

NEUARTIGE STRUKTURINTEGRIERTE WASSERSTOFFSPEICHER FÜR LUFTFAHRTANWENDUNGEN

V. Nagaraj, J. P. Hüppauff, T. Pfaff, N. Motsch-Eichmann, J. Hausmann
Leibniz-Institut für Verbundwerkstoffe GmbH,
Erwin-Schrödinger-Straße 58, 67663 Kaiserslautern, Deutschland

Zusammenfassung

Moderne Leichtbau-Tanks zur Speicherung von Wasserstoff werden heute schon in Faserverbundbauweise hergestellt (Typ 4-Behälter). Dabei übernehmen ein Liner (Kunststoff oder Metall) die weitgehende H₂-Permeationsdichtigkeit und die Faserarmierung (meist Kohlenstofffaser, die im Wickelverfahren aufgebracht wird) die mechanischen Lasten. Durch die Herstellung im Wickelverfahren ergeben sich allerdings hinsichtlich der Geometrie deutliche Einschränkungen. Zum einen kann ein solcher zylindrischer Typ 4-Behälter nicht beliebig klein im Durchmesser werden, da die Fasern am Dombereich des Druckbehälters über eine Wendezone geführt werden müssen, um metallische Lasteinleitungselemente (Bossteile) in die Bauweise zu integrieren und eine ausreichende Tragfähigkeit in axialer Richtung sicherzustellen. Zum anderen müssen solche gewickelten Typ 4-Behälter durch den überwickelten Dombereich geschlossen hergestellt werden, eine nachträgliche Zugänglichkeit zum Innenraum (z.B. zur Wartung oder Systemintegration) kann nicht realisiert werden. Ebenso ist es nicht möglich im Wickelverfahren Fasern rein in axialer Richtung auf dem Behälter zu platzieren, es muss zwingend ein Wickelwinkel eingehalten werden, um die Wendezone im Dombereich realisieren zu können. Wäre es möglich in einem wirtschaftlichen Verfahren sehr schlanke und lange Leichtbau-Tanks herzustellen, die neben den Umfangslagen rein axiale Lagen enthielten, könnten diese zusätzlich als tragende Struktur im Flugzeug verwendet werden, da deren strukturelle Tragfähigkeit im zylindrischen Bereich nicht vollständig ausgenutzt wird. Denkbar ist z.B. die Nutzung der CFK-Tanks als Verstärkungsprofile im Rumpf oder als Holme im Flügel, insbesondere bei Multi-Spar-Bauweisen. Ein weiterer Nachteil gängiger Typ 4-Behälter ist die Notwendigkeit der Herstellung eines Liners, der schon vor dem Wickelprozess die Geometrie des Druckbehälters hat. Nachträgliche geometrische Änderungen (Länge, Durchmesser) der Bauweise bedingen immer die Herstellung eines neuen Liners

Es wird ein Konzept für eine neuartige Bauweise eines Tanks vorgestellt, der diese Nachteile überwindet. In umfangreichen numerischen Simulationen konnte gezeigt werden, dass die neuartige Bauweise durch ihren Aufbau mit rein axialen und in Umfangsrichtung aufgetragenen Fasern maximale Leichtbaugüte besitzt und ebenso sehr dünn hergestellt werden kann. Die Ausleitung der Last aus den axialen Lagen im zylindrischen Bereich des Druckbehälters erfolgt lagenweise mit Hilfe der am IVW patentierten „IVW-Krafteinleitung“. So werden die metallischen Dombereiche, die sowohl geschlossen als auch geöffnet sein können, lastgerecht integriert. Als Liner fungiert ein in der Länge und im Durchmesser flexibles Metall- oder Kunststoffrohr, das bei Änderungen der Tankgeometrie leicht ersetzt werden kann. Da der Lasteinleitungsbereich für die Menge an axialen Fasern dimensionierend ist, ist im zylindrischen Bereich des Behälters das Potenzial von ca. 40 % zur zusätzlichen Nutzung als strukturelles Bauteil vorhanden. Erste Demonstratoren wurden händisch gefertigt und zeigen im Rahmen von Strukturtests die Eignung als Druckbehälter auf.

