

## ENTWICKLUNG EINER MIT WASSERSTOFF-BRENNSTOFFZELLEN BETRIEBENEN HUBSCHRAUBER-DROHNE

*Benjamin Breuer<sup>1</sup>, Mark F. Jentsch<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> Professur Energiesysteme, Fakultät Bauingenieurwesen, Bauhaus-Universität Weimar  
Schwanseestraße 1a, 99423 Weimar

### ABSTRACT

Wasserstoff-Brennstoffzellenantriebe gelten als eine Möglichkeit dazu, zur Dekarbonisierung in der Luftfahrt beizutragen. Dementsprechend gibt es bereits eine Reihe von Ansätzen zur Umsetzung von Wasserstoffsystemen in Luftfahrzeugen, insbesondere in Drohnenanwendungen. Diese Arbeit stellt die Herausforderungen dar, die es bei wasserstoffbetriebenen Drohnen zu bewerkstelligen gilt und zeigt am Beispiel einer Hubschrauber-Drohne auf, wie diese gelöst werden können. Als Basis dient hierbei ein ursprünglich rein batteriebetriebener Versuchsträger, für den die aufgrund der Änderung des Antriebsstrangs erforderlichen Anpassungen dargestellt werden. Dies umfasst die Integration einer Brennstoffzelle sowie die Entwicklung des zum Betrieb der Drohne notwendigen hybriden Antriebskonzepts aus Brennstoffzelle und Traktionsakkumulatoren, das die Implementierung einer angepassten Elektronik notwendig macht. Darüber hinaus wird ein Konzept für einen neuartigen Wasserstofftank vorgestellt, der neben einer Reduzierung der Masse auch eine Optimierung des Bauraums für Drohnen erlaubt.

### 1. EINLEITUNG

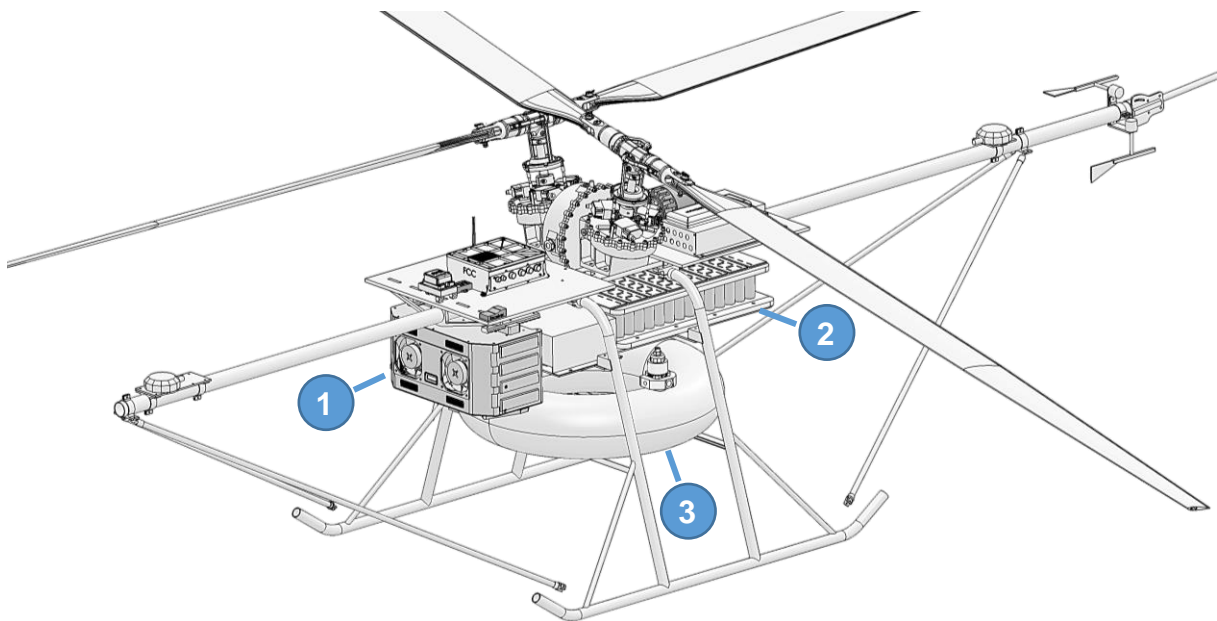
Die Möglichkeit, Wasserstoff mit einer Energiedichte von ca. 120 MJ/kg über die Wasserelektrolyse aus regenerativen Energiequellen zu erhalten, macht ihn zu einem möglichen Substituenten für fossile Treibstoffe. Dies gilt insbesondere für Bereiche, in denen batterieelektrische Antriebe aufgrund des Gewichts der Batterien nur bedingt zum Einsatz kommen können, wie in der Luftfahrt. Die Anwendung von Wasserstoff in der Luftfahrt ist hierbei allerdings keine Idee, die erst in den letzten Jahren entstanden wäre. Wenn man einen Blick in die Vergangenheit wirft, dann wird deutlich, dass der Einsatz von Wasserstoff im Rahmen der Luftschiffahrt einen bedeutenden Anteil an der Entwicklung der Luftfahrt insgesamt hatte. Relativ neu sind dagegen Ansätze, Wasserstoff als Antriebsenergie für Luftfahrzeuge einzusetzen und nicht, wie in der Vergangenheit, als ein Medium, das aufgrund seiner Eigenschaft, leichter als Luft zu sein, für den Auftrieb sorgt.

