

ENTWICKLUNG EINER BRENNSTOFFZELLENTEST-ANLAGE ZUR CHARAKTERISIERUNG FÜR DEN EINSATZ IN DER LUFTFAHRT

Frederik Jantsch, Toni Schott, Jan Hußlein, Johannes Paulus, Isabell Wirth

Technische Hochschule Würzburg-Schweinfurt, Ignaz-Schön-Straße 11, 97421 Schweinfurt,
Tel.-Nr. +49 9721 940-9902, johannes.paulus@thws.de / frederik.jantsch@thws.de,
www.fm.thws.de

Kurzfassung: Diese Veröffentlichung beschreibt einen modularen Ansatz einer Testanlage zur Bewertung von Brennstoffzellen für Anwendungen im Bereich der Luftfahrt. Es werden die relevanten Einflussfaktoren auf die Brennstoffzelle (BZ) im Flugbetrieb detektiert und im Versuchsstand abgebildet. Die Veröffentlichung geht detailliert auf den Aufbau der Brennstoffzellentestanlage und die Umsetzung der flugspezifischen Betriebsparameter der Brennstoffzelle in der Versuchsanlage ein. Schließlich werden Messungen an einer 50 kW Brennstoffzelle vorgestellt und diskutiert. Der Normalbetrieb der Brennstoffzelle nach Datenblatt des Herstellers wird mit den realen Betriebsbedingungen eines Motorseglers des Typs Taifun 17 des Herstellers Valentin verglichen und die Eignung des Brennstoffzellenantriebssystems für die vorgesehene flugtechnische Anwendung wird dargelegt.

Keywords: Brennstoffzelle, Versuchsstand, Power to mobility, Wasserstoff, Luftfahrt

1 Einleitung

Die Luftfahrt steht seit geraumer Zeit für ihren negativen Einfluss auf die Umwelt in der Kritik. So waren konventionell-betriebene Flugzeuge beispielsweise im Jahr 2018 für einen weltweiten CO₂-äquivalenten Ausstoß von einer Milliarde Tonnen verantwortlich [1]. Eine Prognose der University of Limerick in Irland geht davon aus, dass sich die Zahl bis 2050 beinahe verdoppelt haben könnte, sofern an der Antriebstechnik und der generellen Strategie nichts verändert werde [1]. Der schrittweise Umstieg auf wasserstoffbasierende Antriebe hingegen, zeigt sich hier als vielversprechende Strategie.

Das Potenzial, CO₂-Emissionen mithilfe eines wasserstoffbasierten Flugzeugantriebs einzusparen, ergibt sich nach aktuellem Stand der Forschung kurz- bis mittelfristig vorwiegend für kleine bis mittelgroße Fluggeräte. Es ist vorstellbar, bei Inlands- und Kurzstreckenflügen auf Wasserstoff zu setzen, um eine CO₂-Neutralität in diesem Bereich der Mobilität zu erreichen. Inlandsflüge haben laut [2] einer Statistik aus dem Jahr 2018 den höchsten CO₂-Ausstoß pro Passagier und Kilometer zu verantworten. Eine Reduktion der CO₂-Emissionen durch Einsatz von Wasserstoff, kann daher einen großen Beitrag zum Klimaschutz leisten. So könnte durch eine vollständige Elektrifizierung des genannten Sektors, der CO₂-Ausstoß um 255 g/km pro Person eingespart und damit das CO₂-Äquivalent im Reisesektor um fast 19 % reduziert werden [2].

In dem Projekt Taifun 17H₂ der Technischen Hochschule Würzburg- Schweinfurt (THWS) wird ein Brennstoffzellenantrieb für Kleinflugzeuge entwickelt. Hilfsaggregate und Betriebsparameter (z. B. Befeuchtung, Wasserstoff-, Temperatur-, und Luftmengenregelung, u. a.) werden im Hinblick auf die Zielgrößen Wirkungsgrad und Gesamtgewicht optimiert. Ziel ist es, grünen Strom aus dem Energiesektor im Mobilitätssektor zu nutzen. Dies kann durch Produktion des Kraftstoffes Wasserstoff durch Elektrolyse direkt am Flugplatz umgesetzt werden. Damit wird ein Teil der Luftfahrt unabhängig von fossilen Brennstoffen.

Speziell für die Nutzung von Brennstoffzellen in der mobilen Anwendung, ist es notwendig gezielt relevante Temperaturen, Feuchtigkeit, Drücke anzufahren und Leistungskurven aufzunehmen. Der Brennstoffzellenwirkungsgrad ist z. B. abhängig von Temperatur und Feuchtigkeit, sowie dem Druckverhältnis der Medien [4]. Ein eigens dafür entwickelter Versuchsstand [5,6,7] ermöglicht diese Untersuchungen. Kapitel 2 geht ausführlich auf die Brennstoffzellentestanlage ein. Anschließend werden die Bedingungen der Luftfahrt genauer betrachtet (Kapitel 3), um mit diesen Kriterien eine 50 kW Brennstoffzelle zu untersuchen (Kapitel 4).

