

Abschlussbericht

Im Rahmen der Ausschreibung Zukunftsprogramm
Wasserstoff BW (ZPH2)

Förderbaustein 5: Umsetzbarkeitsprüfung

H2MaTe – Machbarkeitsstudie einer Anlagentechnik zur Fertigung von Wasserstoff-Druckspeichern

von

Jan Wolf, Daniel Bross, Simon Bazlen

TBT Tiefbohrtechnik GmbH + Co

Förderkennzeichen: BWZPH2 22101

Laufzeit: 01.03.2022 - 30.09.2022

Die Arbeiten dieses Projekts wurden mit Mitteln
des Landes Baden-Württemberg durchgeführt.

Oktober 2022



Baden-Württemberg

MINISTERIUM FÜR UMWELT, KLIMA UND ENERGIEWIRTSCHAFT

Inhalt

1	Zielsetzung der Umsetzbarkeitsprüfung	3
2	Stand der Wissenschaft/Technik.....	5
2.1	Wickelverfahren.....	5
2.2	Kostenanalyse Wasserstoff-Druckspeicher	5
2.3	Anlagenkosten Wickel-Verfahren	6
3	Vorgehensweise zur Lösungsfindung	7
4	Kurze Zusammenfassung der durchgeführten Arbeiten.....	9
4.1	Konzeptentwicklung der Anlagentechnik.....	9
4.2	Kostenkalkulation der Anlagentechnik.....	9
4.3	Analyse Verbund-Tank.....	10
5	Wesentliche Erkenntnisse bzw. Ergebnisse.....	12
6	Projektansatz aus der Umsetzbarkeitsprüfung (Ausblick/Verwertung).....	13
	Literaturverzeichnis	14

1 Zielsetzung der Umsetzbarkeitsprüfung

„Der Klimawandel ist für uns immer deutlicher zu spüren: In den Gebirgsketten schmelzen die Gletscher, in der Arktis und Antarktis die Eisflächen. Der Meeresspiegel steigt langsam, Starkregen und Dürren treten immer häufiger auf und die Luftqualität verschlechtert sich zunehmend. Die Auswirkungen des Klimawandels sind verheerend.“ (Toyota, 2022)

Um den Klimawandel aufzuhalten, sieht der European Green Deal der Europäischen Kommission vor, dass die EU bis 2050 klimaneutral wird. Bereits in den nächsten zehn Jahren möchte Deutschland seinen Ausstoß an Treibhausgasen radikal senken. Das kann nur klappen, wenn die Energiewende auf alle Wirtschaftsbereiche ausgedehnt und sämtliche fossilen Energieträger nach und nach ersetzt werden - zum Beispiel durch „grünen Wasserstoff.“ (Stahr, 2022)

Der Verkehrssektor ist nach der Energiewirtschaft und der Industrie mit rund 20 Prozent CO₂-Ausstoß der drittgrößte Verursacher von Treibhausgasemissionen. Den weitaus größten Teil der Verkehrsemissionen verursacht der Straßenverkehr (96 Prozent, Stand 2019). Um die Klimaziele erreichen zu können, muss der Anteil der Fahrzeuge mit alternativen Antrieben deutlich zunehmen.

Neben batterieelektrischen Fahrzeugen können Wasserstofffahrzeuge eine entscheidende Rolle in der Transformation spielen. Ein Vorteil von Wasserstoff ist, dass er international über weite Distanzen gehandelt werden kann, per Schiff oder Pipeline. Damit kann Solar- oder Windstrom aus Südamerika, von der arabischen Halbinsel oder aus Nordafrika zur Herstellung von Wasserstoff genutzt werden. (Eckert, 2021)

Für den Einsatz von Wasserstoff im Mobilitätssektor sind Speichertanks essentiell. Derzeit verbreitet ist dabei die Speicherung von gasförmigem Wasserstoff bei 350 bar (LKW, Busse, Züge) oder 700 bar (PKW, teilweise LKW).

