

ENTWICKLUNG EINES KOHLENSTOFFFASERVERSTÄRKTEN RINGDRUCKBEHÄLTERS ZUR WASSERSTOFFSPEICHERUNG

**N. Schramm^{1*}, M. Neubert¹, M.D. Naumann²,
L. Ulke-Winter², L. Krolß² und S. Nendel³**

¹ *Lightweight Structures Engineering GmbH, D-09117 Chemnitz,*

² *Professur Strukturleichtbau und Kunststoffverarbeitung, TU Chemnitz, D-09126 Chemnitz,*

³ *Cetex Institut gGmbH, D-09120 Chemnitz,*

** Korrespondierender Autor (norbert.schramm@lse-chemnitz.de)*

Druckbehälter aus faserverstärktem Kunststoff mit hoher Energiedichte werden nach dem Stand der Technik überwiegend mit zylindrischem Kern und elliptisch geformten Polkappen hergestellt. Um die Energiedichte weiterhin zu verbessern werden neue Konzepte und Formen für Wasserstoffspeicher gefordert, da sich der gesamte Antriebsstrang und damit der Bauraum von mobilen Energieerzeugern stark verändert. Die Entwicklung neuer Konzepte konzentrierten sich bisher auf die konventionelle Bauweise und weichen nicht von der standardisierten zylindrischen Form ab. Mit dem geschlossenen ringförmigen Druckbehälter aus kohlenstofffaserverstärktem Kunststoff und einer neuen Ringwickeltechnologie gehen die Autoren einen alternativen Weg. Diese Konstruktion bietet ca. 30% Massenreduzierung bei gleichzeitiger Ressourcen- und Kosteneinsparung, da bis zu 70% der Gesamtkosten durch das Kohlenstoffasermaterial für aktuelle Verbunddruckbehälter verursacht werden. Durch die Kombination verschiedener Verfahren wie Spritzgießen, Laserschweißen des thermoplastischen Liners und dem neuartigen Ringwickelverfahren soll ein völlig neues Produkt entstehen, das den maximalen Massenbedarf von 6,5% des Eigengewichts des Speichermediums erfüllt.

KEYWORDS: CFK-Ringdruckbehälter, Ringwickler, Spritzgussliner, Wasserstoffpermeation

1. EINFÜHRUNG

Im Zuge der Mobilitätswende wird die Brennstoffzelle als emissionsfreies und ökologisch ausgewogenes Antriebskonzept zur Lösung der Reichweitenfrage für Elektrofahrzeuge seit einigen Jahren auf internationaler Ebene intensiv diskutiert. Mögliche Speicherlösungen für komprimiertem gasförmigem Wasserstoff (CGH₂) sind ein wesentlicher Bestandteil der Diskussionen. Diese reichen von kryogenischen Speicheranwendungen von Druckbehälter mit einem Speicherdruck von 700 bar bis hin zu höheren Drücken von über 1000 bar bei stationären Anlagen wie Wasserstofftankstellen und zentralen Wasserstoffspeichern. Die Entwicklungen von Druckbehältern des Typs IV bis 700 bar Betriebsdruck, die aus einem kohlenstofffaserverstärkten Polymer (CFK) und einen thermoplastischen Liner (z.B. Polyamid 6) bestehen, zeigen sehr gute Ergebnisse in Bezug auf Dauerfestigkeit, Berstdruck, Wasserstoff-Dichtigkeit, gravimetrische und volumetrische Energiedichte [1-3]. Diese Druckbehälter sind in der konventionellen Geometrie konzipiert, bestehend aus einem zylindrischen Kern und elliptisch geformten Polkappen [4].

Aufgrund umfangreicher Veränderungen im gesamten Antriebsstrang und der daraus resultierenden Veränderungen im Bauraum von Elektrofahrzeugen sind neue Konzepte und Formen für Druckbehälter erforderlich. Mit dem CFK-Ringdruckbehälter

(RDB) und seiner neuartigen Fertigungstechnologie gehen die Autoren einen alternativen Weg mit einem großen Masseneinsparpotenzial (bis zu 30%) und der damit verbundenen ressourcen-schonenden und kostenreduzierten Produktion [5].