2 Brennstoffzellentestanlage

Die Brennstoffzellentestanlage besteht aus drei Modulgestellen, welche in Abbildung 1 zu sehen sind. Dabei handelt es sich um Gestelle aus Aluminiumprofilen, deren Grundflächen dem Format einer Europalette entsprechen. Dies ermöglicht es den Versuchsstand zu transportieren. An einem Leitstand wird mittels LabVIEW Software die Sensorik ausgelesen und dargestellt. Weiterhin wird die Aktorik wie elektronische Ventile, die elektrische Last und die Kühlung gesteuert.



Abbildung 1: Versuchsstand mit drei Gestellen (von links nach rechts): Gasversorgungsgestell, Konditionierungsgestell, Brennstoffzellengestell.

2.1 Modulübersicht

Die drei Module bestehen aus dem Gasversorgungsgestell, dem Konditionierungsgestell und dem Brennstoffzellengestell, Abbildung 1 und Abbildung 2. Es werden für den Betrieb einer Brennstoffzelle Wasserstoff, Luft und Wasser für die Kühlung benötigt.

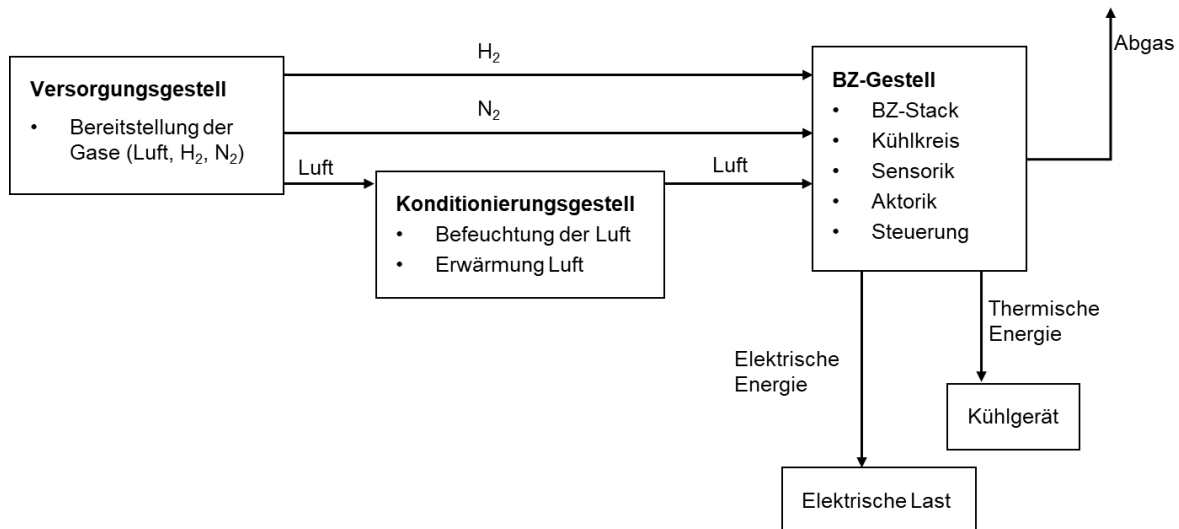


Abbildung 2: Schema des Versuchsstandes mit dem Versorgungsgestell, Konditionierungsgestell und Brennstoffzellengestell [6].

Für die Gasversorgung ist das erste Gestell (Abbildung 2: Versorgungsgestell) verantwortlich, welches auf der linken Seite von Abbildung 1 zu sehen ist. Neben der Bereitstellung von Wasserstoff und gefilterter Luft, versorgt das Gasversorgungsgestell die Brennstoffzelle mit Stickstoff, welcher zur Inertisierung des Anodenkreises verwendet wird. Über zwei Druckminderer können an diesem Gestell die Eingangsdrücke für die Anodenseite (Wasserstoff/Stickstoff) und die Kathodenseite (Luft) eingestellt werden. Um die Sicherheit der Anlage zu gewährleisten, besitzt jedes Gasventil eine Redundanz und alle Leitungen können nach außen entleert werden, ohne die Brennstoffzelle zu belasten. Diese „Waste Line“ wird auch als Entlastung des Systems bei Überdruck verwendet. Die Gase werden anschließend in das Konditionierungsgestell weitergeleitet. Dieses ist für die Befeuchtung und Erwärmung der Luft zuständig. Hierfür wird aktuell ein Gegenstrombefeuchter verwendet. Außerdem bietet das Gestell viel Raum, um weitere Methoden zur Befeuchtung zu testen. Das dritte und letzte Gestell ist der Brennstoffzellenwagen (Abbildung 1 rechts, Abbildung 2 BZ-Gestell). Dieser beinhaltet die Brennstoffzelle und den gesamten primären Kühlkreis.

