit Porenanalyse

Mithilfe der CT-Prüfung können am Tank vielerlei Dinge ausgewertet werden. Auch die Poren können erkannt und sogar ausgemessen werden, wenn das System optimal auf die Tankeigenschaften ausgelegt ist.

Die CT-Prüfung hat daher sehr viele Vorteile, ist aber ein sehr aufwändiges und zeitintensives Verfahren. Sollte jeder Tank geprüft werden, ist dies mit hohen Kosten verbunden. Die Funktionalität der Prüfung ist auf jeden Fall gegeben, zur Qualitätsüberprüfung von Einzelteilen ist diese Prüfung hervorragend geeignet.

8.2.2.2 Ultraschallprüfung

Die Ultraschallprüfung verwendet hochfrequente Schallwellen, die in das zu prüfende Material eingeleitet werden. Ein Ultraschallprüfgerät erzeugt diese Schallwellen, die durch einen Wandler (Ultraschallkopf oder -sonde) in das Material gesendet werden. Bei der Interaktion der Schallwellen mit Materialgrenzen oder Unregelmäßigkeiten im Inneren des Werkstoffs werden die Wellen reflektiert. Die reflektierten Schallwellen werden von der Sonde empfangen und vom Prüfgerät verarbeitet.

Die Ultraschallprüfung wird angewandt, um innere Defekte wie Risse, Lunker, Poren oder Einschlüsse zu detektieren. Sie kann auch zur Messung der Materialdicke genutzt werden. Bei Verbundmaterialien wie bei unserem CFK-Tank hilft die Prüfung, Delaminationen oder andere Fehlstellen zu finden.

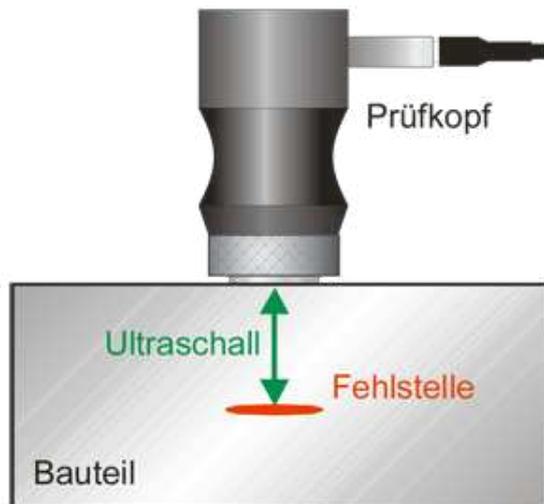


Abbildung 91: Funktionsprinzip Ultraschallprüfung (KarlDeutsch, -)

Da im Hause Handtmann aktuell nur sehr wenig Erfahrung mit Ultraschallprüfungen vorhanden ist, wurden extern Prüfungen mit unserem Demonstrator-Tank durchgeführt. Der Prüfdienstleister „GMA-Werkstoffprüfung“ besitzt hier langjährige Erfahrung, explizit auch in der Prüfung von Composite-Bauteilen.

Der erste infiltrierte Demonstrator-Tank sowie eine Beispielplatte mit Kohlefaserverstärkung wurden bei GMA geprüft. Es sollte die grundsätzliche Machbarkeit überprüft werden. Das Material verhält sich wie erwartet ähnlich zu anderen CFK-Materialien und Defekte sind deutlich zu erkennen. In der folgenden Abbildung ist oben die aufgeklappte Mantelfläche des zylindrischen Teils des Tanks in einer gewissen Tiefe zu erkennen. Es wurde die Tiefe gewählt, bei der deutliche Fehlstellen zu erkennen sind. Wie im Röntgenbild bei dem Demonstrator schon zu erkennen war, sind in einer Tiefe von ca. 10-15mm deutliche Trockenstellen vorhanden.

Im unteren Teil der Abbildung ist der Schnitt durch den Tank zu erkennen. Die Bilder wurden aneinandergereiht, das heißt der komplette Durchmesser des Tanks ist zu sehen. In diesem Bild ist somit die ganze Dicke des Teils abgebildet und man kann dadurch erkennen, in welcher Tiefe die Fehlstellen liegen.

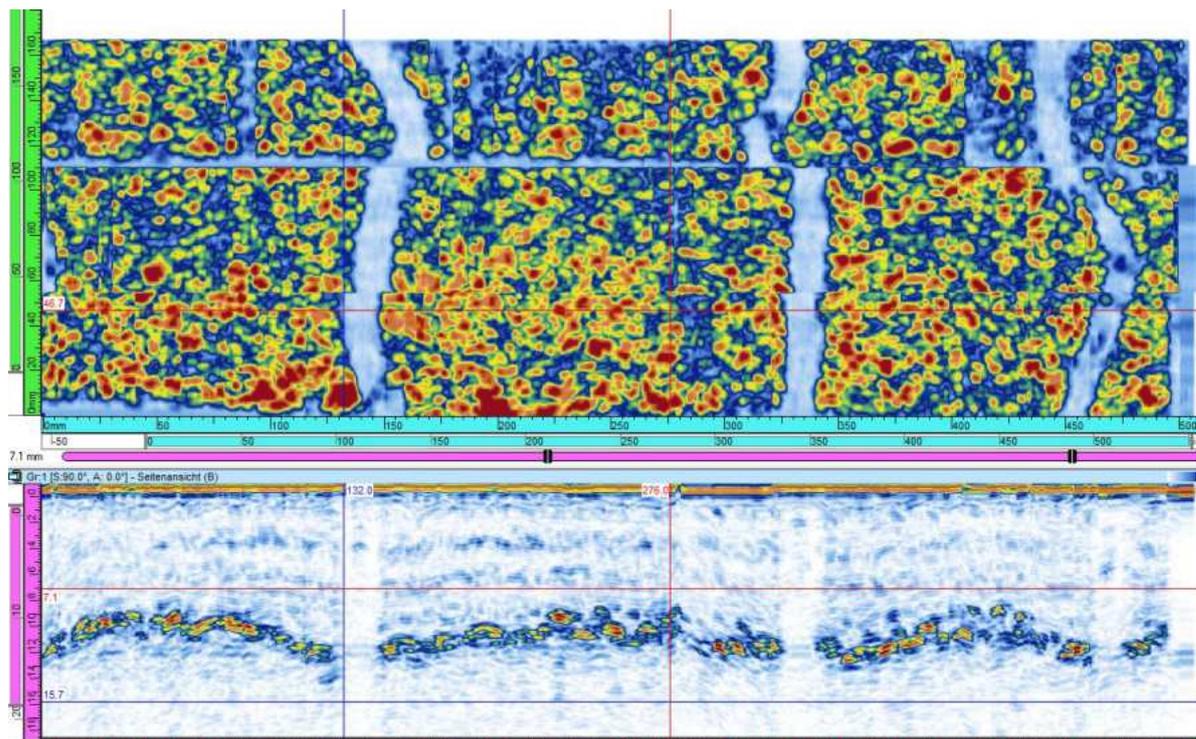


Abbildung 92: Ultraschallbilder des Demonstrator-Tanks bei GMA-Werkstoffprüfung aufgenommen

Auch die Plattenversuche haben sehr gut funktioniert. Mit definierten Fehlstellen in sogenannten Prüfplatten oder Prüfkörpern könnte der Ultraschallkopf exakt kalibriert werden. Diese Prüfungen sollten allerdings nur die grundsätzliche Machbarkeit darstellen, sodass keine weiteren Versuche durchgeführt wurden.

Für den späteren Serienprozess ist die Ultraschallprüfung aber auf jeden Fall eine Möglichkeit für eine zerstörungsfreie Qualitätssicherungsmethode, da die Fehlstellen sehr gut erkannt werden können. GMA entwickelt hierfür sogar komplette Anlagen, die einen Tank automatisiert abfahren können. Dadurch könnte nach Bedarf sogar jeder Tank geprüft werden, eine sogenannte 100%-Prüfung. Vorab müssten die exakten Parameter für den Tank über verschiedene Kalibrierungsmethoden ermittelt werden.

8.2.2.3 Wirbelstromprüfung

Bei der Wirbelstromprüfung wird eine Spule, die mit Wechselstrom betrieben wird, nahe an das zu prüfende Material herangeführt. Der Wechselstrom in der Spule erzeugt ein wechselndes Magnetfeld, das wiederum Wirbelströme im leitfähigen Prüfstück induziert. Diese Wirbelströme erzeugen ein eigenes Magnetfeld, das auf die ursprüngliche Spule zurückwirkt und deren Impedanz ändern kann.

Wenn es im Material Inhomogenitäten, wie Risse, Einschlüsse oder (wie im Fall von CFK) einzelne Fasern mit einer anderen elektrischen Leitfähigkeit als die Matrix, gibt, wird das Muster der Wirbelströme und somit auch das sekundäre Magnetfeld gestört. Diese Störungen führen zu Veränderungen in der Impedanz der Spule, die vom Wirbelstromprüfgerät detektiert und analysiert werden können. Ursprünglich wurde diese Prüfung lediglich zum Erkennen von Rissen bei metallischen Werkstoffen angewandt. Nach aktuellem Stand der Technik kann aber die elektrische Leitfähigkeit der Fasern dazu genutzt werden, um Faserverläufe und Störstellen im CFK zu erkennen.

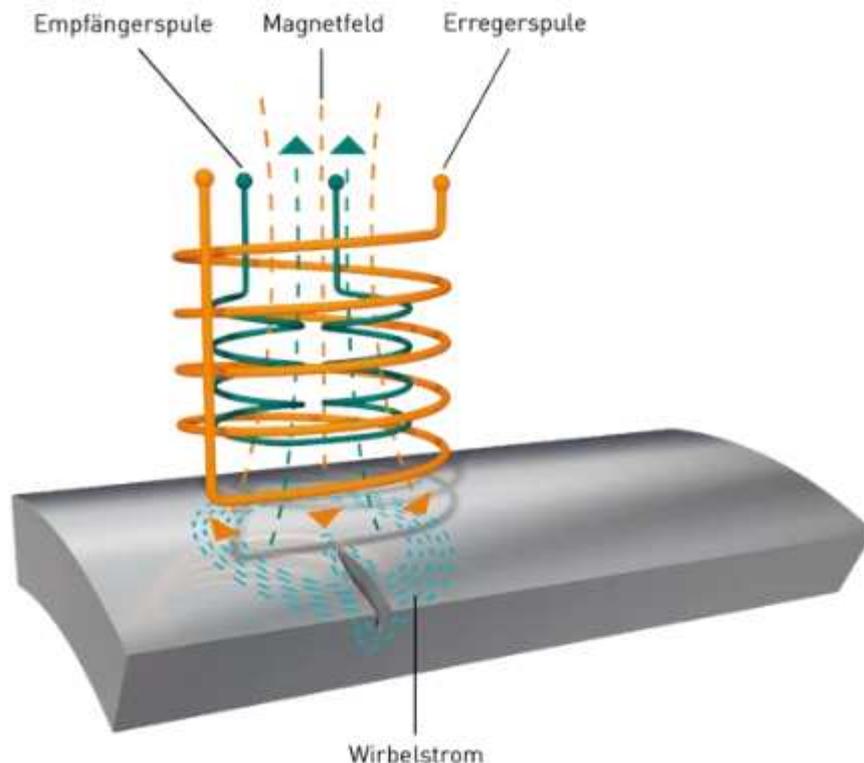


Abbildung 93: Funktionsprinzip Wirbelstromprüfung (Foerster, 06.12.2021)

Für die Machbarkeitsanalyse am Fraunhofer IKTS wurde eine spezielle Platte hergestellt, die einen besonderen Lagenaufbau besitzt. Eine 8mm starke Platte wurde hergestellt, die aus $\pm 45^\circ$ -Lagen zusammengesetzt ist. Die Lagen wurden dabei definiert zueinander verdreht, sodass durch die komplette Platte in verschiedenen Tiefen eine

leichte Faserverschiebung vorhanden ist. Das heißt, je nachdem welche Lage durch die Wirbelstromprüfung erkannt wird, ist auch direkt klar, in welcher Tiefe die Wirbelstromprüfung die Faserverläufe noch erkennen kann.

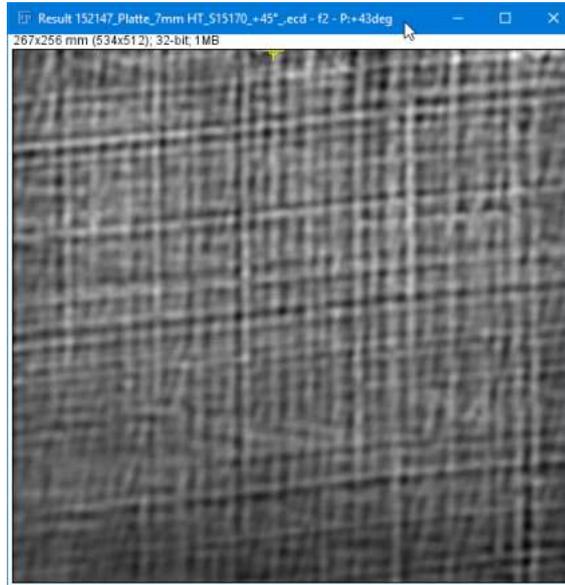


Abbildung 94: Bild aus der Wirbelstromprüfung mit Hicompelt® am Fraunhofer IKTS

Die Wirbelstromprüfung zeigt anschließend ein digitales Bild. Je nach Sensorwinkel und Messfrequenz sind unterschiedliche Auflösungen möglich. Durch eine spezielle Auswertung mithilfe der 2D-FFT-Analyse können die Positionen der Faserverläufe ermittelt werden.

Der Lagenaufbau der Prüfplatte wurde wie folgt gewählt:

$[-90^\circ/0^\circ/-82,5^\circ/7,5^\circ/-75^\circ/15^\circ/-67,5^\circ/22,5^\circ/-60^\circ/30^\circ/-52,5^\circ/37,5^\circ/-45^\circ/45^\circ]_s$

Im folgenden Schaubild ist deutlich zu sehen, welche Lagen erkannt werden können. Der Lagenaufbau ist zudem nochmal visuell dargestellt:

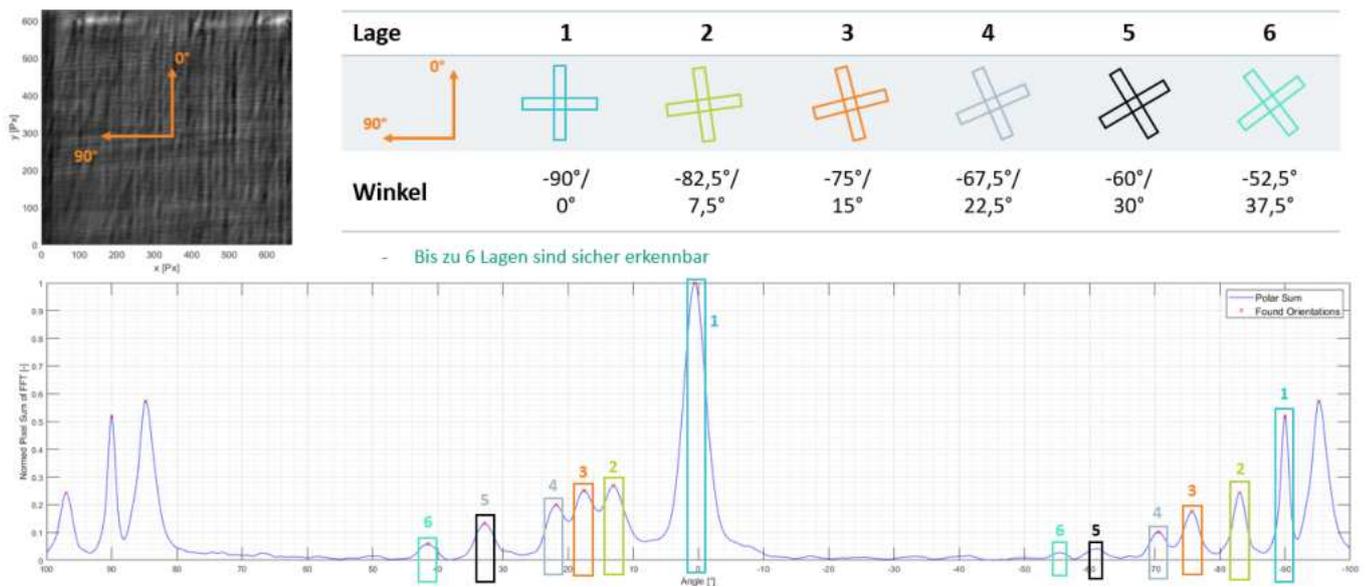


Abbildung 95: Auswertung der Ergebnisse der Wirbelstromprüfung

Es können somit 6 Lagen eindeutig erkannt werden. Dies entspricht einer Tiefe von ca. 3,5-4mm in die CFK-Platte. Auch hier werden keine weiteren Prüfungen durchgeführt, da die Feinjustierung der Sensoren sowieso auf das Endprodukt ausgelegt werden muss. Durch diesen Versuch ist nun aber klar, bis zu welcher Tiefe die Lagen eindeutig auffindig gemacht werden können.

Interessant wäre zusätzlich eine Messung der Faserorientierung im trockenen Zustand, d.h. ohne Matrixverstärkung. Dadurch könnte direkt nach dem Trockenwickelprozess der Lagenaufbau kontrolliert werden. Aus diesem Grund wurde noch ein Versuch mit einem trockengewickelten Tank durchgeführt, da nicht klar ist, ob hier die gleichen Ergebnisse möglich sind.

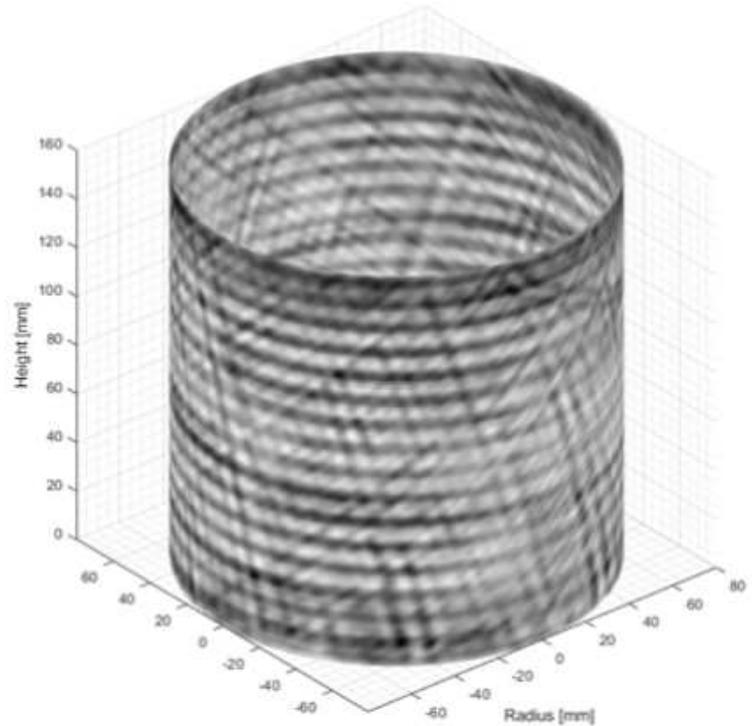


Abbildung 96: Trockengewickelter Tank auf Drehteller und dazugehöriges Messergebnis

Auch ohne Matrix kann der Faserverlauf aufgezeigt werden. Die Gefahr bei den trockenen Fasern liegt lediglich darin, dass der Messkopf des Sensors die Fasern durch die Relativbewegung auf der Faseroberfläche schädigen kann. Dieses Problem wurde dadurch umgangen, dass um den Tank eine dünne Folie gespannt wurde.

