

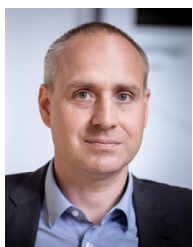
Modellbasierte Entwicklung

Experimentelle Erprobung von Sensortechnologien für Tanks

DIPL.-ING. KASTRIOTE GUTIQ, PROF. DR.-ING. KAY KOCHAN - Hochschule für angewandte Wissenschaften Hamburg



Dipl.-Ing. Kastriote Gutiq ist Maschinenbauingenieurin und forscht derzeit im Projekt PRECISE mit dem Ziel der Promotion.



Prof. Dr.-Ing. Kay Kochan ist seit 2021 als Professor im Gebiet der Flugzeugsysteme und der angewandten Mechatronik an der HAW Hamburg tätig.

» Flüssiger Wasserstoff als Energieträger in der emissionsarmen Luftfahrt

Die Nutzung von flüssigem Wasserstoff (LH2) als alternativer Flugzeugkraftstoff in der Luftfahrtindustrie bietet großes Potenzial für umweltfreundlichere und nachhaltigere Flugreisen. AIRBUS plant daher, bis 2035 eine neue Flugzeuggeneration zu entwickeln [1] (Bild 1). Hierfür ist die präzise Füllmengenmessung in Flüssigwasserstofftanks ein relevanter Technologiebaustein. Die besonderen Herausforderungen beim Messen der Füllmenge resultieren aus den extrem niedrigen Temperaturen, der temperaturabhängigen Dichte des Wasserstoffs, der komplexeren Tankisolierung, dem Boil-off-Effekt, der notwendigen Materialkompatibilität sowie die Anforderungen an Sicherheit und Zuverlässigkeit des gesamten Sensorsystems.

In diesem Kontext arbeitet das Luftfahrtforschungsprojekt PRECISE der Hochschule für Angewandte Wissenschaften (HAW) Hamburg und der AUTOFLUG GmbH daran, ein Kraftstoffsensorsystem für Flüssigwasserstofftanks zu entwickeln. Es werden verschiedene Messverfahren untersucht, darunter kapazitive, ultraschallbasierte, resistive und faseroptische Ansätze. Jedes dieser Verfahren hat Vor- und Nachteile, insbesondere hinsichtlich der Genauigkeit und der Kosten.

Die Bedeutung der Kraftstoffsensoren für Flugzeuge.

Die Kraftstoffmenge wird in Flugzeugen als Masse des Kraftstoffs angegeben. Die Masseangabe ist dabei proportional zur Energiemenge für die Vortriebserzeugung im Triebwerk und damit ein Maß für die Reichweite des Flugzeugs. Deutlich wird dies anhand der Gleichung einer idealen und vollständigen Verbrennung:

$$Q = m \cdot H \quad (1)$$

Dabei steht Q für die freigesetzte Energie, m für die Masse des umgesetzten Kraftstoffs und H für den spezifischen Heizwert [2].

Die Masse m wiederum ergibt sich aus dem Produkt von Dichte ρ und Volumen V . Wie bei Kerosin ist auch die Dichte $\rho(\vartheta, p)$ des Wasserstoffs abhängig von Temperatur und Druck. Das Volumen kann über einen Füllhöhsensor, die Tankgeometrie und die Fluglage ermittelt werden. Ein Kraftstoffsensorsystem für Flüssigwasserstofftanks muss daher mindestens die Tankfüllhöhe und die Dichte des Kraftstoffs messen.

Herausforderungen bei der Entwicklung eines neuen Kraftstoffsensorsystems.

Die Entwicklung eines Kraftstoffsensorsystems für Flüssigwasserstofftanks großer Verkehrsflugzeuge erfordert die Berücksich-



1 ZEROe-Demonstrator mit sichtbaren Wasserstofftanks (© AIRBUS).

tigung der Certification Specifications CS-25 der EASA [3]. Diese Spezifikationen definieren die Anforderungen für die Zulassung von Luftfahrzeugen und ihrer Systeme und ist von entscheidender Bedeutung für die Sicherheit und Zuverlässigkeit. Weitere zu berücksichtigende Anforderungen sind in ETSO-C55a der EASA [4] und der SAE Aerospace Standard SAE AS 405D [5]. All diese Dokumente beziehen sich auf die heute verwendeten Kraftstoffe.