Im Anodenkreis befindet sich nach der Brennstoffzelle ein Wasserabscheider. Für die Rezirkulation, also Wiederverwendung des nichtverbrauchten Wasserstoffs, ist ein Kompressor (Rezirkulationsgebläse) verbaut. Auf dem Brennstoffzellengestell ist eine Haube zur Absaugung angebracht. Diese sorgt für ein sicheres Abströmen von Gas im Falle einer möglichen Leckage. Der Bereich ist zusätzlich mit einer Gaswarnanlage gesichert.

Nicht in den drei Gestellen implementiert sind die elektrische Last zum Testen der Brennstoffzellen, das Kühlaggregat und der Leitstand mit den LabVIEW Komponenten zum Auslesen der Sensoren.

2.2 Sensorik

In der gesamten Anlage sind 32 Sensoren verbaut, welche insgesamt 58 Messgrößen zur Verfügung stellen. Die Differenz zwischen Sensoranzahl und Summe der Messgrößen ergibt sich neben den verbauten Multisensoren, aus sogenannten virtuellen Sensoren, also Größen, welche softwareseitig unmittelbar aus Messwerten berechnet werden. Ein Beispiel hierfür ist das Verhältnis von Wasserstofffluss zu Wasserstoffbedarf, also

$$\lambda_H = \frac{\dot{m}_{H,tats}}{\dot{m}_{H,theo}}$$

Die Gasversorgung (Gestell 1) enthält sicherheitsrelevante Drucksensoren, um eine Gasunterversorgung während des Betriebs zu vermeiden oder einen Überdruck in der Brennstoffzelle zu verhindern.

Im Konditionierungsgestell befinden sich ein Massenstromsensor und zwei Feuchtigkeitssensoren. Diese dienen der Überwachung der relativen Feuchtigkeit im Kathodenkreis am Ein- und Ausgang des Brennstoffzellenstapels und können zudem für die Untersuchung des Einflusses der beiden Größen auf die BZ-Leistung genutzt werden. Die im Brennstoffzellengestell verbauten Messstellen werden im Folgenden je Medienkreis dargestellt.

Im Kühlkreislauf befinden sich zwei Temperatursensoren zur Bestimmung der Differenz zwischen der Vor- und Nachlauftemperatur (Spreizung), ein Leitwertsensor, um ein Kurzschließen der Zellen über den Kühlkreislauf zu verhindern, ein Drucksensor und ein Durchflusssensor für die Regelung. Der Anodenkreis hat einen großen Einfluss auf die Sicherheit der Anlage und enthält daher die meisten Sensoren. Beispielhaft für die Sensorik und Aktorik in der Anlage, zeigt Abbildung 3 diesen Kreis des Brennstoffzellengestells. Dabei sind die rein sicherheitsrelevanten Komponenten in Rot dargestellt. Hierfür befinden sich am Eingang des Gestells ein Kombisensor für Temperatur, Druck, Feuchtigkeit und Konzentration und ein Durchflusssensor (MES_14 und MES_15 in Abbildung 3). Nach Zuführung des Rezirkulationskreises befindet sich ein Kombi- und ein Durchflusssensor (MES_17 und MES_18) sowie zusätzlich ein Drucksensor für die Sicherheitseinrichtung (MES_16).

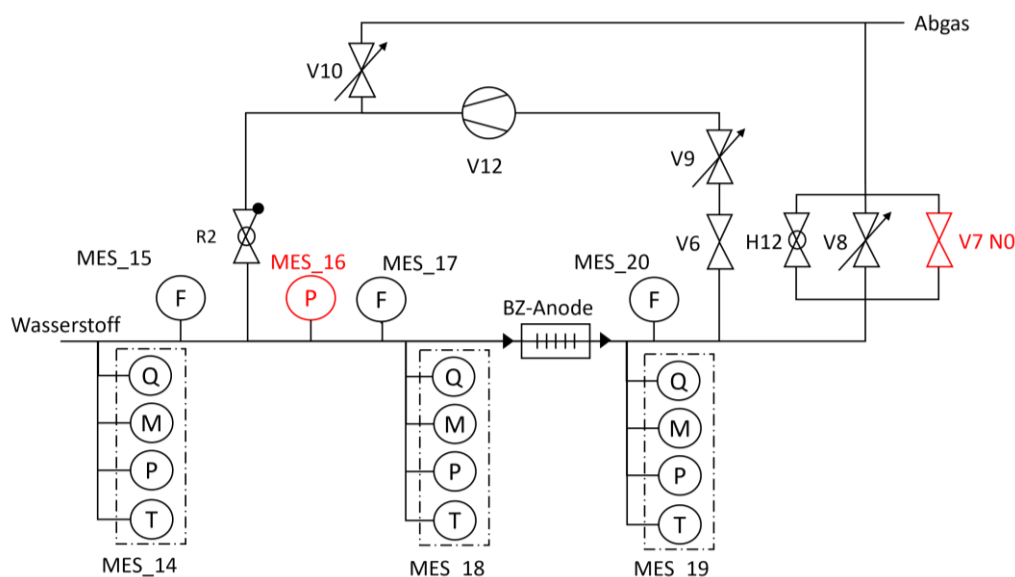


Abbildung 3: Sensor- und Aktorplan des Anodenkreises im Brennstoffzellengestell, rein Sicherheitsrelevantes in Rot [6].