Den Aufbau eines solchen Wasserstoffdruckspeichers zeigt Abbildung 1. Aufgrund der hohen Belastung werden die Tanks aus Carbon-Fasern auf einem metallischen (Typ 3) oder Kunststoffliner (Typ 4) gefertigt. Dabei wird die Faser um den Grundkörper gewickelt. Da sich bei diesem Fertigungsverfahren die Pfade nicht unterbrechen lassen, bestimmt der Teil des Tanks mit der höchsten Belastung die Wandstärke des Gesamttanks. In der Folge kommt es zu nicht effizientem Fasereinsatz, der wiederum zu hohen Kosten führt.

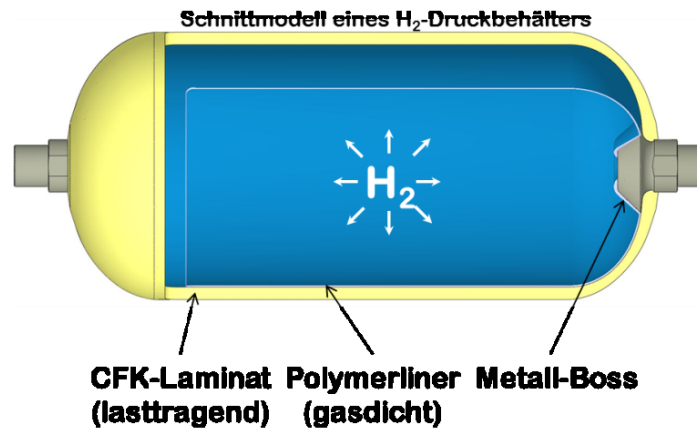


Abbildung 1: Schnittmodell eines Wasserstoff-Druckbehälters aus faserverstärktem Kunststoff mit Kunststoffliner. (Fraunhofer, 2019)

Ein innovativer Ansatz ist die Verwendung von Preforms, bei denen die Fasern dort eingesetzt werden, wo die Belastung am größten ist. In diesem Projekt soll untersucht werden, welche Anlagentechnik benötigt wird, um Wasserstoffdruckspeicher aus Preforms automatisiert herzustellen. Zusätzlich soll abgeschätzt werden, ob und welche wirtschaftlichen Vorteile das alternative Konzept gegenüber dem Stand der Technik bietet.

2 Stand der Wissenschaft/Technik

2.1 Wickelverfahren

Die Herstellung der faserverstärkten Druckbehälter findet bisher im Wickelverfahren statt. Das Verfahren zur Herstellung rotationssymmetrischer faserverstärkter Bauteile ist bereits seit 1961 am Markt erhältlich. In den letzten Jahren wurde vor allem die Entwicklung mehrspindiger Wickelanlagen mit automatisierter Werkstück-Wechselfunktion für die Großserien-Fertigung weiter vorangetrieben.

Das Wickelverfahren lässt sich in die beiden werkstoffabhängigen Kategorien Duroplast- und Thermoplastwickeln unterteilen. Für die Druckbehälterfertigung spielt das Thermoplastwickeln aufgrund des kostenintensiveren Prozesses bislang nur eine untergeordnete Rolle. (Neitzel, 2014)

Das Duroplastwickeln kann grundsätzlich auf drei Arten erfolgen. Am weitesten verbreitet ist das Nasswickelverfahren, bei dem die Benetzung der Fasern mit Harz während des Wickelprozesses erfolgt. Dem gegenüber steht das Wickeln mit vorimprägnierten Fasersträngen, den Towpregs. Das Verfahren bietet Vorteile in der Prozesssicherheit und der Prozessdauer. Allerdings ist das Verfahren verglichen mit dem Nasswickeln aufgrund der deutlich höheren Preise der Towpregs derzeit noch nicht wirtschaftlich. Eine weitere Alternative ist das trockene Faserwickeln, bei welchem ein Harzinjektionsverfahren dem Wickeln nachgestellt wird. (Chemie.de, 2022)

2.2 Kostenanalyse Wasserstoff-Druckspeicher

Die amerikanische Energiebehörde DOE, vertreten durch das Fuel Cell Technologies Office (FTCO), hat 2016 die Analyse der Kosten von Wasserstoff-Druckspeichersystemen in Auftrag gegeben. Unter der Leitung der Strategic Analysis Inc. wurde bis zum Jahr 2021 eine umfangreiche Marktanalyse durchgeführt. Die Daten dienen als Grundlage der nachfolgenden Untersuchungen.

