

VERFASST VON



Louis Krüger, M. Sc.
ist Wissenschaftlicher Mitarbeiter des Instituts für Strömungslehre und Aerodynamik (SLA) der TU Darmstadt.



Tizian Zeckey, M. Sc.
ist Wissenschaftlicher Mitarbeiter des Zentrums für Konstruktionswerkstoffe (MPA-IfW) der TU Darmstadt.



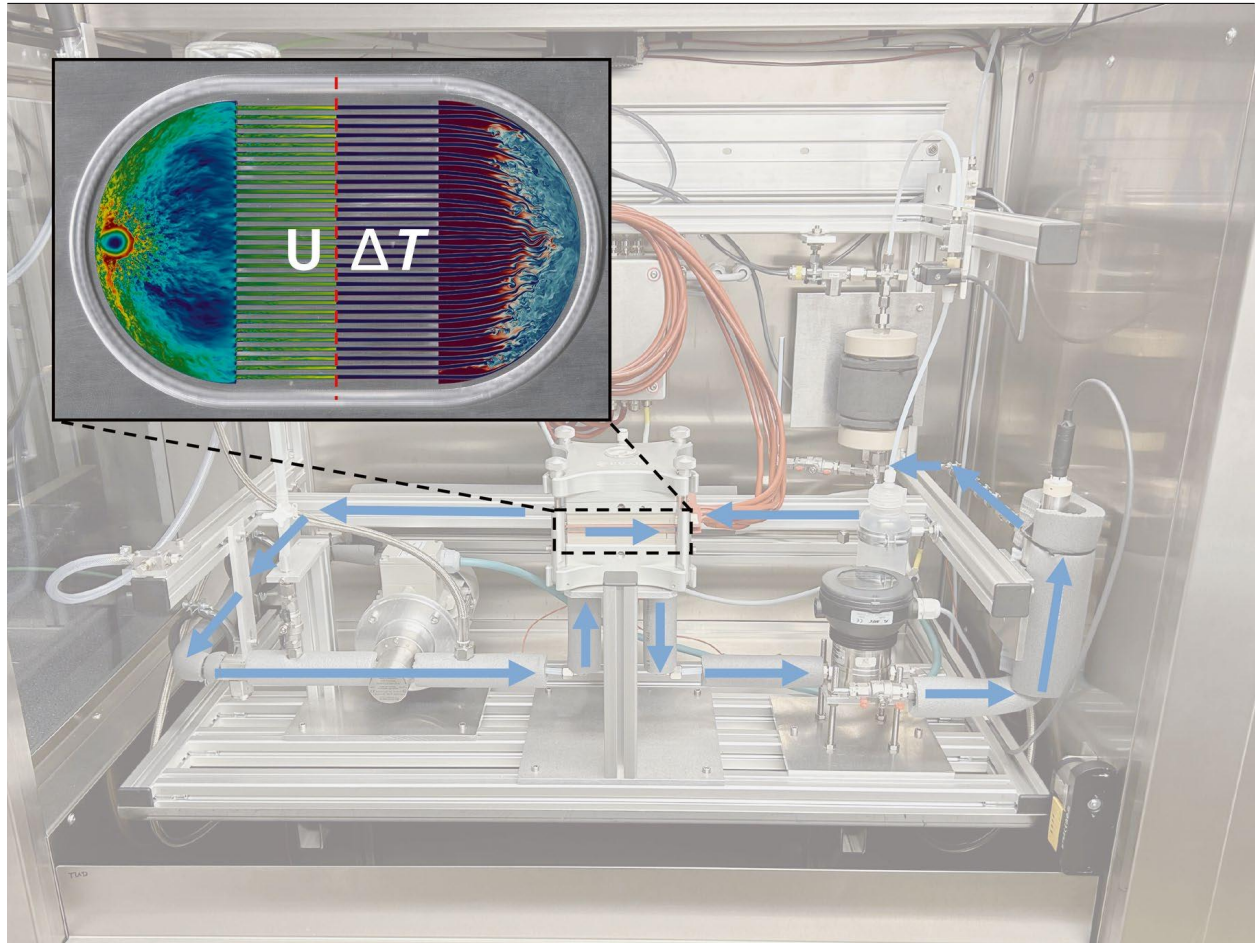
Prof. Dr.-Ing. habil. Suad Jakirlić
ist Leiter der Arbeitsgruppe zur Modellierung und Simulation turbulenter Strömungen des Instituts für Strömungslehre und Aerodynamik (SLA) der TU Darmstadt.