Nach der Brennstoffzelle ist ein dritter Kombisensor und ein dritter Durchflusssensor montiert (MES_19 und MES_20). Die Durchflusssensoren werden benötigt, um den Wasserstoffverbrauch zu bestimmen und den λ_H -Wert zu regeln.

3 Bedingungen in der Luftfahrt

Der Betrieb einer Brennstoffzelle unter kontrollierten Laborbedingungen und in mobilen Anwendungen unterscheiden sich deutlich. Das liegt daran, dass die beiden Systeme nach unterschiedlichen Gesichtspunkten optimiert werden. So gilt es bei mobilen Anwendungen den Aufbau so kompakt und leicht wie möglich zu gestalten, während im Labor das Gewicht und der Formfaktor, der Robustheit und Präzision weichen. Bei der Optimierung eines Brennstoffzellensystems für den Einsatz in einem Flugzeug gilt es umso mehr, Gewicht zu sparen. Dies wird mithilfe einer minimalistischen Auslegung der Leitungen und Komponenten erreicht. Im Zuge dessen wird die Liste verwendeter Sensoren auf ein Minimum reduziert, ohne dass es einen negativen Einfluss auf den Betrieb hat.

Im Antriebsstrang eines Motorseglers muss die Brennstoffzelle in einem sehr weit gesteckten Betriebsfenster arbeiten können. Dabei spielen äußere Einflüsse wie die Temperatur, der Druck und die Feuchtigkeit eine große Rolle.

Für die Erprobungsflüge weniger, jedoch für den späteren Betrieb, ist die Außentemperatur und die damit einhergehende Herausforderung, die Brennstoffzelle auf eine geeignete Betriebstemperatur zu bringen, von Relevanz. Eine geeignete Temperatur für die Inbetriebnahme wäre dabei beispielsweise 50 °C [5]. Hierfür muss das System bei niedrigen Außentemperaturen vorgeheizt werden. Neben der Vorheiztemperatur haben die äußerlichen Bedingungen einen großen Einfluss auf die Befeuchtung und die Temperatur des Kathodenkreises. Niedrige Temperaturen können beispielsweise zur Kondensation der befeuchteten Luft führen.

Ebenfalls einen Einfluss auf den Betrieb haben die Flughöhe und die Feuchtigkeit. Neben Temperatur- und Feuchtigkeitsänderung ändert sich bei zunehmender Flughöhe die Luftdichte und damit der Umgebungsdruck. Die Problematik dabei ist die Sauerstoffversorgung, da es für den benötigten Massenstrom eines höheren Volumenstroms bedarf.

In Tabelle 1 werden daher, zusammenfassend, flugtypische Bedingungen aufgelistet. Bei den aufgeführten Zahlenwerten handelt es sich um Annahmen, welche sich im Rahmen der zulässigen Herstellerangaben befinden. Inwiefern die Untersuchung dieser Extremwerte notwendig ist, oder ob diese vermieden werden können (z.B. Erwärmung BZ im Betrieb) wird in Kapitel 4 diskutiert.

Tabelle 1: Flugtypische Bedingungen für ein Leichtflugzeug auf der angestrebten Reiseflughöhe von 10.000 ft.

Umgebungstemperatur in °C	$-10 \leq T \leq 40$
maximale Flughöhe	$FL100 (10.000 \text{ ft}) \approx 3.048 \text{ m}$
typischer Luftdruck bei FL100	$0,697 \text{ bar}(a) [3]$
Luftdichte bei FL100	$0,9047 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} [3]$

4 Untersuchung des Kaltstartverhaltens einer PEM-Brennstoffzelle

Die Betriebsbedingungen für die Brennstoffzelle differieren vom stationären Laborbetrieb (Versuch „Labor“) zum Flugbetrieb (Versuch „Flugzeug“) u.a. bei der Starttemperatur auf dem Flugfeld. Erfahrungsgemäß wird die Brennstoffzelle idealerweise konstant bei 70 °C betrieben [5]. Dies ist in der Luftfahrt aufgrund von Gewichts- und Bauraumbeschränkungen kaum möglich. Da ein Durchlauferhitzer eine zusätzliche Komponente im Flugzeug darstellt. Aus diesem Grund gilt es im Rahmen der Untersuchungen die Möglichkeit eines Kaltstarts zu untersuchen. Hierbei wird sich mit der Notwendigkeit des Vorheizens im Flugzeugbetrieb befasst. Dieses soll die Brennstoffzelle vor Inbetriebnahme in ein akzeptables Betriebsfenster bringen und zugleich die Kondensation der Medienströme im Inneren der Zellen verhindern.

