

Modellierung einer Heat-Pipe-gestützten Thermalregulierung von HT-PEM-Brennstoffzellen in der Luftfahrt - Numerische Bestimmung geometriespezifischer Wärmeübergangskoeffizienten

Fabian Kramer, Friedrich Franke, Markus Kober, Stefan Kazula

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR), Lieberoser Straße 13a, Cottbus, Deutschland

fabian.kramer@dlr.de

Kurzfassung

Zur Verbesserung des Thermalmanagements von Hochtemperatur-Polymerelektrolytmembran-Brennstoffzellen (HT-PEMFCs) wird ein Konzept untersucht, bei dem hexagonähnliche Pulsierende Heat Pipes (PHPs) in die Bipolarplatten integriert werden. Dazu wird ein bestehendes 1D-Modell durch Computational Fluid Dynamics (CFD)-basierte, geometriespezifische Wärmeübergangskoeffizienten erweitert. Die Validierung erfolgt anhand eines kreisförmigen Referenzfalls, der mit Literaturdaten verglichen wird. Für die hexagonähnliche Geometrie zeigt sich, dass das ursprüngliche Modell den Wärmeübergang überschätzt und das aktualisierte Modell eine um etwa 7 K nach oben verschobene Temperaturverteilung vorhersagt. Trotz dieser Abweichung ist das betrachtete Konzept weiterhin realisierbar.

1 Einleitung

Der Luftfahrtsektor steht zunehmend unter Druck, seine Treibhausgasemissionen drastisch zu senken, um einen Beitrag zur Eindämmung der globalen Klimaveränderung zu leisten. Die Europäische Kommission fordert in ihrer Vision Flightpath 2050 technologische Durchbrüche, die eine Reduktion der CO₂-Emissionen um 75 % pro Passagierkilometer im Vergleich zu Flugzeugen des Jahres 2000 ermöglichen [1]. Aktuelle Strategiepapiere und wissenschaftliche Analysen zeigen, dass kein einzelner Technologiepfad die Dekarbonisierung der Luftfahrt bis 2050 allein gewährleisten kann.

Für die Langstrecke gelten nachhaltige Flugkraftstoffe (SAF) als unverzichtbare Übergangslösung, da sie in bestehenden Triebwerken eingesetzt werden können und ein großes Reduktionspotenzial bieten [2–4]. Auf Kurz- und Mittelstrecken rücken ab den 2030er-Jahren hingegen Wasserstoffantriebe in den Fokus, die bei geeigneten Flugzeugkonzepten erhebliche Emissionsminderungen ermöglichen. Ihre Vorteile beruhen vor allem auf der hohen spezifischen Energie von Wasserstoff sowie dem Fehlen von Kohlenstoffemissionen im Betrieb, erfordern jedoch zugleich eine umfassende Infrastruktur und technologische Anpassungen [4–6].

Ein vielversprechender Ansatz zur effizienten Nutzung von Wasserstoff ist der Einsatz brennstoffzellenbasierter elektrischer Antriebssysteme. Polyerelektrolytmembran-Brennstoffzellen (PEMFCs) zählen zu den am weitesten verbreiteten Technologien, da sie eine hohe Effizienz, eine hohe Leistungsdichte und einen weitreichenden Leistungsbereich aufweisen [7]. Sie werden in Low-Temperatur- (LT) und High-Temperatur-Varianten (HT) unterschieden, basierend auf ihrem jeweiligen Betriebsbereich. HT-PEMFCs, die im Temperaturbereich von 120 bis 200 °C betrieben werden, eignen sich besonders für den Einsatz in der Luftfahrt. Im Vergleich zu LT-PEMFCs zeichnen sie sich durch ein geringeres Systemgewicht, eine vereinfachte thermische Integration und eine größere Leistungsdichte aus [8]. Darüber hinaus begünstigt die höhere Temperatur

eine schnellere Reaktionsgeschwindigkeit, Wasser liegt ausschließlich in einem Aggregatzustand vor und der größere Temperaturunterschied zwischen HT-PEMFC und Umgebung erleichtert das Thermalmanagement [9].