1. EINLEITUNG

Die weltweite Klimakrise führt zu einer Transformation der Europäischen Union hin zu einer umweltverträglicheren und klimaschonenden Gesellschaft. Dies benötigt andere Energieträger als die bisherigen fossilen Brennstoffe für Industrie und Mobilität. Gerade in der Mobilität sind in der Vergangenheit ausschließlich fossile Energieträger zum Einsatz gekommen. Der Verkehrssektor macht dabei einen Anteil von 26% der CO₂-Emissionen im Jahr 2019 in der EU aus [1]. Auf die Luftfahrt entfallen 3,6 % der Treibhausgas-Emissionen in der EU. Zur Dekarbonisierung des Verkehrssektors werden deshalb aktuell verschiedene CO₂-neutrale Treibstoffe untersucht [2, 3]. Neben batterieelektrischen Antriebskonzepten weist Wasserstoff ein großes Potential auf. Wasserstoff hat eine höhere gravimetrische Energiedichte im Vergleich zu Lithium-Ionen-Akkus, eFuels und Erdgas [3, 4]. Außerdem entsteht als Endprodukt nach der Reaktion in einer Brennstoffzelle ausschließlich H₂O. Die Speicherung von Wasserstoff kann in unterschiedlichen Formen erfolgen. Dazu gehört die Speicherung in den Aggregatzuständen flüssig (lH₂), fest und gasförmig (cGH₂), oder in chemischen Verbindungen

wie Ammoniak oder Metallhydriden [5, 6]. Die verschiedenen Speicherformen haben unterschiedliche Vor- und Nachteile. Eine detaillierte Übersicht bieten [5, 7]. Als Fluid hat Wasserstoff eine höhere volumetrische Dichte als in anderen (elementaren) Speicherformen, aber die Siedetemperatur liegt bei nur 20,3 K [6]. Die tiefkalten Temperaturen sind für die Speichersysteme herausfordernd. Deshalb wird gerade im Nutzfahrzeugbereich auf gasförmige Speicherung gesetzt. Hier werden Drucktanks mit Betriebsdrücken bis zu 700 bar eingesetzt [6]. Die hohen Drücke stellen hohe mechanische Belastungen für die Behälter dar. Für diese werden oftmals kohlenstofffaserverstärkte Verbundwerkstoffe verwendet. Mit diesen hochfesten Materialien lassen sich leichte Composite-Tanks fertigen, welche den hohen Anforderungen genügen. Die Druckbehälter werden dabei in die Kategorien Typ 1-5 gegliedert. Der aktuelle marktreife Stand ist der Typ 4 Drucktank. Dieser besteht aus einem thermoplastischen Liner (z.B. PA/HDPE), metallische Anschlussstücke und einer CFK-Hülle. Der Liner fungiert dabei als Wasserstoffbarriere, welche die Permeation stark verlangsamt.

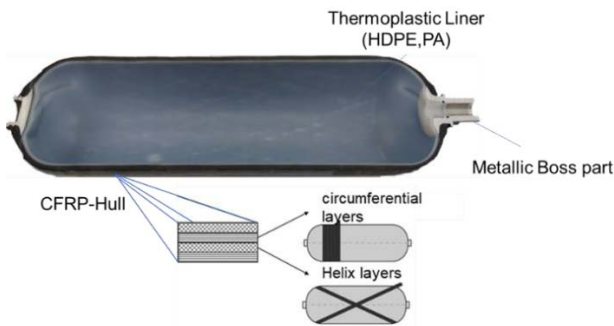


Abbildung 1: Aufbau eines Typ 4-Wasserstoff-Druckbehälters

Solche FKV-Druckbehälter werden meist im Wickelverfahren hergestellt. Durch das Herstellungsverfahren ergeben sich allerdings hinsichtlich der Geometrie deutliche Einschränkungen. Zum einen kann ein solcher zylindrischer Typ 4-Behälter nicht beliebig klein im Durchmesser werden, da die Fasern am Dombereich des Druckbehälters über eine Wendezone geführt werden müssen, um metallische Lasteinleitungselemente (Bosssteile) in die Bauweise zu integrieren und eine ausreichende Tragfähigkeit in axialer Richtung sicherzustellen. Die Herstellung im Durchmesser kleiner, rohrförmiger, langer Tanks ist mit den bisherigen Verfahren nicht möglich. Ebenso ist es nicht möglich im Wickelverfahren Fasern rein in axialer Richtung auf dem Behälter zu platzieren, es muss zwingend ein Wickelwinkel eingehalten werden, um die Wendezone im Dombereich realisieren zu können und einen radialen Konsolidierungsdruck zu gewährleisten. Dies liegt am benötigten Wendebereich an den Polkappen. Sind diese zu klein, kann nicht genug Spannung in die Rovings gegeben werden und die Bündel rutschen vom Dom. Die Bestrebung in der Forschung gehen aber hin zu kleineren Tankdurchmessern. Mit schlankeren Tanks kann so z.B. auch eine höhere Packungsdichte in einem rechteckigen Bauraum erreicht werden.