Die Auflösung verhält sich sehr ähnlich ohne Matrix als auch mit infiltrierter Matrix. Der Tank kann somit vor und nach Infiltration oberflächlich auf Faserorientierung überprüft werden. Zudem kam der Hinweis vom Fraunhofer IKTS, dass mit der Wirbelstromprüfung auch Fehlstellen erkannt werden. Delamination, Poren, Einschlüsse o.ä. können mit der Wirbelstromprüfung ebenso gut erkannt werden, wie mit der Ultraschallprüfung, allerdings nur bis zu einer gewissen Tiefe.

Daher muss bei der Planung des Serienprozesses verglichen werden, welcher Qualitätssicherungsprozess wirklich Sinn macht, sowohl von Kostenseite als auch aus technischer Sicht.

8.3 Automatisierungsmöglichkeiten der Prozesskette

AP 3.3 - Automatisierungsmöglichkeiten der Prozesskette, Prozessüberwachung in der Produktion - Industrie 4.0 (04/23 – 12/23)

Das Ziel dieses Arbeitspaktes besteht darin die Möglichkeiten für eine Automatisierung der angedachten Fertigung hinsichtlich typischer Elemente wie Produktionsvorbereitung, Produktionsprozess und Qualitätssicherung zu prüfen und abzuleiten.

Dazu zählen konkret:

IPT (2 PM)

- Integration von Sensorik zur Bewertung des spezifische Prozessverhalten an individuellen Positionen der Fertigungslinie
- Charakterisierung der Sensorik mit Blick auf die Messdaten und die Datenübertragung
- Datenübergabe an Assistenzsysteme der Fertigung- bzw. Fertigungssteuerung
- Positionsspezifische Prozesskontrolle und angedachte weitreichende Optimierung von Prozessparametern (Ressourcen: Zeit, Energie) und Bauteilqualitäten.
- Übertragung auf das Fertigungskonzept zur weitreichenden Optimierung bzgl. Ressourcen- und Energieeffizienz

Hier arbeiten das IPT und Handtmann direkt zusammen und gleichen die sich ergebenden Anforderungen mit den Möglichkeiten ab und leiten daraus konkrete Handlungspunkte ab.

Die Sensorierung von Werkzeugen mit Temperatur- und Drucksensoren zur Echtzeitmessung von Prozessparametern ist ein Schlüsselement der Digitalisierung 4.0 in industriellen Umgebungen. Hier sind einige Möglichkeiten, wie dies die Prinzipien der Industrialisierung bzw. Digitalisierung 4.0 erfüllt:

1. **Echtzeitüberwachung und Steuerung:** Durch die Integration von Sensoren in Werkzeugen können Prozessparameter wie Temperatur und Druck in Echtzeit gemessen und überwacht werden. Dies ermöglicht eine präzisere Steuerung des Fertigungsprozesses, da Abweichungen sofort erkannt und entsprechende Anpassungen vorgenommen werden können. Dies führt zu einer verbesserten Qualität, Effizienz und Konsistenz der Produktion.
2. **Datengesteuerte Entscheidungsfindung:** Die gesammelten Daten können analysiert werden, um Einblicke in den Fertigungsprozess zu gewinnen. Durch die Anwendung von Datenanalyse- und Machine-Learning-Algorithmen können Muster, Trends und potenzielle Probleme identifiziert werden. Dies ermöglicht eine datengesteuerte Entscheidungsfindung, die zu optimierten Prozessen, reduzierten Ausfallzeiten und verbesserten Produktionsleistungen führt.
3. **Vernetzte Produktionssysteme:** Die Integration von Sensoren in Werkzeugen ermöglicht die Vernetzung von Produktionsanlagen und -systemen. Durch den Einsatz von IoT (Internet of Things)-Technologien können Sensordaten drahtlos oder über kabelgebundene Netzwerke an zentrale Steuerungssysteme übertragen werden. Dies ermöglicht eine nahtlose Kommunikation und Koordination zwischen verschiedenen Teilen der Fertigungslinie, was zu einer effizienteren und flexibleren Produktion führt.
4. **Predictive Maintenance:** Durch die kontinuierliche Überwachung von Prozessparametern können potenzielle Ausfälle oder Verschlechterungen von Werkzeugen frühzeitig erkannt werden. Dies ermöglicht die Umsetzung von Predictive-Maintenance-Strategien, bei denen Wartungsarbeiten geplant werden, bevor tatsächliche Probleme auftreten. Dies reduziert ungeplante Ausfallzeiten, senkt die Wartungskosten und verlängert die Lebensdauer der Werkzeuge.
5. **Flexibilität und Anpassungsfähigkeit:** Die Sensorisierung von Werkzeugen ermöglicht es, Fertigungsprozesse flexibler und anpassungsfähiger zu gestalten. Durch die Überwachung von Prozessparametern können Produktionssysteme schnell auf sich ändernde Anforderungen oder Bedingungen reagieren und sich anpassen. Dies unterstützt agile Fertigungskonzepte und die Produktion von individualisierten oder maßgeschneiderten Produkten.

Insgesamt trägt die Sensorisierung von Werkzeugen zur Realisierung der Prinzipien der Digitalisierung 4.0 bei, indem sie die Produktion intelligenter, vernetzter, effizienter und flexibler macht.

8.4 Untersuchung des Recyclingpotenzials

Im Rahmen des Projektes wurde das Recyclingpotenzial des entwickelten CFK-Verbundwerkstoffes zur Schließung von Stoffkreisläufen bewertet. Die Bewertung des Recyclingpotenziales erfolgte auf Basis von zahlreichen Materialanalysen und praktischen Versuchen zur Simulation von Recyclingprozessen. Dabei wurden mechanische

und thermische Recyclingtechnologien angewendet. Die Arbeiten hierzu liefen durchweg in direkter Zusammenarbeit zwischen dem IPT und Handtmann. Im Wesentlichen wurden Fragestellungen zum rohstofflichen und werkstofflichen Recyclingmöglichkeiten beantwortet.

Neben dem mechanischen Recycling und dem chemischen Recycling (Solvolyse) ist die Pyrolyse im gegenwärtigen Stand der Technik das wichtigste industriell verfügbare Verfahren zum rohstofflichen Recycling von kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffen (CFK) aus vorwiegend duroplastischer Matrix (z.B. Epoxidharz). Entscheidend für die Qualität der wiedergewonnenen Fasern sind die hierbei angewendeten Prozessparametern. Im ersten Schritt wurden daher thermogravimetrische Analysen an HICOMPELT Materialproben unter Inertgasatmosphäre durchgeführt.

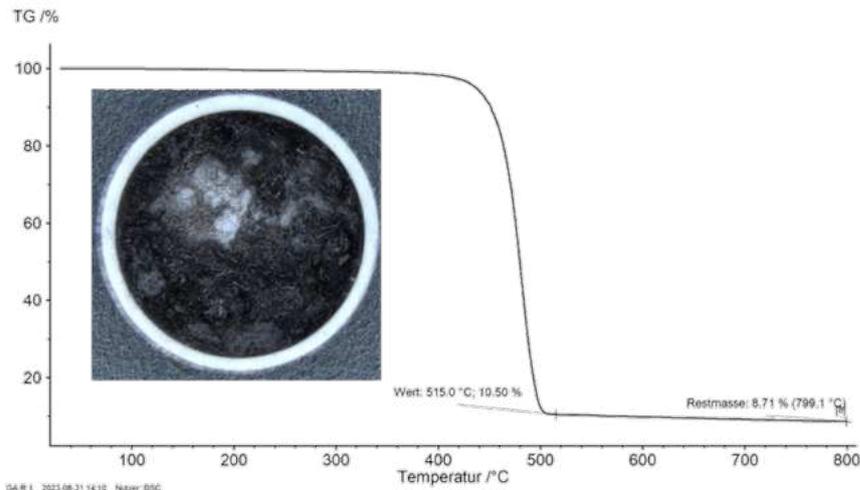


Abbildung 97: Beispiel TGA-Messkurve HICOMPELT / Foto Tiegel mit hochreinen Kohlefasern nach 800 °C

Die Untersuchungen zeigten, dass ein rohstoffliches Recycling des entwickelten Verbundwerkstoffes im industriellen Pyrolyse-Prozess möglich ist. Somit ergibt sich die Möglichkeit bei der Entsorgung entsprechender Tanksysteme derzeitige bereits existente Stoffkreisläufe zu nutzen. Ein größeres Potenzial ergibt sich aus den generellen thermoplastischen Eigenschaften des entwickelten Verbundwerkstoffes und der damit verbundenen Möglichkeit der werkstofflichen Nutzung in Folgeprodukten. Die Aufbereitung von unverstärkten Guss-Polyamid 12 (Lauramid) Abfällen (z.B. Spanfraktionen) kann unter Zugabe von Additiven (Prozessstabilisatoren und Kettenmodifikatoren) im Compoundierprozess mittels Doppelschneckenextruder erfolgen. Die resultierenden, thermoplastisch verarbeitbaren PA12 Regranulate (Lauramid-Inject) sind gut untersucht und können reproduzierbar mit definierten anwendungstechnischen Eigenschaften erzeugt werden. Hieraus abgeleitet wurden im Rahmen des Projektes Untersuchungen zur thermoplastischen Aufbereitung des entwickelten Verbundwerkstoffes durchgeführt. Zur Realisierung eines ganzheitlichen Recycling-Konzeptes wurden in Anlehnung an eine zukünftige industrielle Aufbereitung alle notwendigen Einzelprozessschritte (Zerkleinerung, Aufbereitung, Weiterverarbeitung) untersucht.

Die Zerkleinerung von bereitgestellten HICOMPELT-Resten mit einer Faserkonzentration von ca. 50 Gew. % erfolgte auf einer Kunststoffschneidmühle. Hierbei konnten Parameter und Prozesseinstellung zur Erzeugung von rieselfähigen Ausgangsmaterial mit reproduzierbarer Partikelgeometrie und einem Minimum an Feinstaub- und Kleinstpartikel-Fraktion identifiziert werden, welche sich auf entsprechende industrielle Großprozesse übertragen lassen.



Abbildung 98: v.l. HICOMPELT-Rest, Kunststoffschneidmühle, resultierende Partikelfraktion (Ausgangsmaterial für Folgeversuche)

Mit dem so erzeugten Ausgangsmaterial wurden Versuche zur thermoplastischen Aufbereitung durchgeführt. Mit dem Ziel spritzgießfähige Compounds mit definierter Kohlefaserkonzentration herzustellen, wurden umfangreiche Konzentrationsstudien unter Variation von Rezepturbestandteilen (Additiven, HICOMPELT (CF50), GPA12-Span) und Prozessparameter (Temperatur, Zeit, Drehzahl) im Laborknetzer durchgeführt.

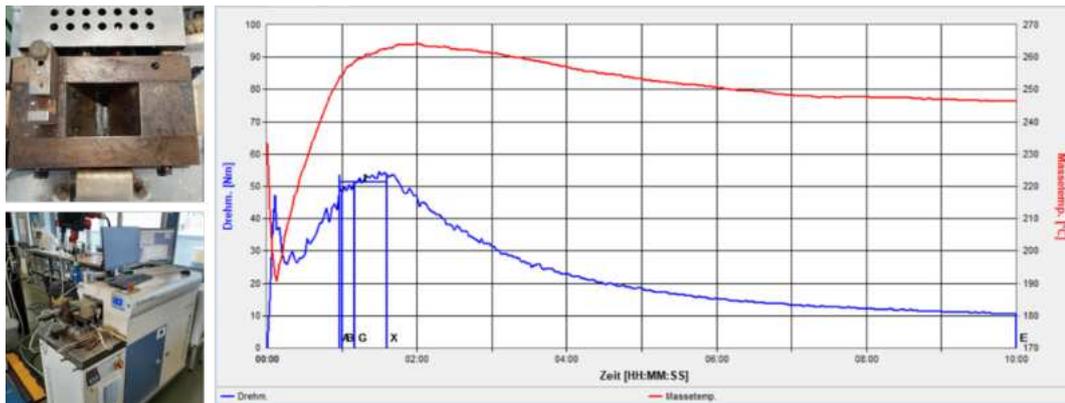


Abbildung 99: v.l. Laborknetzer (Brabender), Beispiel-Plastogramm Temperatur- und Drehmoment-Verlauf der Homogenisierung / Compoundierung

Es konnten zielführende Rezepturen mit unterschiedlichen CF-Gehalten entwickelt werden, welche die für den Folgeverarbeitungsprozess Spritzguss notwendigen verarbeitungstechnischen Eigenschaften besitzen. Aus diesen Rezepturen wurden im Spritzgussverfahren, unter PA12 typischen Parametern, normgerechte Vielzweckprüfkörper hergestellt.



Abbildung 100: v.l. HAAKE™ MiniJet Pro Mini-Spritzgussmaschine, Vielzweckprüfkörper

Untersuchungen mittels TGA und Gaspiknometrier zeigen eine sehr gute Korrelation zwischen Faserkonzentration und Materialdichte, was auf eine gute Materialhomogenität hinweist. Die gewählten Faserkonzentrationen der unterschiedlichen Rezepturen sind an die am Markt üblicher faserverstärkter PA12-Compounds angelehnt.

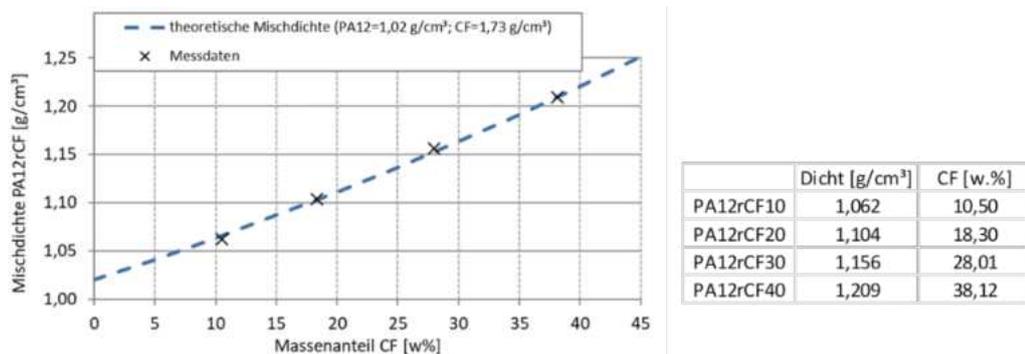


Abbildung 101: Korrelation Faserkonzentration (TGA) und Materialdichte (Gaspiknometrier)

Zur Charakterisierung der mechanischen Eigenschaften und Bewertung der Materialqualität im Vergleich zu marktüblichen PA12CF-Compounds wurden an den Vielzweckprüfkörpern unter anderen Zugversuchen (ISO 527) und Kerbschlagbiegeprüfungen (ISO 179) durchgeführt.

Die untersuchten Rezepturen zeigen sehr gute mechanische Kennwerte, welche im Erwartungsbereich vergleichbarer Compoundprodukte liegen. Im direkten Vergleich zeigt sich Optimierungspotential in der Bruchdehnung, welche in Abhängigkeit der CF-Konzentration geringe Werte zeigt. Ein Optimierungsansatz hierfür liegt in der Erhaltung einer möglichst langen Kohlefaser (> 200 µm) im Endprodukt, da diese durch die einzelnen Prozessschritte der Aufbereitung gekürzt wird. Mikroskopische Untersuchungen zur Bestimmung der resultierenden Faserlängen (nach TGA) zeigen eine große Verteilung und mittlere Faserlängen im Bereich 100 bis 170 µm.

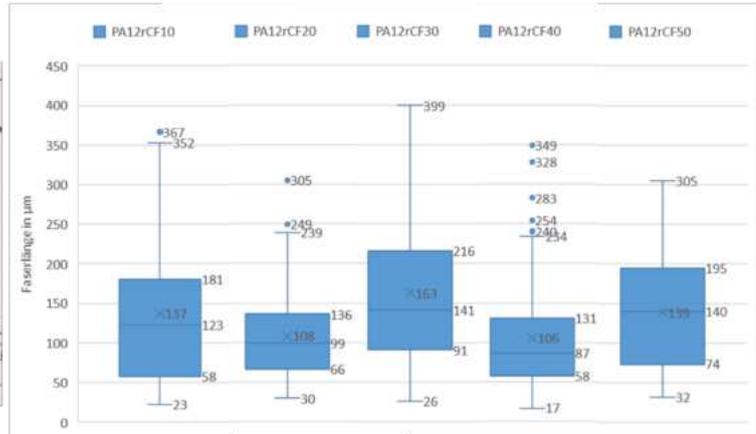
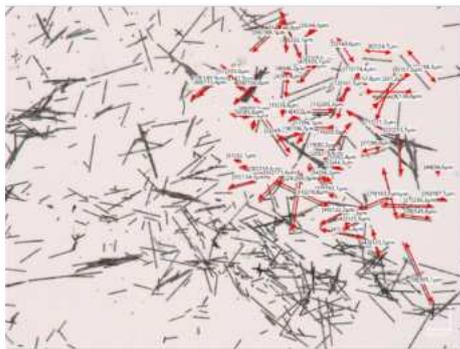


Abbildung 102: mikroskopische Untersuchungen zur Bestimmung der Faserlängenverteilung (Rezepturproben nach TGA 800°C)

Ein Qualitätsmerkmal von Lauramid-Inject ist der Kristallisationsgrad, welcher mittels DSC ermittelt werden kann. Zur Bewertung der PA12 Qualität als Matrix in den unterschiedlichen Rezepturen wurden thermische Analysen unter Berücksichtigung der Faserkonzentration durchgeführt. Die an den Rezepturen ermittelten und um den Faseranteil angepassten Schmelzenthalpien und der daraus berechnete Kristallisationsgrad liegen im Erwartungsbereich, wodurch eine hohe PA12 Qualität bestätigt werden kann.