Für die Messung der Füllmenge in Flüssigwasserstofftanks sind aufgrund der Eigenschaften von LH2 hingegen folgende Faktoren zu berücksichtigen:

Extrem niedrige Temperatur: LH2 wird bei Temperaturen von -253 °C und darunter gelagert. Diese Temperaturen können die Leistung herkömmlicher Sensoren beeinträchtigen. Es werden daher Technologien benötigt, die bei extrem niedrigen Temperaturen zuverlässig funktionieren.

Dichteänderungen: Die Dichte von Flüssigwasserstoff ändert sich erheblich mit der Temperatur. Bei Änderungen der Temperatur im Tank kann es in der Folge zu Volumenänderungen kommen, die die Messungen beeinflussen. Daher müssen die Messgeräte diese Dichteänderungen berücksichtigen [6].
Wärmebrücken: Aufgrund der niedrigen Temperaturen des LH2 müssen Wärmebrücken in der Tankisolierung vermieden werden. Wärmebrücken können zur Kondensation von Luftfeuchte bis hin zur Verflüssigung von Sauerstoff an der Tankaußenseite führen. Obwohl diese Kondensation die Messungen nicht direkt beeinflusst, kann sie potenziell problematisch für das Flugzeug werden.

Boil-off: LH2 unterliegt bei Erwärmung einem kontinuierlichen Verdampfungsprozess, der als „Boil-off“ bezeichnet wird. Dieser Vorgang kann den Druck im Tank erhöhen. Es ist daher nötig, ihn zu überwachen und in die Messungen mit einzubeziehen [7].

Sicherheitsrisiken: Wasserstoff ist ein brennbares Gas. Bei der Handhabung und Lagerung besteht das Risiko von Lecks. Die verwendeten Messverfahren dürfen daher nicht zur Entstehung von Gefahrensituationen beitragen. Dies erfordert, dass Sicherheitsmaßnahmen für den späteren Betrieb und die Wartung der Messsysteme vorgesehen werden [8].

Materialkompatibilität: Wasserstoffmoleküle können in andere Werkstoffe eindringen. Eine daraus resultierende Wasserstoffversprödung kann zu Korrosion und Undichtheiten führen. Die verwendeten

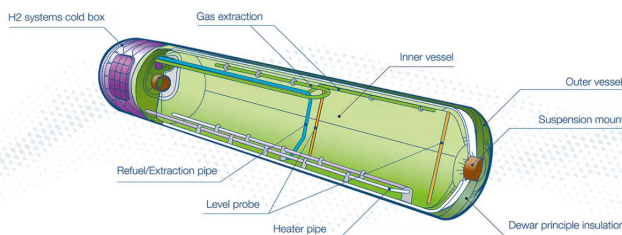
Messsensoren müssen daher aus Materialien bestehen, die gegenüber Wasserstoff inert sind [9].

Tankgeometrie: LH2-Tanks werden wahrscheinlich im Heck über den gesamten Querschnitt des Rumpfes integriert. Sie würden damit erheblich höher als konventionelle Kerosintanks im Flügel sein. Die Füllhöhen Sensoren müssten daher deutlich länger sein als bisher. Dies geht einher mit neuen Anforderungen für die Integration, Wartbarkeit und Festigkeit.

Die genannten Faktoren verdeutlichen die komplexe Aufgabe der Entwicklung eines Kraftstoffsensorsystems für den LH2.

Lösungsansätze zur Messung der Tankfüllhöhe. Bild 2 veranschaulicht das Konzept eines Flüssigwasserstofftanks für die ersten Tests von wasserstoffbetriebenen Triebwerken bei AIRBUS. Die Tankfüllhöhe soll hier über zwei Sensoren gemessen werden. Für diese Messaufgabe kommen verschiedene Messprinzipien infrage. Idealerweise sollte die Sensortechnologie dabei eine minimale Anzahl kostengünstiger Sensoren ohne elektrische Komponenten umfassen. Darüber hinaus sollte das Messverfahren hochpräzise sein und einen wartungsfreien Betrieb ermöglichen. Im Rahmen des Forschungsprojekts werden unter diesen Gesichtspunkten verschiedene Messverfahren erforscht und verglichen, um diese Anforderungen zu erfüllen.