Diese Vorteile eines leichten RDB haben ein hohes Potenzial für den Einsatz in weiteren Märkten wie der mobilen Stromversorgung mit Wasserstoff. Abbildung 1 zeigt einen brennstoffzellenbetriebenen mobilen Energieerzeuger der Firma FAE Elektrotechnik GmbH & Co. KG mit 1 kW konstanter elektrischer Leistung. Für die Speicherung von Wasserstoff kann eine schwere Stahlflasche oder eine innovative Hybridflasche, genannt GENIE[®] der Linde AG, verwendet werden. Für die Befüllung leerer Behälter muss sich ein Kunde an ein Miet- oder Nachfüllunternehmen wenden. Eine weitere Möglichkeit besteht darin, die Behälter selbst an einer Wasserstoff-tankstelle nachzufüllen. In beiden Fällen sind Gewicht und Ausführung des Stahlbehälters nicht für den Transport durch eine Person geeignet. Die GENIE[®] mit ihrem optimierten Handling und 32,7 kg Gewicht ist viel leichter, aber das Füllvolumen ist begrenzt. Ein RDB hingegen kann mit einem erhöhten Fülldruck (700 bar) das Fünffache der Wasserstoffmasse bei gleichem Gewicht speichern (vgl. Kapitel 3).



Abbildung 1: links: Brennstoffzellenbetriebener mobiler Energieerzeuger der Firma FAE Elektrotechnik GmbH & Co. KG mit 1 kW und einer Standard-Stahlgasflasche (Füllvolumen 8,9 m³, Fülldruck 200 bar, Gewicht 80 kg), rechts: GENIE[®]-Gasflasche (Füllvolumen 5 m³, Fülldruck 300 bar, Gewicht 32,7 kg) der Linde AG (www.linde-gas.com/genie)

In dieser Veröffentlichung wird die Entwicklung eines RDB mit 700 bar Fülldruck für einen brennstoffzellenbetriebenen mobilen Energieerzeuger mit 5 kW im Rahmen des Förderprojekts "HZwo:FRAME - Tank" vorgestellt. Alle Partner und Forschungsaufgaben sind in Tabelle 1 dargestellt. Das Projekt wurde im Rahmen des Netzwerks HZwo (ww.hzwo.eu) ins Leben gerufen und wird vom 10/2018 bis 09/2021 von der SAB Sächsische Aufbaubank im Freistaat Sachsen gefördert.

Tabelle 1: Partner und ihre Forschungsschwerpunkte des Projekts "HZwo:FRAME - Tank"

Partner	Forschungsschwerpunkt
TU Chemnitz, Professur Strukturleichtbau und Kunststoffverarbeitung	<ul style="list-style-type: none"> • Materialentwicklung und -Charakterisierung • Entwicklung und Gestaltung einer Ringwickelanlage in Kooperation mit dem Cetex Institut gGmbH, Chemnitz
TU Chemnitz, Professur Alternative Fahrzeugantriebe	<ul style="list-style-type: none"> • Strömungssimulation für die H₂-Betankung • H₂-Permeationsprüfung
Albert Polenz GmbH, Großweitzschen	<ul style="list-style-type: none"> • Entwicklung eines Spritzgusswerkzeuges für die Ober- und Unterschale des Kunststoffliners • Integration eines metallischen Inserts in das Spritzgusswerkzeug
LSE GmbH, Chemnitz	<ul style="list-style-type: none"> • Gestaltung, analytische und numerische Simulation eines Ringdruckbehälters • Fügen der beiden Kunststoff-Halbschalen durch Laserschweißen in Kooperation mit dem Fraunhofer Institut für Werkstoff- und Strahltechnik, Dresden • Analyse und Optimierung der Ringwickeltechnologie in Kooperation mit dem Cetex Institut gGmbH, Chemnitz • Herstellung und Prüfung der Ringdruckbehälter
FAE Elektrotechnik GmbH & Co. KG, Heidenau	<ul style="list-style-type: none"> • Definition aller technischen Anforderungen und Spezifikationen • Anpassung, Gestaltung und Herstellung der brennstoffzellenbetriebenen mobilen Energieversorgungseinheit (5 kW) mit dem Ringdruckbehältern

2. MATERIALIEN AND FÜGETECHNOLOGIE

2.1. Materialien

Die folgenden Bauteile eines RDBs sind mit den typischen, dem Stand der Technik entsprechenden Typ-IV-CFK-Behälter vergleichbar: Polymer-Liner mit geringer Wasserstoffpermeation, gewickelte CFK-Struktur zur Kompensation des hohen Innendrucks und einem metallischen Insert zur Befüllung und Entnahme von Wasserstoff. Die Wasserstoffpermeation von Polymeren ist abhängig von Druck und Temperatur [6] und kann in Anlehnung nach DIN 53380-2 gemessen werden [7-8]. Tabelle 2 zeigt ausgewählte Eigenschaften verschiedener analysierter Materialien.