Prof. Dr.-Ing. Matthias Oechsner
ist Leiter des Zentrums für Konstruktionswerkstoffe (MPA-IfW) und Professor für das Fachgebiet Werkstoffkunde der TU Darmstadt.

Entwicklung einer Bewertungsmethode für Kühlmittel von Brennstoffzellen

Ein effizienter Betrieb von PEM-Brennstoffzellen erfordert eine zuverlässige Kühlung und die Entwicklung neuer Kühlmittel. Diese müssen praxisnah auf ihr Materialverhalten und die Medienalterung hin bewertet werden können. In dem an der TU Darmstadt durchgeführten Forschungsvorhaben (FVV-Nr. 1471) wird dazu eine an die Bipolarplatte angelehnte Referenzgeometrie mit numerischen Methoden strömungsthermisch untersucht und in einem Kühlmittelkreislauf experimentell integriert.



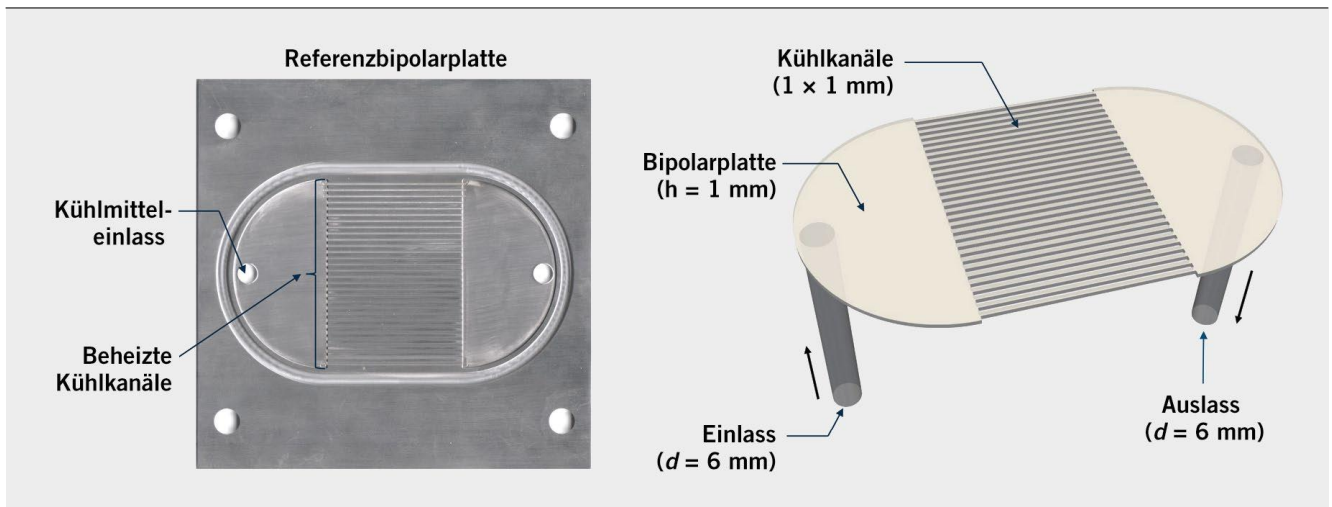


BILD 1 Referenzbipolarplatte für experimentelle Untersuchung und Simulation (links) und ihre wesentlichen Dimensionen (rechts) © MPA-IfW | SLA

1	MOTIVATION
2	REFERENZBIPOLARPLATTE
3	NUMERISCHE METHODIK
4	STRÖMUNGSDYNAMISCHE CHARAKTERISIERUNG
5	EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNG
6	ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

1 MOTIVATION

Brennstoffzellen (BZ) mit temperaturempfindlicher Polymerelektrolytmembran (PEM) sind anfällig für lokale Überhitzungen, weshalb ein effizientes Kühlsystem erforderlich ist. Um Leistungsverluste zu vermeiden, muss das Kühlmittel über die gesamte Betriebszeit eine niedrige elektrische Leitfähigkeit aufrechterhalten, da es mit den stromführenden Bipolarplatten des BZ-Stapels in Kontakt kommt [1].