4.1 Versuchsparameter

Die Versuchsparameter für die Starttemperatur der Brennstoffzelle im Versuch „Flugzeug“, ergeben sich aus Tabelle 1. Das Flugzeug muss bei Außentemperaturen von bis zu -10°C betrieben werden können. Dabei handelt es sich um eine typische Umgebungstemperatur auf der angestrebten Reiseflughöhe von 10.000 ft. Ausgehend von der typischen Temperaturabnahme bei zunehmender Höhe (0,65 K pro 100 m) ergibt dies für besagte Flughöhe und Minimaltemperatur eine Außentemperatur von ca. 10°C auf dem Boden. Dies ist die Starttemperatur im Versuch „Flugzeug“.

Im Rahmen der Vorflugkontrolle wird der Antrieb getestet, indem bei angezogener Parkbremse der Propeller annähernd auf Maximaldrehzahl beschleunigt wird. Um eine mit dem konventionellen Antrieb vergleichbare Dauer der Inbetriebnahme zu erreichen, soll das Brennstoffzellensystem der Taifun in maximal acht Minuten die Startleistung erreichen. Die angestrebte Betriebstemperatur von 70 °C wird nach besagter Einlaufdauer nicht zwangsläufig erreicht.

Tabelle 2: Betriebsparameter der Brennstoffzelle in Versuchen „Labor“ und „Flieger“.

Stromstärke I in A	$1 < I < 180$
λ_{Luft}	$\approx 2,2$
rel. Luftfeuchtigkeit in %	≈ 70
\dot{m}_{Luft} in $\frac{\text{NL}}{\text{min}}$ bei $I < 60$	300
\dot{m}_{Luft} in $\frac{\text{NL}}{\text{min}}$ bei $I > 60 \dots 275$	300 ... 2000
$p_{\text{Wasserstoff}}$ in bar(a)	$\approx 1,5$
p_{Luft} in bar(a)	$\approx 1,4$
Starttemperatur T_{Labor} in °C	70
Starttemperatur T_{Flugzeug} in °C	10

Vor der Aufnahme der Kennlinienwerte der BZ, wird das Brennstoffzellensystem auf die definierten Betriebsparameter in Tabelle 2 konditioniert. Dazu zählen die Mediendrücke, die Feuchtigkeit und der Luftmassenstrom. Es handelt sich sowohl bei der Feuchtigkeit als auch bei den angegebenen Mediendrücken um Richt- bzw. Zielwerte. Eine exakte Angabe ist aufgrund von Messungenauigkeiten und manuellen Ventilen nicht möglich. Die Genauigkeit wird künftig durch softwaregesteuerte Ventile für den Druck verbessert. Des Weiteren muss für eine feinere Auflösung der Gegenstrombefeuchter automatisiert werden. Der Luftmassenstrom ist in beiden Versuchen im Vergleich zum regulären Brennstoffzellenbetrieb um ca. 100 NL/min höher gewählt, um eine Kondensation in der BZ zu vermeiden. Dies ermöglicht eine reine Betrachtung des Temperatureinflusses.

In den Versuchen wird nach Erreichen der Starttemperatur der Strom über die angeschlossene programmierbare elektrische Last in konstanten Schritten erhöht, um das Startleistungsziel von ca. 20 kW zu erreichen. Anschließend wird eine festgelegte Stromkennlinie abgefahren. Diese startet mit 1 A für 10 Sekunden, bevor die Stromstärke stetig mit 0,5 A pro Sekunde angehoben wird.

Aus den Messergebnissen kann die generelle Machbarkeit durch evtl. Zusammenbrüche der Zellspannungen untersucht werden. Weiterhin kann verglichen werden, ob ein Vorheizen sich positiv auf die Effizienz, die Stabilität und die Dauer der Inbetriebnahme auswirkt. Der Vergleich der beiden Untersuchungen bezieht sich auf den Bereich ab 60 A, da im Flugzeugbetrieb die Nebenaggregate – wie der Kompressor – ebenfalls versorgt werden müssen. Dies führt zu einem Mindeststrom von 60 A.