Tabelle 2: Ausgewählte Eigenschaften von analysierten Linermaterialien [7, 9]

Polymer	Dichte in g/cm ³	H ₂ Permeabilität in cm ³ /m ² *d*bar	Preis
PE	0,96	25-55	gering
PP	0,9-1,0	65	gering
PA6	1,14	7	mittel
PVC	1,2-1,4	10	gering
PVDF	1,78	3	sehr hoch

Die Herstellung der Liner erfolgt im Spritzgussverfahren mit einem Halbschalenwerkzeug. Die Anforderungen an das Polymer sind die Erfüllung der Permeationseigenschaften für die Speicherung von Wasserstoff ($< 1 \text{ H}_2 \text{ Ncm}^3/\text{h/L}$ nach EIHP II [6]) sowie die Verwendung für das Spritzgussverfahren. Für weitere Untersuchungen wird PE als kostengünstiges und leichtes Polymer zusammen mit PVDF als High-End-Material zur Wasserstoffspeicherung im Detail analysiert. Trotz seiner guten ausgewogenen Eigenschaften als Linermaterial wird PA6 aufgrund seines hygroskopischen Materialverhaltens nicht weiter berücksichtigt.

Filamentgewickelte Kohlenstofffasern sind zur Verstärkung von Verbunddruckbehältern mit einem Fülldruck von 350 bar bis 700 bar Stand der Technik [1-3, 10]. Typischerweise werden die Fasern vorimprägniert oder anschließend mit Epoxidharz imprägniert, z.B. durch Harztransferpressen (RTM). Ein Vorteil der Behältergestaltung ist die geschlossene Ringgeometrie, die es ermöglicht, alle Fasern so auszurichten, dass sie für den Innendruck-Lastfall vorzugsweise ausgerichtet sind und nur zu einem geringen Anteil die axialen Lasten aufnehmen müssen [5].

Die Kohlenstofffaser Toray T700 hat ein gutes Verhältnis zwischen Zugfestigkeit und Materialkosten. Aus diesem Grund werden viele Druckbehälter aus dieser Faser hergestellt (z.B. in [1]). Speziell für das Filamentwickelverfahren ist die Kohlenstofffaser Tenax UTS50 optimiert und in Bezug auf Festigkeit und Kosten mit der T700 vergleichbar. Mit der sehr hohen Zugfestigkeit der Kohlenstofffaser Tenax IMS65 kann die Wandstärke und somit das Gewicht eines RDB zusätzlich minimiert werden. Die Reduzierung des Faservolumens gleicht jedoch den Anstieg der Herstellungskosten aufgrund höherer Faserpreise nicht aus. Die Zoltek PX35 ist aktuell die günstigsten Kohlenstofffasern auf dem Markt und kann für ein RDB mit geringeren Anforderungen verwendet werden.

Für die geforderte Anwendung des RDBs bei Temperaturen von -40 °C bis $+85 \text{ °C}$ wird ein Standard-Epoxidharzsystem mit 250 mPas Mischviskosität und 210 min. Topfzeit verwendet. Mit der Filamentwickeltechnologie wird ein Faservolumengehalt von ca. 50-60% erreicht, wobei davon ausgegangen wird, dass die Zugfestigkeit des Verbundes durch Faserbrüche während des Wickelprozesses reduziert wird. Daher ist

es für die Bauteilauslegung unerlässlich, die Zugfestigkeit innerhalb der Anwendungstemperaturen an filamentgewickelten Rohrproben zu analysieren, die mit dem ausgewählten Harzsystem und o.g. Kohlenstofffasern hergestellt werden. Abbildung 2 zeigt den dafür genutzten explosionsgeschützten Prüfstand für hydraulische Druckprüfungen mit Rohrproben.