Um praxisnahe Betriebsbedingungen des BZ-Kühlsystems abzubilden, wird im Rahmen des Forschungsvorhabens ein Prüfsystem entworfen, das mit experimenteller Untersuchung von Wechselwirkungen zwischen Kühlmitteln und Werkstoffen unterlegt ist. Ein numerisches Simulationswerkzeug soll dazu dienen, strömungsdynamische und thermische Belastungen zu charakterisieren, komplexe Phänomene innerhalb der Kühlstruktur der Bipolarplatte zu erfassen und kritische Beanspruchungsorte zu lokalisieren. Das Projekt wird experimentell vom Zentrum für Konstruktionswerkstoffe (MPA-IfW) und numerisch vom Fachgebiet für Strömungslehre und Aerodynamik (SLA) der TU Darmstadt durchgeführt.

2 REFERENZBIPOLARPLATTE

Die Betriebsbedingungen des BZ-Kühlsystems sollen innerhalb eines Prüfmoduls, dem BZ-Emulator [2] nachgebildet werden. Zur Abstraktion einer Zellebene wird eine generische Referenzbipolarplatte entwickelt, die die charakteristischen Strömungsphänomene einer realen Bipolarplatte berücksichtigt und zur Begutachtung der

Oberfläche aus dem BZ-Emulator herausnehmbar ist. Zwei symmetrische halbkreisförmige Zonen sollen eine möglichst gleichmäßige Verteilung des Volumenstroms und dadurch homogene Beanspruchung über alle Kühlkanäle erreichen. In der Konditionierungszone wird die Strömung auf 30 Kühlkanäle mit quadratischem Querschnitt aufgeteilt und in der Einmündungszone wieder zusammengeführt. Die An- und Abströmung der Referenzbipolarplatte erfolgt durch gerade Rohrleitungen, BILD 1.

Zur Darstellung der praxisnahen Betriebsbelastung des Kühlsystems eines BZ-Stapels wurde in Anlehnung an [3] und in Abstimmung mit dem projektbegleitenden Arbeitskreis ein typischer Betriebspunkt festgelegt. Darauf basierend wurde der für den BZ-Emulator relevante Parameterbereich auf eine einzelne Zellebene herunterskaliert und erweitert, um sowohl moderate als auch kritische thermische Belastungen im Prüfsystem abbilden zu können. Aus diesem abgeschätzten Parameterbereich, TABELLE 1, wird durch numerische und experimentelle Untersuchungen eine praxisrelevante Prüfbeanspruchung abgeleitet.

Parameter		BZ-Stapel (300 Zellen)	BZ-Emulator
Wärmestrom in das Kühlmittel	\dot{Q}	30 kW	100 bis 400 W
Volumenstrom des Kühlmittels	\dot{V}	50 l/min	0,2 bis 1,4 l/min
Kühlmitteltemperaturdifferenz über die gesamte Brennstoffzelle	ΔT	10 K	5 bis 10 K
Kühlmitteltemperatur am Einlass der Brennstoffzelle	T_{Einlass}	60 °C	60 bis 90 °C
Überdruck am Einlass der Brennstoffzelle	p	1,5 bar	1,5 bar

TABELLE 1 Typischer Betriebspunkt des Kühlsystems eines BZ-Stapels und Betriebsparameter des BZ-Emulators zur Abbildung moderater bis kritischer Betriebsbedingungen © SLA | MPA-IfW