	CF	Enthalpie	angep. Enthalpie	Kristallisationsgrad
	w%	J/g	J/g	%
PA12rCF10	10,5	61,52	68,74	32,73
PA12rCF20	18,3	56,89	69,63	33,16
PA12rCF30	28,01	52,28	72,62	34,58
PA12rCF40	38,12	45,27	73,16	34,84

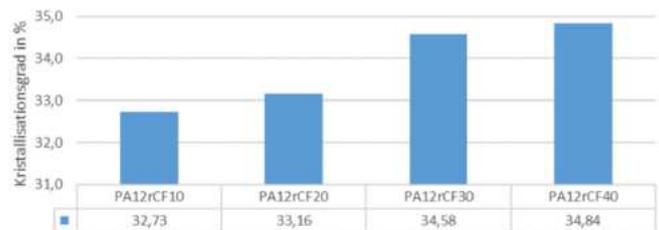


Abbildung 103: Ergebnisse aus thermischen Analysen (TGA und DSC) / Kristallisationsgrad

Anhand der umfangreichen Untersuchungen zeigte sich, dass die Realisierung eines ganzheitlichen Konzeptes von der Aufbereitung bis hin zum Recycling und zur Verwertung in Folgeprodukten (Spitzguss) möglich ist und somit ein großes Potential für das werkstoffliche Recycling zu thermoplastischen Regranulaten resultiert. Die einzige im Tank integrierte Komponente, welche für ein sortenreines CFK-Recycling entfernt werden muss, ist der Boss. Ist dieser entfernt bildet der Tank bei der Entsorgung einen qualitativ hochwertigen, sortenreinen Materialquelle, welche die Grundvoraussetzung für eine erfolgreiche Etablierung eines zu schließenden Stoffkreislaufes bildet.

9 Ausblick und weitere Vorgehensweise

Im Zuge der Entwicklung einer nachhaltigen und emissionsfreien Energieversorgung wurde ein fortschrittlicher Wasserstofftank konzipiert und entwickelt. Die bisherigen Testergebnisse zeigen vielversprechende Eigenschaften hinsichtlich Permeation, Wasserstoffreinheit und Effizienz. Diese Entwicklung stellt einen bedeutenden Schritt in der Bereitstellung von Wasserstoffspeicherlösungen für eine Vielzahl von Anwendungen dar, einschließlich der Mobilitätsbranche, da der Typ 4-Tank sehr leicht ist.

Nach diesen vielversprechenden Ergebnissen der Erprobungsphase des Wasserstofftanks stehen nun zwei kritische Schritte bevor, die für die Kommerzialisierung des Produkts entscheidend sind. Es müssen Zertifizierungsversuche durchgeführt werden, um die Eigenschaften des Tanks im realen Umfeld abzuprüfen. Im ersten Schritt sind vor allem Berstdruckversuche von hoher Bedeutung, da diese die prinzipielle technische Eignung des Tanks belegt. Außerdem muss die Serienfertigung des Tanks betrachtet werden. Im aktuellen Stand sind wir im Prototypen-Status, die Versuche werden im Labormaßstab mit Kleinwerkzeugen durchgeführt.

1. Zertifizierungsversuche:

Die Zertifizierung ist ein essenzieller Prozess, um die Konformität des Wasserstofftanks mit internationalen Sicherheitsnormen und Industriestandards zu gewährleisten. Es wird ein detaillierter Zertifizierungsplan erstellt, der die Durchführung umfassender Tests beinhaltet, um die Einhaltung aller relevanten Vorschriften zu demonstrieren. Dies umfasst unter anderem:

- Drucktests zur Überprüfung der mechanischen Festigkeit und Dichtigkeit.
- Thermische Tests zur Bewertung der Leistung unter verschiedenen Temperaturbedingungen.
- Tests unter realen Betriebsbedingungen, um die Zuverlässigkeit und Haltbarkeit zu beurteilen.
- Verschiedene Schädigungsmechanismen auf den Tank unter Betriebsdruck

Die erfolgreiche Zertifizierung wird die Markteinführung des Wasserstofftanks wesentlich unterstützen und das Vertrauen potenzieller Kunden stärken.

2. Planung der Serienfertigung:

Parallel zu den Zertifizierungsversuchen wird die Vorbereitung für die Serienfertigung des Wasserstofftanks vorangetrieben. Dies beinhaltet:

- Auswahl und Qualifizierung von Zulieferern für hochwertige Materialien und Komponenten.
- Entwicklung eines Skalierungsplans für die Produktion, um die wachsende Nachfrage zu erfüllen.
- Investition in Produktionsanlagen und die Einführung fortschrittlicher Fertigungstechnologien.
- Implementierung eines Qualitätsmanagementsystems, um eine gleichbleibend hohe Produktqualität sicherzustellen.
- Ausarbeitung von Logistik- und Vertriebsstrategien, um eine effiziente Lieferkette zu etablieren.

Das Hauptziel für die kommende Phase ist es, einen sicheren, zuverlässigen und wirtschaftlich produzierbaren Wasserstofftank auf den Markt zu bringen, der die strengen Anforderungen der Industrie erfüllt und einen wertvollen Beitrag zur Energiewende und zur Dekarbonisierung verschiedener Sektoren leistet.

Mit dem Abschluss der Entwicklung und den erfolgreichen Ergebnissen ist das Projektteam zuversichtlich, dass die bevorstehenden Zertifizierungsversuche und die Planung der Serienfertigung den Grundstein für eine erfolgreiche Kommerzialisierung des Wasserstofftanks legen werden. Wir stehen an der Schwelle zu einer neuen Ära der Energieversorgung, und dieser Wasserstofftank kann eine Schlüsselkomponente im Übergang hierzu darstellen.

10 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Speicherung von Wasserstoff (Lehmann & Luschtinetz, 2014)	7
Abbildung 2: Druckbehältertypen (Schulz, 2013).....	9
Abbildung 3: Darstellung der Entwicklungsschwerpunkte im Verbundprojekt	13
Abbildung 4: Projektplan zu Projektbeginn.....	14
Abbildung 5: Zugprüfkörper mit verschiedenem Lagenaufbau	18
Abbildung 6: Darstellung der Prüfergebnisse am IPT und am FIBRE (E-Modul)	19
Abbildung 7: Darstellung der Prüfergebnisse am IPT und am FIBRE (Zugfestigkeit)	20
Abbildung 8: Darstellung der Prüfergebnisse am IPT und am FIBRE (Bruchdehnung)	20
Abbildung 9: Bestimmung Schubmodul an Hicompelt.....	21
Abbildung 10: Erste Permeationsprüfungen mit Lauramid®.....	23
Abbildung 11: Prüfaufbau am TesTneT	23
Abbildung 12: Permeationsrate von Hicompelt (2mm) bei 10bar	24
Abbildung 13: Erklärung der Masseströme	26
Abbildung 14: Aufbau der Prüfkammer des He-Permeationsmessaufbaus.....	27
Abbildung 15: Schematischer He-Permeationsmessaufbau	27
Abbildung 16: Prüfkörpergeometrie	28
Abbildung 17: μ CT und REM-Aufnahmen von einem Hicompelt-Prüfkörper mit und ohne Reinpolyamidbeschichtung	29
Abbildung 18: Wärmeausdehnung Lauramid (©Netzsch)	30
Abbildung 19: Wärmeausdehnung UD-Hicompelt CL in 0° und 90° (©Netzsch)	31
Abbildung 20: Ultraschallbild der größten Schadensfläche (Probe4.2-20Joule) (©Fraunhofer IMWS)	32
Abbildung 21: Impactversuche 15J (2 Platten links mit EP-Harz, 2 Platten rechts mit Lauramid).....	33
Abbildung 22: Vergleich der Ultraschallergebnisse mit EP-Harz (links) und Lauramid (rechts) bei 15J	33
Abbildung 23: μ CT-Aufnahme von der Impact Stelle der Prüfkörper bei unterschiedlich induzierten Energien (Bild 1).....	34
Abbildung 24: μ CT-Aufnahme von der Impact Stelle der Prüfkörper bei unterschiedlich induzierten Energien (Bild 2).....	34
Abbildung 25: μ CT-Aufnahme von der Impact Stelle der Prüfkörper bei unterschiedlich induzierten Energien (Bild 3).....	34
Abbildung 26: reibgeschweißte Platten aus Lauramid bzw. Hicompelt.....	36
Abbildung 27: Zugprüfkörper mit Reibschweißverbindung in der Mitte	36
Abbildung 28: Zugkennwerte Reibschweißversuche	36
Abbildung 29: Platten angegossen (Lauramid® auf Hicompelt®).....	37
Abbildung 30: Zugscherprüfkörper	37
Abbildung 31: DSC-Diagramm Lauramid A mit einer Kristallinität von 34,4 % (grün: 1. Aufheizkurve, blau: Abkühlkurve, lila: 2. Aufheizkurve).....	38
Abbildung 32: DSC-Diagramm Lauramid B mit einer Kristallinität von 45,1 % (grün: 1. Aufheizkurve, blau: Abkühlkurve, lila: 2. Aufheizkurve).....	39
Abbildung 33: Materialproben / Variation der Polymerisationsdauer / zentrale Entnahme der DSC-Probe (keine Oberflächeneffekte)	39
Abbildung 34: Vergleich DSC-Kurven (1. Aufheizung) / Proben: Variation von Haltezeit bei der Polymerisation ...	40
Abbildung 35: Vergleich DSC-Kurven (Abkühlung) / Proben: Variation von Haltezeit bei der Polymerisation	40
Abbildung 36: Vergleich DSC-Kurven (2. Aufheizung) / Proben: Variation von Haltezeit bei der Polymerisation ...	40
Abbildung 37: DSC-Peak-Temperaturen die Abhängigkeit der Ofenzeit (Polymerisationszeit bei der Probenherstellung) / links: Schmelz-Peak-Temperaturen aus 1. und 2. Aufheizung / rechts: Kristallisations-Peak- Temperatur aus der Abkühlung.....	41
Abbildung 38: Probenpräparation unter Argon	41
Abbildung 39: Entnahme einer DSC-Probe aus dem PE-Schlauch	42
Abbildung 40: Temperaturprogramm der dynamischen DSC-Methode (Beispiel: Heirate 5 K/min)	42
Abbildung 41: Vergleich DSC-Kurven reaktive Proben nach Polymerisation unter verschieden Heizraten (5, 10 und 20 K/min)	43
Abbildung 42: Temperaturprogramm der isothermen DSC-Methode (Beispiel: 155, 160 und 165 °C für 30 min) ..	43

Abbildung 43: Vergleich DSC-Kurven reaktive Proben nach Polymerisation unter verschiedenen Haltetemperaturen	44
Abbildung 44: Vergleich TG-Kurven von Laurinlactam und GPA12.....	45
Abbildung 45: FTIR an Laurinlactam und GPA12.....	45
Abbildung 46: Zugprüfung unter Flüssig-Stickstoff	46
Abbildung 47: Typ 4 Tanks von Nprox (DB Netze, 2020).....	48
Abbildung 48: Typ 4 Tanks von Plastic Omnium (Leichtbauwelt, 12.02.2024)	49
Abbildung 49: Aufbau Wasserstofftank (BS19 Hamburg, 2019)	51
Abbildung 50: Konstruktionsvariante Boss-Liner-Verbindung	54
Abbildung 51: EGA und Führungssystem an der FIBRE Wickelanlage.....	55
Abbildung 52: Wickelkopf der Wickelanlage beim FIBRE.....	56
Abbildung 53: Spannungen auf einen Drucktank nach der Kesselformel	57
Abbildung 54: Beschreibung der Hoop- (a), Knuckle- (b) und Helicallagen (c)	58
Abbildung 55: berechneter Lagenaufbau des Tanks	58
Abbildung 56: isotensoide Kontur der Dombereiche des Tanks	58
Abbildung 57: Hashin-Index unter Zugbelastung	59
Abbildung 58: Darstellung der Zug- und Druckspannungen in und quer zur Faserrichtung.....	60
Abbildung 59: gewickelte Hoop- (89°) und Helical- (21°) Lagen	61
Abbildung 60: Gewickelte Knuckle- (54°) und Helical- (21°) Lagen.....	61
Abbildung 61: FEM-Berechnung Aufweitung Boss bei 700bar	62
Abbildung 62: Eingefrorener Konstruktionsstand des verkürzten Wasserstofftanks	62
Abbildung 63: instrumentiertes T-RTM-Plattenwerkzeug	63
Abbildung 64: Sensornummerierung auf Werkzeugunter- und -oberhälfte.....	64
Abbildung 65: Versuchsdurchführung Infiltrationsversuch	66
Abbildung 66: Temperaturverlauf bei Infiltrationsbeginn (Standard-Versuch)	66
Abbildung 67: Druckverlauf bei niedrigem Faservolumengehalt (ca.37%).....	67
Abbildung 68: Druckverlauf bei geringem Infiltrationsdruck (1bar)	67
Abbildung 69: Werkzeugkonzept verkürzter Tank	68
Abbildung 70: Zusammengebautes RTM-Werkzeug mit 5 Drucksensoren.....	69
Abbildung 71: trocken gewickelter Tankpreform.....	70
Abbildung 72: Tankkollision im Dombereich.....	70
Abbildung 73: Messergebnisse aus der Streifenlichtprojektionsmessung	71
Abbildung 74: Neue CFK-Struktur nach Wickeln	73
Abbildung 75: Prototypentank-Kontur nach dem Vermessen	74
Abbildung 76: Prototypen-Wickelliner aus Vollmaterial.....	75
Abbildung 77: Markierter Tank-Preform für die optische Vermessung.....	75
Abbildung 78: Überstehende Fasern an unterer Formhälfte	77
Abbildung 79: Abwickeln der Fasern	78
Abbildung 80: Abstandshalter am seitlichen Flansch.....	79
Abbildung 81: Tankoberseite und Tankunterseite nach Infiltration	79
Abbildung 82: Infiltrierter Prototypentank	80
Abbildung 83: Prozessschema Serienherstellung Wasserstofftank	82
Abbildung 84: Probenentnahmepositionen von Testplatte 201 und 64.....	88
Abbildung 85: Vergleich DSC-Kurven der 1. Aufheizung (links) und Abkühlung (rechts).....	88
Abbildung 86: Vergleich DSC-Kurven der 2. Aufheizung (links) und TGA (rechts)	89
Abbildung 87: Ofenzeit-Polymerisationsqualität-Funktion mit integrierten Messwerten	89
Abbildung 88: berechneter Kristallisationsgrad der Polymermatrix.....	90
Abbildung 89: Funktionsweise Röntgenprüfung (All-Electronics, 10.03.2016).....	90
Abbildung 90: CT-Aufnahme des ersten infiltrierten Demonstrators mit Porenanalyse.....	91
Abbildung 91: Funktionsprinzip Ultraschallprüfung (KarlDeutsch, -).....	92
Abbildung 92: Ultraschallbilder des Demonstratortanks bei GMA-Werkstoffprüfung aufgenommen	92
Abbildung 93: Funktionsprinzip Wirbelstromprüfung (Foerster, 06.12.2021).....	93
Abbildung 94: Bild aus der Wirbelstromprüfung mit Hicomelt® am Fraunhofer IKTS.....	94
Abbildung 95: Auswertung der Ergebnisse der Wirbelstromprüfung.....	94

Abbildung 96: Trockengewickelter Tank auf Drehteller und dazugehöriges Messergebnis	95
Abbildung 97: Beispiel TGA-Messkurve HICOMPELT / Foto Tiegel mit hochreinen Kohlefasern nach 800 °C	97
Abbildung 98: v.l. HICOMPELT-Rest, Kunststoffschneidmühle, resultierende Partikelfraktion (Ausgangsmaterial für Folgeversuche)	98
Abbildung 99: v.l. Laborkneter (Brabender), Beispiel-Plastogramm Temperatur- und Drehmoment-Verlauf der Homogenisierung / Compoundierung	98
Abbildung 100: v.l. HAAKE™ MiniJet Pro Mini-Spritzgussmaschine, Vielzweckprüfkörper	99
Abbildung 101: Korrelation Faserkonzentration (TGA) und Materialdichte (Gaspyknometer)	99
Abbildung 102: mikroskopische Untersuchungen zur Bestimmung der Faserlängenverteilung (Rezepturproben nach TGA 800°C)	100
Abbildung 103: Ergebnisse aus thermischen Analysen (TGA und DSC) / Kristallisationsgrad	100

11 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Darstellung der Aufgaben der Partner mit Bezug zu den Entwicklungsschwerpunkten im Verbundprojekt	15
Tabelle 2: Anforderungsliste	16
Tabelle 3: Ermittelte Kennwerte der Wöhlerlinie (Grundmaterial Wanhua)	22
Tabelle 4: Ermittelte Kennwerte der Wöhlerlinie von Hicompelt mit UD-Lagenaufbau	22
Tabelle 5: Ermittelte Kennwerte der Wöhlerlinie von Hicompelt mit quasiisotropem Lagenaufbau	22
Tabelle 6: Permeationsraten der unterschiedlichen Materialien	25
Tabelle 7: Permeationsraten der unterschiedlichen Proben	25
Tabelle 8: Permeationsraten bei unterschiedlichen Temperaturen	25
Tabelle 9: Permeationsraten der unterschiedlich dicken Proben	25
Tabelle 10: Permeationsraten bei unterschiedlichen Drücken	26
Tabelle 11: Prüfkörperplanung	28
Tabelle 12: Ergebnisse der Permeationsmessungen	28
Tabelle 13: Messparameter Wärmeausdehnung (©Netzsch)	30
Tabelle 14: Fallhöhen für die unterschiedlichen Versuche (©Fraunhofer IMWS)	31
Tabelle 15: Zusammenfassung der Ergebnisse (©Fraunhofer IMWS)	32
Tabelle 16: Prüfparameter Versuchsreihe 2	32
Tabelle 17: Flammtestergebnisse mit Hicompelt CL	35
Tabelle 18: Eigenschaften des Nprox-Tanks	48
Tabelle 19: Eigenschaften des Plastic Omnium-Tanks	49
Tabelle 20: Tankanforderungen für Demonstrator aus Use-Cases	50
Tabelle 21: morphologischer Kasten	53
Tabelle 22: Für die Berechnung verwendete Materialkennwerte	57
Tabelle 23: Randbedingungen für den finalen Drucktank Demonstrator	59
Tabelle 24: Faserwinkel	59
Tabelle 25: Experimentell ermittelte Materialkennwerte	60
Tabelle 26: Versuchsplan Infiltrationsversuche	65
Tabelle 27: Produktlenkungsplan für den Prozessschritt "Herstellung Wickel-Preform"	83
Tabelle 28: Ausschnitt aus Kostenbetrachtung des Departement of Energy (DOE, 25.11.2019)	85
Tabelle 29: Kosten für Zubehör und Prozessschritte bei Herstellung eines Wasserstofftanks	86
Tabelle 30: Kostenkalkulation Wasserstofftank im T-RTM-Prozess für 100.000Stk.	86