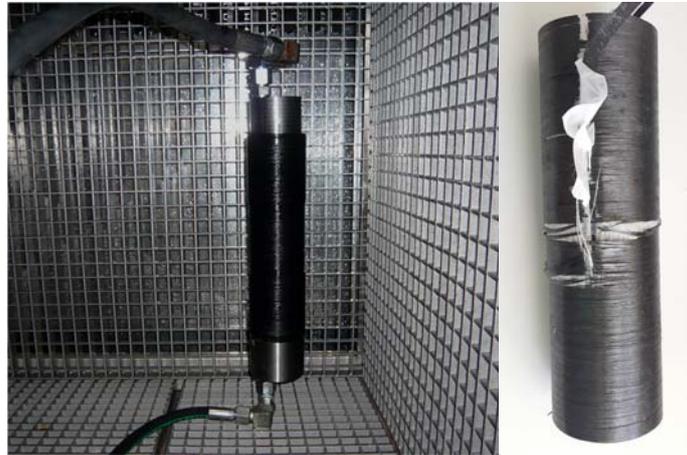


Abbildung 2: links: CFK-Rohrprobe im Innendruckprüfstand der Maximator GmbH an der TU Chemnitz, rechts: geprüfte Rohrprobe mit Faserbruch

2.2. Fügetechnologie

Die Liner-Produktion erfolgt durch Spritzgießen mit zwei Halbschalenwerkzeugen und anschließend durch das Laserfügen der Halbschalen. Das laserabsorbierende Unterteil (z.B. durch Zugabe von 1% Graphit zu Naturpolymer) des Liners wird in der ersten Form und das laserdurchlässige Oberteil des Liners mit dem metallischen Insert in der zweiten Form hergestellt. Beide Teile sind mit einer konischen Verbindungsgeometrie ausgeführt, um eine optimierte Positionierung während des Laserfügeprozesses zu erreichen und eine Axialkraft auf die Fügefläche aufzubringen. Das Laserschweißen mit einem Schweißfaktor bis zu 0,99 kann die guten Permeationseigenschaften des Polymers gegenüber Wasserstoff auch in der Fügezone garantieren.

Mit Unterstützung des Fraunhofer-Instituts für Werkstoff- und Strahltechnik IWS in Dresden werden die Prozesseigenschaften, der Schweißfaktor und die Permeationseigenschaften von Schweißproben der in Tabelle 2 aufgelisteten Polymere analysiert. Für PE wurde ein Clean Laser 50 mit einer Wellenlänge von 1060 nm, einer Schweißgeschwindigkeit von 800 mm/s und einer Laserleistung zwischen 40-80% untersucht. Die geschweißten Proben mit einer Überlappung von 13x25 mm für Zugversuche nach DIN EN 1465 [11] ergeben eine Zugfestigkeit von 7 MPa der laserdurchlässigen (weiß) und laserabsorbierenden (schwarz) Probe im Vergleich zur Zugscherfestigkeit von 2,1-2,2 MPa der geschweißten Proben mit einer Laserleistung zwischen 40-80%. Unter Berücksichtigung der mikroskopischen Analyse können die besten Ergebnisse mit einer Laserleistung von 60% erzielt werden. In den laufenden Untersuchungen werden weitere Werkstoffe und Fügegeometrien untersucht.

3. DESIGN

Anhand der experimentellen Ergebnisse und mit einem selbst programmierten analytischen Auslegungstool [5] wurde ein Projektdemonstrator des RDBs für folgende Anforderungen entwickelt: Der minimale gewickelte Innendurchmesser ist durch die Größe der Kohlenstofffaserspule, die sich um und innerhalb des RDB dreht, auf 400 mm begrenzt, und der Außendurchmesser des Polymerliners ist durch die Größe der Spritzgießwerkzeuge auf maximal 760 mm begrenzt. Die CAD-Konstruktion ist im linken Bild von Abbildung 3 dargestellt. Das rechte Bild zeigt einen ersten Demonstrator für die Filamentwicklung in gleicher Größe, der in zwei Halbschalen im RIM-Verfahren aus Polyurethan (PU) hergestellt und zusätzlich verklebt wurde. Mit diesem Demonstrator kann der analytisch berechnete und tatsächliche Faserwinkel jeder Schicht (vgl. α_1 und α_2 in Abbildung 3) validiert werden. Die Kennzeichnung der Komponenten in Abbildung 6 lautet: 1) CFK (Epoxidharz + Toray T700, Faservolumengehalt ca. 50%), 2) metallischer Befüllinsert, 3) Oberteil des PE-Liners (laserdurchlässig, $t = 4$ mm), 4) H₂-Speichervolumen, 5) Unterteil des PE-Liners (laserabsorbierend, $t = 4$ mm), 6) geklebter PU-Liner des Wickeldemonstrators, α_1) Wickelwinkel von ca. 90°, α_2) Wickelwinkel von ca. $\pm 75^\circ$. Der Projektdemonstrator trägt den Namen "LSE 1,4" aufgrund der Speicherkapazität von 1,4 kg Wasserstoff bei einem Fülldruck von 700 bar. Weitere wesentliche Eigenschaften dieses RDB sind: Bauraum 780x410x185 mm, Füllvolumen 33,4 l, Gewicht inklusive Metalleinsatz ca. 23,2 kg, gemittelte CFK-Wanddicke $t = 13,5$ mm und ein berechneter Berstdruck 1575 bar nach ISO 15869.3.