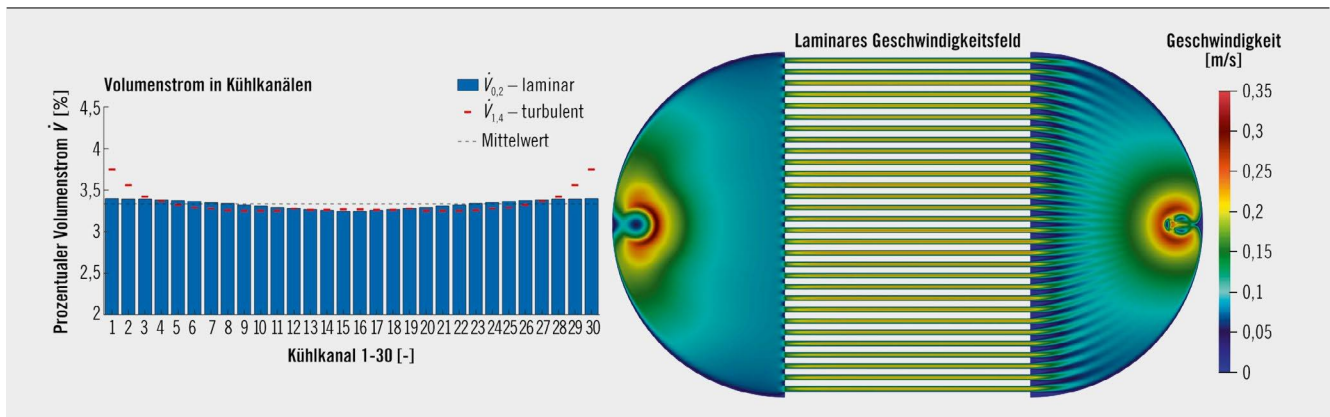


BILD 2 Volumenstromverteilung über die Kühlkanäle (links) und laminares Geschwindigkeitsfeld (rechts) bei Kühlmitteldurchfluss $\dot{V}_{0,2}$ (© SLA)

3 NUMERISCHE METHODIK

Mit einer numerischen Strömungssimulation können Geschwindigkeits-, Druck- und Temperaturfelder berechnet und damit Stellen mit erhöhtem Überhitzungs- und Schädigungspotenzial lokalisiert werden. Die grundlegenden Gleichungen der inkompressiblen Strömung einschließlich der Kontinuitäts-, Impuls- und Temperaturgleichungen sind durch die Navier-Stokes-Gleichungen gegeben und werden durch das Open-Source-Software-Framework OpenFOAM gelöst. Skalenauflösende Grobstruktur-Simulationsmodelle (Large Eddy Simulations, LES) ermöglichen es im Vergleich zu herkömmlichen Reynolds-gemittelten Navier-Stokes(RANS)-Modellen, einen Großteil des turbulenten Energiespektrums aufzulösen, was zu einer verbesserten Vorhersagequalität führt. Dabei wird das Wall-Adapting Local Eddy (WALE) Viscosity Model von Nicoud und Ducros [4] für die LES-Simulation eingesetzt, um eine Datenbasis für weitere numerische Studien zu generieren. Für die numerische Simulation wird das Rechengebiet durch ein vollstrukturiertes Gitter mit 285 Millionen Volumenzellen diskretisiert.

4 STRÖMUNGSDYNAMISCHE CHARAKTERISIERUNG

Um eine effiziente Kühlung über verschiedene Betriebspunkte hinweg zu gewährleisten, ist eine gleichmäßige Verteilung des Volumenstroms \dot{V} in den Kühlkanälen erforderlich. Mit $\dot{V}_{0,2} = 0,2$ l/min beziehungsweise $\dot{V}_{1,4} = 1,4$ l/min soll der Einfluss auf die strömungsdynamischen Eigenschaften des Systems ermittelt werden.

Wie in BILD 2 (links) dargestellt erfolgt im laminaren Betriebspunkt eine gleichmäßige Verteilung von \dot{V} über die Kühlkanäle, wobei lediglich ein geringer Anstieg von der Mitte zu den äußeren Kanälen erkennbar ist. $\dot{V}_{1,4}$ führt zu einer verstärkten Durchströmung der äußeren Kühlkanäle und daher inhomogenen Beanspruchung des Kühlsystems. Die homogene Verteilung im laminaren Betrieb ist auch im Geschwindigkeitsfeld erkennbar, BILD 2 (rechts), in dem das Kühlmittel zunächst die halbkreisförmige Verteilungszone erreicht und sich dann gleichmäßig auf die Kanäle aufteilt. Nach dem Durchfluss durch die Kanäle vereinigt sich die Strömung am Auslass, bevor sie in das Auslassrohr überführt wird.