Wäre es für die Luftfahrt möglich in einem wirtschaftlichen Verfahren sehr schlanke und lange Leichtbau-Tanks herzustellen, die neben den Umfangslagen rein axiale Lagen enthielten, könnten diese zusätzlich als tragende Struktur im Flugzeug verwendet werden, da deren strukturelle Tragfähigkeit im zylindrischen Bereich nicht vollständig ausgenutzt wird. Denkbar ist z.B. die Nutzung der CFK-Tanks als Verstärkungsprofile im Rumpf oder als Holme im Flügel, insbesondere bei Multi-Spar-Bauweisen. Ein weiterer Nachteil gängiger Typ 4-Behälter ist die Notwendigkeit der Herstellung eines Liners, der schon vor dem Wickelprozess die Geometrie des Druckbehälters hat. Nachträgliche geometrische Änderungen (Länge, Durchmesser) der Bauweise bedingen immer die Herstellung eines neuen Liners. Daher wird ein neues Konzept entwickelt, welches die Nachteile der bisherigen Designs überwindet.

2. DRUCKTANK-KONZEPT

Für die Realisierung von schlanken Druckbehältern wird eine alternative Verbindung von CFK-Hülle und Domkappe benötigt. In dieser Verbindungsstelle liegen meist komplexe Spannungsüberlagerungen vor, welche für die Auslegung limitierend sind. Um die Kräfte und Spannungen möglichst gleichmäßig zu übertragen, wird eine lagenweise Übertragung anvisiert. Dafür wird eine ursprünglich für Zug-

/Druckstäbe entwickelte Lasteinleitung für die Entwicklung eines neuartigen Druckbehälterdesigns abgewandelt.

2.1. Lasteinleitung

Bei einem rohrförmigen Zug-/Druckstab werden ausschließlich axiale Lagen in Längsrichtung bzw. Lastrichtung (0° -Lagen) benötigt. Um eine gute Ausnutzung der Festigkeit des Laminates im Lasteinleitungsbereich zu erreichen, müssen die Kräfte möglichst gleichmäßig über die Laminatdicke eingeleitet werden. Ist dies nicht der Fall kommt es zu hohen Spannungsspitzen in lokalen Bereichen, welche zum vorzeitigen Versagen führen. Dies ist zum Beispiel bei einer punktförmigen Lasteinleitung, wie z. B. einer Bolzenverbindung, der Fall. Dort konzentriert sich die Spannung am Rand des Lochs von wo aus die Schädigung bei Überlastung weiter ins Laminat wandert. Daher zielt die hier beschriebene Lasteinleitung darauf ab, die Kräfte lagenweise und damit gleichmäßiger zu übertragen. Dies wird über ein formschlüssiges Profil erreicht. Die axialen Lagen werden einzeln in separate Profildämme abgelegt und mit Umfangslagen fixiert (vgl. Abbildung 2). Dabei wird eine Verklebung zwischen CFK-Lagen und metallischen Profil unterbunden. Bei auftretender Verschiebung gleiten die axialen Lagen an den Profildämme nach oben und das Rohr weitet sich auf. Dies ist in Abbildung 2 verdeutlicht. Durch die Aufweitung des Rohrdurchmessers werden die Umfangslagen auf einen größeren Durchmesser der metallischen Lasteinleitung verschoben und so unter Zugspannung gesetzt. Dies verhindert ein weiteres Aufweiten. Die darunterliegenden axialen Lagen werden zudem stärker gegen die Flanken gepresst. Über die einzelnen Flanken werden dann die Kräfte gleichmäßig in das Laminat über die gesamte Dicke eingeleitet.