Auf Zellebene besteht eine PEMFC aus zwei Bipolarplatten und einer Membran-Elektroden-Anordnung (MEA). Letztere setzt sich aus zwei Gasdiffusionsschichten, zwei Katalysatorschichten sowie einer Polymermembran zusammen [10]. Auf der Anodenseite wird Wasserstoff und auf der Kathodenseite Sauerstoff über Kanäle innerhalb der Bipolarplatten in die Zelle eingeleitet und anschließend über die Gasdiffusionsschichten verteilt. In der Katalysatorschicht wird der Wasserstoff in Protonen und Elektronen aufgespalten. Während die Protonen die Polymermembran passieren, werden die Elektronen über die leitfähigen Bipolarplatten zur Kathodenseite weitergeleitet. Auf diese Weise entsteht ein geschlossener Stromkreis, in dem die Elektronen als nutzbare elektrische Energie abgegriffen werden können. Protonen und Elektronen reagieren schließlich mit Sauerstoff zu Wasser. Dieses wird zusammen mit den unverbrauchten Reaktanden über die Kanäle in den Bipolarplatten wieder aus der Zelle abgeführt. Neben elektrischer Energie und Wasser entsteht bei der elektrochemischen Reaktion auch ein erheblicher Wärmeanteil. Reale Systeme wandeln nur 40–50 % der chemischen Energie in Elektrizität um [9, 11]. Die restliche Energie fällt als Abwärme an, hauptsächlich in der Kathodenkatalysatorschicht durch ohmsche Verluste und Reaktionswärme [12].

Damit ein stabiler Betrieb gewährleistet ist, muss diese thermische Last durch ein Thermalmanagementsystem (TMS) abgeführt werden. Ziel eines TMS ist es, die Membran im optimalen Temperaturbereich zu halten und eine gleichmäßige Temperaturverteilung über die aktive Zelloberfläche sicherzustellen [11, 13].

Brennstoffzellen, die dem aktuellen Stand der Technik entsprechen, nutzen in der Regel eine Flüssigkeitskühlung [11]. Dabei wird ein Kühlmittel durch Kanäle in den Bipolarplatten geleitet, erwärmt und anschließend über Wärme-

tauscher an die Umgebung abgeführt. Dieses Verfahren ermöglicht eine präzise Temperaturregulierung und eine homogene Belastung der Zellen, erfordert jedoch zahlreiche Zusatzkomponenten wie Pumpen, Leitungen, Ventilatoren und voluminöse Wärmetauscher. Gewicht, Bauraumbedarf und zusätzlicher parasitärer Energieverbrauch stellen insbesondere in der Luftfahrt erhebliche Nachteile dar.

Daher rücken alternative Thermalmanagementstrategien stärker in den Fokus. Grundsätzlich können TMS in vier Kategorien eingeteilt werden. Hierunter zählen konduktive Kühlung, Luftkühlung, Flüssigkeitskühlung und Phasenwechselkühlung [13, 14]. Eine vergleichende Studie dieser Konzepte im Luftfahrtkontext zeigt das Potenzial von Heat-Pipe-basierten Verfahren hinsichtlich thermischer Leistung, Gewicht und Systemzuverlässigkeit [14].

Darauf aufbauend wurde in einer Untersuchung ein Konzept entwickelt, das auf einer passiven konduktiven Kühlmethode basiert [15]. Dabei kommen Pulsating Heat Pipes (PHPs) als alternative Kühlstrategie für HT-PEM-Brennstoffzellen zum Einsatz. PHPs sind geschlossene kapillare Rohrsysteme, die teilweise mit einem Arbeitsfluid gefüllt sind. Durch periodische Verdampfung und Kondensation des Fluids sowie durch kapillare Kräfte transportieren sie Wärme effizient entlang ihrer Längsausdehnung [16].

Im vorgeschlagenen Konzept werden PHPs mit hexagonähnlichem Querschnitt in die Bipolarplatten integriert [15]. Eine schematische Darstellung ist in Bild 1 gezeigt. Das heiße Ende der Struktur steht dabei in direktem Kontakt mit der MEA, in der die Reaktionswärme entsteht, während das kalte Ende über die HT-PEMFC hinausgeführt und in einen externen Kühlluftstrom eingebettet wird.