Die Daten des DOE stützen sich auf der Analyse eines Tanks von Toyota mit einer Kapazität von 5,6 kg Wasserstoff bei einem Druck von 700 bar.

Um beliebige Tank-Größen und -Geometrien bewerten zu können, wird aus den gegebenen Daten ein Berechnungsmodell abgeleitet. Aufgrund der von der Geometrie abhängigen Massenverhältnisse des Faserverbundwerkstoffs in Bezug zur Speicherkapazität des Tanks können die Kosten nicht linear skaliert werden.

Tabelle 1 vergleicht die Kosten zur Fertigung des 5,6kg Tanks mit einer einspindigen und einer vollautomatisierten mehrspindigen Wickelanlage. Als Berechnungsgrundlage wird eine Produktionsrate von 62.500 Stück pro Jahr festgelegt. Diese basiert auf der Annahme von 250 Stück pro Produktionstag.

	5,6kg 700bar 1-spindlig manuell		5,6kg 700bar 11x 5-spindlig automatisiert	
Carbon-Fasern	1738,20€	78,14%	1738,20€	81,51%
Harz	76,94€	3,46%	76,94€	3,61%
Prozesskosten	155,36€	6,98%	63,46€	2,98%
Liner	74,66€	3,36%	74,66€	3,50%
Sonstiges*	179,18€	8,06%	179,18€	8,40%
Kosten pro Tank	2224,34€		2132,44€	
Kosten Tank pro kg H2	397,20€		380,79€	
Kosten Tank pro kWh	11,92€		11,42€	

Tabelle 1: Fertigungskosten Wickeln; *Sonstiges: Boss, Prozess-Kosten Aushärten im Ofen, Prüfverfahren

Die Prozesskosten für das Wickeln betragen ca. 7% der Gesamtkosten, wohingegen die Materialkosten des Faserverbundwerkstoffes ca. 78% der Kosten ausmachen.

Durch Einsatz der automatisierten, mehrspindligen Wickelanlage ergibt sich eine Kostenreduktion bzgl. der Prozesskosten. Durch den deutlich geringeren Maschinenstundensatz verringern sich diese auf ca. 3%, wodurch die Materialkosten mit ca. 82% eine noch stärkere Gewichtung erhalten.

Entsprechend können die Optimierungspotentiale identifiziert werden. Obwohl die Zykluszeiten des Wickelverfahrens sehr hoch sind, ist deren Einfluss auf die Fertigungskosten eines Tanks nur gering. Das weit größere Potential besteht in der Reduzierung der Materialkosten und somit in einem verringerten Fasereinsatz.

2.3 Anlagenkosten Wickel-Verfahren

Die in dem Bericht des DOE zugrundeliegende Wickelmaschine ist nicht näher beschrieben. Die Daten lassen jedoch Rückschlüsse auf eine einspindlige Flachbett-Wickelanlage zu. Als Anschaffungssumme der Maschine wird 309.000 € genannt.

Für die Fertigung der geforderten Stückzahlen von ca. 62.500 Stück pro Jahr wird eine Fertigungsanlage mit 53 Spindeln benötigt. Es wird eine Anlage bestehend aus 11 5-spindligen Maschinen mit einer Vollautomatisierung zu Grunde gelegt.

3 Vorgehensweise zur Lösungsfindung

Das Land Baden-Württemberg, vertreten durch das Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft und durch den Projektträger Karlsruhe (PTKA), fördert die Untersuchung eines innovativen Ansatzes zur Herstellung von Wasserstoff-Druckspeichern mit Preforms. Grundgedanke ist ein belastungsgerechter Fasereinsatz und somit eine Kostenreduzierung aufgrund der Materialeinsparung.