4.2 Messergebnisse Versuch Labor

Die Temperaturgrenzen für die Einlasstemperatur (Vorlauftemperatur) des Kühlkreislaufes der verwendeten PEM-Brennstoffzelle liegen laut Herstellerangaben bei -30 bis +85 °C. Während des Betriebs der Brennstoffzelle darf die Spreizung 12 K nicht überschreiten. Außerdem darf die Nachlauftemperatur der Brennstoffzelle nicht über 90 °C liegen. Laut Hersteller ist ein Vorheizen des Systems nicht zwingend erforderlich, kann sich aber positiv auf die Effizienz des Systems auswirken.

Außerdem ist es für Pilot*innen eines Flugzeugs erstrebenswert, die volle Betriebsbereitschaft des Antriebs schnellstmöglich zu erreichen. Im Rahmen vorhergehender Tests, wurde eine Betriebstemperatur von ca. 70 °C als erstrebenswert festgestellt. Auf diese Temperatur wird das System vorgeheizt, bevor die zuvor festgelegte Stromkennlinie abgefahren wird. Diese startet mit 1 A für 10 Sekunden, bevor die Stromstärke stetig mit 0,5 A pro Sekunde angehoben wird. Wie in Abbildung 4 zu sehen, werden 10 A, 60 A und 120 A, also 1,45 kW, 7,8 kW und 15 kW jeweils für 30 Sekunden konstant gehalten, um mögliche Schwankungen im System zu stabilisieren.

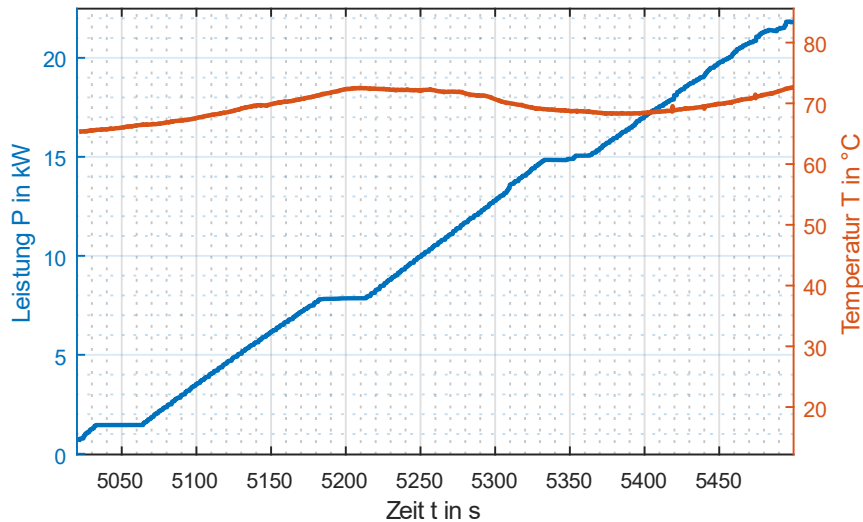


Abbildung 4: Zeitabhängige Leistung (blau) und Temperatur (orange) bei etwa 70 °C Starttemperatur.

Die Brennstoffzelle stellt bei den definierten Strömen und deren Dynamik ohne Einschränkungen die Leistung bereit. Abbildung 4 zeigt weiterhin ein Schwanken der Vorlauftemperatur um den Wert 70 °C mit einem Delta von 4,8 °C in Orange. Diese Schwankung ist ein Resultat aus der schnellen Änderung der Wärmeleistung der Brennstoffzelle in Verbindung mit der implementierten Kühlregelung. Die 70 °C Brennstoffzellentemperatur und der um 100 NL/min höher gewählte Luftstrom führen zu einer trockeneren Kathodenluft. Dies kann im Dauerbetrieb im Labor zum Austrocknen der Brennstoffzelle führen und stellt ein Sicherheitsrisiko dar. Während des Versuchs lag die relative Luftfeuchtigkeit im Schnitt bei 70%.

4.3 Messergebnisse Versuch Flugzeug

Die Brennstoffzelle wird vor Beginn der Messung auf eine Vorlauftemperatur von ca. 10 °C gebracht. Anschließend wird die zuvor festgelegte Stromkennlinie abgefahren (siehe Abbildung 5).

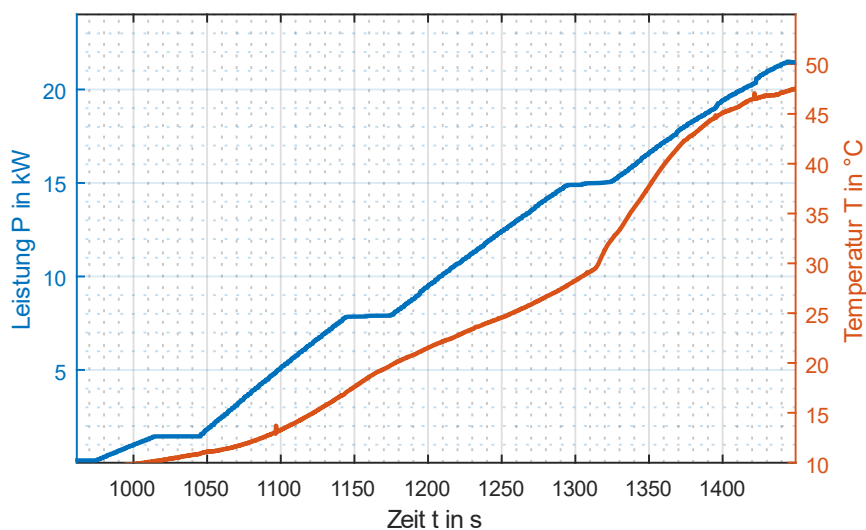


Abbildung 5: Leistung und Temperatur über Zeit mit 10°C Starttemperatur.