Projekte zur Wasserstoffnutzung in der Luftfahrt werden zurzeit von diversen Forschungsinstituten und Konsortien durchgeführt. Beispielsweise wird im Rahmen des Forschungsvorhabens „BALIS“ des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) die Hochskalierung von Brennstoffzellen für die bemannte Luftfahrt auf 1,5 MW erprobt, wobei dies zunächst auf dem Boden erfolgt [1]. Die meisten anderen derzeitigen Projekte befassen sich hingegen mit kleinen, unbemannten Luftfahrzeugen. An der TU Delft wird z.B. gemeinsam mit anderen Partnern das Ziel verfolgt, die Flugdauer ultraleichter geflügelter Drohnen mit Wasserstoff zu erhöhen [2]. Das in diesem Beitrag vorgestellte Forschungs- und Entwicklungsprojekt FlyHy unterscheidet sich maßgebend von diesem Ansatz durch die Skalierung hinsichtlich Leistungsdaten und Abflugmasse, Art des Luftfahrzeugs (Hubschrauber-Drohne), sowie durch die Konzentration auf die Entwicklung von Einzelkomponenten. Als Basis dient hierbei ein Versuchsträger, der ursprünglich vom DLR und der Technischen Universität München entwickelt wurde.

## 2. AUSGANGSZUSTAND UND ZIEL

Der Fokus des hier beschriebenen Entwicklungsvorhabens FlyHy liegt nicht auf der grundlegenden Neuentwicklung einer Drohne oder eines Hubschraubers. Deshalb wird, wie eingangs bereits erwähnt wurde, auf einen Versuchsträger aus vorangegangenen Forschungsprojekten zurückgegriffen und dieser für den Wasserstoff-Brennstoffzellenantrieb modifiziert. Übergreifendes Ziel des Projektkonsortiums von in Thüringen ansässigen Unternehmen und Forschungseinrichtungen ist dementsprechend der Umbau der bestehenden Drohne zu einer flugfähigen Hubschrauber-Drohne mit hybridem Brennstoffzellen-Akkubetrieb.

Der für das Entwicklungsvorhaben genutzte AREA Versuchsträger des DLR und der TU München wurde als batteriebetriebene Hubschrauberdrohne für Flughöhen über 5000 Meter entworfen. Eine Besonderheit bildet das Rotorsystem, welches in Form eines Flettner-Doppelrotors ausgebildet ist. Dabei kämten zwei Rotoren in gegenläufiger Richtung. Durch den Drehmomentausgleich der beiden Rotoren entfällt ein Heckrotor. Ein weiterer Vorteil dieser Konfiguration ist der geringere Leistungsbedarf bei gleicher Flächendichte gegenüber einer Haupt-/Heckrotor-Konfiguration [3]. Der Akku des originalen Versuchsträgers besteht aus knapp 200 Einzelzellen des Typs 18650 und weist eine Gesamtmasse von rund 12,3 kg auf. Die nominale Abflugmasse von AREA lag ursprünglich bei ca. 36,6 kg. Abbildung 1 zeigt ein CAD-Modell der für die Wasserstoffnutzung modifizierten AREA Drohne mit Brennstoffzelle, neuem Traktionsakkumulator sowie dem unter der Brennstoffzelle angeordneten, neuartigen, ringförmigen Wasserstofftank.