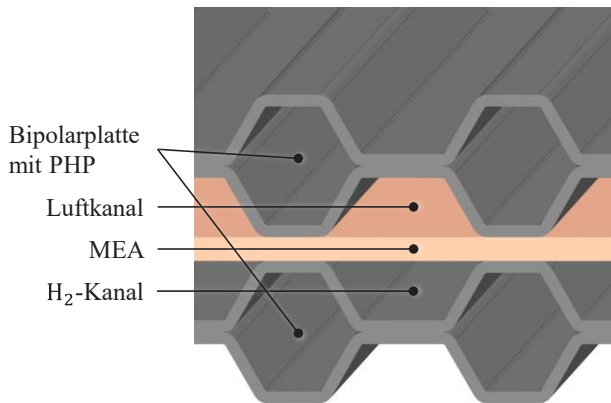


Bild 1 Schematischer Querschnitt der MEA-Baugruppe mit zwei Bipolarplatten und integrierten PHPs [15]

Zur theoretischen Untersuchung dieser Methodik wurde ein eindimensionales Simulationsmodell entwickelt, mit dem verschiedene Eingabeparameter variiert wurden [15]. Die Ergebnisse zeigen, dass die Betriebstemperatur für eine Vielzahl an Parametern unter 200 °C gehalten werden kann. Zudem wird deutlich, dass entlang eines PHP-Strangs ein Temperaturunterschied von maximal 10 K, der als Kriterium für eine homogene Temperaturverteilung dient, nur erreicht wird, wenn die thermische Leitfähigkeit der PHP größer als 3300 W/mK ist.

Trotz vielversprechender Ergebnisse weist das verwendete 1D-Modell Einschränkungen auf. Der Wärmeübergangskoeffizient wird über eine empirische Korrelation bestimmt, deren Gültigkeit für die hexagonähnliche Geometrie bislang nicht ausreichend untersucht wurde. Da dieser Koeffizient maßgeblich die Wärmeabgabe an die Umgebung bestimmt, besteht eine zentrale Unsicherheit.

Vor diesem Hintergrund verfolgt die vorliegende Arbeit das Ziel, das bestehende Modell durch eine zweidimensionale Computational Fluid Dynamics (CFD)-Simulation in Ansys Fluent 2024 R1 zu erweitern, die geometriespezifische Wärmeübergangskoeffizienten liefert.

2 Simulationsmodell

Zur Verbesserung der Vorhersage des konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten für den hexagonähnlichen Querschnitt wird ein 2D-CFD-Modell entwickelt. Da für diese Geometrie bislang keine numerischen oder experimentellen Daten vorliegen, wird zunächst ein kreisförmiger Referenzquerschnitt mit einem Durchmesser von 5 mm simuliert und mit Literaturdaten validiert. Anschließend wird die Methodik auf die hexagonähnliche Geometrie mit einem Innendurchmesser von 2 mm und einer Wandstärke von 0,2 mm übertragen.

Insgesamt wird ein Bereich von Reynoldszahlen zwischen 100 und 28.000 untersucht, sodass sowohl laminare als auch turbulente Strömungsbedingungen abgedeckt sind.

2.1 Rechendomän

Die Rechendomän ist als rechteckiger Querschnittskanal ausgelegt und in Bild 2 schematisch dargestellt. Ihre Höhe und Länge werden über dimensionslose Verhältnisse zur horizontalen Ausdehnung der untersuchten Geometrie definiert. Die exakten Werte werden im Rahmen einer Netzunabhängigkeitsstudie bestimmt, sodass äußere Randbedingungen keinen Einfluss auf den Wärmeübergang haben. Das Querschnittsprofil wird als Aussparung in die Rechendomän integriert und befindet sich bei 40 % der Gesamtlänge, gemessen von der linken Seitenwand. Um das Profil wird eine quadratische Verfeinerungszone definiert. Dadurch wird die Gitterauflösung in unmittelbarer Nähe des Profils erhöht, während im Fernfeld eine gröbere Diskretisierung möglich ist. Direkt am Querschnitt wird eine der Geometrie entsprechende Inflationszone erstellt, um die wandnahen Strömungsgrößen adäquat aufzulösen.