Unter einer Preform oder einem textilen Vorformling versteht man eine noch nicht imprägnierte Faserstruktur, die bereits mit dem gewünschten Faseranteil des Bauteils in die vorgegebene Orientierung gebracht und fixiert wurde. Diese wird anschließend in einem Verarbeitungsverfahren mit einer Harz-Matrix imprägniert und somit in ein konsolidiertes FKV-Bauteil überführt.

Generell können zwei Wege zur Herstellung von Preforms unterschieden werden. Während 3D-Textiltechniken auch zur direkten Preform-Herstellung eingesetzt werden können, basiert der Einsatz der Binder- oder der Nähtechnik immer auf einem Vorprodukt, in der Regel 2D-Textilien, siehe Abbildung 2. Das Binder- bzw. die Nähverfahren werden dabei als Verarbeitungsschritte definiert, die jeweils auf verschiedene Halbzeuge aufbauen.

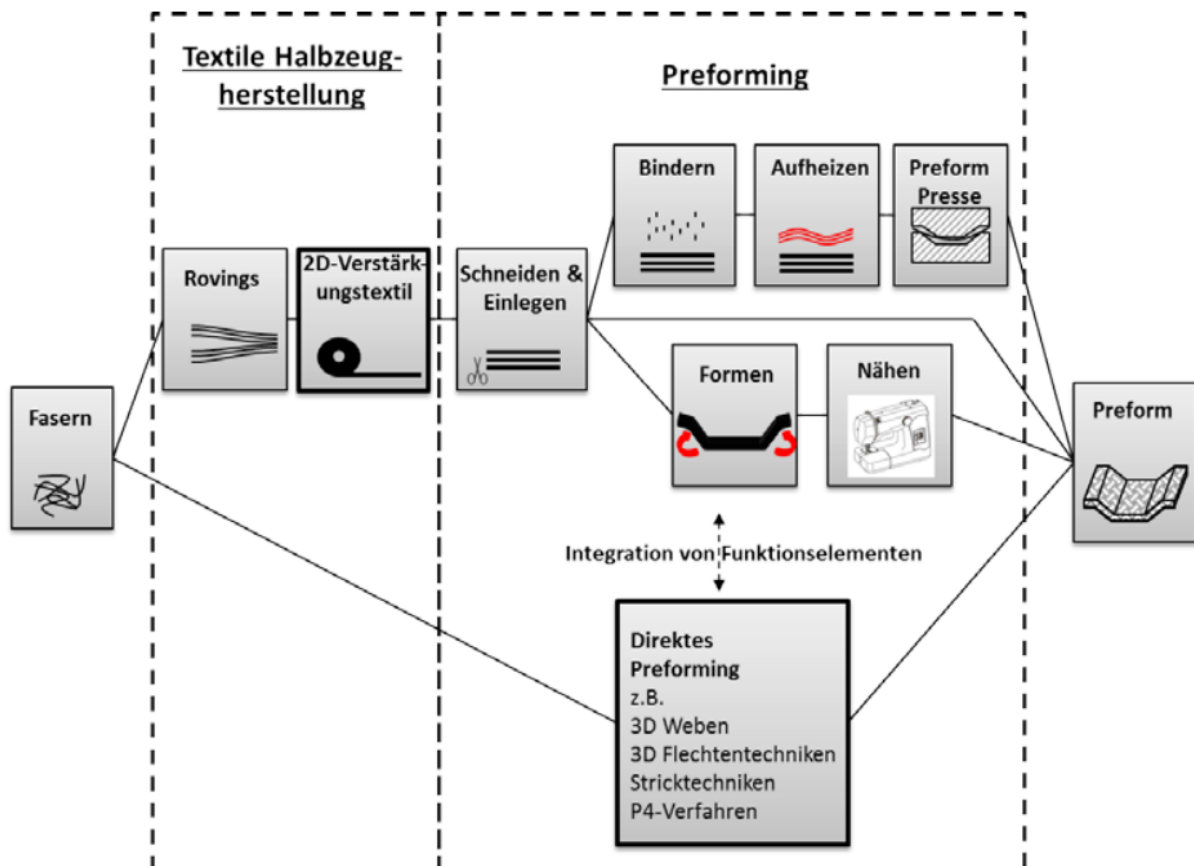


Abbildung 2: Prozess-Kette zur Preform-Herstellung (Neitzel, 2014)