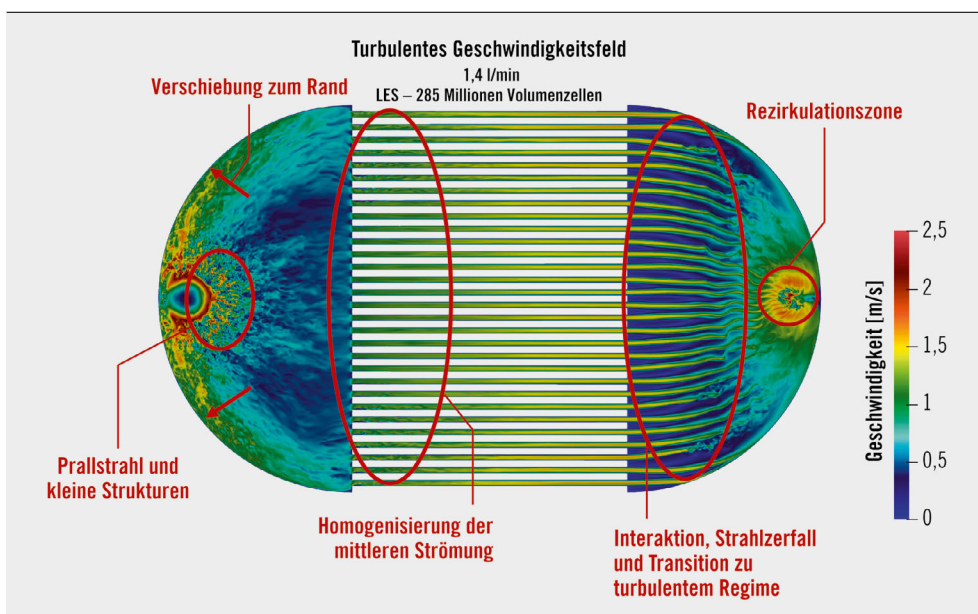


BILD 3 Turbulentes Geschwindigkeitsfeld bei $\dot{V}_{1,4}$ inklusive charakteristischer Zonen (© SLA)

Wie in **BILD 3** zu erkennen ist, führt $\dot{V}_{1,4}$ zu einem stärkeren Aufprall des Kühlmittels in der Verteilungszone, wodurch es sich deutlich zum Rand der Bipolarplatte hin verschiebt und zu einer verstärkten Durchströmung der äußeren Kanäle führt. Zudem lassen sich weitere charakteristische Strömungszonen feststellen: Direkt nach dem Aufprallbereich bilden sich Instabilitäten als kleine turbulente Strukturen. Auf die Verschiebung des Kühlmittels hin zur äußeren Randzone erfolgt eine Homogenisierung und Laminaisierung der Strömung innerhalb der Kühlkanäle, da die lokale Reynoldszahl gering ist. Turbulente Fluktuationen lösen sich hier in den filigranen Kanälen auf. Hinter den Kühlkanälen entstehen sogenannte Jets, die nach einer gewissen Distanz stark miteinander interagieren, aufbrechen und in einen turbulenten Zustand übergehen, gefolgt von einer Zone intensiver Fluiddurchmischung. Der Übergang in das Auslassrohr ist durch eine markante dynamische Wirbelstruktur geprägt.

Da die filigranen Kanäle zur Kühlung der Bipolarplatte einem Wärmestrom ausgesetzt sind, wird der simulierte Wärmetransport innerhalb des Systems mit experimentellen Ergebnissen abgeglichen. Dafür wird der zugeführte Wärmestrom \dot{Q} proportional zu $\dot{V}_{1,4}$ mit 100 W und zu $\dot{V}_{0,2}$ mit 14,29 W skaliert. In beiden Betriebspunkten ergeben sich die größten Temperaturerhöhungen in den Rezirkulationsbereichen hinter den Stegen, **BILD 4**. Darauf erfolgt die Durchmischung der erwärmten und weniger stark erhitzten Bereiche. Unter turbulenten Bedingungen führt die Wechselwirkung der Jets, ihr Aufbruch und turbulenter Umschlag zu einer intensiven Durchmischung. Die Umlenkung der Strömung in das Austrittsrohr intensiviert diesen Prozess zusätzlich, sodass sich nach kurzer Distanz im Auslassrohr ein nahezu homogenes Temperaturfeld einstellt. Unter laminaren Bedingungen findet lediglich eine geringfügige Durchmischung der warmen und kalten Bereiche statt. Es erfolgt eine stärkere Verlagerung von konvektiven zu diffusiven Transportprozessen, sodass selbst nach der Umlenkung in das Auslassrohr über eine größere Distanz weiterhin ein inhomogenes Temperaturfeld vorliegt.