**Abbildung 1: Darstellung der modifizierten Hubschrauber-Drohne mit Brennstoffzellensystem (1), Traktionsakkumulator (2) und Wasserstofftank (3)**

## 3. VORGEHENSWEISE

Zum Projektstart standen lediglich die Ausgangsbasis in Form des AREA Versuchsträgers, das übergreifende Ziel der Entwicklung einer flugfähigen H<sub>2</sub>-Drohne sowie die jeweiligen Teilvorhabenziele der Projektpartner fest. Nach einer detaillierten Aufnahme des Versuchsträgers wurden erste neuralgische Meilensteine (Fixpunkte) identifiziert:

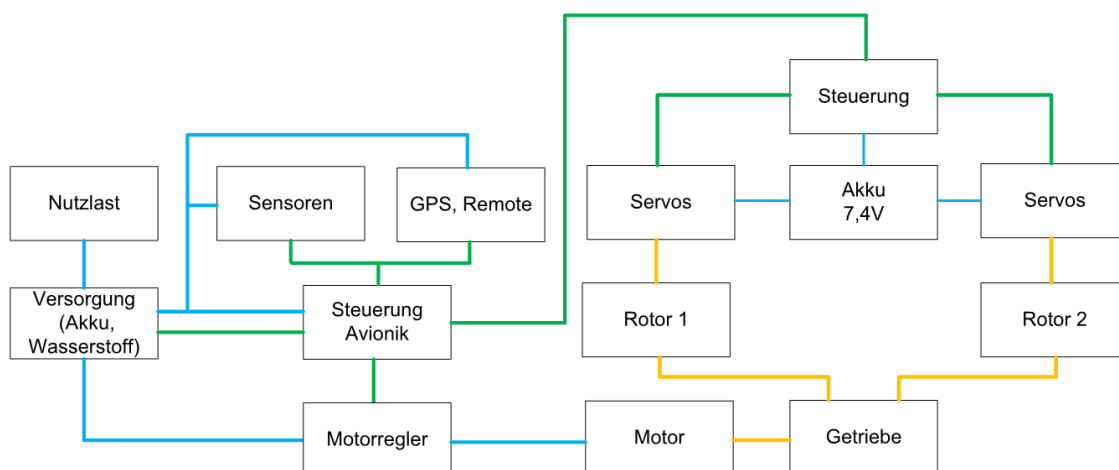
- Erhaltung der erprobten und auf Zuverlässigkeit geprüften Avionik → Dies macht eine Angleichung aller zusätzlichen Komponenten erforderlich, um eine angepasste Kommunikation und Steuerung zu ermöglichen.

- Gewichtsoptimierung der neuen Komponenten → Durch die Optimierung zusätzlicher Massen durch Brennstoffzelle, Wasserstofftank- und Versorgung, Steuerung sowie geplanter Nutzlast soll die zusätzliche Abflugmasse möglichst gering gehalten werden.
- Erhaltung der strukturellen Integrität der Ausgangsbasis → Zusätzliche Komponenten werden so in die vorhandene Konstruktion eingepasst, dass das Flugverhalten nicht negativ beeinflusst wird.

#### 4. PRINZIP DES HYBRIDANTRIEBS FÜR DIE HUBSCHRAUBER-DROHNE

Vergleichbar mit dem Antriebskonzept eines Plug-in-Hybrid Automobils wird, wie in Abbildung 1 gezeigt wird, in der modifizierten Drohne neben der Brennstoffzelle auch ein Traktionsakkumulator für die Energieversorgung verwendet. Dessen Kapazität und die Dauerleistung der Brennstoffzelle bestimmen hierbei maßgeblich die mögliche Flugzeit. Zusätzliche Masse bei einer Erhöhung der Akkukapazität und/oder Wasserstoffmenge wirkt sich jedoch auf diese konträr aus. Darüber hinaus erschweren weitere Faktoren wie die Nutzlastanforderung, das Kapazität-/Massenverhältnis des Wasserstofftanks sowie die vom Leistungsbedarf abhängige Masse der Elektronik den Findungsprozess eines Optimums. Ein prognostizierter Spitzenleistungsbedarf während des Steigflugs von 9 kW ist allein durch die Brennstoffzelle nur schwer abzubilden, da Brennstoffzellensysteme in diesem Leistungsbereich derzeit noch zu massereich für dieses Einsatzgebiet sind. Die letztendlich zum Einsatz kommende Brennstoffzelle weist eine Dauerleistung von 1,5 kW<sub>el</sub> auf. Dies macht ihre Funktion vergleichbar mit der eines Range-Extenders beim Automobil.