Ein gängiges Verfahren zum Imprägnieren der Matrix ist das Resin Transfer Moulding (RTM). Nach dem Beschicken, d.h. Einlegen der Preform in die Kavität des Werkzeugs, wird dieses geschlossen und das Reaktionsgemisch aus Harz, Härter und eventuell einem zusätzlichen Katalysator unter Druck in die Kavität injiziert. Die Verstärkungsstruktur wird durch das Gemisch imprägniert, welches anschließend meist unter erhöhter Temperatur aushärtet. (Neitzel, 2014)

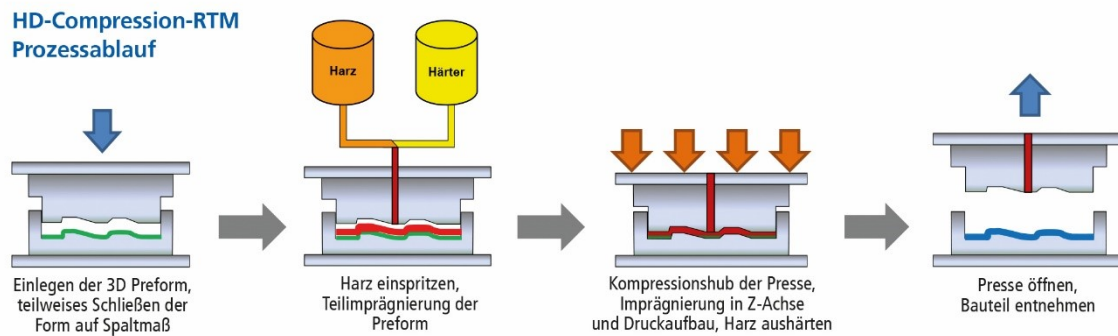


Abbildung 3: RTM-Prozess (Plastverarbeiter, 2015)

In Zusammenarbeit der Firmen ACE Advanced Composite Engineering GmbH, TBT Tiefbohrtechnik GmbH + Co, KIT Campus Transfer GmbH und STG Intec Consulting soll ein entsprechender Ansatz ausgearbeitet werden.

4 Kurze Zusammenfassung der durchgeführten Arbeiten

4.1 Konzeptentwicklung der Anlagentechnik

Zentraler Bestandteil der Fertigungsanlage ist die Einheit zur Herstellung der Preforms. Diese Technologie ist am Markt nicht erhältlich und bildet deshalb den Entwicklungsschwerpunkt dieses Projektes.

Der Preforming-Prozess kann in die beiden Fertigungsverfahren zur Herstellung des zylindrischen Bereichs sowie der Pole untergliedert werden. Bei der Konzeptionierung und Entwicklung steht die Anpassbarkeit an unterschiedliche geometrische Abmessungen der Druckbehälter im Fokus.

Die Anlage besteht aus Preforming- und RTM-Einheiten. Hinzu kommen Materiallager, Materialhandling sowie Material-Bereitstellung und Zwischenspeicher der Liner, Preforms und fertigen Tanks. Das Handling wird durch Roboter mit jeweiliger Greifertechnik realisiert.

Die Anzahl der einzelnen Anlagenkomponenten kann anhand der Taktzeitberechnung festgelegt werden. Für die zugrunde gelegte Stückzahl von 62.500 pro Jahr ergeben sich 13 Preform- und 8 RTM-Einheiten.

4.2 Kostenkalkulation der Anlagentechnik

Der Kostenkalkulation liegen die Daten der automatisierten Wickelanlage, abgeleitet aus der Analyse des DOE, sowie dem erarbeiteten Konzept der Fertigungs-Anlage mit Preforms zugrunde.

Die Prozesskosten sind die relevante Zielgröße für die Bewertung der Produktionsanlage. Für einen Vergleich müssen die sich durch das Preform-Verfahren ergebenden Materialeinsparungen ebenfalls berücksichtigt werden.