Abbildung 3: links: CAD-Konstruktion RDB Typ LSE 1.4; rechts: Wicklungsdemonstrator mit PU-Liner

Um CFK-Druckbehälter für Wasserstoffspeichersysteme zu vergleichen, sind Gewicht und maximaler Bauraum für einen gleichen Füll- oder Berstdruck die entscheidenden Merkmale. Darüber hinaus können nationale und internationale technische oder politische Empfehlungen und Ziele herangezogen werden. Für die bordeigene Wasserstoffspeicherung für leichte Brennstoffzellenfahrzeuge wird die von der U.S. DRIVE Partnership im Mai 2017 überarbeitete Zielerklärungsdokumentation berücksichtigt, die eine Partnerschaft zwischen dem U.S. Department of Energy (DOE), dem U.S. Council for Automotive Research (USCAR), Energie- und Versorgungsunternehmen sowie anderen Organisationen ist [12].

Eine der Hauptaussagen in diesem Dokument ist die Darstellung der gravimetrischen Energiedichte des Systems, die sich aus dem Verhältnis zwischen spezifischer Energie und der Nettonutzenergie pro Gesamtmasse des Bordspeichersystems zusammensetzt. Die Einheit ist die Nettonutzenergie in kg H₂ pro maximaler Systemmasse in kg in Prozent. Die "maximale Systemmasse" beinhaltet alles, was für das Speichersystem notwendig ist, sowie die maximale Wasserstoffbeladung. Die Ziele für die gravimetrische Energiedichte des Gesamtsystems liegen in den kommenden Jahren bei 4,5% für 2020, 5,5% für 2025 und 6,5% für ein sogenanntes "Ultimate Full Fleet"-Ziel. Abbildung 4 zeigt die Nettonutzenergie in kg H₂ pro maximaler Systemmasse in kg für den RDB LSE 1,4 (siehe hellgrüner Balken) im Vergleich zu den oben genannten Zielen.