12 Literaturverzeichnis

- Adolf, J. (2017). *Adolf, Jörg ; Balzer, Christoph H. ; Louis, Jurgen ; Schabla, Uwe ; Fishedick, Manfred ; Arnold, Karin ; Pastowski, Andreas ; Schüwer, Dietmar: Energie der Zukunft, Nachhaltige Mobilität durch Brennstoffzelle und H2. Hamburg.*
- All-Electronics. (10.03.2016). <https://www.all-electronics.de/elektronik-entwicklung/die-aufbau-und-verbindingstechnik-wird-durchleuchtet.html>.
- AVK. (2013). *AVK HRS.G.: Handbuch Faserverbundkunststoffe/Composites : Springer Fachmedien Wiesbaden.*
- Braune, M. (-). *Braune, Mathias ; Ruß, Roland: Nichtzylindrischer Verbundstoffdruckbehälter.*
- Brunner, M. (2016). *Brunner, Markus; Kampitsch, Tobias ; Kircher, Oliver: Cryo-Compressed Hydrogen Storage. In: Fuel Cells : Data, Facts and Figures : Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA., S. 162–174.*
- BS19 Hamburg. (2019). <https://www.bs19hamburg.de/uploads/2019/09/FOS-R5.pdf>.
- DB Netze, N. (2020). <https://blog.lea-hessen.de/wp-content/uploads/2020/08/Potenzialbeschreibung-Wasserstofftransport-%C3%BCber-das-Schienennetz.pdf>.
- DOE. (25.11.2019). https://www.hydrogen.energy.gov/docs/hydrogenprogramlibraries/pdfs/19008_onboard_storage_cost_performance_status.pdf?Status=Master. Departement of Energy.
- Emcel. (23.05.2023). *Wasserstoffdruckbehälter: Welche Druckbehälter-Typen gibt es? | EMCEL. URL <https://emcel.com/de/wasserstoffdruckbehaelter/>.*
- Fette, M. (2021). *Fette, Marc: Stahl- oder CFK-Tank, Wer macht das Rennen. In: CU-Thementag „Wasserstoffspeicher - Chancen für Faserverbund“.*
- Flemming, M. (1999). *Flemming, Manfred ; Ziegmann, Gerhard ; Roth, Siegfried: Faserverbundbauweisen : Springer Berlin Heidelberg.*
- Foerster. (06.12.2021). <https://blog.foerstergroup.com/de/komponentenpruefung/wie-funktioniert-ein-wirbelstrompruefgeraet>.
- Grogan. (2014). *Grogan, D. M. ; Leen, S. B. ; Semprimoschnig, C. O.A. ; Ó Brádaigh, C. M.: Damage characterisation of cryogenically cycled carbon fibre/PEEK laminates. In: Composites Part A: Applied Science and Manufacturing Bd. 66, Elsevier Ltd, S. 237–250.*
- KarlDeutsch. (-). <https://www.karldeutsch.de/zfp-wissen/basiswissen/ultraschallpruefung/>.
- Klinger, A.-L. (2020). *Klingler, Anna-Lena ; Schnabel, Frieder ; Groos, Ulf ; Hebling, Christopher ; Schaadt, Achim ; Smolinka, Tom ; Döscher, Henning ; Kimpeler, Simone ; U. A.: Wasserstoff-Roadmap Baden-Württemberg.*
- Klug, H. (2001). *Klug, Heinz G. ; Faass, Reinhard: Cryoplane: hydrogen fuelled aircraft — status and challenges. In: Air & Space Europe Bd. 3, Elsevier BV, Nr. 3–4, S. 252–254.*
- Kroiss, H. (-). *Kroiss, Hugo ; Stiegler, Ottmar: Kraftstoffbehälter für druckbeaufschlagte Gase.*
- Kunze. (2012). *Kunze, K.: Performance of a cryo-compressed hydrogen storage. In: World Hydrogen Energy Conference - WHEC. Toronto.*
- Lehmann, J. (2014). *Lehmann, Jochen ; Luschtinetz, Thomas: Wasserstoff und Brennstoffzellen, Unterwegs mit dem saubersten Kraftstoff. Berlin Heidelberg : Springer-Verlag Berlin Heidelberg — ISBN 9783642346682.*
- Lehmann, J., & Luschtinetz, T. (2014). *Wasserstoff und Brennstoffzellen, Unterwegs mit dem saubersten Kraftstoff. Berlin Heidelberg : Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2014 — ISBN 9783642346682.*
- Leichtbauwelt. (12.02.2024). <https://www.leichtbauwelt.de/plastic-omnium-entwickelt-wasserstofftanks-fuer-busse/>.
- Leichtbau-Zentrum Sachsen GmbH. (26.05.2021). *Individuelles Wickeln 4.0 | LZS | engineering your innovative edge. URL <https://www.lzs-dd.de/de/individuelles-wickeln/>.*

- Neitzel, M. (2014). *Neitzel, Manfred ; MITSCHANG, PETER ; BREUER, ULF: Handbuch Verbundwerkstoffe : Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG.*
- Nproxx. (23.05.2021). *Die verschiedenen Druckbehältertypen - NPROXX. URL*
<https://www.nproxx.com/de/different-types-of-pressure-vessel/>.
- RP-Energie-Lexikon. (20.05.2021). *RP-Energie-Lexikon - Wasserstoffspeicher, Drucktanks, flüssiger Wasserstoff, transkritische Speicherung, Metallhydrid, flüssige organische Wasserstoffträger, Fahrzeuge. URL*
<https://www.energie-lexikon.info/wasserstoffspeicher.html>.
- Schulz, M. (2013). *Ein Beitrag zur Modellierung des Zeitstandverhaltens von Faserverbundwerkstoffen im Hinblick auf die Anwendung an Hochdruckspeichern, TU Berlin.*
- Sihn, S. (2007). *Sihn, Sangwook ; Kim, Ran Y. ; Kawabe, Kazumasa ; Tsai, Stephen W.: Experimental studies of thin-ply laminated composites. In: Composites Science and Technology Bd. 67, Elsevier, Nr. 6, S. 996–1008.*
- Steinbach, K. (2021). *Steinbach, Kai: Wickeln oder Flechten? Duro- oder Thermoplast? Rund oder eckig? In: CU-Thementag „Wasserstoffspeicher - Chancen für Faserverbund“.*
- Weichenhain, U. (2020). *Weichenhain, Uwe ; Lange, Simon ; Koolen, Jan ; Benz, Anja ; Hartmann, Sandra ; Heilert, Daniela ; Henninger, Sandra ; Kallenbach, Tom: Potenziale der Wasserstoff- und Brennstoffzellenindustrie in Baden-Württemberg, S. 150.*
- Wolter, H. J. (05.01.2021). *Wasserstoff als Schlüsseltechnologie des European Green Deal. Wir. Hier.*

13 Anhang

1. Projektplan
2. Testmatrix
3. Prozess-FMEA Wasserstofftank

Test-Matrix

1. Tankauslegung (FEM)

1.1 Materialkennwerte Einzelkomponenten

Vorhandene Kennwerte

Prüfung/ Norm	Randdaten zum Versuch 1	Randdaten zu Versuch 2	Randdaten zu Versuch 3	Probekörperanzahl	zu ermittelnde Kennwerte	Kennwerte	Priorität/ Status
Zugversuch	-	-	-	-	E-Modul Matrix	E = 1.800N/mm ²	erledigt
DIN EN ISO 527-1	-	-	-	-	Querkontraktion Matrix	v = -0,46	
	-	-	-	-	E-Modul Faser	E = 240.000N/mm ²	

1.2 Materialkennwerte UD-Lage

Ausgehend von den Materialkennwerten der Einzelkomponenten, können die theoretisch abgeleiteten UD-Werte mit realen Messwerten verglichen werden

Zugversuch	UD-Lagenaufbau	90°-Lagenaufbau		10Stk. / Lagenaufbau	E_1	91600N/mm ²	erledigt
DIN EN ISO 527-4	Verwendung Gelege	Verwendung Gelege		(5Stk. FIBRE)	E_2	4560N/mm ²	
	FVG ca. 46%	FVG ca. 46%		(5Stk. IPT)	G_12	-	
					nu_12	-	
Einzelergbnis: E-Modul [Mpa]	91620	4558					
Zugfestigkeit [Mpa]	1366	31					
Bruchdehnung [%]	1,4	0,73					

1.3 Materialkennwerte Laminat

Hier werden Laminat mit unterschiedlichem Lagenaufbau getestet und mit theoretisch abgeleiteten Werten verglichen.

Durch den Vergleich von theoretischen und realen Laminatkennwerten kann die Genauigkeit der FEM-Analyse charakterisiert werden.

Zugversuch	Lagenaufbau [0/90/90/0]	Lagenaufbau quasiisotroper [0/90/+45/-45]s	Lagenaufbau annähernd wie Tank [15/95/85/-15]	10Stk. / Lagenaufbau	E_1	-	erledigt
DIN EN ISO 527-4	Verwendung Gelege	Verwendung Gelege	Verwendung Gelege	(5Stk. FIBRE)	E_2	-	
	FVG ca. 50%	FVG ca. 50%	FVG ca. 50%	(5Stk. IPT)	E_3	-	
					G_12 (berechnet)	1870N/mm ²	
			V4: Lagenaufbau mit Fehlstellen über TFP aufbauen (erst wenn exakter Lagenaufbau bekannt ist)		G_13 (berechnet)	1870N/mm ²	
					G_23 (berechnet)	1690N/mm ²	
Einzelergbnis: E-Modul [Mpa]	50620	33220	42500		nu_12 (berechnet)	0,2825	
Zugfestigkeit [Mpa]	716	534	392		nu_13	-	
Bruchdehnung [%]	1,36	1,49	1,09		nu_23	-	

1.4 Bestimmung Schubmodul Laminat

Ausgehend von den Materialkennwerten der Einzelkomponenten, können die theoretisch abgeleiteten UD-Werte mit realen Messwerten verglichen werden

Zugversuch	±45°-Lagenaufbau			8Stk. / Lagenaufbau	G_12	1940N/mm ²	erledigt
DIN EN ISO 14129	Verwendung Gelege						
	FVG ca. 46%						
Einzelergbnis: G-Modul [Mpa]	1940						
Schubspannung [Mpa]	46,4						
Schubverformung [%]	0,05						

1.5 Dauerlastversuche

Dauerlastversuche an CFK-Proben unter Belastungsprofil des Drucktanks (vermutlich schwelende Zugbelastung)

Zugprüfstab	UD-Lagenaufbau mit 50% FVG	quasiisotroper Lagenaufbau mit 50% FVG	reine Lauramid-Matrix unter Wassersättigung	10Stk.		Wöhlerkurve siehe Prüfprotokolle	
DIN EN ISO 527-4	Info aus Regelung ECE R134: 22.000 Zyklen	Info aus Regelung ECE R134: 22.000 Zyklen	DIN EN ISO 527				

		Info aus Regelung ECE R134: 125% des Betriebsdrucks = 1,25x70MPa=87,5MPa	Info aus Regelung ECE R134: 125% des Betriebsdrucks = 1,25x70MPa=87,5MPa	Wassersättigung bei ca. 1,2-1,4%				erledigt
		Betriebslast: zugschwellend	Betriebslast: zugschwellend					

1.6 Permeationsverhalten

Untersuchungen zum Verhalten des Materials hinsichtlich Wasserstoffdurchlässigkeit (Permeation) bzw. Dichtigkeit

Rundproben	gealterte Probe [0/90/90/0] (Alterung: Klimawechseltest nach PV2005, 100Zyklen von -35°C bis 80°C, zusätzliche Lagerung über 5 Jahre im Lager)	reines Lauramid* (PA12G) (altes Material, 5 Jahre, Vicat 178,1°C)	Prüfung am FIBRE: Durchmesser 40,0 ±0,2/-0,5mm Dicke 0,1-3,0mm	1Stk./ Material	Permeationsrate	45,59 ml/h/l bei 5mm Wandstärke + Prüfung nach ECE R134	erledigt
Info aus Regelung ECE R134: max. Leckage 46ml/h/l Speichervolumen max. Permeationsrate 0,005mg/s (3,6Nml/min)	Versuch am TesTneT: Teststandard: CSA ANSI CHMC2-2019 Testmedium: H2 PK: Ø78mmx 2-7mm Druck: 87,5MPa Temp.: +15/ +85°C Testdauer: max. 7 Tage Testergebnis: Permeationsrate [Ncm³/h]	Versuch am TesTneT: Teststandard: CSA ANSI CHMC2-2019 Testmedium: H2 PK: Ø78mmx 2-7mm Druck: 87,5MPa Temp.: +15/ +85°C Testdauer: max. 7 Tage Testergebnis: Permeationsrate [Ncm³/h]	-				
Versuche an TesTneT möglich							

1.7 Wärmeausdehnung

Verhalten des Werkstoffs unter Temperatureinwirkung hinsichtlich Längenausdehnung des Materials

Prüfung am FIBRE/ IPT möglich	UD-Lagenaufbau, Prüfung in x- und y-Richtung	reine Lauramidmatrix	UD-Lagenaufbau, Prüfung in x- und y-Richtung	3 Stk./ Material	Wärmeausdehnungs-koeffizient	Lauramid A: 147,62x10 ⁻⁶ 1/K Lauramid Inject: 139,18x10 ⁻⁶ 1/K	erledigt
	Temperaturbereich -40°C bis +80°C (+120°C wenn möglich)	Temperaturbereich -40°C bis +80°C (+120°C wenn möglich)	Prüfung bei Netzsch am Dilatometer			Hicompelt 0°: 2,44x10 ⁻⁶ 1/K	
	Prüfkörpergeometrie 5mmx5mmx10mm	Prüfkörpergeometrie 5mmx5mmx10mm	Prüfkörpergeometrie 5mmx5mmx25mm			Hicompelt 90°: 103,03x10 ⁻⁶ 1/K	

1.8 Impactverhalten

Widerstandsfähigkeit des Materials gegen schlagartige Beanspruchungen

ASTM D7136	Lagenaufbau annähernd wie Tank [15/95/85/-15]			8Stk.	Impacttiefe	0,2mm bei 5J 0,34mm bei 10J 0,96mm bei 15J 1,85mm bei 20J	erledigt
Versuche am Fraunhofer IMWS in Halle möglich	Prüfung an Platten 100x150x2mm²				Schadensfläche	20,03mm² bei 5J 110,74mm² bei 10J 150,8mm² bei 15J 298,46mm² bei 20J	

1.9 Kriechverhalten

Beachtung der Längenausdehnung des Materials bei Langzeitbelastung durch Kriechverhalten des thermoplastischen Materials

Zeitstandzugversuch	Lagenaufbau annähernd wie Tank [15/95/85/-15]	reine Lauramidmatrix		5Stk.	Zeitdehnlinien	Kriechverhalten bei CFK zu vernachlässigen	
---------------------	---	----------------------	--	-------	----------------	--	--

	DIN EN ISO 899-1	Zugprüfkörper nach DIN EN ISO 527-4	Zugprüfkörper nach DIN EN ISO 527-1				Kriechkurven von Lauramid vorhanden	aufgeschoben
		50% FVG						

1.10 Flammenschutz

Beurteilung des Brandverhaltens, um die gängigen Vorschriften einhalten zu können

	Flammstutztests lediglich an kompletten Tanks bekannt (ECE R134)	Hicompelt-Prüfkörper nach UL94V 125x13x10mm³			10Stk.	Einstufung nach UL94-V	94V-0	erledigt
	Erfahrungen am IPT vorhanden --> abgeleitete Prüfungen	Lagenaufbau in 0°- und in 90°-Richtung						

2. Anwendungsbezogene Tests

2.1 Faser-Matrix-Anbindung

Bewertung der Faser-Matrix-Haftung (an unterschiedlichen Fasern)

	mikroskopische Aufnahmen von gealterter Probe (Platte aus 2016 vorhanden)	mikroskopische Aufnahmen an Dauerlastgeprüften Proben	Bewertung Faser-Matrix-Haftung am FIBRE --> Herstellung Proben?				Messung aktuell nicht möglich aufgrund Probenvorbereitung	aufgeschoben
	Geprüfte Proben werden gelagert. 1 Referenzprobe an IPT	Geprüfte Proben werden gelagert. 1 Referenzprobe an IPT						

2.2 Verbindungstechnik

Erprobung notwendiger Verbindungstechniken für den Aufbau des Wasserstofftanks

	Zugversuch	mechanische Kennwerte einer reibgeschweißten Verbindung CFK-PA12			5Stk./Verbindung	Zugfestigkeit	55-57N/mm²	erledigt
	DIN EN ISO 527-1							

Prüfung/ Norm	1. Ermittlung passende Oberflächenbehandlung			Probekörperanzahl	zu ermittelnde Kennwerte	Kennwerte	Priorität/ Status
---------------	--	--	--	-------------------	--------------------------	-----------	-------------------

2.3 Materialschnittstellen

Boss- PA 12G (Materialpaarung Metall-PA12)

	Zugscherversuch	Rändelung			5Stk.	Scherspannung		aufg. Projekt TheDi
	DIN EN 1465	Laserstrukturierung			5Stk.	Scherspannung		
		Sandstrahlen (Delo Saco)			5Stk.	Scherspannung		
		Haftvermittler			5Stk.	Scherspannung		
		Warmeinbetten			5Stk.	Scherspannung		

Boss-PA 12G-CF (Materialpaarung Metall-CFK)

	Zugscherversuch	ausgewählte Oberflächenbehandlung aus Metall-PA12			10Stk.	Scherspannung		aufg. Projekt Smart Pro
	DIN EN 1465							

PA 12G-PA 12G-CF (Materialpaarung PA12-CFK)

	Zugscherversuch	Gussoberfläche			5Stk.	Scherspannung	Bruch in Matrix	erl.
	DIN EN 1465						min. 10,3N/mm²	

PA 12G-CF-PA 12G-CF (Materialpaarung CFK-CFK)	Zugscherversuch	Gussoberfläche			5Stk.	Scherspannung	20,9 N/mm ²	erl.
	DIN EN 1465							

3. Verarbeitungsrelevante Tests

Prüfung/ Norm	Position der Probenentnahme	1. Versuch	2. Versuch	Probekörperanzahl	zu ermittelnde Kennwerte	Kennwerte	Priorität/ Status
---------------	-----------------------------	------------	------------	-------------------	--------------------------	-----------	-------------------

3.1 Untersuchungen zur Polymerisationskinetik

Untersuchungen der Kristallinität mittels DSC

Die Untersuchungen werden an ungefüllten und Faser-verstärkten Prüfkörpern durchgeführt, um zu untersuchen welchen Einfluss die Faserverstärkung auf die Polymerisation hat.