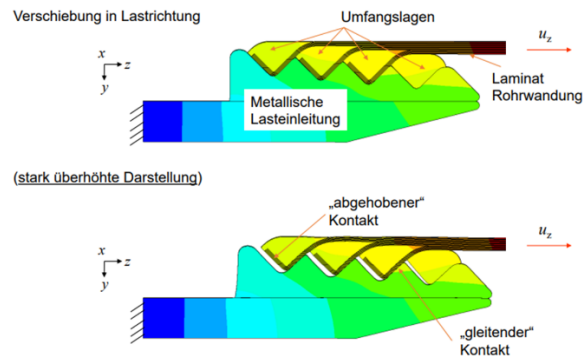


Abbildung 2: Funktionsweise der IVW-Lasteinleitung für Zugstäbe

Das Lasteinleitungsprinzip wurde bereits an einem Zugstab erprobt. Der Zugstab hat einen Durchmesser von $d = 66\text{ mm}$, eine Laminatdicke von $t = 2,5\text{ mm}$ und eine Länge von $L = 540\text{ mm}$. Das Gewicht beträgt 910 g inklusive der metallischen Inserts. Die Prüfung wurde mit einem Hydraulikzylinder durchgeführt. Bei 245 kN wurde die Messung ohne Versagen abgebrochen, da der Zylinder auf Grund des Leistungslimits nicht mehr Kraft aufbringen konnte.

Diese Lasteinleitung wird für einen Druckbehälter angepasst. Die dort vorliegenden Lasten sind ähnlich zu denen eines Zugstabes. Durch den anliegenden

Innendruck tritt eine axiale und eine radiale Lastkomponente auf. Diese Spannungen lassen sich mit Hilfe der Kesselformel bestimmen. Unter der Annahme einer gleichmäßigen Spannungsverteilung über den Querschnitt können für isotrope Werkstoffe die Spannungen mit den nachfolgenden Gleichungen bestimmt werden [6]:

$$\sigma_t = \frac{p_i * D_i}{2 * s}$$

$$\sigma_a = \frac{p_i * D_i}{4 * s}$$

Durch Auflösen der Gleichungen nach der minimal benötigten Wanddicke s_{min} und die Substitution der auftretenden Spannungen $\sigma_{t,a}$ durch die Verbundfestigkeiten in Faserrichtung R_{11} , kann der Tank überschlägig dimensioniert werden. Dabei sollte festgehalten werden, dass die Kesselformel für anisotrope Verbundwerkstoffe nur bedingt einsetzbar ist.

$$s_{min,u} = \frac{p_i * D_i}{2 * R_{11}}$$

$$s_{min,a} = \frac{p_i * D_i}{4 * R_{11}}$$

Der Wasserstofftank wird für den Druck $p_i = 157,5$ MPa ausgelegt. Dies entspricht dem vorgeschriebenen Berstdruck. Dieser ergibt sich aus dem Betriebsdruck von 700 bar und einem in der GTR13 für CFK vorgeschriebenen Sicherheitsfaktor von 2,25 [8]. Die Festigkeit in Faserrichtung des CF-EP-Verbundes wird mit der Mischungsregel für einen Faservolumengehalt von 60% abgeschätzt. Diese beträgt im Falle dieser Auslegung $R_{11}=3500$ N/mm². Für den Demonstrator errechnen sich für einen Innendurchmesser von $D_i = 57$ mm eine minimale Wanddicke mit:

$$s_{min,Gesamt} = s_{min,u} + s_{min,a}$$

von $s_{min,Gesamt} = 1,92$ mm. Für einen ersten Prototypen wird eine Gesamtdicke von 3,6 mm für das Laminat festgelegt. Dabei sind insgesamt 2,4 mm für die Umfangslagen und 1,2 mm für die Längslagen vorgesehen. Diese Wanddicke ist deutlich überdimensioniert und soll nach der Validierung der grundsätzlichen Funktionsweise reduziert werden.

Beim Zugstab sind im Rohr ausschließlich 0°-Lagen vorhanden. Umfangslagen existieren nur im Lasteinleitungsbereich zum Verpressen der Längslagen in den Nuten. Außerdem muss die Lasteinleitung beim Druckbehälter, anders als beim Zug-/Druckstab, keine axialen Drucklasten ertragen. Deswegen muss die Geometrie der Lasteinleitung geringfügig angepasst werden. Darüber hinaus verlaufen die Umfangslagen, anders als im Zugstab, nun über den gesamten zylindrischen Bereich des Druckbehälters, um die Spannungen in radialer Richtung aufzunehmen. In Abbildung 3 ist der Aufbau der patentierten Lasteinleitung bei der Anwendung im Druckbehälter zur Integration der Dombereiche abgebildet.