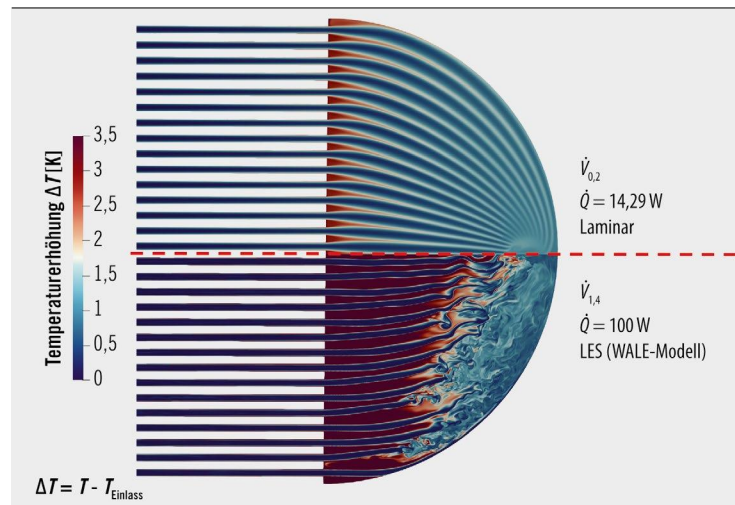



BILD 4 Temperaturerhöhung ΔT in Bezug auf die Kühlmitteltemperatur am Einlass T_{Einlass} für $\dot{V}_{1,4}$ (100 W) und $\dot{V}_{0,2}$ (14,29 W) (© SLA)

5 EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNG

Zur Durchführung experimenteller Untersuchungen wurde eine Prüfanlage mit einem geschlossenen Kreislaufsystem entwickelt, **BILD 5**. Das Prüfsystem regelt den Druck p , die Kühlmitteltemperatur T_{Einlass} und \dot{V} und bringt über elektrische Heizmatten Wärme in die Kühlkanäle der Referenzbipolarplatte ein. Der tatsächlich an das Kühlmittel abgegebene Wärmestrom \dot{Q} wird durch Messung der Kühlmitteltemperatur T_{Auslass} des BZ-Emulators bestimmt. Lokale Temperaturen im Inneren des Emulators werden durch Temperatursensoren an den Heizwicklungen der Heizmatten erfasst (T_H). Die elektrische Leitfähigkeit C des Kühlmittels wird kontinuierlich innerhalb einer Durchflussarmatur gemessen.

Schweizer Präzision. Jetzt auch in Deutschland.

 Das neue Magazin **maschinenbau** ist die Deutschland-Ausgabe des erfolgreichen Schweizer Industriemagazins. Es informiert mit Fachbeiträgen, Anwenderreportagen, Interviews und Nachrichten rund um das gesamte Thema Maschinenbau sowie über neuste Verfahren & Trends wie Industrie 4.0 und andere progressive Technologien.

Profitieren Sie von dem umfassenden Wissensvorsprung. Mit 6 Ausgaben im Jahr, inklusive E-Magazin und freiem Zugriff auf das Online-Fachartikel-Archiv. Ihr persönliches, kostenloses Leseexemplar finden Sie unter: meinfachwissen.de/maschinenbau

maschinenbau
Die Deutschland-Ausgabe des Schweizer Industriemagazins



Jetzt kostenlos testen!