DSC mittels dynamischer Wärmestrom-Differenzkalorimetrie (DWDC)							
DIN EN ISO 11357-1	angussnah	reines Lauramid® (PA12G)	Lagenaufbau 0/90/90/0	10 Stk. (5 Stk. / Versuch)	Peak-Temp. Schmelz- u.		erl.
	angussfern			10 Stk. (5 Stk. / Versuch)	Peak-Temp. Schmelz- u.		
	nahe Werkzeugwand			10 Stk. (5 Stk. / Versuch)	Peak-Temp. Schmelz- u.		
	nahe Kern			10 Stk. (5 Stk. / Versuch)	Peak-Temp. Schmelz- u.		

Untersuchung der Materialspektren mittels FTIR

Die Untersuchungen werden an ungefüllten und Faser-verstärkten Prüfkörpern durchgeführt, um zu untersuchen welchen Einfluss die Faserverstärkung auf die Polymerisation hat.

FTIR mittels abgeschwächter Totalreflektion							
DIN EN ISO XXX	angussnah	reines Lauramid® (PA12G)	Lagenaufbau 0/90/90/0	10 Stk. (5 Stk. / Versuch)	Identifizierung charakteristischer Banden		erl.
	angussfern			10 Stk. (5 Stk. / Versuch)			
	nahe Werkzeugwand			10 Stk. (5 Stk. / Versuch)			
	nahe Kern			10 Stk. (5 Stk. / Versuch)			

3.2 Untersuchungen des Infiltrationsverhaltens

Instrumentierung der Versuchs-Gießwerkzeuge (Industrie 4.0)

Füllstudie an 3 verschiedenen Laminatdicken mit min. 5 Füllstufen (Prüfung an Platten 100x150mm²)

Untersuchung der dicken- und fließweglängenabhängigen Materialhomogenität

IPT-Messtechnik wird für Füllstudie bereitgestellt	Ermittlung von Echtzeit-Daten im T-RTM-Verfahren				Permeabilitätskennwerte ermittelt: K=1,48E-11m ² bei 0/90/90/0 K=2,48E-11m ² bei UD	erl.
Versuchsdurchführung bei Handtman	Lagenaufbau annähernd wie Tank [15/95/85/-15] aber in unterschiedlichen Dicken			15 Stk. (aus 5 Füllstufen und 3 Laminatdicken)	Übergabe der Proben an IPT	
Versuchsdurchführung bei IPT	optische Untersuchungen mittels Digitalmikroskopie an Materialdichte mittels Gas-Pyknometer - Ermittlung Porenvolumen /					

4. Kryogene Tests

Prüfung/ Norm	Randdaten zum Versuch 1	Randdaten zu Versuch 2	Randdaten zu Versuch 3	Probekörperanzahl	zu ermittelnde Kennwerte	Kennwerte	Priorität/ Status
---------------	-------------------------	------------------------	------------------------	-------------------	--------------------------	-----------	-------------------

4.1 Permeationstests

Untersuchungen zum Verhalten des Materials hinsichtlich Wasserstoffdurchlässigkeit (Permeation) bzw. Dichtigkeit im kryogenen Bereich --> spezieller Aufbau von FIBRE, bei denen Zugversuch im kryogenen Bereich durchgeführt werden kann	Prüfung am FIBRE, angelehnt an Zugprüfung	UD-Lagenaufbau	90°-Lagenaufbau	reine Lauramid-Matrix	10Stk.		Bei tiefen Temperaturen Permeation sehr gering -> Literatur	aufgeschoben
	DIN EN ISO 527-4	Zugprüfkörper nach DIN EN ISO 527-4	Zugprüfkörper nach DIN EN ISO 527-4	Zugprüfkörper nach DIN EN ISO 527-2				

4.2 Tieftemperatur-Zugversuche Lauramid

Verhalten der Lauramid-Matrix bei tiefen Temperaturen (kryogen) unter Zugbeanspruchung

Prüfung am FIBRE	reine Lauramid-Matrix			5Stk.	E-Modul	E-Modul=5.380MPa	erledigt
DIN EN ISO 527	Zugprüfkörper nach DIN EN ISO 527				Zugfestigkeit	Zugfestigkeit=139MPa	
T=-196°C					Bruchdehnung	Bruchdehnung=2,79%	

4.2 Tieftemperatur-Zugversuche Hicompelt

Verhalten von Hicompelt bei tiefen Temperaturen (kryogen) unter Zugbeanspruchung

Prüfung am FIBRE	UD-Aufbau			5Stk.	E-Modul	UD: 87.300MPa	erledigt
DIN EN ISO 527-5	Zugprüfkörper nach DIN EN ISO 527-5				Zugfestigkeit	UD: 746MPa	
T=-196°C					Bruchdehnung	UD: 0,34%	
						Probenvorbereitung verbessern, Proben rutschen aus PH während Versuch	

hab	FMEA	Version	Teil-Name							
handmann	Prototypen Prozess FMEA	Elteka	Wasserstofftank							
Industrie 4.0										
M	Funktion	Fehlfunktion	Fehlerursache	Fehlerfolge	Maßnahme	Prozessparameter	Parametergrenzen	Messmethodik	Prozessnachgeschaltete Qualitätskontrolle	Industrie 4.0
Welches "M" ist an diesem Prozes beteiligt (Mensch, Maschine, Material, Methode, ..)	Was ist die Aufgabe des jeweiligen "Ms"	Was kann bei der jeweiligen Aufgabe schief gehen?								
[1.1] Herstellung Wickel- Preform										
[1.1] Herstellung Liner										
1.1.1 Material: Lauramid B	Materialspezifikation nach Handmann-Datenblatt	Falsche Temperzeiten	-Vergessen der Form im Ofen -Verwechslung von Formen	Reduzierte Materialqualität und somit erhöhte Wasserstoffpermeation	Automatisierung des Temperprozesses	Vicat-Temperatur	T=185°C-191°C	Vicaterweichungstemperatur nach DIN EN ISO 306	DSC-Messung	
		Falsche Gießrezeptur	-Falsches Abwiegen der Bestandteile - Falsche Dokumentation bei Wareneingangsprüfung	Reduzierte Materialqualität und somit erhöhte Wasserstoffpermeation	-Dokumentation der Wägung - 4-Augenkontrolle	Vicat-Temperatur	T=185°C-191°C	Vicaterweichungstemperatur nach DIN EN ISO 306		
		Verwendung falsche Charge	-Falsche oder unsaubere Dokumentation	Falsche Chargenzuordnung und somit fehlende Rückverfolgbarkeit		Vicat-Temperatur	T=185°C-191°C	Vicaterweichungstemperatur nach DIN EN ISO 306		
		...								
1.1.2 Mitarbeiter: mech. Fertigung NEF	Rohr gemäß Zeichnungs-Nr. 22-F039-554-1 drehen	Falsches Maschinenrüsten	-unsauberes Arbeiten -fehlende Dokumentation - falsche/ schlechte/ fehlende Vorrichtungen an Maschine	Falsche Bearbeitung des Tanks und somit falscher Wickelliner. Tank kann somit später nicht in RTM-Form eingelegt werden	- Erstellung einer Arbeitsanweisung - Verwendung von speziell angepassten Vorrichtungen für die Bearbeitung des Rohrs	Für 1.1.2-1.1.5: Beachtung der Parameter/ Vorgaben der mech. Bearbeitung --> sollte klar sein, wird somit hier nicht betrachtet				
		Bearbeitung nach falscher Zeichnung	-Schlechte Dokumentation	Falsche Bearbeitung des Tanks und somit falscher Wickelliner. Tank kann somit später nicht in RTM-Form eingelegt werden	- Erstellung einer Arbeitsanweisung					
	2 Endstücke gemäß Zeichnungs-Nr. 22-F039-555-1 Index A drehen	Falsches Maschinenrüsten	-unsauberes Arbeiten -fehlende Dokumentation - falsche/ schlechte/ fehlende Vorrichtungen an Maschine	Falsche Bearbeitung des Tanks und somit falscher Wickelliner. Tank kann somit später nicht in RTM-Form eingelegt werden	- Erstellung einer Arbeitsanweisung - Verwendung von speziell angepassten Vorrichtungen für die Bearbeitung der Endstücke					
		Bearbeitung nach falscher Zeichnung	-Schlechte Dokumentation	Falsche Bearbeitung des Wickeliners. Tank kann somit später nicht in RTM-Form eingelegt werden	- Erstellung einer Arbeitsanweisung					
1.1.3 Maschine: NEF	Rohr und 2 Endstücke gemäß Zeichnungen drehen	Falsche Maschineneinstellungen	- Falsche Programmierung der Bauteile - Programmfehler	Falsche Bearbeitung Wickeliners. Tank kann somit später nicht in RTM-Form eingelegt werden	-Kontrolle Programm über Einstellteile -Hinterlegung des richtigen Programms in einer Arbeitsanweisung					Zuordnung der Teile über QR-Code?
		Falsche Kalibrierung der Anlage	-Fehlende Kalibrierung der Anlage - Zu seltene Kalibrierung der Anlage	Ungenauigkeiten bei der Bearbeitung, dadurch Toleranzprobleme	Regelmäßige Kalibrierungsintervalle, die eingehalten werden müssen					
		Falsche Wartung der Anlage	- Fehlende Wartung der Anlage -Zu seltene Wartung der Anlage	Ausfall der Anlage und somit Produktionsengpass	Regelmäßige Wartungsintervalle, die eingehalten werden müssen					
		Falsches/ Minderwertiges Werkzeug	-Verwendung verschlissenes Werkzeug -Verwendung falsches Werkzeug	Unsaubere Bearbeitung (schlechte Oberfläche, Nichteinhalten von Toleranzen). Darauß entstehen Wickelprobleme	-Regelmäßiger Austausch von Werkzeug -Erstellung einer Arbeitsanweisung					
1.1.4 Mitarbeiter: QS	Kontrolle der richtigen Abmessungen laut Zeichnungen	Verwendung der falschen Messmittel	-Falsche Vorgaben zum Vermessen der Liner -Unkonzentriertes Arbeiten	Falsche Maße des Wickeliners. Tank kann somit später nicht in RTM-Form eingelegt werden	-Erstellung einer Arbeitsanweisung -Regelmäßige Pausen					
		Abgleich mit falschen Zeichnungen	-Schlechte Dokumentation	Falsche Maße des Wickeliners. Tank kann somit später nicht in RTM-Form eingelegt werden	- Erstellung einer Arbeitsanweisung					
1.1.5 Maschine: Messmittel QS	Vermessung der Drehteile	Fehlende Kalibrierung der Messmittel	-Fehlende Kalibrierung der Anlage - Zu seltene Kalibrierung der Anlage	Falsche Abmessungen des Wickeliners	Regelmäßige Kalibrierungsintervalle, die eingehalten werden müssen					
		Defekte Messmittel	-Verwendung defekter Messmittel - Beschädigung der Messmittel während der Messung	Falsche Abmessungen des Wickeliners	-Verwendung von kalibrierten Messmitteln -Sauberes Vorgehen nach Arbeitsanweisung					
1.1.6 Mitarbeiter: mech. Fertigung NEF	Verbinden der 3 Bauteile über Reibschweißen	Verwendung der falschen Drehzahl beim Reibschweißen	-Unsauberes Arbeiten -Schlechte Dokumentation	Schlechte Schweißnaht, die zu Undichtigkeiten führt	-regelmäßige Pausen -Erstellung ener Arbeitanweisung	Drehzahl	n=450U/min	Einstellungen Drehbank		
		Verwendung des falschen Wegs beim Reibschweißprozess	-Unsauberes Arbeiten -Schlechte Dokumentation	Schlechte Schweißnaht, die zu Undichtigkeiten führt	-regelmäßige Pausen -Erstellung ener Arbeitanweisung	Weg	s=1mm	nicht vorhanden		
		Verwendung der falschen Zeit beim Reibschweißen	-Unsauberes Arbeiten -Schlechte Dokumentation	Schlechte Schweißnaht, die zu Undichtigkeiten führt	-regelmäßige Pausen -Erstellung ener Arbeitanweisung	Zeit	t=10s	Stoppuhr		
		Verwendung der falschen Anpresskraft	-Unsauberes Arbeiten -Schlechte Dokumentation	Schlechte Schweißnaht, die zu Undichtigkeiten führt	-regelmäßige Pausen -Erstellung ener Arbeitanweisung	Kraft	F= ?	nicht vorhanden		
		falsches Rüsten/ falsche Positionierung der Bauteile	-unsauberes Arbeiten -fehlende/ Schlechte Dokumentation - falsche/ schlechte/ fehlende Vorrichtungen an Maschine	Schlechte Schweißnaht, die zu Undichtigkeiten führt	- Erstellung einer Arbeitsanweisung - Verwendung von speziell angepassten Vorrichtungen für die Verschweißung der Bauteile					

hab	FMEA	Version				Teil-Name			
handmann	Prototypen Prozess FMEA Elteka		1			Wasserstofftank			

						Industrie 4.0			Prozessnachgeschaltete Qualitätskontrolle	
M	Funktion	Fehlfunktion	Fehlerursache	Fehlerfolge	Maßnahme	Prozessparameter	Parameter Grenzen	Messmethodik	Industrie 4.0	
1.1.7 Maschine: NEF	Verbinden der 3 Bauteile über Reibschweißen	Falsche Maschineneinstellungen	- Nicht-Beachten der richtigen Prozessschrittreihenfolge - Falsche Programmierung der Bauteile - Programmfehler	- Unsauberes Arbeiten - Schlechte Dokumentation Falsche Bearbeitung Wickelliners. Tank kann somit später nicht in RTM-Form eingelegt werden	- Schlechte Schweißnaht, die zu Undichtigkeiten führt - Kontrolle Programm über Einstellteile - Hinterlegung des richtigen Programms in einer Arbeitsanweisung	Für 1.1.7-1.1.11: Beachtung der Parameter/ Vorgaben der mech. Bearbeitung --> sollte klar sein, wird somit hier nicht betrachtet				
		Falsche Kalibrierung der Anlage	- Fehlende Kalibrierung der Anlage - Zu seltene Kalibrierung der Anlage	- Unsauberes Arbeiten - Schlechte Dokumentation	- Schlechte Bearbeitung des Wickelliners. Tank kann somit später nicht in RTM-Form eingelegt werden	- Erstellung einer Arbeitsanweisung				
		Falsche Wartung der Anlage	- Fehlende Wartung der Anlage - Zu seltene Wartung der Anlage	- Unsauberes Arbeiten - Schlechte Dokumentation	- Schlechte Bearbeitung des Wickelliners. Tank kann somit später nicht in RTM-Form eingelegt werden	- Erstellung einer Arbeitsanweisung				
1.1.8 Mitarbeiter: mech. Fertigung NEF	Außenkontur des Liners fertig drehen	Nicht-Beachten der richtigen Prozessschrittreihenfolge	- Unsauberes Arbeiten - Schlechte Dokumentation	- Unsauberes Arbeiten - Schlechte Dokumentation	- Schlechte Bearbeitung des Wickelliners. Tank kann somit später nicht in RTM-Form eingelegt werden	- Erstellung einer Arbeitsanweisung				
		Falsches Maschinenrüsten	- unsauberes Arbeiten - fehlende Dokumentation - falsche/ schlechte/ fehlende Vorrichtungen an Maschine	- unsauberes Arbeiten - fehlende Dokumentation	- Schlechte Bearbeitung des Wickelliners. Tank kann somit später nicht in RTM-Form eingelegt werden	- Erstellung einer Arbeitsanweisung - Verwendung von speziell angepassten Vorrichtungen für die Bearbeitung der Endkontur				
		Bearbeitung nach falscher Zeichnung	- Schlechte Dokumentation	- Schlechte Dokumentation	- Schlechte Bearbeitung des Wickelliners. Tank kann somit später nicht in RTM-Form eingelegt werden	- Erstellung einer Arbeitsanweisung				
1.1.9 Maschine: NEF	Außenkontur des Liners fertig drehen	Falsche Maschineneinstellungen	- Falsche Programmierung der Bauteile - Programmfehler	- Unsauberes Arbeiten - Schlechte Dokumentation	- Schlechte Bearbeitung des Wickelliners. Tank kann somit später nicht in RTM-Form eingelegt werden	- Erstellung einer Arbeitsanweisung				
		Falsche Kalibrierung der Anlage	- Fehlende Kalibrierung der Anlage - Zu seltene Kalibrierung der Anlage	- Unsauberes Arbeiten - Schlechte Dokumentation	- Schlechte Bearbeitung des Wickelliners. Tank kann somit später nicht in RTM-Form eingelegt werden	- Erstellung einer Arbeitsanweisung				
		Falsche Wartung der Anlage	- Fehlende Wartung der Anlage - Zu seltene Wartung der Anlage	- Unsauberes Arbeiten - Schlechte Dokumentation	- Schlechte Bearbeitung des Wickelliners. Tank kann somit später nicht in RTM-Form eingelegt werden	- Erstellung einer Arbeitsanweisung				
1.1.10 Mitarbeiter: QS	Kontrolle der richtigen Abmessungen des Liners laut Zeichnung	Verwendung der falschen Messmittel	- Falsche Vorgaben zum Vermessen der Liner - Unkonzentriertes Arbeiten	- Falsche Maße des Wickelliners. Tank kann somit später nicht in RTM-Form eingelegt werden	- Kontrolle Programm über Einstellteile - Hinterlegung des richtigen Programms in einer Arbeitsanweisung					
		Abgleich mit falschen Zeichnungen	- Schlechte Dokumentation	- Schlechte Maße des Wickelliners. Tank kann somit später nicht in RTM-Form eingelegt werden	- Erstellung einer Arbeitsanweisung					
1.1.11 Maschine: Messmittel QS	Vermessung des Liners	Fehlende Kalibrierung der Messmittel	- Fehlende Kalibrierung der Anlage - Zu seltene Kalibrierung der Anlage	- Falsche Abmessungen des Wickelliners	- Regelmäßige Kalibrierungsintervalle, die eingehalten werden müssen					
		Defekte Messmittel	- Verwendung defekter Messmittel - Beschädigung der Messmittel während der Messung	- Falsche Abmessungen des Wickelliners	- Verwendung von kalibrierten Messmitteln - Sauberes Vorgehen nach Arbeitsanweisung					
1.1.12 Mitarbeiter: Lager	Einlagern des Tanks	Falsche Zuordnung der Prozessparameter	- Falsches Scannen der QR-Codes - unkonzentriertes Arbeiten	- Falsche Chargenzuordnung und somit fehlende Rückverfolgbarkeit	- Regelmäßige Pausen, um konzentriertes Arbeiten zu ermöglichen	QR-Code Beschriftung		QR-Code Beschriftungsvorrichtung (Laser)	Automatische Zuordnung der Tanks zu Bossen	
		Falsche Einlagerungsbedingungen	- Falscher Lagerort - Fehlende Überwachung der Lagerungsbedingungen	- Qualitätsreduzierung des Tanks durch Alterungsprozesse	- Verwendung des richtigen Lagerorts - Kontrolle der Lagerbedingungen					
		Falscher Lagerort	- Verwendung des falschen Lagerorts (z.B. Sonnenstrahlung, Temperatur, Umgebungsbedingungen)	- Qualitätsreduzierung des Tanks durch Alterungsprozesse	- Lagerbedingungen vorab eindeutig dokumentieren - Lagerbedingungen durch Lagerort ermöglichen und kontrollieren					
		Falsche Beschriftung des Tanks	- Falsches Scannen der QR-Codes - unkonzentriertes Arbeiten	- Verwechslung von Tanks (ggf. unterschiedliche Herstellungsparameter) - Fehlende Rückverfolgbarkeit	- Regelmäßige Pausen, um konzentriertes Arbeiten zu ermöglichen	QR-Code Beschriftung		QR-Code Beschriftungsvorrichtung (Laser)		
[1.2] Herstellung Bosse										
1.2.1 Material: Aluminium	Rohmaterial nach Herstellervorgaben	Falsche Rohmaterialherstellung	- Falsche Materialauswahl beim Hersteller	- Undichtigkeit des Tanks aufgrund zu großer Aufbiegung des Bauteils	- Erstellung eines 3.1-Prüfzertifikats	Härte	Rockwellhärte= ? Shorehärte= ?	Härteprüfgerät	Regelmäßige Härteprüfung an Bauteilen notwendig?	
		Falsche Spezifikation	- Falsche Materialspezifikation beim Hersteller	- Undichtigkeit des Tanks aufgrund zu großer Aufbiegung des Bauteils	- Vorab-Zertifizierung des Herstellers - Regelmäßige Überprüfungen (Audits) beim Hersteller					
		Verwendung falsche Charge	- Falsche Chargenzuordnung beim Hersteller	- Undichtigkeit des Tanks aufgrund zu großer Aufbiegung des Bauteils - Fehlende Rückverfolgbarkeit	- Erstellung eines 3.1-Prüfzertifikats					