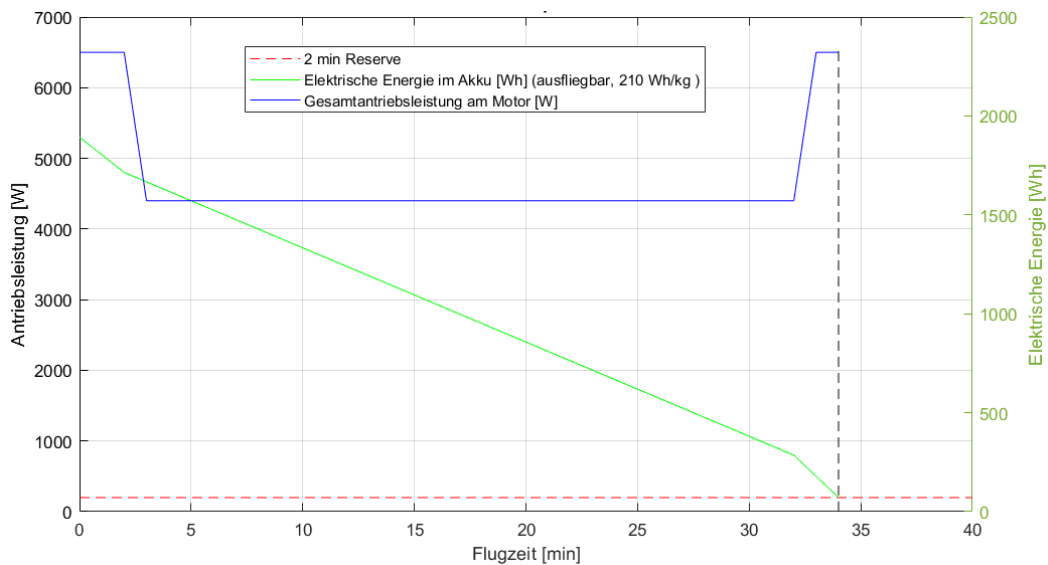
Der Leistungsbedarf der Hubschrauber-Drohne ist stark lastabhängig und variiert je nach Flugsituation in weiten Bereichen. Während im schnellen Steigflug oder bei Abfangmanövern kurzzeitig Leistungen von über 9 kW zu erwarten sind, werden für den gleichmäßigen Vorwärtsflug lediglich ca. 5 kW benötigt. Neben den hohen Antriebsleistungen ist darüber hinaus auch elektrische Energie auf verschiedenen Spannungsniveaus für Sensoren, Anbaugeräte, Steuerung und Servomotoren erforderlich. Abbildung 2 zeigt einen Überblick der wichtigsten Komponenten der Drohne und der dazwischen notwendigen Verbindungen. Die Verbindungen sind hierbei zur Übersicht farblich gekennzeichnet; (blau: Strom, grün: Daten, gelb: Mechanik).