Es dauert ca. 7,5 Minuten, um den Betriebspunkt von 20 kW zu erreichen. Dies ist vor der acht Minuten Marke. Bei Erreichen der acht Minuten, wurde eine Vorlauftemperatur von ca. 48 °C

gemessen. Aufgrund des absichtlich höher gewählten Luftmassenstroms kam es nicht zu einer Flutung der Brennstoffzelle und das System konnte stabil betrieben werden. Die grundsätzliche Machbarkeit konnte hiermit bewiesen werden.

4.4 Vergleich der Messungen

Im Flugzeug und im Laborbetrieb läuft die Brennstoffzelle stabil und kann die angeforderte Leistung bereitstellen. Die zeitliche Differenz bis zu dem Erreichen des 20 kW Betriebspunkts liegt bei 4,4 Sekunden. Je höher die Effizienz, desto früher wird die Zielleistung erreicht. Im Flugzeugbetrieb ist dies zu einem früheren Zeitpunkt der Fall, da die Effizienz bei den Versuchsparametern höher ist (Abbildung 6, links). Dieses Phänomen könnte auf das Feuchtigkeitsmanagement bei erhöhten Temperaturen und den angepassten Luftmassenstrom zurückzuführen sein. Die Herausforderung hierbei ist, bei der hohen Temperatur das Feuchtigkeitsniveau in der BZ-Membran aufrecht zu erhalten, während in der BZ kaum Wasser produziert wird. Des Weiteren ist zu erkennen, dass sich die Kurven im Bereich des Stromplateaus angleichen (Abbildung 6, rechts).

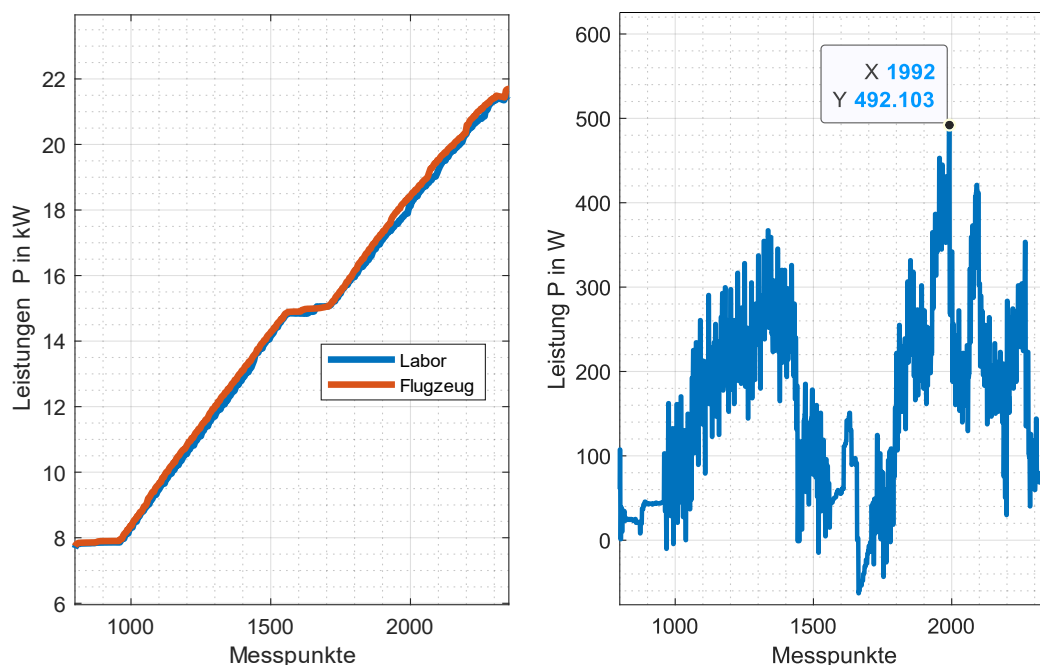


Abbildung 6: Vergleich der Leistungskennlinien, sowie Verlauf der Leistungsdifferenz zwischen „Labor“- und „Flugzeug“-Start mit der maximalen Abweichung von 492 W bei 150 A also ca. 18 kW.