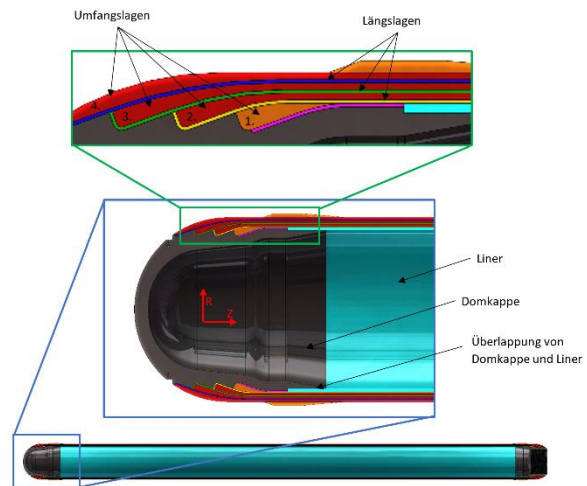


Abbildung 3: Neuartiges Domkonzept für schlanke Drucktanks

Die dargestellte Domkappe bildet das geschlossene Endstück. Die gegenüberliegende Domkappe ist mit einem Anschlussgewinde ausgestattet, in welches Ventile (OTV) oder Rohranschlüsse eingeschraubt werden können. Ein wesentlicher Vorteil der weit außen endenden Lagen ist es, das große Öffnungsdurchmesser realisiert werden können. So können sehr kleine Tankdurchmesser gefertigt werden, wobei das Innere des Tanks trotzdem gut zugänglich ist. Als Liner wird beim dargestellten Prototypen ein Aluminiumrohr verwendet. Grundsätzlich kann aber auch ein rohrförmiger Kunststoffliner verwendet werden. Der Liner wird auf die metallischen Inserts aufgeschoben und bildet so eine breite Überlappungszone. Der statische Innendruck soll dabei die Dichtigkeit gewährleisten.

Für die Lasteinleitung der Zugstäbe wurde die Spannungsverteilung bereits numerisch und experimentell untersucht. Aus diesen Untersuchungen geht hervor, dass die Lasteinleitung eine gute Ausnutzung der Festigkeit des Verbundmaterials ermöglicht, d.h. die Spannungsüberhöhungen in der Lasteinleitung sind deutlich niedriger als bei vergleichbaren Lasteinleitungen. Der Überhöhungsfaktor berechnet sich aus dem Verhältnis der auftretenden Spannungen in der Lasteinleitung zu den Spannungen im ungestörten (zylindrischen) Rohrlaminat und liegt bei ca. 1,4. Der niedrige Überhöhungsfaktor bewirkt, dass die Struktur aufgrund von lokalen Spannungsspitzen nicht übermäßig überdimensioniert werden muss. Ähnliches gilt, wie die numerischen Untersuchungen zeigen, auch für den Druckbehälter. Die patentierte Lasteinleitung ermöglicht eine hohe Leichtbaugüte. Dennoch ist auch hier die Lasteinleitung der limitierende Faktor, d.h. das Laminat im zylindrischen Behälterbereich hat noch Festigkeitsreserven (ca. 40%), die nicht ausgenutzt werden. Dies ermöglicht zukünftig die Nutzung der Tanks als Strukturbauteile. Denkbar ist z.B. die Integration der Druckbehälter in Flügel für Kleinflugzeuge. Hier ermöglichen die schlanken Behälter die Substitution der Flügelholme.

2.2. Numerische Berechnung

2.2.1. Modellaufbau

Zur detaillierten Auslegung wird die Lasteinleitung in numerischen Struktursimulationen betrachtet. Dazu muss ein hochauflösendes Modell der Lasteinleitung aufgebaut

werden. Um die Rechenzeit niedrig zu halten wird die Symmetrie ausgenutzt und ein Viertelmodell in ABAQUS® aufgebaut. Die einzelnen Lagen werden durch Solid-Elemente repräsentiert. Diesen werden orthotrope Materialeigenschaften zugewiesen. Es wird ein IMS-65 Faseroving von Teijin und als Harz-Härtersystem MGS RIMR 135 + MGS RIMH 137 verwendet. Die Materialeigenschaften dieses Verbundwerkstoffes wurden mit dem Programm AlfaLam überschlägig ermittelt und in der nachfolgenden Tabelle dargestellt.