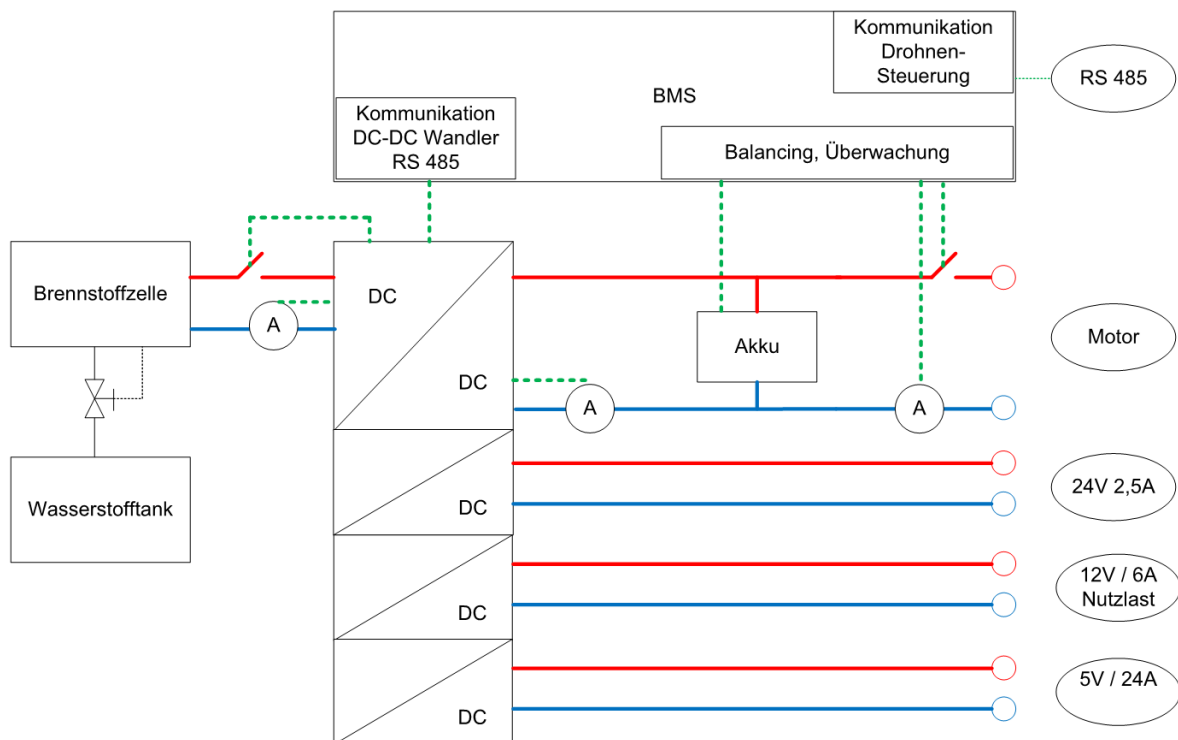
**Abbildung 2: Schematische Darstellung der Systemkomponenten der Drohne**

Um die für den Betrieb der modifizierten Drohne erforderlichen verschiedenen Leistungs- und Spannungsniveaus abdecken zu können, wurde die Leistungselektronik mit Ausnahme des Motor-Wechselrichters im Rahmen des FlyHy-Vorhabens neu entwickelt. Nach einer Analyse der theoretisch zu erwartenden Ströme und deren Schwankungsverhalten wurden hierfür die Schaltszenarien festgelegt. Im Kern besteht die neue Elektronik aus einem Gleichspannungs-Gleichspannungswandler, der die Brennstoffzelle und den Traktionsakkumulator mit der Motorelektronik verschaltet. Die

Spannung des Akkumulators fällt während des Flugs ab, während die Spannung der Brennstoffzelle möglichst konstant gehalten werden sollte. Das neu gestaltete Energieverteilssystem muss daher in der Lage sein, flexibel auf Spannungsschwankungen zu reagieren und diese auszugleichen. Besonders effizient müssen hierbei die Wandlerkomponenten mit dem Batteriemanagementsystem (BMS) zusammenarbeiten. Die Motorleistung kann zudem bei Abfangmanövern noch deutlich höher ausfallen und stärkeren Schwankungen unterliegen, als dies im grundlegenden Missionsprofil in Abbildung 3 dargestellt ist. Die Leistung des Energieverteilers wurde daher so ausgelegt, dass dem Motor auch bei Ausfall der Brennstoffzelle ausreichend Reserven zu Verfügung stehen. Abbildung 4 zeigt systematisch den Aufbau der Energieverteilung.