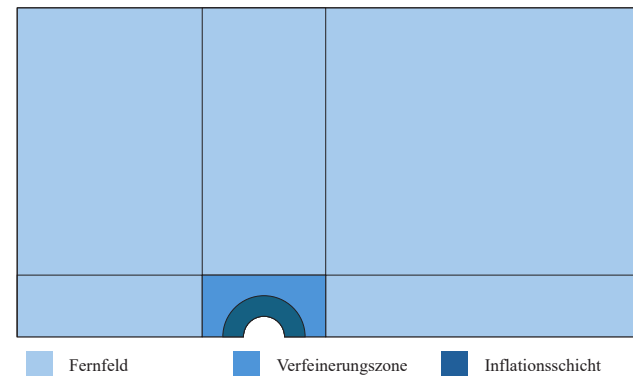


Bild 2 Schematische Darstellung der Rechendomän

Zur Reduzierung des Rechenaufwands wird die Domain entlang der horizontalen Symmetrieachse halbiert, da die untersuchten Geometrien symmetrisch aufgebaut sind.

2.2 Modell

Die vertikalen Ränder der Rechendomains dienen als Ein- und Auslass. An der linken Seitenwand wird eine konstante Strömung senkrecht zur Wand mit einer Temperatur von 323,15 K initialisiert. Am Auslass wird eine Druckrandbedingung von 0 Pa angewendet, sodass die Strömung ungehindert austreten kann.

Als Arbeitsmedium dient Luft mit konstanten Stoffwerten. Die Inkompressibilität ist durch eine Machzahl kleiner als 0,3 gewährleistet. In Bezug auf die konvektive Wärmeübertragung wird konservativ nur erzwungene Konvektion berücksichtigt, was bei kleineren Reynoldszahlen zu einer Unterschätzung des Wärmeübergangs führt. Viskose Dissipation ist aktiviert, bleibt jedoch für alle Simulationen vernachlässigbar, da die Brinkmanzahl kleiner als eins ist. Die obere horizontale Wand wird als stationäre Wand mit No-Slip-Bedingung und adiabatischen Eigenschaften definiert. Die Symmetrieebene durch das Querschnittsprofil wird als Symmetrie-Randbedingung modelliert. Die Wand des Profils wird als No-Slip-Oberfläche mit konstanter Wandtemperatur behandelt. Die Gültigkeit dieser Annahme ist durch eine Knudsenzahl kleiner 0,001 bestätigt.

2.3 Berechnungsverfahren

Die Berechnungen erfolgen mit dem gekoppelten Druck-Geschwindigkeits-Lösungsansatz in ANSYS Fluent 2024 R1. Für die Turbulenzmodellierung wird das SST $k-\omega$ -Modell eingesetzt.

Die Konvergenz gilt als erreicht, wenn Residuen und überwachte Größen unter 10^{-6} fallen. Überwacht werden flächenintegrierte Werte entlang der Querschnittswand, darunter Wärmestrom, Wärmeübergangskoeffizient, Nusseltzahl, Temperatur und y^+ -Wert. Zusätzlich wird die Luftströmungstemperatur kontrolliert.

2.4 Netzunabhängigkeitsstudie

Die Zuverlässigkeit numerischer Simulationen setzt eine hinreichend feine und zugleich effiziente Diskretisierung voraus. Um sicherzustellen, dass die Ergebnisse nicht von der Gitterauflösung abhängen, wird eine Netzunabhängigkeitsstudie durchgeführt. Da die Geometrie vergleichsweise einfach aufgebaut ist, wird die gesamte Rechendomains in die Untersuchung einbezogen.