hab	FMEA	Version	Teil-Name							
handmann	Prototypen Prozess FMEA	1	Wasserstofftank							
Industrie 4.0										
M	Funktion	Fehlfunktion	Fehlerursache	Fehlerfolge	Maßnahme	Prozessparameter	Parametergrenzen	Messmethodik	Prozessnachgeschaltete Qualitätskontrolle	Industrie 4.0
1.2.2 Mitarbeiter: mech. Bearbeitung	Bauteile nach Zeichnung ... bearbeiten	...	Falsches Maschinenrüsten	-unsauberes Arbeiten -fehlende Dokumentation -falsche/ schlechte/ fehlende Vorrichtungen an Maschine	Falsche Bearbeitung der Bosse. Tank kann somit später nicht in RTM-Form eingelegt werden	- Erstellung einer Arbeitsanweisung - Verwendung von speziell angepassten Vorrichtungen für die Bearbeitung der Bosse	Für 1.2.2-1.2.5: Beachtung der Parameter/ Vorgaben der mech. Bearbeitung --> sollte klar sein, wird somit hier nicht betrachtet			
		Bearbeitung nach falscher Zeichnung	-Schlechte Dokumentation	Falsche Bearbeitung der Bosse. Tank kann somit später nicht in RTM-Form eingelegt werden	- Erstellung einer Arbeitsanweisung					
		Verwendung von falschen/ minderwertigen Werkzeugen	-Verwendung verschlissenes Werkzeug -Verwendung falsches Werkzeug	Unsaubere Bearbeitung (schlechte Oberfläche, Nichteinhalten von Toleranzen). Darauß entstehen Wickelprobleme	-Regelmäßiger Austausch von Werkzeug -Erstellung einer Arbeitsanweisung					
1.2.3 Maschine	Bauteile nach Zeichnung ... bearbeiten	Falsche Maschineneinstellungen	- Falsche Programmierung der Bauteile - Programmfehler	Falsche Bearbeitung der Bosse. Tank kann somit später nicht in RTM-Form eingelegt werden	-Kontrolle Programm über Einstellteile -Hinterlegung des richtigen Programms in einer Arbeitsanweisung					Zuordnung der Teile über QR-Code?
		Falsche Kalibrierung der Anlage	-Fehlende Kalibrierung der Anlage - Zu seltene Kalibrierung der Anlage	Ungenauigkeiten bei der Bearbeitung, dadurch Toleranzprobleme	Regelmäßige Kalibrierungsintervalle, die eingehalten werden müssen					
		Falsche Wartung der Anlage	- Fehlende Wartung der Anlage -Zu seltene Wartung der Anlage	Ausfall der Anlage und somit Produktionsengpass	Regelmäßige Wartungsintervalle, die eingehalten werden müssen					
1.2.4 Mitarbeiter: QS	Kontrolle der richtigen Abmessungen laut Zeichnungen	Verwendung der falschen Messmittel	-Falsche Vorgaben zum Vermessen der Liner -Unkonzentriertes Arbeiten	Falsche Maße des Wickeliners. Tank kann somit später nicht in RTM-Form eingelegt werden	-Erstellung einer Arbeitsanweisung -Regelmäßige Pausen					
		Abgleich mit falschen Zeichnungen	-Schlechte Dokumentation	Falsche Maße der Bosse. Später evtl. Probleme beim Wickeln oder Einlegen des Tanks in die RTM-Form	- Erstellung einer Arbeitsanweisung					
1.2.5 Maschine: Messmittel QS	Vermessung der Drehteile	Fehlende Kalibrierung der Messmittel	-Fehlende Kalibrierung der Anlage - Zu seltene Kalibrierung der Anlage	Falsche Abmessungen der Bosse	Regelmäßige Kalibrierungsintervalle, die eingehalten werden müssen					
		Defekte Messmittel	-Verwendung defekter Messmittel - Beschädigung der Messmittel während der Messung	Falsche Abmessungen der Bosse	-Verwendung von kalibrierten Messmitteln -Sauberes Vorgehen nach Arbeitsanweisung					
[1.3] Montage Wickeliner										
1.3.1 Mitarbeiter: Montage	Korrekte Zuordnung der Bosse zum Tank	QR-Codes (bzw. anderes Zuordnungssystem) falsch gescannt	-Falsches Scannen der QR-Codes -unkonzentriertes Arbeiten	Falsche Chargenzuordnung und somit fehlende Rückverfolgbarkeit	Regelmäßige Pausen, um konzentriertes Arbeiten zu ermöglichen	QR-Code Beschriftung		QR-Code Beschriftungsvorrichtung (Laser)		Zuordnung der Teile über QR-Code?
			-Falscher Umgang mit Bauteilen (Beschädigung der Gravur) -Falsche Gravur der Teile	Chargenzuordnung nicht mehr möglich	-geschützte Transportboxen für Bosse+Liner -Rücksichtsvoller Umgang mit Bauteilen	QR-Code Beschriftung		QR-Code Beschriftungsvorrichtung (Laser)		
		QR-Code beschädigt	-Falsches Scannen der QR-Codes -Vertauschen von Bauteilen -unkonzentriertes Arbeiten	Falsche Chargenzuordnung und somit fehlende Rückverfolgbarkeit	Regelmäßige Pausen, um konzentriertes Arbeiten zu ermöglichen	QR-Code Beschriftung		QR-Code Beschriftungsvorrichtung (Laser)		
1.3.2 Maschine: Montage-vorrichtung	Korrekte Ausrichtung der Bosse zueinander	QR-Codes vertauscht	-fehlende Dokumentation - falsche/ schlechte/ fehlende Vorrichtungen an Maschine	Ungenau/ falsche Ausrichtung der Bosse	- Erstellung einer Arbeitsanweisung - Verwendung von speziell angepasster Vorrichtung für die Ausrichtung der Bosse -Klare Beschriftung der Vorrichtung					
			-Beschädigung der Montagevorrichtung durch Falschanwendung -Verschleiss an der Montagevorrichtung	Ungenau/ falsche Ausrichtung der Bosse	-Regelmäßige Wartungsintervalle an der Montagevorrichtung -Arbeitsanweisung für richtige Vorgehensweise					
		Montagevorrichtung beschädigt								
1.3.3 Mitarbeiter: Montage	Korrekte Ausrichtung der Bosse zueinander	Verdrehung der Teile bei Entnahme aus Vorrichtung	-unvorsichtige Arbeitsweise -falsche Arbeitsutensilien	Ungenau/ falsche Ausrichtung der Bosse	- Regelmäßige Pausen, um konzentriertes Arbeiten zu ermöglichen					
			-falscher Umgang mit der Montagevorrichtung	Ungenau/ falsche Ausrichtung der Bosse	-Einweisung in Vorgehensweise -Arbeitsanweisung					
[1.4] Einspannung Wickeliner										
1.4.1 Mitarbeiter: Wickelanlage	Korrekte Positionierung des Wickeliners in der Anlage	Falsche Positionierung des Wickeliners	Ungenau Vorgehensweise	Falsche Positionierung des Wickeliners und somit falsche Wicklung	-Arbeitsanweisung					
		Falsches Einspannen des Wickeliners	Falche Bedienung der Wickelanlage	Beschädigung der Bosse	-Vorrichtung zur Regulierung der Schließkraft					
1.4.2 Maschine: Wickelanlage	Bauteilausrichtung über Positionierungssystem	Positionierungssystem defekt	Beschädigung durch Kollision	Falsche Positionierung des Wickeliners und somit falsche Wicklung	-regelmäßige Wartung - Bei Kollision direkt Wartungsintervall starten					
		Einspannsystem defekt	Spannsystem durch vorherige Beschädigung defekt	Beschädigung der Bosse	- regelmäßige optische Kontrolle - Vorrichtung zur Regulierung der Schließkraft					

hab	FMEA	Version	Teil-Name							
handmann	Prototypen Prozess FMEA Elteka	1	Wasserstofftank							
Industrie 4.0										
M	Funktion	Fehlfunktion	Fehlerursache	Fehlerfolge	Maßnahme	Prozessparameter	Parametergrenzen	Messmethodik	Prozessnachgeschaltete Qualitätskontrolle	Industrie 4.0
[1.5] Wickeln										
1.5.1 Material: Kohlefaser	Korrekte Kohlefaser verwenden	3.1-Prüfzeugnis des Hersteller nicht mitgeliefert	-unsauberes Arbeiten	falsche Kohlefaser verwendet und somit Festigkeit des Tanks nicht ausreichend	- Kontrollprozess im System hinterlegen					
		Falsche Kohlefaser verwendet	-3.1-Prüfzeugnis nicht überprüft -Falsche Kohlefaser geliefert	Restigkeit des Tanks nicht ausreichend	- Kontrollprozess im System hinterlegen -Chargenprüfung Kohlefaser?					
		Falsche Lagerung des Rohmaterials	-Verwendung des falschen Lagerorts (z.B. Sonneneinstrahlung, Temperatur, Umgebungsbedingungen)	Qualitätsreduzierung der Faser durch Alterungsprozesse	- Lagerbedingungen vorab eindeutig dokumentieren -Lagerbedingungen durch Lagerort ermöglichen und kontrollieren					
1.5.2 Mitarbeiter: Wickelanlage	Anbringen der ersten Lage	Falsches Anbringen der ersten Lage	-Falsche Vorgehensweise -Verwendung falsches Material	Lösen der Faserlage beim Wickeln	Arbeitsanweisung					
		Keine gute Anbindung der Faser an den Liner	-Falsche Bearbeitung der Teile -Falsche Vorgehensweise	Lösen der Faserlage beim Wickeln	Arbeitsanweisung					
1.5.3 Mitarbeiter: Wickelanlage	Wickelprogramm laufen lassen	Verwendung des falschen Wickelprogramms	-Unkonzentrierte Vorgehensweise	Falscher Lagenaufbau	-Klare Zuordnung an Anlage -doppelte Überprüfung notwendig	Faserorientierung	Winkel siehe Lagenaufbau	Wirbelstromprüfung?		
		Zu wenig Fasern auf der Spule	- zu wenig Fasern für die Wicklung auf Anlage vorhanden	Fasern reichen nicht für die Wicklung des kompletten Tanks	Vorgehensweise noch zu definieren	Gewichtskontrolle	m= min. 4kg	Waage		
		Falsche Einstellungen an der Anlage	-falsches Wickelprogramm gewählt -Wickelcode fehlerhaft	Falscher Lagenaufbau		Geometrie	siehe Zeichnung ...	optische Vermessung?		
	Faserbrüche vermeiden	Zu hohe Faserspannung	-Störkanten/ -teile auf Liner, die zu höherer Faserspannung führen -defekte Anlage	Faserbrüche, evtl. sogar Riss der Faser und dadurch kein Wickeln möglich	-regelmäßige Wartung der Anlage -saubere Vorgehensweise beim Einlegen des Tanks	Faserspannung	F=?	Kraftmessdose? Rovingbremse?		
		Störeinflüsse vorhanden, die zu Rovingbrüchen führen können	-Scharfe Kanten auf Liner -Störteile auf Liner	Faserbrüche, evtl. sogar Riss der Faser und dadurch kein Wickeln möglich	-optische Kontrolle des Liners beim Einlegen	Geometrie	siehe Zeichnung ...	optische Vermessung?		
1.5.4 Maschine: Wickelanlage	Wickeln nach Wickelprogramm	Falsches Wickelprogramm hinterlegt	- Falsche Programmierung der Wickelanlage - Falsches Programm gewählt	Falscher Lagenaufbau	-Kontrolle Programm über Einstellteile -Hinterlegung des richtigen Programms in einer Arbeitsanweisung	Faserorientierung	Winkel siehe Lagenaufbau	?		-Einbringen von Sensorik für Flammenschutz -Einbringen von DMS o.ä., die eine zu große Dehnung/ Risse detektieren kann (Anzeige Überbelastung)
		Fehler in der Programmierung	-Falsche Ablage der Lagen durch Programmfehler	Falscher Lagenaufbau	-Kontrolle Programm über Einstellteile -Hinterlegung des richtigen Programms in einer Arbeitsanweisung	Faserorientierung	Winkel siehe Lagenaufbau	?		
	Kontrolle der Lagenpositionierung über optisches Messsystem	Messsystem defekt	-Faserabrutschen durch trockene Faser	Falscher Lagenaufbau oder Probleme beim Wickeln	Kontrolle des Lagenaufbaus	Faserorientierung	Winkel siehe Lagenaufbau	?	Welches Messsystem kann hier verwendet werden? -optisches Messsystem -Wirbelstrommessung -> laut Cygnet Textimp gar keine Prüfung erforderlich!! Eher nach Infiltrationsprozess -> Masterarbeit am FIBRE läuft	
	Faserverrutschen		-zu hohe Faserspannung -falscher Ablagewinkel -falsche Faserschichte	Falscher Lagenaufbau oder Probleme beim Wickeln	- Kontrolle über Einstellteile -regelmäßige Wartung + Reinigung der Anlage	Faserspannung Faserwinkel	F=? Winkel siehe Lagenaufbau	Kraftmessdose? Rovingbremse? ?		
	Faserbrüche		-zu hohe Faserspannung	Faserbrüche, evtl. sogar Riss der Faser und dadurch kein Wickeln möglich	- scharfe Kanten vermeiden - Konkrete Faserspannung über Anlagentechnik aufbringen	Faserspannung	F=?	Kraftmessdose? Rovingbremse?		
1.5.5 Mitarbeiter: Wickelanlage	Anbringen der letzten Lage	Falsche Befestigung der letzten Faserlage	-Falsche Vorgehensweise -Verwendung falsches Material -Aufdickung in ungewünschten Bereichen -Störungen in ungewünschten Bereichen	Lösen der Faserlage nach Wickeln beim Transport	Arbeitsanweisung					
		Lösen der letzten Faserlage	-Falsche Vorgehensweise -Verwendung falsches Material	Lösen der Faserlage nach Wickeln beim Transport	Arbeitsanweisung					
		Aufbringen von zu viel Fremdmaterial (Binder)	- zu viel Bindematerial aufgebracht	Störungen beim Polymerisationsprozess	Arbeitsanweisung					
[1.6] Entnahme Tank-Prefom										
1.6.1 Mitarbeiter: Wickelanlage	Entnahme Trank-Prefom aus Wickelanlage	Verschmutzungen auf Tank-Prefom	-Unsauberes Arbeiten -kein Tragen von Handschuhen	Verschmutzungen führen zu Polymerisationsstörungen	- passende Arbeitskleidung - Arbeitsanweisung					
		Faserverschiebungen bei Entnahme	- falsche Handhabung des Tanks - Transport nicht über Bosse, sondern an der Faserwicklung	-Ungenügende Festigkeit des Tanks durch Faserverschiebungen -Quetschungen in gewissen Bereichen - Fasern fallen auf Dichtungen	-Entnahmhilfe -Arbeitsanweisung					