**Abbildung 3: Missionsprofil der modifizierten Hubschrauber-Drohne**



**Abbildung 4: Prinzipdarstellung des Energieverteilers der Drohne (Bild: isle GmbH)**

Die Kommunikation zwischen den in Abbildung 2 dargestellten Einzelkomponenten des Gesamtsystems erfolgt innerhalb der Drohne über ein symmetrisches EIA-485 (RS 485) mittels UART-Protokoll. Über eine kabellose Ethernet-Schnittstelle erfolgt ein bidirektionaler Datenaustausch vom Boden aus mit der Drohne. Relevante Parameter, wie Füllstand des Wasserstofftanks, Akkuzustand und Stacktemperatur werden in Echtzeit übertragen und ausgewertet. Im Falle einer Unterbrechung der Kommunikation und dem Eintreffen kritischer Parameter ist die Bordelektronik auch autark in der Lage, die Brennstoffzelle selbstständig herunterzufahren.

## 5. BRENNSTOFFZELLENINTEGRATION IN DIE HUBSCHRAUBER-DROHNE

Die in Abbildung 5 dargestellte, für die Drohne verwendete Brennstoffzelle hat eine Masse von 3150 g und weist eine Dauerleistung von ca. 1,5 kW<sub>el</sub> auf. Kurzzeitig sind Spitzenleistungen von ca. 1,8 kW<sub>el</sub> möglich. Das Stack der Brennstoffzelle ist mit offener Kathode ausgeführt und luftgekühlt. Bei einem elektrischen Wirkungsgrad  $\eta_{el}$  des Stacks von 50% ist der abzuführende Wärmestrom nicht unerheblich, weshalb eine ungehinderte Kühlluftzufuhr zu gewährleisten ist. Dies wird, wie Abbildung 1 zeigt, durch eine freistehende Anbringung unterhalb der Antriebsebene der Drohne gewährleistet. Für eine einfache Montage und Demontage der Brennstoffzelle wird diese mit einem Schnellkupplungssystem an der Drohne befestigt. Dies ist notwendig, da das Stack durch die offene Kathodenkonstruktion bei einer Nichtnutzung relativ schnell austrocknen kann. Eine Lagerung der Brennstoffzelle in einem luftdichten Behälter ist daher angebracht, um dem entgegenzuwirken sowie zum Schutz der Brennstoffzelle beizutragen. Die Brennstoffzelle benötigt einen Massenstrom von 1,5 g(H<sub>2</sub>)/min bei einem Eingangsdruck von 0,6 bis 0,9 bar, wobei der zur Versorgung erforderliche Druckminderer ein Sonderbauteil darstellt, das speziell für diesen Anwendungsfall konzipiert wurde. Abbildung 6 stellt diesen dar. Markverfügbare Druckminderer aus dem Automobilbau weisen nämlich aufgrund der höheren benötigten Massenströme zu große Volumina und Massen für die hier vorgesehene Anwendung auf. Weiterhin ist anzumerken, dass die Brennstoffzelle regelmäßig einen Spülvorgang (purge) durchführt. Während des „purgens“ werden Kondensat und Restgas auf der Anodenseite ausgetragen. Für diesen Vorgang ist kurzzeitig ein höherer Volumenstrom an Wasserstoff notwendig. Der Druckminderer wurde daher so ausgelegt, dass er auf diese kurzzeitigen Bedarfsschwankungen entsprechen reagieren kann.



Abbildung 5: Bild der für die Hubschrauber-Drohne verwendeten Brennstoffzelle



Abbildung 6: Darstellung des Druckminderers

Brennstoffzellen der für die Hubschrauber-Drohne verwendeten Bauart sind aufgrund der in ihnen vorgenommenen Gewichtsoptimierung nicht auf eine maximale Betriebsstundenzahl ausgelegt. Grundsätzlich gilt jedoch, dass die Lebensdauer von Brennstoffzellen von den Betriebszuständen abhängig ist. Lastschwankungen führen zu wechselnden Zellspannungen und damit Stromdichten, die sich schädigend auswirken können [4]. Daher muss der Brennstoffzelle während des Betriebs eine möglichst stabile Leistung abverlangt werden, wozu das Energieverteilsystem der Lage sein muss, wie im Abschnitt 4 bereits dargestellt wurde. Dies ist mit der neu entwickelten Leistungselektronik gewährleistet, die spezifisch auf die verwendete Brennstoffzelle angepasst wurde.