Tabelle 1: Definierte Materialeigenschaften im FEM-Modell

Materialeigenschaften	
E ₁₁	192488
E ₂₂	10636
E ₃₃	10363
G ₁₂	7104
G ₁₃	7104
G ₂₃	7104
ν ₁₂	0,25
ν ₁₃	0,25
ν ₂₃	0,35
ρ	1,58*10 ⁻⁹

Die einzelnen Lagen sind mittels Tie-Constraints miteinander verbunden. Dies bildet die Verklebung der einzelnen Lagen ab. Ein Versagen innerhalb der Laminatschichten untereinander wird hier nicht vorgesehen. Das Viertelmodell wird mit den entsprechenden Randbedingungen versehen. Die Freiheitsgrade an den Symmetrieebenen werden in die jeweiligen Richtungen gesperrt. Da hier nur ein Detailausschnitt betrachtet wird, endet das Druckzylindermodell kurz hinter der Lasteinleitung. Im weiterführenden zylindrischen Bereich sind die Belastungen und Spannungen gleichmäßig verteilt und werden hier nicht weiter betrachtet. Der Querschnitt des Zylinders wird an der Schnittstelle des Modells fest eingespannt. Die Randbedingungen sind in Abbildung 4 dargestellt.

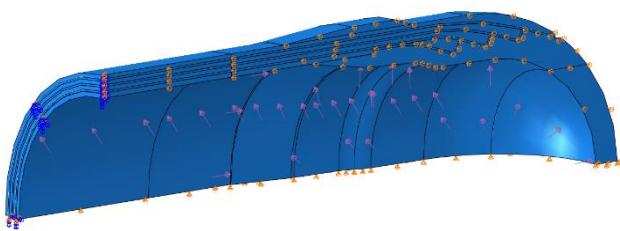


Abbildung 4: Modellaufbau des Viertelmodells der Lasteinleitung

Belastet wird der Druckbehälter mit einem Innendruck von 157,5 MPa, welcher, wie oben beschrieben, dem geforderten Berstdruck (1575 bar) entspricht. Der Druck wird dabei schrittweise aufgebracht, da es sonst zu Problemen mit der numerischen Konvergenz kommen kann.

Der komplexe auftretende Spannungszustand muss mit einem ausreichend feinen Netz untersucht werden, damit die Lösung als netzunabhängig anzusehen ist. Allerdings muss gleichzeitig eine recheneffiziente Vernetzung erreicht werden. Daher werden gerade die axialen Lagen feiner

vernetzt, sodass Spannungsverteilungen über die Dicke der Einzelschicht untersucht werden können. Vernetzt wird teils mit quadratischen und teils mit linearen Elementen.

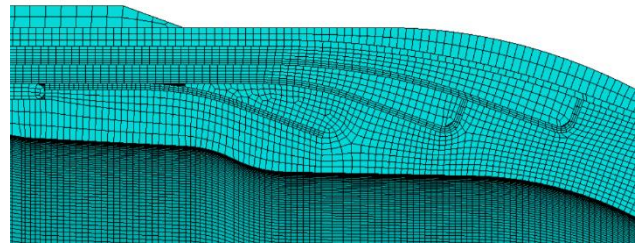


Abbildung 5: Detailsicht der Vernetzung

2.2.2. Ergebnisse

Zur Validierung der überschlägigen Dimensionierung des Drucktanks werden zunächst die Spannungen in Faserrichtung im zylindrischen Teil betrachtet. Dabei betragen die Höchstspannungen in den Umfangslagen $S_{11} = 1736 \text{ N/mm}^2$. Diese liegen deutlich unter den vorhandenen Festigkeiten von $R_{11} = 3500 \text{ N/mm}^2$. Ähnliches gilt für die axialen Lagen. Hier liegen die Spannung S_{11} bei bis zu 1200 N/mm^2 . In beiden Fällen sind die vorhandenen Festigkeiten nicht komplett ausgenutzt.