Die reinen Prozesskosten des Preform-Verfahrens ohne Berücksichtigung der Materialersparnis liegen aufgrund der komplexeren Maschinenteknik deutlich über denen des Wickelns. Werden diese jedoch mitberücksichtigt, zeigt sich, dass das Preform-Verfahren ab einer jährlichen Produktionsrate von ca. 5.000 Stück das wirtschaftlichere Verfahren ist. Die Reduktion der Produktionskosten bei einer Produktionsrate von 62.500 Stück pro Jahr liegt bei ca. 7%.

Ein weiterer entscheidender Vorteil des Fertigungsprozesses im Preform- und RTM-Verfahren ist die höhere Prozesssicherheit. Durch die präzise Herstellung der Preforms und die kontrollierte Infiltration im geschlossenen RTM-Verfahren kann ggf. der benötigte Sicherheitsfaktor der Tanks reduziert werden. Das realistische Einsparpotential wird bei einer max. Fasereinsparung von 20% und somit einer Kostenreduktion von ca. 12% vermutet (im Folgenden als „real.“ bezeichnet).

Diese These muss in einem Folgeprojekt durch Ermittlung der Korrekturfaktoren zur Berechnung von dicken Laminaten und unter Berücksichtigung der aktuellsten normativen Anforderungen an Wasserstoffdruckspeicher ermittelt werden. Eine geringere Ausschussrate und reduzierte Ondulationseffekte können zu weiteren Einsparungen führen.

Das enorme Potential zeigt sich in der Gesamtbetrachtung der Produktionskosten-Reduktion in Bezug auf die jährliche Produktionsrate, siehe Abbildung 4. Bei einer Produktionsrate von 62.500 Tanks pro Jahr ergibt sich beispielsweise bereits eine Einsparung von min. 9,1 Mio. €.

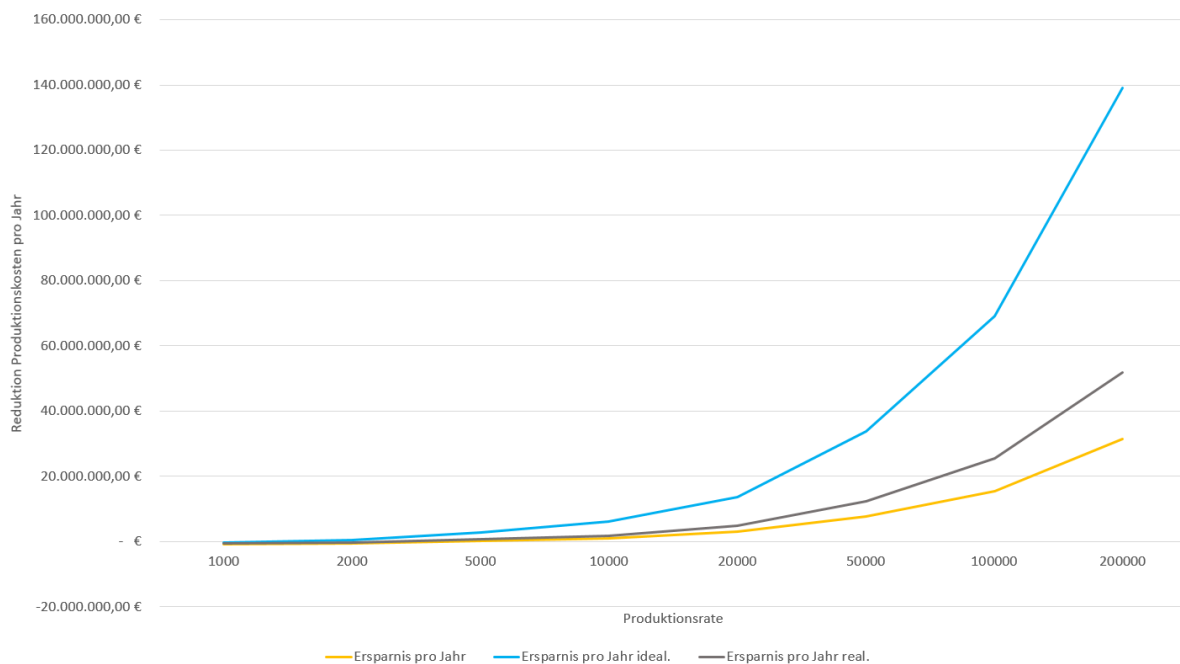


Abbildung 4: Produktionskosten-Reduktion pro Jahr

Dem gegenüber stehen die deutlich höheren Anlagenkosten einer Preform- und RTM-Anlage. Die jeweilige Anlage amortisiert sich trotz der hohen Anschaffungskosten bereits nach max. 4 Jahren.