## 6. NEUARTIGER WASSERSTOFFTANK FÜR DROHNENANWENDUNGEN

Bisher werden für Wasserstoffanwendungen in Fahrzeugen ausschließlich CFK-Hochdrucktanks in zylindrischer Bauweise verwendet, die nur bedingt eine bauraumoptimierte Gestaltung des Fahrzeugs zulassen, weshalb im Rahmen des Entwicklungsvorhabens FlyHy mit der Neuentwicklung eines bauraumoptimierten Wasserstofftanks begonnen wurde. Dieser Typ IV CFK-Tank mit Kunststoffliner ist auf einen Speicherdruck von 350 bar ausgelegt und besitzt die Form eines Torus. Durch diese Form kann bei einer Unterbringung unter dem Schwerpunkt der Drohne das Loch des Torus zur Montage massereicher Anbauteile verwendet werden, wodurch eine Optimierung der Gewichtsverteilung ermöglicht wird. Für die Herstellung des Tanks ist eine Wickelmaschine in der Entwicklung, die in der Lage sein wird, die Kohlefasern in genau definierten Bahnen zu verarbeiten. Der projektierte Tank hat ein Speichervolumen von über 11 L, wodurch eine Speicherkapazität von fast 300 g Wasserstoff erreicht wird. Die Entwicklung des bauraumoptimierten Tanks wird ergänzt um die Entwicklung eines anwenderfreundlichen Systems für das Befüllen kleiner Wasserstofftanks. Dieses System wird in Abbildung 7 in einer Prinzipskizze dargestellt. Durch das System soll es Anwendern nach kurzer Einweisung ermöglicht werden, kleinvolumige Wasserstofftanks sicher befüllen zu können, ohne dass eine umfangreiche Sachkenntnis oder eine Schulung erforderlich wären. Das Befüllsystem soll hierbei die folgenden Zielparameter erfüllen:

- Dichtigkeitsprüfung der Befüllleitung,
- Spülung der Leitung mit Wasserstoff, zur Gewährleistung einer hohen Gasreinheit im Tank,
- geführte Druckregelung während des Betankungsvorgangs,
- Temperaturüberwachung und ggf. Gaskühlung,
- ausreichend kompakte Maße für einen einfachen Transport durch zwei Personen,
- Masse kleiner als 50 kg,
- unmissverständliche Anwenderführung durch eine nutzerfreundliche Bedienoberfläche.

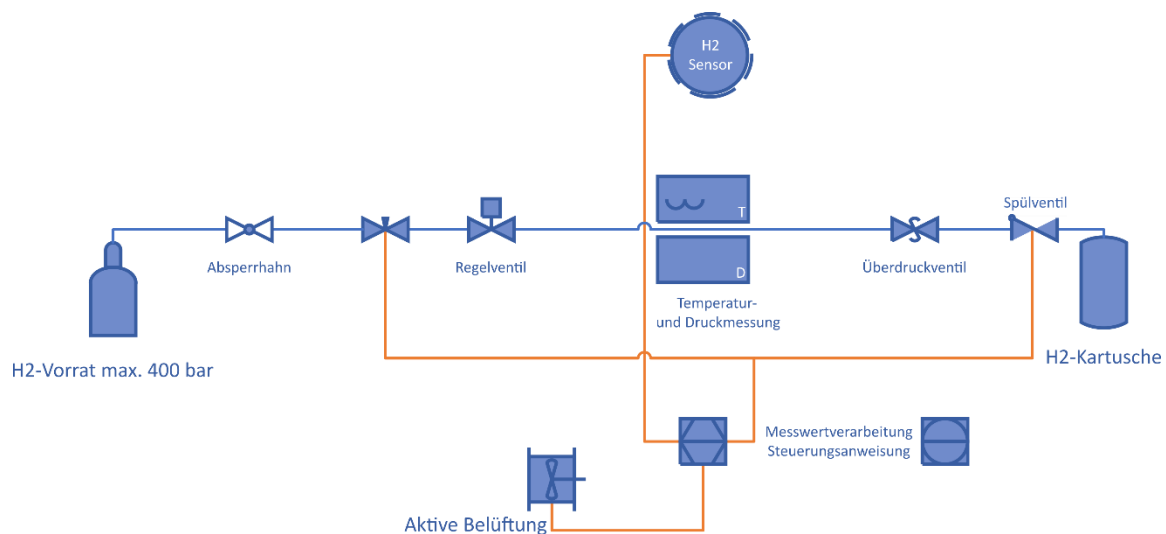


Abbildung 7: Systemdarstellung der Befüllanlage für kleinvolumige H<sub>2</sub>-Tanks