Die Kennlinie kann weiter verbessert werden, indem eine höhere Stromrampe (aktuell 0,5 A/s) verwendet wird. Weiter können die Stabilisierungsintervalle verkleinert oder gar ausgelassen werden, da diese einzig die Dynamik der Testanlage kompensieren. Im realen Flugzeugbetrieb ist mit einer signifikant höheren Dynamik zu rechnen, weshalb die Anlaufzeit weiter verringert werden kann.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Mit dem Projekt Taifun 17H₂ möchte die THWS einen Beitrag zur Klimaneutralität in der allgemeinen Luftfahrt leisten. Dabei handelt es sich um das Vorhaben, einen konventionell betrie-

benen Motorsegler auf einen wasserstoffbasierten Antrieb umzubauen. Hierfür wird eine Testanlage entwickelt und gebaut, um Untersuchungen für den Einsatz von Brennstoffzellen in der Luftfahrt zu ermöglichen. Die Versuchsanlage besteht aus drei Modulgestellen: der Gasversorgung, der Konditionierung und des Brennstoffzellensystems. Diese ermöglichen das gezielte Einstellen von Medienströmen, sowie deren Feuchtigkeit und Temperaturen. Die Sensorik ermöglicht einen detaillierten Einblick in die Stoffströme. Im späteren mobilen Betrieb wird die Sensorik und Konditionierung auf ein Minimum reduziert, um Gewicht einzusparen. Aus diesem Grund wird im ersten Schritt getestet, ob es für den Betrieb der Brennstoffzelle im Flugzeug notwendig ist, diese vor Inbetriebnahme zu temperieren. Bei den durchgeführten Tests lag die Effizienz des BZ-Systems unter „Flugzeug“-Bedingungen auf einem höheren Niveau. Um die Aussagekraft der Messungen zu erhöhen, wird diese Messung wiederholt. Von einer größeren Anzahl an Wiederholungen wird jedoch abgesehen, da der finanzielle Aufwand beim Betrieb der Brennstoffzelle, sowie die Menge an zu untersuchenden Phänomenen zur Charakterisierung der BZ für den Einsatz im Motorsegler hoch sind.

Wie die Untersuchung gezeigt hat, ist es nicht zwangsläufig notwendig die Brennstoffzelle vollständig oder explizit vorzuheizen. Beim Hochfahren der Brennstoffzelle wird eine Temperatur von ca. 48 °C erreicht. Aufgrund der Erkenntnisse über die Stabilität des BZ-Systems aus den durchgeführten Untersuchungen, kann die Stromkennlinie für das Hochfahren der BZ deutlich progressiver gewählt werden. Hierdurch kann die Anlaufzeit verringert werden, wodurch jedoch eine geringere Systemtemperatur bei Erreichen des Betriebspunktes 20 kW zu erwarten ist.

Weiterhin konnte im Rahmen der Messungen die Funktion und Sicherheit des für den Einsatz im Flugzeug reduzierten Messaufbaus nachgewiesen werden. Eine Validierung im Flugzeug erfolgt mit Beginn der Ground-Tests. Abschließend lässt sich sagen, dass die Testergebnisse zufriedenstellend sind. Das Gewicht des Flugzeugs konnte reduziert werden.

6 Referenzen

- [1] Wyman, O., Projected CO₂ emissions from the aviation industry between 2022 and 2050, by scenario, <https://www.statista.com/statistics/1189613/projected-co2-emissionaviation-world-wide/>, Limerick (Aufgerufen 06 Juli 2023)
- [2] UK Department for Business, Energy and Industrial Strategy, Carbon footprint of select modes of transport per kilometer of travel in 2018, <https://www.statista.com/statistics/1185559/carbon-footprint-of-travel-per-kilometer-by-mode-of-transport/>, London (Zugriffstag: 06.05.2023)
- [3] Deutscher Wetterdienst, https://www.dwd.de/DE/service/lexikon/begriffe/S/Standardatmosphaere_pdf.pdf?__blob=publicationFile&v=3, Offenbach (Zugriffstag: 15.07.2023)
- [4] Kurzweil, Peter (2003), Brennstoffzellentechnik (3. Ausgabe), Springer Verlag, ISBN 978-3-658-14934-5
- [5] Jantsch, F., Inbetriebnahme und Optimierung eines Brennstoffzellenversuchsstandes sowie experimentelle Analyse des Verhaltens einer PEM-Brennstoffzelle, 2023, Schweinfurt
- [6] Hußlein, J., Entwicklung, Implementierung und Inbetriebnahme einer Software zur Regelung und Messwerterfassung eines Brennstoffzellenleistungsprüfstandes mittels LabVIEW, 2023, Schweinfurt
- [7] Schott, T., Konzeption, Entwicklung und konstruktive Gestaltung eines Brennstoffzellenprüfstandes, 2021, Schweinfurt