Als Ausgangspunkt dient ein gleichförmiges Elementaraster, das über die gesamte Geometrie gelegt wird. Darauf aufbauend werden die Dimensionen des rechteckigen Querschnittskanals variiert. Dabei wird die Höhe, die Länge und die Abmaße der quadratischen Verfeinerungszone untersucht. Zur Reduzierung des Rechenaufwands werden zusätzlich Wachstumsraten für Höhe und Länge des Kanals betrachtet. Es zeigt sich, dass eine Variation entlang der Strömungsrichtung möglich ist, während eine gleichzeitige Anpassung der vertikalen Wachstumsrate bei höheren Reynoldszahlen zu fehlender Konvergenz führt.

Ein besonderer Fokus liegt auf der Inflationsschicht an der Profilwand. Um die Wandgradienten ausreichend fein erfassen zu können, werden die Höhe der ersten Schicht, die Wachstumsrate und die Gesamthöhe der Schicht angepasst sowie die Anzahl der Unterteilungen variiert.

Die Untersuchung wird für Reynoldszahlen von 100 und 28.000 sowie Profilwandtemperaturen von 333,15 K und 473,15 K durchgeführt. Die Ergebnisse zeigen, dass die berechneten Werte in Bezug auf die kreisförmige und hexagonähnliche Geometrie netzunabhängig sind, da sämtliche Änderungen der betrachteten Kenngrößen bei weiteren Netzverfeinerungen stets unter 0,37 % liegen.

2.5 Validierung des Modells

Zur Validierung des entwickelten CFD-Modells wird eine Geometrie mit kreisförmigem Querschnitt untersucht. Die Simulationen erfolgen bei einer konstanten Profilwandtemperatur von 473,15 K und werden mit der in dem ein-dimensionalen Modell verwendeten empirischen Korrelation nach Gnielinski [17] als auch mit den experimentellen Messdaten von Hilpert [18] verglichen. Da die Korrelation nach Gnielinski eine alternative Definition der charakteristischen Länge verwendet, die als Kreisdurchmesser multipliziert mit $\pi/2$ festgelegt ist, ergeben sich für die Reynolds- und Nusseltzahlen abweichende Werte. Um die Vergleichbarkeit sicherzustellen, werden die Simulations- und Versuchsdaten daher entsprechend skaliert. Die Resultate sind in Bild 3 dargestellt.

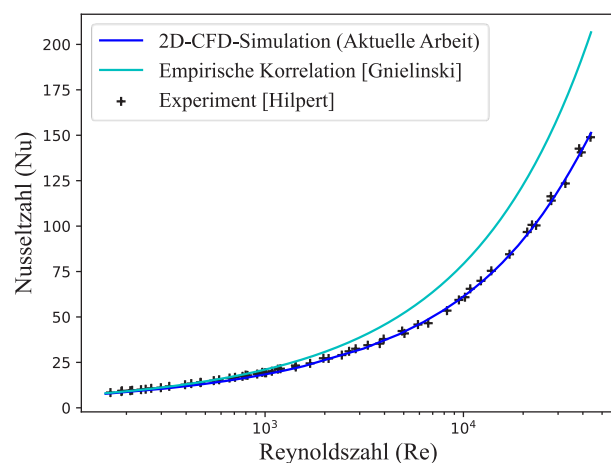


Bild 3 Vergleich der Nusseltzahlen aus der 2D-CFD-Simulation eines kreisförmigen Querschnitts mit empirischer Korrelation [17] und experimentellen Daten [18]

Für Reynoldszahlen kleiner als 1000 zeigen alle drei Datensätze eine enge Übereinstimmung. In diesem Bereich überschätzt die Korrelation nach Gnielinski die Nusseltzahl leicht im Vergleich zu den experimentell gemessenen Werten, während die CFD-Simulation etwas darunterliegt, was die konservative Vorhersage des numerischen Modells bestätigt. Bei Reynoldszahlen größer als 1000 weicht die Korrelation hingegen vom Trend der übrigen Datensätze ab und prognostiziert einen stärkeren Anstieg der Nusseltzahl. Die CFD-Simulationen bleiben dagegen in sehr guter

Übereinstimmung mit den Messungen von Hilpert und erfassen das konvektive Verhalten in diesem Bereich präzise. Insgesamt zeigt der Vergleich, dass das CFD-Modell das experimentelle Verhalten bei hohen Profilwandtemperaturen über den gesamten betrachteten Bereich der Reynoldszahlen mit hoher Genauigkeit reproduziert. Auf dieser Grundlage wird die neue Methode zur Bestimmung des Wärmeübergangskoeffizienten in das bestehende eindimensionale Modell integriert, wobei die Ergebnisse der parametrischen CFD-Simulationen herangezogen werden.