Die technische Umsetzung der Befülleinrichtung erfolgt in Form eines geschlossenen Behältnisses, in das die Wasserstofftanks eingelegt werden können. Nach Anschluss der Befüllleitung am Tank wird das Behältnis geschlossen. Es wird somit ein Raum geschaffen, dessen Wasserstoffkonzentration präzise überwacht werden kann, wobei durch Vermeidung eines großen Totraumvolumens die Detektion geringer Undichtigkeiten ermöglicht wird. Da bei einer Spülung der Befüllleitung unweigerlich kleine Mengen Wasserstoff austreten, soll der Behälter zudem über eine aktive Belüftung verfügen.

## 7. FAZIT UND AUSBLICK

In diesem Beitrag wurde der derzeitige Stand der Entwicklungsarbeiten zur Modifikation einer bisher batteriegetriebenen Hubschrauber-Drohne auf ein hybrides Antriebskonzept aus Brennstoffzelle und Traktionsakkumulatoren mit den entsprechenden Konzepten für die erforderliche Leistungselektronik und einen bauraumoptimierten Wasserstofftank mitsamt Befüllsystem für kleinvolumige Wasserstofftanks aufgezeigt. Die bisher getätigten Systementwicklungen und Umsetzungsarbeiten haben die grundsätzliche Umsetzungsfähigkeit des Umbaus der Drohne bestätigt, und zwar ohne dass die Avionik des bestehenden Versuchsträgers maßgeblich beeinflusst würde. In einem nächsten Schritt geht es darum, die einzelnen neuen Komponenten in den Versuchsträger einzubauen und zunächst am Boden auf ihre gemeinsame Funktionsfähigkeit im Gesamtsystem hin zu testen und zu überprüfen. Sofern dies erfolgreich verläuft, ist für 2023 ein Testflug auf einem Versuchsgelände vorgesehen.

## 8. DANKSAGUNG

Das dieser Veröffentlichung zugrundeliegende Verbundvorhaben FlyHy – Wasserstoffbasierte Drohne mit Wechselträgerkonzept für unterschiedliche Mess- und Arbeitsanwendungen wird durch den Freistaat Thüringen im Rahmen der Richtlinie des Freistaates Thüringen zur Förderung von Forschung, Technologie und Innovation (FTI-Richtlinie) unter dem Förderkennzeichen 2021 FE 9009 gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren. Die geförderten Forschungspartner im Verbundvorhaben FlyHy sind: Bauhaus-Universität Weimar (Koordinator), edm aerotek GmbH, HySON gGmbH, IMG Electronics & Power Systems GmbH, IVK Ingenieur- und Vermessungsbüro Kramer GmbH, Schmuhl FVT GmbH & Co. KG. Die Autoren danken dem Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) sowie der Technischen Universität München für die Möglichkeit, ihre bestehende Hubschrauber-Drohne für den Umbau zum Brennstoffzellenantrieb nutzen zu dürfen.

## 9. LITERATURVERZEICHNIS

- [1] S. Ansar, C. Bänsch und D. Diarra, „DLR,“ 2021. [Online]. Available: [https://www.dlr.de/tt/desktopdefault.aspx/tabid-18038/28640\\_read-74380/](https://www.dlr.de/tt/desktopdefault.aspx/tabid-18038/28640_read-74380/). [Zugriff am 14. 10. 2022].
- [2] B. Remes, „TU Delft,“ 2020. [Online]. Available: <https://www.tudelft.nl/en/2020/tu-delft/tu-delft-maritime-hydrogen-drone-flies-longer-and-greener>. [Zugriff am 14. 10. 2022].
- [3] A. U. Barth, „Auslegung, Simulation, Bau und Flugerprobung eines unbemannten, elektrischen Hubschraubers mit kämmenden Rotoren für extreme Flughöhen,“ Technische Universität München, München, 2020.
- [4] S. Bonitz, *Zur Lebensdauerabschätzung von Brennstoffzellen mit den Methoden der Betriebsfestigkeit*, Clausthal: Technische Universität Clausthal, 2016.