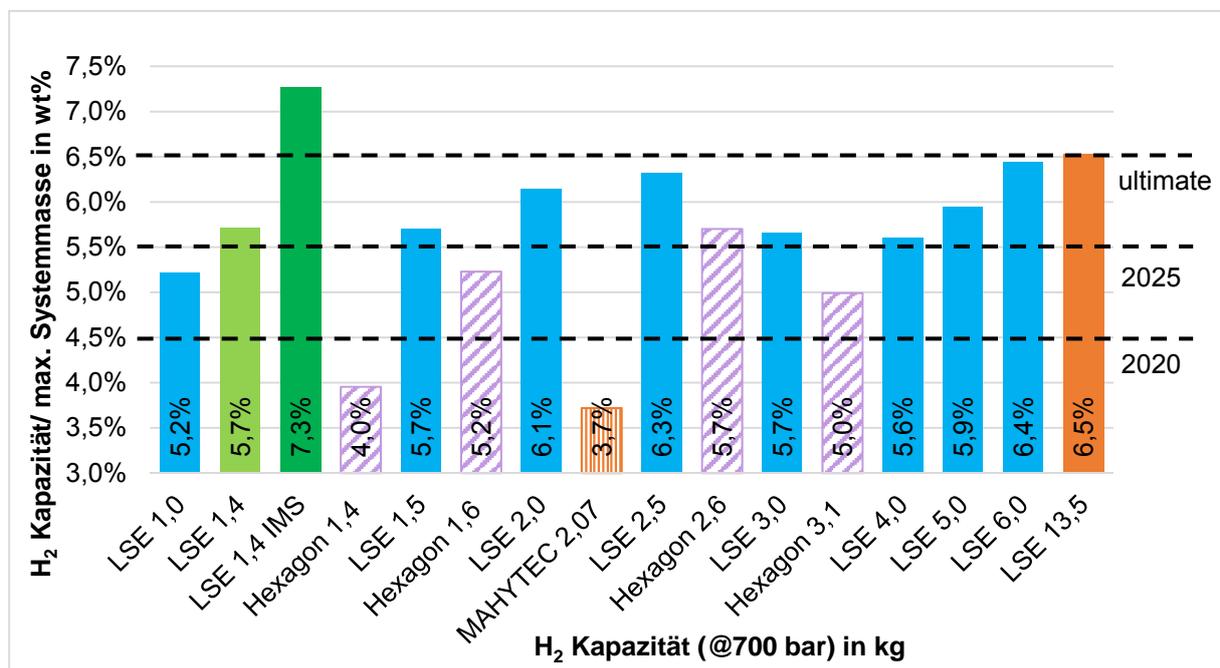


Abbildung 4: Überblick unterschiedlicher CFK-Druckbehälter (H₂, 700 bar)

Ferner wird die Kapazität des RDB Typ LSE 1,4 mit verschiedenen analytisch ausgelegter RDB mit H₂-Kapazitäten von 1,0 bis 13,5 kg für 700 bar Fülldruck mit den zylindrischen marktüblichen CFK-Druckbehältern für 700 bar Fülldruck verglichen, die von den Firmen Hexagon und MAHYTEC angeboten werden [2-3]. Der am höchsten eingestufte Typ LSE 1,4 IMS (siehe dunkelgrüner Balken) hat die gleiche Linergröße wie der Projekt-Demonstrator LSE 1,4 und unterscheidet sich aber durch die Verwendung der hochfesten Kohlenstofffaser Tenax-E IMS65. Damit die Reichweite und somit die Energiemenge vergleichbar mit den derzeitigen Verbrennungsmotoren von PKWs sind, ist ein RDB mit einem Fassungsvermögen von ca. 6 kg geeignet.

4. HERSTELLUNGSTECHNOLOGIE

Es sind keine Ringwickelmaschinen für RDB auf dem Markt erhältlich, aber einige Forschungsansätze mit Prototypen-Maschinen [13-15] und einem US-Patent für die Herstellung von Fahrradradfelgen [16] sind bekannt. Im Rahmen des Projekts wurde

durch das Cetex Institut gGmbH eine Prototyp-Ringwickelmaschine für den RDB Typ LSE 1,4 entwickelt (siehe Abbildung 5), um den Fertigungsprozess in Bezug auf Herstellbarkeit, Produktivität und Prozessstabilität zu analysieren und zu optimieren.