3 Resultate

Nach der Validierung des CFD-Ansatzes am kreisförmigen Querschnitt wird die Methodik auf die hexagonähnliche Geometrie angewendet, die im vorgestellten TMS betrachtet wird. Da der Wärmeübergangskoeffizient die zentrale zu verbessernde Kenngröße darstellt, wird er direkt aus den CFD-Simulationen bestimmt. Für den Vergleich wird die bislang verwendete empirische Korrelation nach Gnielinski [17] herangezogen. Die aus der Korrelation berechneten Nusseltzahlen werden in die entsprechenden Wärmeübergangskoeffizienten umgerechnet. Bild 4 zeigt den Vergleich beider Ansätze, wobei die Simulationsergebnisse für eine Profilwandtemperatur von 473,15 K dargestellt sind.

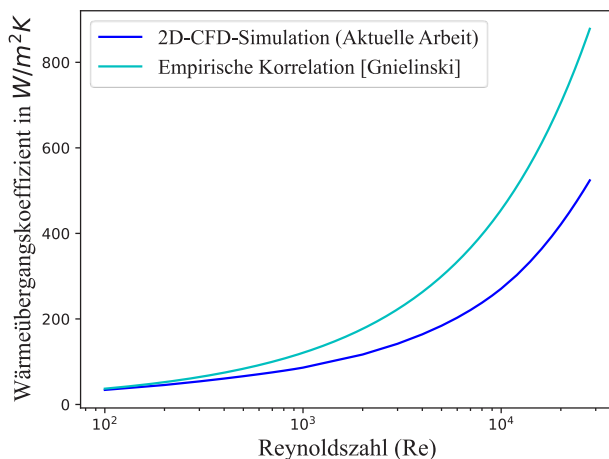


Bild 4 Vergleich des Wärmeübergangskoeffizienten aus der 2D-CFD-Simulation mit empirischer Korrelation [17]

Die Ergebnisse weisen grundsätzlich einen ähnlichen Trend wie im Fall des Kreisquerschnitts (vgl. Bild 3) auf, jedoch treten Abweichungen bereits bei deutlich niedrigeren Reynoldszahlen auf. Nur im Bereich um $Re = 100$ stimmen die Datensätze gut überein, bei höheren Werten driften sie zunehmend auseinander. Während die Korrelation nach Gnielinski einen steileren Anstieg prognostiziert, zeigen die CFD-Simulationen ein flacheres Verhalten. Daraus folgt, dass das 1D-Modell auf Basis der Korrelation den Wärmeübergangskoeffizienten überschätzt.

Die Auswirkungen auf die Ergebnisse des eindimensionalen Modells sind in Bild 5 dargestellt. Die Abbildung zeigt die Temperaturverteilung eines PHP-Strangs nach ursprünglicher und aktualisierter Methodik. Das Modell wird in beiden Fällen mit einer Wärmeleitfähigkeit von $3300 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ sowie einer Strömung mit einer Geschwindigkeit von 3 m s^{-1} und einer Temperatur von $323,15 \text{ K}$ berechnet.

Im neuen Modell sind zusätzlich die Punkte markiert, ab denen CFD-basierte Wärmeübergangskoeffizienten verwendet werden.