hab	FMEA	Version	Teil-Name							
handmann	Prototypen Prozess FMEA	Elteka	Wasserstofftank							
Industrie 4.0										
M	Funktion	Fehlfunktion	Fehlerursache	Fehlerfolge	Maßnahme	Prozessparameter	Parametergrenzen	Messmethodik	Prozessnachgeschaltete Qualitätskontrolle	Industrie 4.0
		Faserbrüche bei Entnahme	- falsche Handhabung des Tanks - Transport nicht über Bosse, sondern an der Faserwicklung	-Ungenügende Festigkeit des tanks durch Faserbrüche -Lösen der Fasern vom Liner	-Entnahmhilfe -Arbeitsanweisung					
1.6.2 Mitarbeiter: Lager/ Versand	Lagerung/ Transport Tank-Preform	Verschmutzungen aufgrund falscher Verpackung	-Falsche Verpackung falsche Handhabung	Verschmutzungen führen zu Polymerisationsstörungen	-Verpackungsvorschriften erstellen					
		Beschädigungen während Lagerung/ Transport	-Falsche Verpackung falsche Handhabung	-Faserbrüche -Faserverschiebungen --> dadurch ungenügende Festigkeit	-Verpackungsvorschriften erstellen					
		Faserbrüche aufgrund falscher Verpackung	-unpassende Verpackungsmaterialien -falsche Handhabung	-Faserbrüche -Faserverschiebungen --> dadurch ungenügende Festigkeit	-Verpackungsvorschriften erstellen					
P[2] RTM Verfahren										
[2.1] Tank- Preform in RTM WKZ einlegen										
2.1.1 Material: Binder	Befestigung der Faser auf Liner	Falscher Binder verwendet	-Bestellung falscher Binder -Verwendung des falschen Materials	Polymerisationsstörungen	- Bereitstellung nur eines Bindermaterials -Arbeitsanweisung					
		Binder wird verbrannt	-Falsche Bearbeitung des Binders	Polymerisationsstörungen	-Arbeitsanweisung	Temperatur	T=max. 200°C	Temperaturmessung (meist am Heizgerät)		
		Falsche Aufbringung des Binders	-Flasche Menge des Binders verwendet -falsche Vorgehensweise	Polymerisationsstörungen	-Arbeitsanweisung					
2.1.2 Material/ Mitarbeiter: Tank- Preform	Verwendung korrekter Tank-Preform	QR-Codes (bzw. anderes Zuordnungssystem) falsch gescannt	-Falsches Scannen der QR-Codes -unkonzentriertes Arbeiten	Falsche Chargenzuordnung und somit fehlende Rückverfolgbarkeit	Regelmäßige Pausen, um konzentriertes Arbeiten zu ermöglichen	QR-Code Beschriftung		QR-Code Beschriftungsvorrichtung (Laser)		Zuordnung der Teile über QR-Code?
		QR-Code beschädigt	-Falscher Umgang mit Bauteilen (Beschädigung der Gravur) -Falsche Gravur der Teile	Chargenzuordnung nicht mehr möglich	-geschützte Transportboxen für Tankpreform -Rücksichtsvoller Umgang mit Bauteilen	QR-Code Beschriftung		QR-Code Beschriftungsvorrichtung (Laser)		
		QR-Codes vertauscht	-Falsches Scannen der QR-Codes -Vertauschen von Bauteilen -unkonzentriertes Arbeiten	Falsche Chargenzuordnung und somit fehlende Rückverfolgbarkeit	Regelmäßige Pausen, um konzentriertes Arbeiten zu ermöglichen	QR-Code Beschriftung		QR-Code Beschriftungsvorrichtung (Laser)		
		Tank-Preform beschädigt	-Falsche Entpackung der Tank-Preform -Falscher Transport der Tank-Preform	- Faserbrüche - Falscher Faserverlauf	-Transportvorschriften erstellen - Umgang mit Fasern schulen -Arbeitsanweisung					
		Falsche Tankpreform verwendet	-Vertauschen der Bauteile -Falsche Größe des Tank-Preforms verwendet	-Fehlende Rückverfolgbarkeit -Bauteil passt nicht in RTM-Form	-Saubere Dokumentation mithilfe von QR-Codes					
2.1.3 Mitarbeiter: RTM-Anlage	Eintrennen Werkzeug	Falsche Menge Trennmittel verwendet	- zu viel oder zu wenig Trennmittel	Polymerisationsstörungen und Probleme beim Lösen der Bauteile von der RTM-Form	Arbeitsanweisung					
		Falsches Aufbringen des Trennmittels	-falsche Menge -falsche Aufbringung des Trennmittels	Polymerisationsstörungen und Probleme beim Lösen der Bauteile von der RTM-Form	Arbeitsanweisung					
		Falsche Häufigkeit des Eintrennens	-Ausbilden einer Trennmittelschicht	Polymerisationsstörungen und Probleme beim Lösen der Bauteile von der RTM-Form	-Arbeitsanweisung - Überarbeitung (Polieren) des Werkzeugs nach gewisser Anzahl von Abgüssen					
2.1.4 Mitarbeiter: RTM-Anlage	Saubereit der Teile	Verschmutzung des Tank-Preforms	-Falsche Handhabung -verschmutzte Räumlichkeiten (Ggf. auch Sublimat in der Luft) -Falsche Arbeitskleidung	Polymerisationsstörungen und Einschlüsse	-Richtige Arbeitskleidung -Richtige Räumlichkeiten verwenden -Arbeitsanweisung					
		Verschmutzung der RTM-Form	- Falsche Handhabung -unsaubere Vorgehensweise -Verschmutztes Arbeitsmaterial	Polymerisationsstörungen und Einschlüsse	-Arbeitsmaterial regelmäßig reinigen/ austauschen - Arbeitsanweisung					
2.1.5 Maschine: Werkzeugform	Werkzeug funktionsfähig	Dichtungen defekt	-Verschleiß der Dichtung -Beschädigung der Dichtung	undichtes Werkzeug	-regelmäßige Kontrolle der Dichtungen (vor jedem Abguss optische Begutachtung)					
		Falsche Werkzeugform gewählt	-Werkzeugform passt nicht zu Tankgeometrie	Infiltration des Bauteils nicht möglich	eindeutige Zuordnung über QR-Codes o.ä.					
		Geometrie Werkzeugform und Tank-Preform nicht zueinander passend	-Werkzeugform passt nicht zu Tankgeometrie	Infiltration des Bauteils nicht möglich	eindeutige Zuordnung über QR-Codes o.ä.					
		Beschädigungen Tank-Preform durch scharfe Kanten am Werkzeug	-zu scharfe Kanten am Werkzeug	Faserbrüche/ Faserverschiebungen	-Vermeidung von scharfen Kanten u.ä. im Werkzeug					
2.1.6 Mitarbeiter: Einlegen des Tank-Preforms	Positionierung des Tanks	Falsche Bauteilausrichtung im Werkzeug durch falsches Einlegen	- Falsche Positionierung des Tanks im Werkzeug	Montageprobleme bei der Lagerung in der Endanwendung	Werkzeugkonstruktion so gestalten, dass Tank gar nicht falsch eingelegt werden kann					
		Falsche Bauteilausrichtung im Werkzeug durch falsche Werkzeugaufnahme	-Werkzeugaufnahme beschädigt oder falsch gestaltet	Montageprobleme bei der Lagerung in der Endanwendung	Werkzeugkonstruktion so gestalten, dass Tank gar nicht falsch eingelegt werden kann (vorab prüfen)					
		Korrektes Einlegen des Tanks	Falsche Vorgehensweise beim Einlegen	-Falsches Handling der Tank-Preform	Faserbrüche/ Faserverschiebungen -Schulung korrektes Handling CF					

hab	FMEA	Version	Teil-Name							
handmann	Prototypen Prozess FMEA	Elteka	Wasserstofftank							
								Industrie 4.0		
M	Funktion	Fehlfunktion	Fehlerursache	Fehlerfolge	Maßnahme	Prozessparameter	Parametergrenzen	Messmethodik	Prozessnachgeschaltete Qualitätskontrolle	Industrie 4.0
		Beschädigungen des Preforms durch falsches Einlegen	-unvorsichtiges Handling der Tank-Preform	Faserbrüche/ Faserverschiebungen	-Schulung korrektes Handling CF					
		Verschmutzung des Preforms beim Einlegen	- unsauberes Arbeiten - Verschmutzte Arbeitskleidung - Verschmutztes Arbeitsmaterial	Polymerisationsstörungen/ Einschlüsse	- saubere Arbeitskleidung - Saubere Arbeitsmaterialien					
[2.2] RTM- Werkzeug vorbereiten										
[2.2.1] RTM- Werkzeug schließen										
2.2.1.1	Mitarbeiter: RTM-Anlage	Werkzeug schließen	Falsche Werkzeugoberhälfte verwendet	-Werkzeugform passt nicht zu Tankgeometrie	Infiltration des Bauteils nicht möglich	eindeutige Zuordnung über QR-Codes o.ä.				
			Falsche Positionierung der Werkzeughälften zueinander	- Falsche Ausrichtung der Werkzeughälften zueinander	Schließen des Werkzeugs nicht möglich	- Konstruktion der Werkzeughälften so, dass eindeutige Ausrichtung möglich ist				
			Faserquetschungen beim Schließen des Werkzeugs	- Fasern stehen beim Einlegen der Tank-Preform über - falscher Tank-Preform - falsche Wicklung des Tank-Preforms	Faserquetschungen und somit Beschädigungen am Werkzeug und Undichtigkeiten	- Verwendung korrekte Tank-Preforms - Vorsichtiges und sauberes Einlegen der Tank-Preforms	Schließkraft	F=max. ?	Kraftmessung beim Schließen des Werkzeugs	
			Zu großer Werkzeugspalt vorhanden	-Schließweg des Formenträger passt nicht zu Werkzeuggeometrie -Probleme am Formenträger	Werkzeug undicht bzw. nicht geschlossen	- Vorabkontrolle Schließen des Werkzeugs	Schließweg	s= ?	Wegmessung beim Schließen des Werkzeugs	
2.2.1.2	Maschine: RTM-Anlage	Werkzeug schließen	Falsche Schließkraft verwendet	- zu hohe oder zu niedrige Schließkraft des Werkzeugs	Undichtigkeiten oder Beschädigung Werkzeug	-Prozessüberwachung	Schließkraft	F=min. - max. ?	Kraftmessung beim Schließen des Werkzeugs	
			Falsche Anschlüsse angebracht	-falsche Anbringung der Anschlüsse	- inkorrekte Vermischung - keine Injektion	-Versuchsabguss nach neuer Installation				
			Zu großer Werkzeugspalt vorhanden	-Werkzeug fährt nicht komplett zu	keine Injektion möglich aufgrund von Undichtigkeiten	-Versuchsabguss nach neuer Installation	Schließweg	s= ?	Wegmessung beim Schließen des Werkzeugs	
[2.2.2] RTM- Werkzeug aufheizen										
2.2.2.1	Mitarbeiter: RTM-Anlage	Werkzeug aufheizen	Falsche Werkzeugpositionierung	- Falsche Ausrichtung der Werkzeughälften zueinander	Schließen des Werkzeugs nicht möglich	- Konstruktion der Werkzeughälften so, dass eindeutige Ausrichtung möglich ist				
			Falsche Temperatur gewählt	zu hohe oder zu niedrige Temperatur gewählt	Polymerisationsfehler, hoher Restmonomeranteil	-Prozessüberwachung	Temperatur	T= 153-157°C	Temperatursensoren am Werkzeug	
			Werkzeug evakuieren	Kein Vakuum auf Bauteil	-Vakuum auf Bauteil vergessen	-Lufteinschlüsse -Polymerisationsfehler	- Arbeitsanweisung - Signalwarnung	Druck	p= max. 50mbar	Drucksensoren im Werkzeug
				Falsche Vakuumeinstellungen	Zu niedriges Vakuum gewählt	-Lufteinschlüsse -Polymerisationsfehler	- Arbeitsanweisung - Signalwarnung	Druck	p= max. 50mbar	Drucksensoren im Werkzeug
				Werkzeug undicht	- Werkzeug (aufgrund verschiedener Problematiken möglich) undicht	-Injektion nur bedingt möglich -Lufteinschlüsse -Polymerisationsfehler	- Korrekte Kontrolle der ersten Schritte beim Schließen des Werkzeugs	Druck	p= max. 50mbar	Drucksensoren im Werkzeug
2.2.2.2	Maschine: RTM-Anlage	Werkzeug aufheizen	Falsche Temperaturmessung	zu hohe oder zu niedrige Temperatur gewählt	Polymerisationsfehler, hoher Restmonomeranteil	-Prozessüberwachung	Temperatur	T= 153-157°C	Temperatursensoren am Werkzeug	Condition Monitoring- Live-Überwachung der Parameter
				Fehlende Kalibrierung der Anlage - Zu seltene Kalibrierung der Anlage	Polymerisationsfehler, hoher Restmonomeranteil	Regelmäßige Kalibrierungsintervalle, die eingehalten werden müssen	Temperatur	T= 153-157°C	Temperatursensoren am Werkzeug	
				Werkzeug evakuieren	Vakuumpumpe defekt	- kein Vakuum auf Bauteil aufgrund defekter Vakuumpumpe	-Lufteinschlüsse -Polymerisationsfehler	-regelmäßige Wartung der Anlage	Druck	p= max. 50mbar
					Falsche Druckmessung	- kein Vakuum auf Bauteil aufgrund defekter Druckmessung	-Lufteinschlüsse -Polymerisationsfehler	-regelmäßige Wartung der Anlage	Druck	p= max. 50mbar
[2.3] Infiltration										
[2.3.1] Schmelzaufbereitung										
2.3.1.1	Material: Laurinlactam	Laurinlactam nach Materialspezifikation	Falsche Herstellerspezifikation	Falsche Herstellerspezifikation beim Hersteller	Schlechte Polymerisation	-Vorab-Zertifizierung des Herstellers - Regelmäßige Überprüfungen (Audits) beim Hersteller	Viskositätsmessung	Handmann-Spezifikation t= 7-12min Topfzeit	Viskositätsmessgerät	Qualitätskontrolle am Bauteil notwendig -> DSC?
				Feuchtes Material	-Falsche Verpackung -Falsche Lagerung	Schlechte Polymerisation	Wareneingangskontrolle mit Feuchtigkeitsmessung	Feuchtigkeitsmessung	max. 0,1% Restfeuchte	Feuchtemessgerät Aquatrac-V von Brabender
				Verwendung falsche Charge	-Falsche oder unsaubere Dokumentation	Falsche Chargenzuordnung und somit fehlende Rückverfolgbarkeit				
2.3.1.2	Material: Aktivator	Aktivator nach Materialspezifikation	Falsche Herstellerspezifikation	Falsche Herstellerspezifikation beim Hersteller	Schlechte Polymerisation	-Vorab-Zertifizierung des Herstellers - Regelmäßige Überprüfungen (Audits) beim Hersteller	Viskositätsmessung	Handmann-Spezifikation t= 7-12min Topfzeit	Viskositätsmessgerät	Qualitätskontrolle am Bauteil notwendig -> DSC?
				Verwendung falsche Charge	-Falsche oder unsaubere Dokumentation	Falsche Chargenzuordnung und somit fehlende Rückverfolgbarkeit				
				...						
2.3.1.3	Material: Katalysator	Katalysator nach Materialspezifikation	Katalysator hat zu viel Feuchtigkeit gezogen	-Falsche Verpackung -Falsche Lagerung	Schlechte Polymerisation	-Regelmäßige Kontrolle -Richtige Lagerung	Viskositätsmessung	Handmann-Spezifikation t= 7-12min Topfzeit	Viskositätsmessgerät	Qualitätskontrolle am Bauteil notwendig -> DSC?
				Verwendung falsche Charge	-Falsche oder unsaubere Dokumentation	Falsche Chargenzuordnung und somit fehlende Rückverfolgbarkeit				
				...						

hab	FMEA	Version				Teil-Name			
handmann	Prototypen Prozess FMEA Elteka		1			Wasserstofftank			

						Industrie 4.0			Prozessnachgeschaltete Qualitätskontrolle	
M	Funktion	Fehlfunktion	Fehlerursache	Fehlerfolge	Maßnahme	Prozessparameter	Parametergrenzen	Messmethodik	Qualitätskontrolle	Industrie 4.0
2.3.1.4 Mitarbeiter: RTM-Anlage	Aufschmelzen Bestandteile	Falsche Mengen abgewogen	-Falsches Abwiegen der Bestandteile - Falsche Dokumentation bei Wareneingangsprüfung	Reduzierte Materialqualität und somit erhöhte Wasserstoffpermeation	-Dokumentation der Wägung - 4-Augenkontrolle	Gewicht	je nach Tankgröße m= ...g	Waage	Qualitätskontrolle am Bauteil notwendig -> DSC?	
		Falsche Aufschmelztemperatur gewählt	-Einstellen der falschen Prozessparameter	Reduzierte Materialqualität und somit erhöhte Wasserstoffpermeation	Automatisierung des Aufheizprozesses	Temperatur	T= 163-165°C	Temperatursensoren		
		Aufschmelzbehälter nicht/ falsch evakuiert	-Vakuum vergessen	Reduzierte Materialqualität und somit erhöhte Wasserstoffpermeation	-Signalertönung bei zu schlechtem Vakuum	Druck	p= max. 50mbar	Drucksensoren im Aufschmelzbehälter		
2.3.1.5 Maschine: RTM-Anlage	Aufschmelzen der Bestandteile	Falsche Temperaturanzeige	Temperaturanzeige defekt	falsche Temperatur und dadurch schlechte Polymerisation	Mehrfache Temperaturüberwachung	Temperatur	T= 163-165°C	Temperatursensoren	Qualitätskontrolle am Bauteil notwendig -> DSC?	Condition Monitoring- Live-Überwachung der Parameter
		Falsche Kalibrierung der Temperatur	-Falsche Kalibrierung der Anlage -zu seltene Kalibrierung der Anlage	falsche Temperatur und dadurch schlechte Polymerisation	Mehrfache Temperaturüberwachung	Temperatur	T= 163-165°C	Temperatursensoren		
		Falsche Druckanzeige	Druckanzeige defekt	schlechte Polymerisation durch Sauerstoffschädigungen	Mehrfache Drucküberwachung	Druck	p= max. 50mbar	Drucksensoren im Aufschmelzbehälter		
		Defekte Vakuumpumpe	-kein Vakuum auf Anlage aufgrund von defekter Vakuumpumpe	schlechte Polymerisation durch Sauerstoffschädigungen	Mehrfache Drucküberwachung	Druck	p= max. 50mbar	Drucksensoren im Aufschmelzbehälter		
		Defekter Rührer	-defekter Rührer	Schlechte Durchmischung	Rührorgan regelmäßig inspizieren					
		Falsche Einstellungen des Rührorgans	-falsche Einstellungen (z.B. Drehzahl)	Schlechte Durchmischung	Einstellungen regelmäßig überprüfen	Drehzahl	n= ...U/min	Drehzahlmessung		
[2.3.2] Injektion										
2.3.2.1 Mitarbeiter: RTM-Anlage	Schmelzeinfiltration	Falscher Injektionsdruck gewählt	-falsche Vorgaben -unkonzentriertes Arbeiten	Unsaubere Infiltration des Bauteils	-Überprüfung über Drucksensoren - Opferbauteil mit hohem Infiltrationswiderstand	Druck	p= 10bar	Drucksensoren im Werkzeug	Überwachung Infiltrationsqualität: -CT-Analyse -Ultraschall -Opferbauteil mit hohem Infiltrationswiderstand	
		Injektionsanschlüsse vertauscht	-Vertauschen der Anschlüsse durch Unkonzentriertheit	Schlechte Infiltration des Bauteils	-Überprüfung über Drucksensoren - Opferbauteil mit hohem Infiltrationswiderstand					
		Falsche Abklemmung der Abgüsse	-falsches oder zu spätes Abklemmen des Abgusses	Luftschlüsse im Bauteil, schlechte Infiltration	-automatische Verriegelung bei Schmelzedurchfluss					
		Kein Vakuum auf RTM-Werkzeug	Vergessen Vakuum einzuschalten	Luftschlüsse im Bauteil	Warnung durch Signalgeber	Druck	p= max. 50mbar	Drucksensoren im Werkzeug		
		Befüllung des Werkzeugs dauert zu lange	-zu lange Befüllzeiten durch Faserquetschungen o.ä.	Schlechte Infiltration des Bauteils	-Überprüfung über Drucksensoren -	Druck	p= 10bar	Drucksensoren im Werkzeug		
2.3.2.2 Maschine: RTM-Anlage	Schmelzeinfiltration	Druckmessung defekt	-Drucksensor defekt	Unsaubere Infiltration des Bauteils	-Überprüfung über mehrere Drucksensoren - Opferbauteil mit hohem Infiltrationswiderstand -regelmäßige Wartung	Druck	p= 10bar	Drucksensoren im Werkzeug	Überwachung Infiltrationsqualität: -CT-Analyse -Ultraschall -Opferbauteil mit hohem Infiltrationswiderstand	Condition Monitoring- Live-Überwachung der Parameter
		Injektionsanschlüsse undicht	- Injektionsanschluss defekt -Dichtungen defekt	Unsaubere Infiltration des Bauteils, Luftschlüsse	-regelmäßige Wartung	Druck	p= 10bar	Drucksensoren im Werkzeug		
		Abgussverschluss kann nicht geschlossen werden	-falsches oder zu spätes Abklemmen des Abgusses	Luftschlüsse im Bauteil, schlechte Infiltration	-automatische Verriegelung bei Schmelzedurchfluss					
		Undichtes RTM-Werkzeug	-Dichtungsprobleme am RTM-Werkzeug	Luftschlüsse im Bauteil, schlechte Infiltration	-regelmäßiger Austausch der Dichtung -regelmäßige Wartung	Druck	p= 10bar	Drucksensoren im Werkzeug		
		Druck kann nicht vollständig aufgebracht werden	-Sonstige Undichtigkeiten -Probleme mit Dosierpumpe	Schlechte Infiltration des Bauteils	Regelmäßige Wartungsintervalle, die eingehalten werden müssen	Druck	p= 10bar	Drucksensoren im Werkzeug		
2.3.2.3 Mitarbeiter: RTM-Anlage	Nachdruck aufbringen	Falscher Nachdruck gewählt	Nachdruck zu hoch oder zu niedrig eingestellt	Trockenstellen im Bauteil	-Überprüfung über Drucksensoren	Druck	p= 10bar	Drucksensoren im Werkzeug	Überwachung Infiltrationsqualität: -CT-Analyse -Ultraschall -Opferbauteil mit hohem Infiltrationswiderstand	
		Falscher Zeitpunkt des Nachdrucks gewählt	Nachdruck zu früh oder zu spät angewählt	Trockenstellen im Bauteil	-Überprüfung über Drucksensoren und Zeitmessung	Zeit	t=... s	Zeitmessung an Anlage		
2.3.2.4 Maschine: RTM-Anlage	Nachdruck aufbringen	Druckmessung defekt	-Drucksensor defekt	Unsaubere Infiltration des Bauteils	-Überprüfung über mehrere Drucksensoren - Opferbauteil mit hohem Infiltrationswiderstand -regelmäßige Wartung	Druck	p= 10bar	Drucksensoren im Werkzeug	Überwachung Infiltrationsqualität: -CT-Analyse -Ultraschall -Opferbauteil mit hohem Infiltrationswiderstand	
		Nachdruckaufbringung nicht möglich	-Sonstige Undichtigkeiten -Probleme mit Dosierpumpe	Schlechte Infiltration des Bauteils	Regelmäßige Wartungsintervalle, die eingehalten werden müssen	Druck	p= 10bar	Drucksensoren im Werkzeug		
		Entstehende Undichtigkeiten bei Nachdruck	-Zu hoher Nachdruck gewählt	Undichtigkeiten und evtl. Beschädigungen des Werkzeugs	-Kontrolle über Drucksensoren	Druck	p= 10bar	Drucksensoren im Werkzeug		
[2.4] Polymerisation										