Liquid H₂ tank



2

AIRBUS

Kapazitives Messverfahren. Das kapazitive Messverfahren basiert auf dem Prinzip eines teilweise in Flüssigkeit eingetauchten, typischerweise zylindrischen Kondensators. Durch die unterschiedlichen Dielektrizitätskonstanten des LH2 und des umgebenden gasförmigen Wasserstoffs ändert sich die Kondensatorkapazität. Diese kann elektrisch gemessen werden. Die starke Abhängigkeit der Dielektrizitätskonstante von Temperatur und Dichte schränkt deren Messgenauigkeit allerdings ein, sodass zur Bestimmung der Dielektrizitätskonstante im LH2, analog zur

2 Konzeptskizze eines Flüssigwasserstofftanks (© AIRBUS).

Messung in Kerosin, der Einsatz eines Kompensators erforderlich ist.

Das Verfahren, welches heute Stand der Technik für Kerosintanks ist, findet bei AIRBUS, Boeing und anderen Flugzeugherstellern Anwendung [10]. Der Projektpartner AUTOFLUG GmbH fertigt solche kapazitiven Kraftstoffsensoren für Kerosintanks (Bild 3). Der hier dargestellte Sensor wird von unten in den Tank eingebaut. Die elektrischen Steckverbindungen am Flansch gewährleisten eine kontinuierliche Füllstandsmessung und das Auslesen des integrierten optischen Levelsensors. Im Rahmen des Projekts soll dieses Messprinzip zuerst auf die Anwendung in flüssigem Wasserstoff übertragen werden sowie dessen Zulassbarkeit untersucht werden.



Ultraschallbasierte Messverfahren. Dieses Messprinzip findet neben dem kapazitiven Messverfahren heute bereits in Kerosintanks Anwendung [10]. Das Ultraschallverfahren misst die Höhe des Flüssigkeitsstands über die Reflexion akustischer Wellen. Die Temperaturabhängigkeit der Schallgeschwindigkeit und des Reflexionskoeffizienten sowie die Entstehung von Blasen durch Turbulenzen und druckabhängige Ausgasung machen die Messung bereits in Kerosintanks schwierig. Wie sich diese Faktoren auf die Messung in LH2-Tanks auswirken, ist derzeit nicht bekannt. Die Probleme aufgrund der kryogenen Temperaturen und des spröden Materialverhaltens müssten bei der Entwicklung einer Ultraschallwandlersonde zum Einbau in einen LH2-Tank gelöst werden.

Resistive Messprinzipien auf Basis von Supraleitung oder Halbleitern. Resistive Messprinzipien auf Basis der Temperaturabhängigkeit können über Halbleiter [11] oder supraleitende Materialien [12] realisiert werden. Der Vorteil resistiver Prinzipien gegenüber dem kapazitiven Verfahren sind die lineare Kennlinie und das Einsparpotenzial beim Gewicht. Ein einfaches resistives Messverfahren funktioniert über die Temperatur

des Wasserstoffs auf Basis von Siliziumdioden. Hierbei wird die Temperaturabhängigkeit des p-n-Übergangs einer Diode genutzt und so die Tankfüllhöhe erfasst. Der Vorteil dieses Verfahrens ist die bereits vorliegende Erfahrung in der Raumfahrt. Nachteilig ist, dass die Füllhöhe nur an diskreten Punkten (1 Messpunkt pro Siliziumdiode) gemessen werden kann.

Ein weiteres resistives Messverfahren basiert auf der Verwendung von supraleitendem Magnesiumdiborid als Widerstandsmaterial. Dieses Material kann bei extrem niedrigen Temperaturen, unterhalb von $-234,15^{\circ}\text{C}$, seinen Widerstand schlagartig ändern. Es zeichnet sich dadurch aus, dass es in diesem Zustand keinen elektrischen Widerstand aufweist, was es von herkömmlichen Materialien unterscheidet. Die Veränderung des Widerstands dieses Materials wird durch elektrische Messungen erfasst und quantifiziert.

Beide Verfahren erfordern die Einleitung elektrischer Ströme in den Tank und stellen daher keine Ideallösung dar.