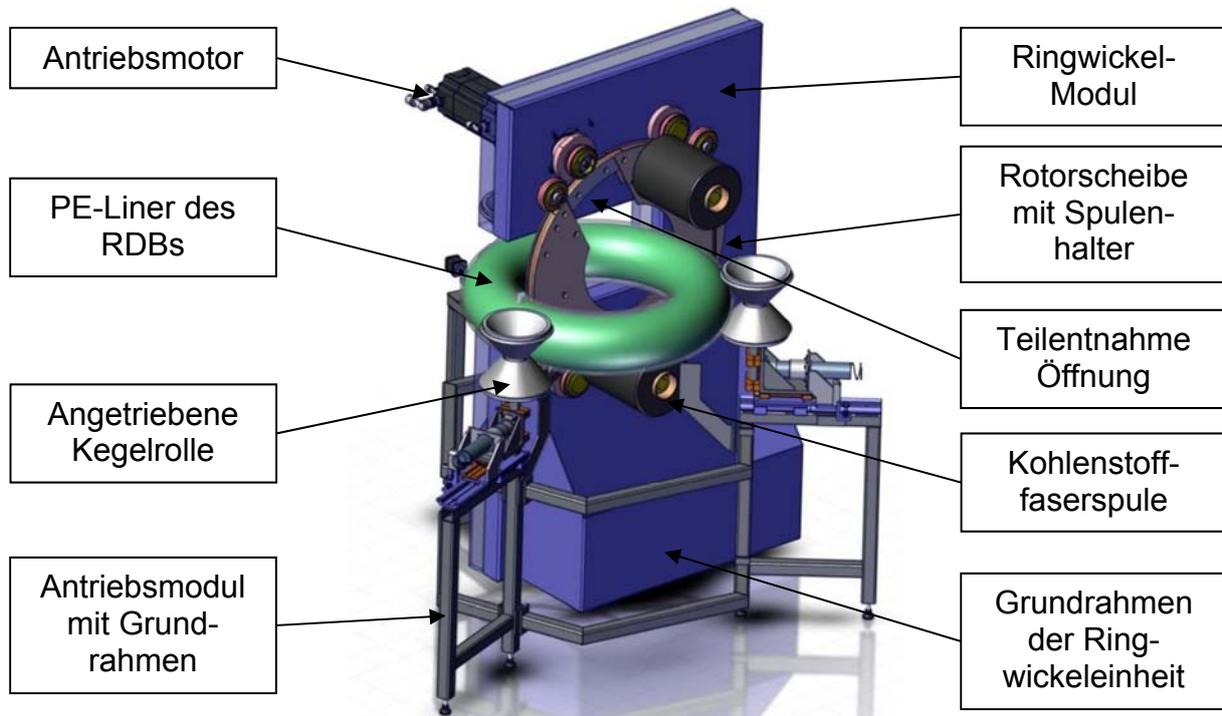


Abbildung 5: Prototyp einer Ringwickelmaschine der Cetex Institut gGmbH

Das System besteht aus zwei Modulen. Einerseits ein Ringwickelmodul, das die Kohlenstofffasern auf den Druckbehälter ablegt, und andererseits ein Antriebsmodul, das die Drehung des Druckbehälters und somit den Vorschub beim Wickeln ermöglicht. Die Ringwickelmaschine hat eine Grundfläche von 1450x1650 mm und eine maximale Höhe von 1600 mm. Die Rotorscheibe mit zwei Rovingspulen wird über einen Zahnriemen radial angetrieben. Die Kohlenstofffaser auf jeder Spule wird durch Führungselemente zum Druckbehälter geführt. Eine Teileentnahmeöffnung auf der Rotorscheibe ermöglicht es, den Druckbehälter manuell ein- oder auszubauen. Die Positionierung und Fixierung des Druckbehälters wird durch drei gleichmäßig auf dem Außenring verteilte Kegelrollen erreicht. Manuell verstellbare Halterungselemente ermöglichen eine einfache Platzierung und Entnahme des Druckbehälters aus der Ringwickelmaschine. Darüber hinaus kompensiert das Antriebsmodul Abweichungen der Position des Druckbehälters durch den Wickelvorgang. Das Drehzahlverhältnis zwischen Antrieb- und Ringwickelmodul ist für eine Präzisionswicklung optimiert und kann flexibel angepasst werden. Um eine vollständig geschlossene Wicklung zu erzeugen, wird das Fasermaterial einschließlich der Spule durch den Innendurchmesser des Rings geführt.

5. ZUSAMMENFASSUNG

In diesem Beitrag wurde die aktuelle Entwicklung eines toroidalen Verbunddruckbehälters zur mobilen Wasserstoffspeicherung mit 700 bar Fülldruck für einen brennstoffzellenbetriebenen mobilen Energieerzeuger mit 5 kW im Rahmen des Förderprojektes "HZwo:FRAME - Tank" vorgestellt. Für die spritzgegossenen Polymerliner-Halbschalen und deren Laserfügeverfahren wurde ein Polyethylen mit einem akzeptablen Wasserstoffpermeationskoeffizienten ausgewählt. Der metallische Befüllinsert wird im Spritzguss in einer Halbschale integriert. Für den Berstdruck von 1575 bar nach ISO 15869.3 wird die Verstärkungsstruktur mit der entwickelten analytischen und numerischen Methodik mit einer Toray T 700 Kohlenstofffaser und einem Epoxidharzsystem mit einem Faservolumenanteil von ca. 50% im Filamentwickelverfahren ausgelegt. Im Vergleich zu den am Markt erhältlichen zylindrischen Wasserstoff-Druckbehältern ist die gravimetrische H₂-Kapazität hinsichtlich des Systemgewichts des entwickelten toroidalen CFK-Behälters geringer. Mit einem Verhältnis von 5,7% des Gesamtgewichts zu Eigengewichts des Speichermediums wird bereits das Ziel für das Jahr 2025 für bordeigene Wasserstoffspeicher für leichte Brennstoffzellenfahrzeuge des U.S. Department of Energy erreicht. Der Ringdruckbehälter wird mit der entwickelten Ringwickelmaschine automatisiert hergestellt. Diese Prototyp-Maschine wurde im Rahmen des Projekts entwickelt und befindet sich derzeit im Aufbau. Erste Funktionstests sind für Ende 2019 geplant. Die Autoren freuen sich darauf, die Forschungsaufgaben fortzusetzen und das geförderte Projekt bis September 2021 erfolgreich abzuschließen.