4.3 Analyse Verbund-Tank

Im Laufe des Projektes wurden neben dem Einzeltank auch Verbund-Tanks betrachtet. Hiermit lassen sich Tank-Konzepte abbilden, die nur bei kleinen Tankdurchmessern umgesetzt werden können. Im Folgenden sollen Verbund-Systeme aus drei und neun Tanks analysiert und mit dem Einzeltank-System verglichen werden.

Die Stückzahlen der kleineren Tanks erhöhen sich entsprechend der verminderten Tankkapazität, sodass die Systemkapazität konstant ist. Da sich die benötigte Fertigungsdauer nicht im selben Maß reduziert, wie die benötigte Produktionsrate

Förderkennzeichen: H2MaTe

steigt, ist eine Anlage mit einer höheren Anzahl an Fertigungseinheiten notwendig. Dies erhöht die Anlagenkosten und führt somit zu höheren Prozesskosten. Die Anzahl der RTM-Anlagen wird durch Mehrkavitäts-Werkzeuge möglichst gering gehalten.

Anlagenkosten	Einzel-Tank 1x 5,6kg	Verbund-Tank 3x 1,87kg	Verbund-Tank 9x 0,62kg
Anzahl Preform-Einheiten	9	18	20
Anzahl RTM-Einheiten	6 (1 Kav.)	5 (2 Kav.)	6 (3 Kav.)
Prozesskosten	-	+69%	+88%

Tabelle 2: Prozesskosten Verbund-Tank

Hinzu kommt das höhere Gewicht eines Verbund-Tanksystems. Hierzu führen sowohl die zusätzlichen Ventil- und Verrohrungskomponenten, sowie das höhere Gewicht der Verbund-Tanks im Vergleich zu einem einzelnen Tank. Das Mehrgewicht resultiert vor allem aus den Linern und Bossen und kann bis zu 30% betragen.

5 Wesentliche Erkenntnisse bzw. Ergebnisse

Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurde aufgezeigt, dass der alternative Fertigungsansatz mit Preforms sowohl ökologische wie auch ökonomische Vorteile gegenüber dem als Stand der Technik verwendeten Wickelverfahren bieten kann.

Das Wickelverfahren gilt als langjährig erforschte und am Markt etablierte Technik zur Fertigung rotationssymmetrischer Bauteile, u.a. von Druckspeichern. Entsprechend gering sind die Weiterentwicklungspotentiale der Technologie. Die Kostenanalyse der gewickelten Tanks liefert die Erkenntnis, dass die Prozesskosten trotz der hohen Prozesszeiten einen sehr geringen Anteil an den Produktionskosten eines Tanks ausmachen. Den entscheidenden Einfluss haben die Materialkosten.

Die Fertigung mit Preforms ermöglicht einen effizienteren, an die Belastung angepassten Materialeinsatz. Im Zuge des Projektes konnte eine Faserreduktion von 15% ermittelt werden. Weitere Potentiale bergen die Anpassung des Sicherheitsfaktors an die höhere Prozesssicherheit, geringere Ausschussraten sowie verringerte Ondulationseffekte. Diese können aktuell noch nicht quantifiziert werden und sollen Umfang eines Folgeprojektes sein.

Durch die detaillierte Konzeptionierung der vollautomatisierten Anlagentechnik zur Fertigung der Tanks im Preform-Verfahren konnten die Anlagenkosten und der Maschinenstundensatz bestimmt werden.

Bei einer jährlichen Produktionsrate von 62.500 Stück ergibt sich eine Reduktion der Produktionskosten gegenüber dem Wickelverfahren von 9,1 Mio. € pro Jahr. Dies entspricht einer Reduktion der Kosten eines Tanks von ca. 7%.