Abbildung 6: Spannungsverteilung in Faserrichtung im zylindrischen Tankbereich

Bei Anwendung des Puck Bruchkriteriums treten in der Mantelfläche Zwischenfaserbrüche auf. Allerdings wird hier nur ein linear-elastisches Materialverhalten berücksichtigt. Daher ist der Einfluss von Matrixrissen auf das Gesamtversagen schwer zu bewerten.

Die radiale Deformation liegt im zylindrischen Bereich bei $u_r = 0,2934 \text{ mm}$. Die Lasteinleitung teilt sich in Umfangslagen und Längslagen auf. In Abbildung 7 sind die Faserspannungen S_{11} der Lasteinleitung dargestellt. Hier liegt ein Spannungspeak in der ersten Umfangslage vor. Dieser ist allerdings durch Probleme in der numerischen Kontaktdefinition entstanden und begrenzt sich auf eine einzige Elementreihe. Die weiteren Faserspannungen liegen unter der vorhandenen Faserfestigkeit. Damit sind die Lagen im Lasteinleitungsbereich ausreichend

dimensioniert.

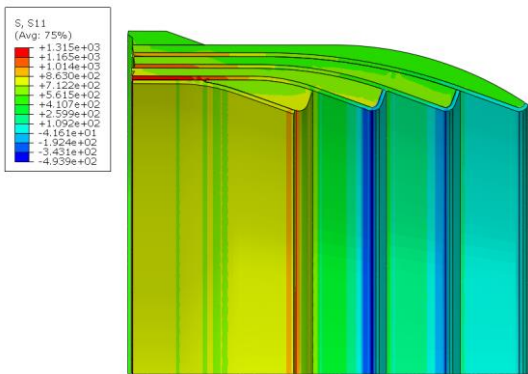


Abbildung 7: Spannungsverteilung der Faserspannung in der Lasteinleitung

Zur Validierung der numerischen Ergebnisse müssen physikalische Belastungstests durchgeführt werden.

2.3. Herstellung

Die Herstellung eines Demonstrators erfolgt in einem angepassten Wickelverfahren. Im ersten Schritt werden die metallischen Inserts/Endkappen aus Aluminium-Rohlingen gedreht. Diese werden mit einem marktüblichen Aluminium-Rohr, welches als Liner und gleichzeitig als Wickelkern fungiert, zusammengefügt. Durch die Verwendung eines Trennmittels wird ein Verkleben der Lagen mit den metallischen Teilen verhindert. Unter der Verwendung von Wickelsternen wird nun der Laminataufbau erstellt.

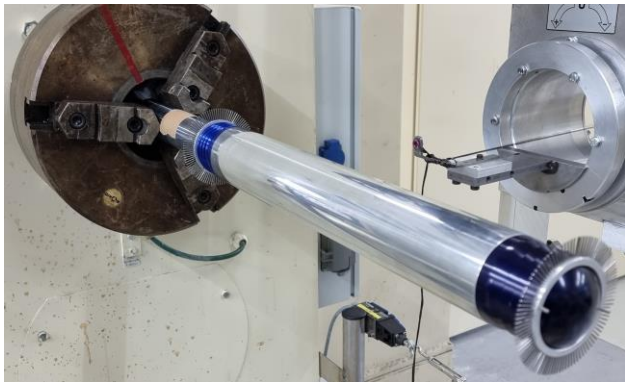


Abbildung 8: Herstellung der Demonstratoren im Wickelverfahren

Dabei werden die axialen Lagen von Wickelsternen zu Wickelstern gespannt und dann über die Umfangslagen in die Profilgänge gepresst. Anschließend wird der überstehende Rest der axialen Lagen entfernt und die nächste Schicht bis zum nächste Profilgang gelegt. So wird verfahren, bis alle Profilgänge gefüllt sind. Der Demonstrator härtet anschließend bei Raumtemperatur aus. Nach vollständiger Aushärtung wird der Demonstrator in der Temperaturkammer bei 55°C nachgetempert.

Der Tank hat eine Länge von 500 mm und einen Durchmesser von 70 mm. Die einzelnen Komponenten

wurden vorher und nachher gewogen, um die Gewichtsanteile zu bestimmen. Das ausgehärtete CFK-Laminat hat eine Dicke von 3,6 mm und wiegt 586 g. Auf die metallischen Bauteile entfallen 514 g der Gesamtmasse von 1100g.