DANKSAGUNG

Diese Arbeit wurde durch den ESF-EFRE Technologiefonds der SAB Sächsischen Aufbaubank unterstützt.

REFERENZEN

- [1] Villalonga, S.; et al.: Application of full thermoplastic composite for type IV 70 MPa high pressure vessels, Conference proceedings 18th International Conference on Composite Materials, ICCM-18 Jeju Island, Korea, 21 - 26 August 2011.
- [2] Breuer, P.: PRESENTATION OF HEXAGON COMPOSITES, Group Exhibit Hydrogen + Fuel Cells + Batteries at HANNOVER MESSE 16, Hannover, 26th April 2016.
- [3] Perreux, D.: Hydrogen Storage Solutions, Group Exhibit Hydrogen + Fuel Cells + Batteries at HANNOVER MESSE 12, Hannover, 23rd April 2012.
- [4] Naumann, M. D.; Ulke-Winter, L.; Kroll, L.: Optimization of winding structures for composite pressure vessels with elliptic bottom shapes, in 3rd Annual Composite Pressure Vessel Symposium. Hasselt (Belgium), 2013.

- [5] Schramm, N.; et al., TECHNOLOGICAL IMPLEMENTATION OF A TOROIDAL COMPOSITE PRESSURE VESSEL FOR HYDROGEN STORAGE, Conference proceedings 22nd International Conference on Composite Materials, ICCM-22 Melbourne, Australia, 12 - 16 August 2019.
- [6] Villalonga, S.; et al.: Composite 700 bar-vessel for on-board compressed gaseous hydrogen storage, Conference proceedings 17th International Conference on Composite Materials, ICCM-17 Edinburgh, United Kingdom, 27 - 31 July 2009.
- [7] Rosen, P. A.: Beitrag zur Optimierung von Wasserstoffdruckbehältern, AutoUni – Schriftenreihe, Band 113, Wiesbaden, Springer, 2018 (<https://doi.org/10.1007/978-3-658-21124-0>).
- [8] DIN 53380-2:2006, Prüfung von Kunststoffen – Bestimmung der Gasdurchlässigkeit – Teil 2: Manometrisches Verfahren zur Messung an Kunststoff-Folien.
- [9] KRV-Kunststoffrohrverband e.V., Permeation, (n.d.), 19/11/2018, Online verfügbar: <https://www.krv.de/artikel/permeation>.
- [10] Sirosh, N.; Niedzwiecki, A.: Development of Storage Tanks - High-pressure Vessels, In: Léon A. (eds) Hydrogen Technology. Green Energy and Technology, pp 291-310. Springer, Berlin, Heidelberg, 2008 (https://doi.org/10.1007/978-3-540-69925-5_10).
- [11] DIN EN 1465:2009, Klebstoffe – Bestimmung der Zugscherfestigkeit von Überlappungsklebungen.
- [12] U.S. Department of Energy, Target Explanation Document: Onboard Hydrogen Storage for Light-Duty Fuel Cell Vehicles, (n.d.), 05/2017, online available: https://www.energy.gov/sites/prod/files/2017/05/f34/fcto_targets_onboard_hydro_storage_explanation.pdf.
- [13] Allen, A. K.; Anderson, J. V.: The New L-O-T-U-S Filament Winding Method for Composite Fabrication, SAMPE Fall Technical Conference Proceedings: Global Advances in Material and Process Engineering. Society for the Advancement of Materials and Process Engineering: Dallas, Texas. p. CD-ROM - 5 pp., 2006.
- [14] Zu, L.; He, Q.-X.; Ni, Q.-Q.: Pattern design for non-geodesic winding toroidal pressure vessels, Conference proceedings 16th International Conference on Composite Materials, ICCM-16 Kyoto, Japan, July 3-8, 2007.
- [15] Kuznetsov, V. M.; Nekhoroshikh, G. E.: Application of carbon fiber-reinforced plastics in the manufacture of toroidal pressure vessels, Polymer Science Series D, Volume 8, Issue 3, pp 231-234, July 2015.
- [16] Wetzels, J. F. H.; et al.: Device and method for producing a fiber composite product, US8491828B2, 23/07/2013.