Trotz der deutlich höheren Anschaffungskosten der Preform-Anlage gegenüber der Wickelanlage amortisiert sich diese aufgrund der geringeren Prozesskosten in max. vier Jahren.

Eine Untersuchung von Verbund-Tanks zeigt sowohl wirtschaftliche wie auch gravimetrische Nachteile gegenüber einem Einzeltank. Deshalb ist der Ansatz nur interessant, wenn die Einbauvorgaben einen solchen Verbund fordern. Dies kann beispielsweise der Fall sein, wenn die Wasserstoffdruckspeicher in Plattformen von Elektrofahrzeugen eingesetzt werden sollen.

6 Projektansatz aus der Umsetzbarkeitsprüfung (Ausblick/Verwertung)

Während des Forschungsvorhabens konnten neben der analysierten Materialreduktion weitere Ansätze ermittelt werden, welche den Fasereinsatz senken könnten. In einem Folgeprojekt sollen deshalb die weiteren Potentiale sowohl bezüglich der Material- wie auch der Prozesskostenreduktion untersucht werden.

Für die Maximierung der Kostenreduktion ist eine eng verknüpfte Entwicklung des Tanks und der Anlagentechnik ausschlaggebend. Durch die komplexe und kostenintensive Maschinenteknik, welche für das Preform-Verfahren notwendig ist, spielen Taktzeitverkürzungen und damit eine reduzierte Anzahl an Fertigungseinheiten eine entscheidende Rolle.

Für den weiteren Verlauf wird die Entwicklung eines Tank-Systems inkl. Peripherie und einer Produktionsanlage mit Prozessüberwachung sowie die Erstellung einer Life-Cycle-Analyse in einem Folgeprojekt angestrebt. Das entsprechende Konsortium konnte bereits gefunden und eine Antragskizze eingereicht werden.

Die Funktionalität des Anlagenkonzepts soll im Rahmen des Projektes durch einen Demonstrator der Preforming-Einheit nachgewiesen werden. Um neben dem technischen auch den wirtschaftlichen Nachweis erbringen zu können, muss zur Analyse der Taktzeiten bereits beim Demonstrator ein hoher Automatisierungsgrad realisiert werden.

Die Verwertbarkeit sieht kurzfristig zunächst eine Anlage mit einer Produktionsrate von 10.000 Stück pro Jahr für die Kleinserienfertigung vor. Mittelfristiges Ziel ist eine weitere Anlage mit einer Produktionsrate von 100.000 Stück für einen Großserienkunden. Langfristig ist aufgrund der prognostizierten Nachfrage nach Wasserstofflösungen im Mobilitätsbereich und somit auch nach entsprechenden Wasserstoffdruckspeichern mit mindestens einer solchen Produktionsanlage pro Jahr zu rechnen.

Literaturverzeichnis

- Chemie.de.* (2022). Von <https://www.chemie.de/lexikon/Faserverbundwerkstoff.html> abgerufen
- Eckert, W. (23. Februar 2021). *Tagesschau.* Von <https://www.tagesschau.de/wirtschaft/technologie/elektro-wasserstoff-technologie-101.html> abgerufen
- Fraunhofer.* (17. April 2019). Von <https://www.imws.fraunhofer.de/de/presse/pressemitteilungen/wasserstoff-hochdrucktank-1000bar-leichtbau.html> abgerufen
- Neitzel, M. (2014). *Handbuch Verbundwerkstoffe.*
- Plastverarbeiter.* (09. Oktober 2015). Von <https://www.plastverarbeiter.de/verarbeitungsverfahren/compression-rtm-ein-effizientes-verfahren.html> abgerufen
- Stahr, J.-U. (2022). *SWR.* Von <https://www.swr.de/swr2/wissen/wasserstoff-als-klimaretter-hoffnungstraeger-der-energiewende-102.html> abgerufen
- Toyota.* (2022). Von <https://www.toyota.de/elektromobilitaet/wasserstoff/brennstoffzellenautos> abgerufen