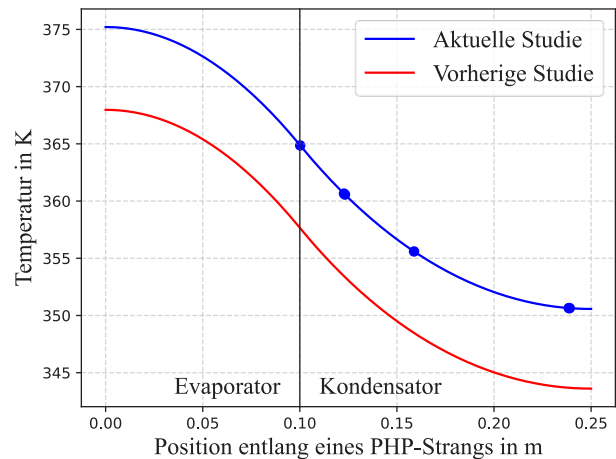


Bild 5 Vergleich der Temperaturverteilungen entlang eines PHP-Strangs zwischen dem ursprünglichen 1D-Modell und der aktualisierten Version

Die beiden Kurven zeigen über den gesamten Bereich hinweg einen übereinstimmenden Verlauf, sodass der Temperaturgradient unverändert bleibt. Gleichzeitig weist das aktualisierte Modell eine um etwa 7 K nach oben verschobene Temperaturverteilung auf.

Insgesamt wird deutlich, dass die CFD-Ergebnisse eine geometriespezifische Wärmeübertragung abbilden und somit eine präzisere Beschreibung des betrachteten Systems ermöglichen. Zudem bestätigt sich, dass die theoretische Umsetzung des vorgestellten Konzepts weiterhin realisierbar ist, da der Maximalwert der Temperaturverteilung unterhalb der Grenzbetriebstemperatur von $473,15 \text{ K}$ bleibt.

4 Fazit und Ausblick

Auf Grundlage einer früheren Studie wird ein bestehendes numerisches 1D-Modell erweitert, indem die empirische Korrelation zur Berechnung des Wärmeübergangskoeffizienten durch parametrisierte CFD-Analysen ersetzt wird. Das entwickelte CFD-Modell wird anhand von Literaturdaten für einen kreisförmigen Referenzfall validiert. Die Ergebnisse der hexagonähnlichen Geometrie zeigen, dass der bisherige Ansatz die Wärmeübertragung überschätzt, wodurch die Temperaturen entlang eines PHP-Strangs um rund 7 K unterschätzt werden.

Da für die hexagonähnliche Geometrie bislang keine experimentellen Daten vorliegen, ist eine vollständige Validierung nicht möglich, sodass zur Absicherung und Verfeinerung des Ansatzes weitere Untersuchungen erforderlich sind. In zukünftigen Arbeiten ist hierfür unter anderem der Bau eines Demonstrators des hexagonähnlichen PHP-Kühlsystems vorgesehen. Darüber hinaus sollen künftige Simulationen mehrere PHP-Stränge gleichzeitig berücksichtigen und mit Modifikationen wie Rippen ausstatten, um die Wärmeübertragung zu verbessern. Langfristig soll das Konzept weiterentwickelt werden, um das TMS von Brennstoffzellen zu verbessern und so deren Integration in die Luftfahrt zu unterstützen.