Faseroptische Messprinzipien. Das faseroptische Messprinzip misst die Temperatur indirekt entlang einer Glasfaser. Es müssen hierfür keine elektrischen Ströme in den Tank eingeleitet werden. Dies bietet Vorteile für die Zuverlässigkeit und die Zulassung. Die Temperaturunterschiede werden durch Längenänderung der Faser und Rückstreuung des Lichts an Interferenzfiltern innerhalb spezieller Glasfasern gemessen. Faseroptische Verfahren sind gegebenenfalls kombinierbar mit Ansätzen für das Structural Health Monitoring des Tanks, wenn die Fasern direkt in die Struktur eingearbeitet werden. Im Projekt soll dies analysiert und bewertet werden. Das Verfahren bietet jedoch ebenfalls nur Messwerte an diskreten Punkten und stellt nach jetzigem Kenntnisstand zudem die mit Abstand teuerste Lösung dar.

Messung der Wasserstoffdichte. Ergänzend zur Tankfüllhöhe muss immer die temperaturabhängige Dichte gemessen werden. Dies kann über Densitometer und Temperatursensoren erfolgen, wie sie heute schon Anwendung in Kerosintanks finden. Hier stellen sich jedoch Fragen hinsichtlich des Einflusses der kryogenen Umgebungsbedingungen, insbesondere beim Densitometer. Dieses basiert auf einer vibrierenden Platte, die in Abhängigkeit von der Massebelegung unterschiedlich stark schwingt. Messprinzipien auf Basis schwingender Strukturen sind aufgrund des spröden Materialverhaltens bei tiefkalten Temperaturen jedoch schwer zu realisieren.

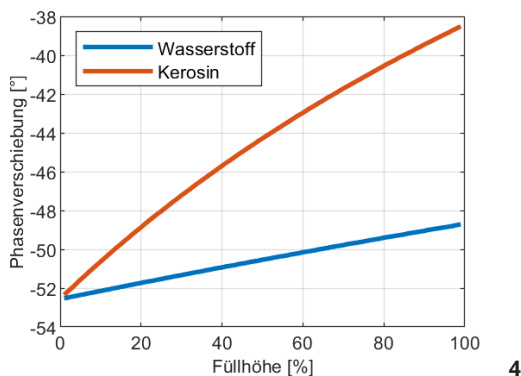
3 Kapazitiver Kraftstoffsensor für Kerosintanks mit optischem Levelsensor (© AUTOFLUG GmbH)

Erste modellbasierte Untersuchungen des kapazitiven Messverfahrens.

Im Rahmen des Projekts an der HAW Hamburg liegt der Schwerpunkt auf der konzeptionellen Lösungsentwicklung und der experimentellen Arbeit. Eine erste modellbasierte Untersuchung im Rahmen einer studentischen Arbeit [13] zielt darauf ab, die Sensitivität eines kapazitiven Sensors in flüssigem Wasserstoff im Vergleich zu Kerosin zu untersuchen.

Hierfür wurde ein Modell in Matlab und SimScape erstellt. Im Modell bilden zwei parallel geschaltete Kondensatoren die Kapazität im flüssigen und im gasförmigen Medium ab. Für die elektrische Messung werden die parallel geschalteten Kapazitäten mit einer dreiecksförmigen Wechselspannung angeregt und die Phasenverschiebung zwischen Strom und Spannung analysiert.

In Bild 4 ist die prozentuale Tankfüllhöhe im Verhältnis zur Phasenverschiebung zwischen Strom und Spannung für zwei baugleiche FüllhöSENSoren gezeigt. Deutlich wird, dass die Sensitivität eines kapazitiven Sensors im Flüssigwasserstofftank erheblich geringer ist als im Kerosintank. Um eine vergleichbare Sensitivität zu erzielen, wäre z. B. eine Reduzierung des Abstandes zwischen innerer und äußerer Elektrode notwendig oder die Vergrößerung der Elektrodenfläche.