hab	FMEA	Version				Teil-Name				
handmann	Prototypen Prozess FMEA Elteka		1			Wasserstofftank				

						Industrie 4.0			Prozessnachgeschaltete Qualitätskontrolle		Industrie 4.0
M	Funktion	Fehlfunktion	Fehlerursache	Fehlerfolge	Maßnahme	Prozessparameter	Parametergrenzen	Messmethodik	Qualitätskontrolle		
2.4.1 Material: Polymerisation zu Lauramid	Temperatur-Zeit-Verlauf einhalten	Falsche Werkzeugtemperatur gewählt	-falsche Einstellungen an Anlage	Schlechte Polymerisation und dadurch schlechte Materialqualität	Stetige Kontrolle der Herstellungsparameter	Werkzeugtemperatur	T=153-157°C	Temperatursensoren im Werkzeug	Qualitätskontrolle am Bauteil notwendig --> DSC?		
		Falsche Schmelztemperatur gewählt	-falsche Einstellungen an Anlage	Schlechte Polymerisation und dadurch schlechte Materialqualität	Stetige Kontrolle der Herstellungsparameter	Schmelztemperatur	T=163-165°C	Temperatursensoren im Aufschmelzbehälter			
		Falsche Polymerisationszeit gewählt	-falsche Einstellungen an Anlage	Schlechte Polymerisation und dadurch schlechte Materialqualität	Stetige Kontrolle der Herstellungsparameter	Zeit	t=10min	Zeitmessung an Anlage			
		Temperaturspitzen/ -tiefen während Polymerisationsprozess	-technische Probleme an der Anlage	Schlechte Polymerisation und dadurch schlechte Materialqualität	Stetige Kontrolle der Herstellungsparameter	Werkzeugtemperatur	T=153-157°C	Temperatursensoren im Werkzeug			
2.4.2 Mitarbeiter: RTM-Anlage	Prozessdaten überwachen	Temperatur-Zeit-Verlauf stimmt nicht mit Standardprozess überein	-falsche Einstellungen an Anlage ausgewählt	Schlechte Polymerisation und dadurch schlechte Materialqualität	Stetige Kontrolle der Herstellungsparameter				Qualitätskontrolle am Bauteil notwendig --> DSC?		
		Druck fällt während Polymerisation ab (Undichtigkeiten)	Undichtigkeiten am Werkzeug	Schlechte Infiltration des Bauteils	Regelmäßiger Austausch der Dichtung	Druck	p= 10bar	Drucksensoren im Werkzeug			
		Schließkraft des Werkzeugs verändert sich	Falsche Einstellungen and er Anlage ausgewählt	Undichtigkeiten und dadurch schlechte Infiltration	Stetige Kontrolle der Herstellungsparameter	Schließkraft	F=min. - max. ?	Kraftmessung beim Schließen des Werkzeugs			
		Keine Kontrolle über Prozessdaten	Fehlende Überwachung der Prozessdaten	-Schlechte Polymerisation -Schlechte Infiltration usw.	Stetige Kontrolle der Herstellungsparameter						
2.4.3 Maschine: RTM-Anlage	Polymerisation der Schmelze	Temperatur-Zeit-Verlauf kann nicht eingehalten werden	-Defekte Sensoren -sonstige probleme mit der Anlage	Schlechte Polymerisation und dadurch schlechte Materialqualität	-regelmäßige Wartung der Anlage	Zeit Schmelztemperatur Werkzeugtemperatur	t=10min T=163-165°C T=153-157°C	Zeitmessung an Anlage Temperatursensoren im Aufschmelzbehälter/ Werkzeug	Qualitätskontrolle am Bauteil notwendig --> DSC?		
		Druckprobleme an Anlage aufgrund von Undichtigkeiten	Undichtigkeiten am Werkzeug	Schlechte Infiltration des Bauteils	Regelmäßige Wartung der Anlage Regelmäßiger Austausch der Dichtung	Druck	p= 10bar	Drucksensoren im Werkzeug			
		Kaltstellen im Prozess	-Heizkanäle nicht richtig ausgelegt - zu geringe Vorheizzeit	Polymerisationsprobleme	-Korrekte Auslegung des Werkzeugs -Vorheizzeiten einhalten	Werkzeugtemperatur	T=153-157°C	Temperatursensoren im Werkzeug			
[2.5] RTM- Werkzeug öffnen											
2.5.1.1 Mitarbeiter: RTM-Anlage	Werkzeug öffnen	Falsches Öffnen des Werkzeugs	Beschädigung des Bauteils beim öffnen des Werkzeugs	Mechanische Beschädigung des Bauteils	-Schulung der Mitarbeiter -Arbeitsanweisung						
		Anschlüsse nicht entfernt	Unkonzentriertes Arbeiten	Beschädigung des Werkzeugs/ der RTM-Anlage	-regelmäßige Pausen						
		Abdrücker falsch eingesetzt	Beschädigung des Bauteils/ des Werkzeugs beim Entformen	-Beschädigungen am Bauteil -Beschädigungen am RTM-Werkzeug	-Schulung der Mitarbeiter -Arbeitsanweisung	Kraftmessung	F=min. - max. ?				
		Beschädigung des Werkzeugs	Beschädigungen Am Werkzeug durch falsche Hilfsmittel	-Beschädigungen am Bauteil -Beschädigungen am RTM-Werkzeug	-Schulung der Mitarbeiter -Arbeitsanweisung						
2.5.1.2 Maschine: RTM-Anlage	Werkzeug öffnen	Verklemmen des Werkzeugs	-Hinterschnitte durch Konstruktionsfehler -Klemmende Bestandteile durch beschädigte Form -Verzug	-Beschädigungen am Bauteil -Beschädigungen am RTM-Werkzeug	-Korrekte Auslegung des Werkzeugs -regelmäßige Wartung des Werkzeugs -Verwendung der richtigen Hilfsmittel						
		Öffnen nicht möglich (zu hohe Entformungskräfte)	- schlechtes Eintrennen der Form -Hinterschnitte durch vorherige Beschädigungen	-Beschädigungen am Bauteil -Beschädigungen am RTM-Werkzeug	-Korrekte Auslegung des Werkzeugs -regelmäßige Wartung des Werkzeugs -Verwendung der richtigen Hilfsmittel	Schließkraft/ Öffnungskraft	F=min. - max. ?	Kraftmessung beim Schließen des Werkzeugs			
[2.6] Entformung											
2.6.1 Mitarbeiter: RTM-Anlage	Entformung	Entformung nicht möglich aufgrund von Verzug	Verrutschen von Fasern und dadurch Verzug im Bauteil	-Beschädigungen am Bauteil -Beschädigungen am RTM-Werkzeug	- Vorsichtiges Einlegen der Preforms						
		zu starkes Anhaften des Bauteils an die Form	Schlechtes Eintrennen der Form	-Beschädigungen am Bauteil -Beschädigungen am RTM-Werkzeug	-Sauberes Eintrennen der RTM-Form -Verwendung des korrekten Trennmittels						
		Bauteil hat sich auf der Form verklemmt	-Hinterschnitte durch Konstruktionsfehler -Klemmende Bestandteile durch beschädigte Form -Verzug	-Beschädigungen am Bauteil -Beschädigungen am RTM-Werkzeug	-Korrekte Auslegung des Werkzeugs -regelmäßige Wartung des Werkzeugs -Verwendung der richtigen Hilfsmittel						
		Beschädigung des Bauteils durch Verkanten	- Falsche Vorgehensweise beim Entformen	-Beschädigungen am Bauteil -Beschädigungen am RTM-Werkzeug	- Arbeitsanweisung						
2.6.2 Mitarbeiter: RTM-Anlage	Reinigung	Beschädigung des Werkzeugs beim Reinigen	- Verwendung falsche Hilfsmittel	Beschädigungen der RTM-Form	- Arbeitsanweisung						
		Unsaubere Reinigung	- Verwendung falsche Hilfsmittel -unsaubere Vorgehensweise	Verschmutzungen im folgenden Bauteil	- Arbeitsanweisung -regelmäßiger Austausch der Hilfsmittel						
		Falsche Reinigung	- Verwendung falsche Hilfsmittel	- Beschädigungen der Form -Verschmutzungen im folgenden Bauteil	- Arbeitsanweisung						
[P3] Nachbearbeitung+ Montage											

hab		FMEA	Version	Teil-Name						
handtmann		Prototypen Prozess FMEA Elteka		Wasserstofftank						
Industrie 4.0										
M	Funktion	Fehlfunktion	Fehlerursache	Fehlerfolge	Maßnahme	Prozessparameter	Parameter Grenzen	Messmethodik	Prozessnachgeschaltete Qualitätskontrolle	Industrie 4.0
[3.1] Nachbearbeitung										
3.1.1 Mitarbeiter: mech. Fertigung	Tank gemäß Zeichnung ... fertig bearbeiten	Falsches Maschinenrüsten	-unsauberes Arbeiten -fehlende Dokumentation - falsche/ schlechte/ fehlende Vorrichtungen an Maschine	Falsche Bearbeitung des Tanks	- Erstellung einer Arbeitsanweisung - Verwendung von speziell angepassten Vorrichtungen für die Bearbeitung des Rohrs	Für 3.1: Beachtung der Parameter/ Vorgaben der mech. Bearbeitung -> sollte klar sein, wird somit hier nicht betrachtet				
		Bearbeitung nach falscher Zeichnung	-Schlechte Dokumentation	Falsche Bearbeitung des Tanks	- Erstellung einer Arbeitsanweisung					
		Beschädigungen am Tank	-zu grobe Vorgehensweise -unvorsichtige Vorgehensweise	Beschädigungen am Tank	- Sensibilisierung der Mitarbeiter					
3.1.2 Maschine: Drehbank	Tank gemäß Zeichnung ... fertig bearbeiten	Falsche Maschineneinstellungen	- Falsche Programmierung der Bauteile - Programmfehler	Falsche Bearbeitung des Tanks.	-Kontrolle Programm über Einstellteile -Hinterlegung des richtigen Programms in einer Arbeitsanweisung					
		Falsche Kalibrierung der Anlage	-Fehlende Kalibrierung der Anlage - Zu seltene Kalibrierung der Anlage	Ungenauigkeiten bei der Bearbeitung, dadurch Toleranzprobleme	Regelmäßige Kalibrierungsintervalle, die eingehalten werden müssen					
		Falsche Wartung der Anlage	- Fehlende Wartung der Anlage -Zu seltene Wartung der Anlage	Ausfall der Anlage und somit Produktionsengpass	Regelmäßige Wartungsintervalle, die eingehalten werden müssen					
3.1.3 Mitarbeiter: QS	Kontrolle der richtigen Abmessungen laut Zeichnungen	Verwendung der falschen Messmittel	-Falsche Vorgaben zum Vermessen des Tanks -Unkonzentriertes Arbeiten	Falsche Maße des Tanks	-Erstellung einer Arbeitsanweisung -Regelmäßige Pausen					
		Abgleich mit falschen Zeichnungen	-Schlechte Dokumentation	Falsche Maße des Tanks	- Erstellung einer Arbeitsanweisung					
3.1.4 Maschine: Messmittel QS	Vermessung des Tanks	Fehlende Kalibrierung der Messmittel	-Fehlende Kalibrierung der Anlage - Zu seltene Kalibrierung der Anlage	Falsche Abmessungen des Tanks	Regelmäßige Kalibrierungsintervalle, die eingehalten werden müssen					
		Defekte Messmittel	-Verwendung defekter Messmittel - Beschädigung der Messmittel während der Messung	Falsche Abmessungen des Tanks	-Verwendung von kalibrierten Messmitteln -Sauberes Vorgehen nach Arbeitsanweisung					
[3.2] Montage OTV (+Endplug)										
3.2.1 Mitarbeiter: Montage	Montage OTV nach Vorgaben des Herstellers	Verwendung falsche Werkzeuge	Falsche Montage des OTVs	Undichtigkeiten am Tank	-Erstellung einer Arbeitsanweisung -Zu verfügung stellen der korrekten Werkzeuge/ Hilfsmittel				Regelmäßige Qualitätskontrolle der Bauteile (Bsp.: Ultraschallprüfung)	Online-Wartung der Tanks
		Beschädigung der Dichtungen	Unvorsichtige Montage des OTVs	Undichtigkeiten am Tank	- Erstellung einer Arbeitsanweisung -Schulung der Mitarbeiter					
		Verwendung falsches Drehmoment beim Anziehen	Falsche Montage des OTVs	Undichtigkeiten am Tank	- Erstellung einer Arbeitsanweisung -Schulung der Mitarbeiter	Drehmoment	Mmax= ?	Drehmomentschlüssel		
		Falsche Vorgehensweise	Falsche Montage des OTVs	Undichtigkeiten am Tank	- Erstellung einer Arbeitsanweisung -Schulung der Mitarbeiter					
3.2.2 Mitarbeiter: Montage	Montage Endplug nach Vorgaben des Herstellers	Verwendung falsche Werkzeuge	Falsche Montage des Endplugs	Undichtigkeiten am Tank	-Erstellung einer Arbeitsanweisung -Zu verfügung stellen der korrekten Werkzeuge/ Hilfsmittel					
		Beschädigung der Dichtungen	Unvorsichtige Montage des Endplugs	Undichtigkeiten am Tank	- Erstellung einer Arbeitsanweisung -Schulung der Mitarbeiter					
		Verwendung falsches Drehmoment beim Anziehen	Falsche Montage des Endplugs	Undichtigkeiten am Tank	- Erstellung einer Arbeitsanweisung -Schulung der Mitarbeiter	Drehmoment	Mmax= ?	Drehmomentschlüssel		
		Falsche Vorgehensweise	Falsche Montage des Endplugs	Undichtigkeiten am Tank	- Erstellung einer Arbeitsanweisung -Schulung der Mitarbeiter					
3.2.3 Maschine: Montage- vorrichtung	Montage der Anbauteile an den Tank	Vorrichtung falsch ausgerichtet	- Inkorrekte Ausrichtung des Tanks	Bosse/ Endplugs können nicht montiert werdenoder sind falsch zueinander ausgerichtet	- Verwendung korrekte Vorrichtung				Hydro Test? Hellum Fill & Leak Test? -> laut DOE müssen beide Versuche nach Endmontage durchgeführt werden	
		Beschädigung des Tanks durch Vorrichtung	-Scharfe Kanten an Vorrichtung -Störteile an Vorrichtung	Beschädigungen am Tank	- Vermeidung von unnötigen Kanten und Teilen an der Vorrichtung					
3.2.4 Mitarbeiter: Lager	Lagerung des Tanks	Schlechte Verpackung des Tanks	Inkorrekte Verpackung des Tanks	Beschädigungen am Tank	Vorgaben für Verpackung des Tanks erstellen					
		Falsche Lagerung des Tanks	Falsche Lagerungsbedingungen	Alterung des Tanks	Zu Verfügung stellen der richtigen Räumlichkeiten zur Lagerung der Tanks					