5 Literatur

- [1] Directorate-General for Research and Innovation and Directorate-General for Mobility and Transport, *Flightpath 2050: Europe's vision for aviation: maintaining global leadership and serving society's needs* (policy). Luxembourg: Publ. Off. of the Europ. Union, 2011.
- [2] E. Cabrera und J. M. M. de Sousa, "Use of Sustainable Fuels in Aviation - A Review," *Energies*, Jg. 15, Nr. 7, 2022, Art. Nr. 2440, doi: 10.3390/en15072440.
- [3] Destination 2050, "Roadmap 2025-2050: A Route to Net Zero European Aviation," [Online]. Verfügbar unter: <https://www.destination2050.eu/roadmap/>
- [4] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, "Ergebnisse des Arbeitskreises klimaneutrale Luftfahrt," 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.bundeswirtschaftsministerium.de/Redaktion/DE/Downloads/klimaschutz/20240604-ergebnisse-des-arbeitskreises-klimaneutrale-luftfahrt.html>
- [5] Jayant Mukhopadhyaya und Dan Rutherford, "Performance analysis of evolutionary hydrogen-powered aircraft," [Online]. Verfügbar unter: <https://theicct.org/publication/aviation-global-evo-hydrogen-aircraft-jan22>
- [6] M. M. Hossain Bhuiyan und Z. Siddique, "Hydrogen as an alternative fuel: A comprehensive review of challenges and opportunities in production, storage, and transportation," *International Journal of Hydrogen Energy*, Jg. 102, S. 1026–1044, 2025, doi: 10.1016/j.ijhydene.2025.01.033.
- [7] T. Hoff, F. Becker, A. Dadashi, K. Wicke und G. Wende, "Implementation of Fuel Cells in Aviation from a Maintenance, Repair and Overhaul Perspective," *Aerospace*, Jg. 10, Nr. 1, 2023, Art. Nr. 23, doi: 10.3390/aerospace10010023.
- [8] S. Kazula, S. de Graaf und L. Enghardt, "Review of fuel cell technologies and evaluation of their potential and challenges for electrified propulsion systems in commercial aviation," *Journal of the Global Power and Propulsion Society*, Jg. 7, S. 43–57, 2023, doi: 10.33737/jgpps/158036.
- [9] Q. Li, R. He, J. O. Jensen und N. J. Bjerrum, "Approaches and Recent Development of Polymer Electrolyte Membranes for Fuel Cells Operating above 100 °C," *Chem. Mater.*, Jg. 15, Nr. 26, S. 4896–4915, 2003, doi: 10.1021/cm0310519.
- [10] X.-Z. Yuan und H. Wang, "PEM Fuel Cell Fundamentals," in *PEM Fuel Cell Electrocatalysts and Catalyst Layers*, J. Zhang, Hg., London: Springer London, 2008, S. 1–87.
- [11] L. Yang, N.-N. Nik-Ghazali, M. A. Ali, W. T. Chong, Z. Yang und H. Liu, "A review on thermal management in proton exchange membrane fuel cells: Temperature distribution and control," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Jg. 187, 2023, Art. Nr. 113737, doi: 10.1016/j.rser.2023.113737.
- [12] S. G. Kandlikar und Z. Lu, "Fundamental Research Needs in Combined Water and Thermal Management Within a Proton Exchange Membrane Fuel Cell Stack Under Normal and Cold-Start Conditions," *Journal of Fuel Cell Science and Technology*, Jg. 6, Nr. 4, 2009, Art. Nr. 044001, doi: 10.1115/1.3008043.
- [13] T. Wilberforce *et al.*, "Recovery of waste heat from proton exchange membrane fuel cells - A review," *International Journal of Hydrogen Energy*, Jg. 52, S. 933–972, 2024, doi: 10.1016/j.ijhydene.2022.08.069.
- [14] Fr. Franke, A. Link und S. Kazula, "Evaluation of Heat Transfer Technologies for High Temperature Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cells as Primary Power Source in a Regional Aircraft," in *Review bei: CEAS Aeronautical Journal*, 2025.
- [15] Fr. Franke, M. Kober und S. Kazula, "Hexagonal Pulsating Heat Pipe for Fuel Cell Integration; Preliminary Design and Evaluation of Thermal Performance," in *Review bei: Case Studies in Thermal Engineering*, 2025.
- [16] A. Faghri, "Review and Advances in Heat Pipe Science and Technology," *Journal of Heat Transfer*, Jg. 134, Nr. 12, 2012, Art. Nr. 123001, doi: 10.1115/1.4007407.
- [17] V. Gnielinski, "Berechnung mittlerer Wärme- und Stoffübergangskoeffizienten an laminar und turbulent überströmten Einzelkörpern mit Hilfe einer einheitlichen Gleichung," *Forschung im Ingenieurwesen*, Jg. 41, Nr. 5, S. 145–153, 1975, doi: 10.1007/BF02560793.
- [18] R. Hilpert, "Wärmeabgabe von geheizten Drähten und Rohren im Luftstrom," *Forschung im Ingenieurwesen*, Jg. 4, Nr. 5, S. 215–224, 1933, doi: 10.1007/BF02719754.