Ausblick. Nach dem Abschluss der Anforderungsanalyse soll in einem weiteren Schritt die Lösungsentwicklung für das Sensorsystem vorangetrieben werden. Hierzu sind diverse modellbasierte Untersuchungen von der Komponentenebene bis zur Systemebene geplant. Für die vielversprechendsten Konzepte werden anschließend Laborprototypen entwickelt und experimentell untersucht. Die Untersuchungen finden in Kryostaten sowohl unter Verwendung von flüssigem Stickstoff und Helium als auch unter Verwendung von flüssigem Wasserstoff statt. <<

Literatur

- [1] Airbus and CFM International to pioneer hydrogen combustion technology, 22.2.2022 [online]: Internet: <https://www.airbus.com/en/newsroom/press-releases/2022-02-airbus-and-cfm-international-to-pioneer-hydrogen-combustion> (Zugriff: 5.9.2023)
- [2] Lüdecke, Christa; Lüdecke, Dorothea: Thermodynamik. Physikalisch-chemische Grundlagen für Naturwissenschaftler und Ingenieure der thermischen Verfahrenstechnik. 2., aktual. u. überarb. Aufl. Berlin; Heidelberg: Springer, 2020
- [3] CS-25 Large Aeroplanes [online]: Internet: <https://www.easa.europa.eu/en/document-library/certification-specifications/group/cs-25-large-aeroplanes> (Zugriff: 8.9.2023)
- [4] ETSO- C55a Fuel and Oil Quantity Instruments [online]: Internet: Annex II to ED Decision 2012-009-R (europa.eu) (Zugriff: 22.09.2023)
- [5] Norm SAE AS 405D:2012-08-22. Fuel and Oil Quantity Instruments
- [6] Metalucci, Sergio: The Hydrogen Stream: Condensed hydrogen on smooth surfaces can sharply exceed liquid hydrogen density, 6.9.2022 [online]: Internet: <https://www.pv-magazine.com/2022/09/06/the-hydrogen-stream-condensed-hydrogen-on-smooth-surfaces-can-significantly-exceed-liquid-hydrogen-density> (Zugriff: 11.9.2023)
- [7] Al Ghafri, Saif Z. | S.; Swanger, Adam; Jusko, Vincent; Siahvashi, Arman; Perez, Fernando; Johns, Michael L.; May, Eric F.: Modelling of Liquid Hydrogen Boil-Off. In: Energies 15 (2022), Nr. 3. DOI: 10.3390/en15031149
- [8] Cirrone, D.; Molkov, V.; Makarov, D.; Coldrick, S.; Ren, Z.; Wen, J.; Proust, C.; Friedrich, A.; Jordan, T.; Kuznetsov, M.: Handbook of hydrogen safety: Chapter on LH2 safety. O. | O.: Pre-normative REsearch for Safe use of Liquid Hydrogen (PRESLHY), 2021 [online]: Internet: https://hysafe.info/wp-content/uploads/sites/3/2021/06/2021-01-PRESLHY_ChapterLH2-v4.pdf (Zugriff: 19.9.2023).
- [9] Material properties and compatibility for hydrogen technologies [online]: Internet: <https://www.bam.de/Content/EN/Standard-Articles/Topics/Energy/Hydrogen/hydrogen-material-properties-compatibility.html> (Zugriff: 5.9.2023)
- [10] Langton, Roy; Clark, Chuck; Hewitt, Martin; Richards, Lonnie (Hrsg.): Aircraft Fuel Systems. Chichester: John Wiley & Sons, 2009
- [11] Dempsey, Paula J.; Fabik, Richard H.: Using Silicon Diodes for Detecting the Liquid-Vapor Interface in Hydrogen. Cleveland, Oh.: National Aeronautics and Space Administration, Lewis Research Center, 1992 (NASA Technical Memorandum 105541) [online]: Internet: <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/19920009214/downloads/19920009214.pdf> (Zugriff: 19.9.2023)
- [12] Takeda, M.; Matsuno, Y.; Kodama, I.; Kumakura, H.: Characteristics of MGB2 Sensor for Detecting Level of Liquid Hydrogen. In: Advances in Cryogenic Engineering 53 (2008), S. 933–939. DOI: 10.1063/1.2908691
- [13] Garten, Albrecht: Modellbasierte Machbarkeitsanalyse zum Einsatz von kapazitiven Füllstandssensoren in Flüssigwasserstofftanks in der Luftfahrt. Hamburg, Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg, studentische Arbeit, 2023

4 Phasenverschiebung zwischen Strom und Spannung bei variierenden Tankfüllhöhen [13]