Abbildung 9: Demonstrator für Berstdruckversuche

Das hergestellte Druckbehälterdesign wurde zur Validierung der neuartigen Bauweise entwickelt und wäre so in der Lage ca. 45 g Wasserstoff unter einem Betriebsdruck von 700 bar zu speichern. Das Verhältnis von Wasserstoffgewicht zu Tankgewicht beträgt dabei ungefähr 4,1 %. Da der Anteil der „schweren“ metallischen Bauteile im Verhältnis zum Leichtbau FKV-Material bei der geringen Länge von 500 mm relativ hoch ist, ist das Leichtbaupotenzial vergleichsweise gering. Bei einer Behälterlänge von z.B. 2000 mm steigt das Leichtbaupotenzial der Bauweise deutlich an. Hier beträgt das Verhältnis von Wasserstoffgewicht zu Tankgewicht dann z.B. 5,1 %. Entsprechend besser wird das Leichtbaupotenzial bei sehr langen Druckbehältern, wie z.B. bei der Speicherung des Wasserstoffs über die gesamte Flügellänge.

3. ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Im Rahmen dieses Forschungsprojektes wurde ein neuartiger Wasserstoffdrucktank entwickelt. Diese Bauweise ermöglicht es, besonders schlanke Drucktanks mit vergleichsweise großer Öffnung herzustellen. Dazu wird eine Lasteinleitung für Zug- und Druckstäbe (Struts) abgewandelt. Im Gegensatz zu den Struts müssen beim Einsatz der Lasteinleitung für Druckbehälter nur Zuglasten übertragen werden. Die überschlägige Auslegung ist mit der Kesselformel erfolgt und kann anhand der numerischen Berechnung validiert werden.

Anhand eines Demonstrators wird ein Herstellungsprozess erprobt. Nachfolgend muss der hergestellte Prototyp auf Fertigungsfehler untersucht werden. Anschließend können weitere Prototypen gefertigt und physikalische Berstdruckversuche durchgeführt werden. Außerdem muss die Dichtigkeit und die Permeation von Wasserstoff untersucht werden.

In nachfolgenden Entwicklungsprojekten wird die Integration in tragende Flugzeugstrukturen untersucht. Hier liegt ein starker Fokus auf zyklischen Belastungen und damit der Materialermüdung.

Literatur

- [1] Statistisches Bundesamt, *Straßenverkehr: EU-weite CO₂-Emissionen seit 1990 um 29 % gestiegen: Pkw verursachen den größten Anteil* (Zugriff am: 14. September 2022).
- [2] Siemens Energy, „Power-to-X: A closer look at e-Ammonia“, 2021.
- [3] F. E. Nigbur, *Ammoniak-Cracker zur Brenngasversorgung von Brennstoffzellen: Experimentelle und simulative Untersuchungen*, 1. Aufl. Göttingen: Cuvillier Verlag, 2021. [Online]. Verfügbar unter: <https://ebookcentral.proquest.com/lib/kxp/detail.action?docID=6730271>
- [4] C. Zamfirescu und I. Dincer, „Using ammonia as a sustainable fuel“, *Journal of Power Sources*, Jg. 185, Nr. 1, S. 459–465, 2008, doi: 10.1016/j.jpowsour.2008.02.097.
- [5] J. Töpler und J. Lehmann, Hg., *Wasserstoff und Brennstoffzelle: Technologien und Marktperspektiven*, 2. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2017. [Online]. Verfügbar unter: <http://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:bsz:31-epflicht-1562361>
- [6] P. A. Rosen, *Beitrag Zur Optimierung Von Wasserstoffdruckbehältern: Thermische und Geometrische Optimierung Für Die Automobile Anwendung*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, 2018. [Online]. Verfügbar unter: <https://ebookcentral.proquest.com/lib/kxp/detail.action?docID=5355916>
- [7] M. Klell, H. Eichlseder und A. Trattner, *Wasserstoff in der Fahrzeugtechnik: Erzeugung, Speicherung, Anwendung*, 4. Aufl. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2018. [Online]. Verfügbar unter: <https://ebookcentral.proquest.com/lib/kxp/detail.action?docID=5356050>
- [8] *Global technical regulation on hydrogen and fuel cell vehicles*, 13, United Nations, Jun. 2013.