© 2024 creative republic / shutterstock

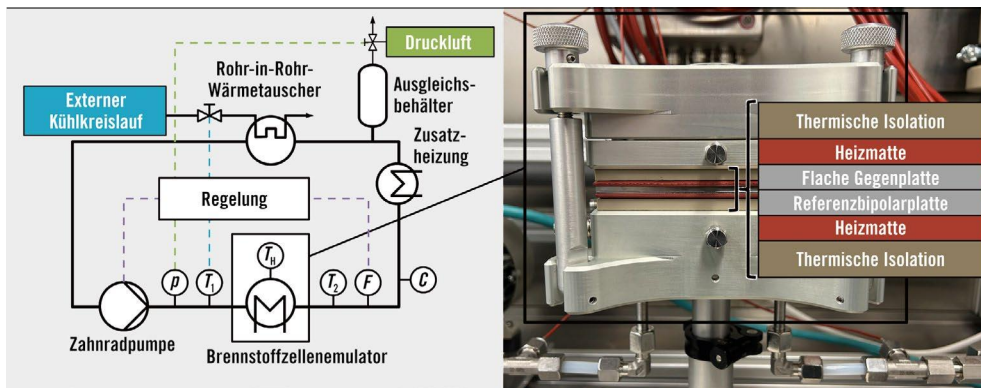


BILD 5 Schematischer Aufbau des Kreislaufsystems (links) mit $T_1 = T_{\text{Einlass}}$; $T_2 = T_{\text{Auslass}}$; $F = \dot{V}$ und Bildaufnahme des BZ-Emulators (rechts) © MPA-IfW

Zur Festlegung einer geeigneten Prüfbelastung wurde der in **TABELLE 1** dargestellte Parameterbereich experimentell präzisiert. Bei einer Kühlmitteltemperatur von $T_{\text{Einlass}} = 80 \text{ °C}$ ergibt sich am Auslass abhängig von der Heizleistung eine Temperatur von $T_{\text{Auslass}} = 85$ bis 90 °C . Das ermöglicht einen Vergleich mit Ergebnissen der standardisierten Kühlmittelprüfung bei 88 °C gemäß ASTM D8485-23 auf einem ähnlichen Temperaturniveau. Zudem muss sichergestellt werden, dass die Temperatur an der Oberfläche der Referenzbipolarplatte unterhalb der Siedetemperatur des Kühlmittels mit 130 °C bei $2,5 \text{ bar}$ bleibt. Ein großflächiges Sieden ist zu vermeiden, da das im Hinblick auf die maximale Betriebstemperatur einer PEM-BZ ($\leq 120 \text{ °C}$) untypisch wäre [5]. Allerdings werden bereits bei moderaten Kühlmitteltemperaturen von $T_{\text{Auslass}} = 85 \text{ °C}$ lokal hohe Temperaturen für $T_H > 120 \text{ °C}$ gemessen, was eine präzisere Bestimmung der Temperaturen im Bereich der Werkstoffoberfläche erforderlich macht.

Eine Prüfmethode erfordert neben der Prüfbeanspruchung die Festlegung objektiver Bewertungskriterien. Eine Bewertung anhand der Massenänderung von Probekörpern der Bipolarplatte ist wenig aussagekräftig, da die eingesetzten austenitischen Stähle selbst in nicht-inhibierten Kühlmitteln nur geringe Änderungen zeigen ($\leq 0,2 \text{ mg}$ bei einem Probekörper gemäß ASTM D8485-23). Dagegen stellt die elektrische Leitfähigkeit der Kühlmittel ein praxisrelevantes Prüfkriterium dar, da diese eine funktionelle Bedeutung für die BZ hat, aber anfällig für thermisch bedingte Veränderungen ist. Ein Zusammenhang zwischen der thermisch bedingten Bildung von Oxidationsprodukten des Ethylenglykols und der damit verbundenen Erhöhung der Leitfähigkeit konnte aufgezeigt werden. Um die Leitfähigkeit als objektives Prüfkriterium zu etablieren, sind jedoch wissenschaftlich begründete Grenzwerte zu erarbeiten und zusätzliche praxisrelevante Prüfbelastungen zu definieren.

6 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Die numerische Analyse verdeutlicht den Einfluss unterschiedlicher Volumenströme und deren Verteilungen in den Kühlkanälen der Referenzbipolarplatte einer PEM-BZ. Dabei können charakteristische Strömungszonen identifiziert werden, die den Wärmetransport innerhalb des Kühlsystems maßgeblich beeinflussen. Bei turbulenter Strömung fördert die stärkere Durchmischung eine homogene Temperaturverteilung, während sich bei laminarer Strömung eine inhomogene Temperaturverteilung über größere Distanzen innerhalb der filigranen Kühlstruktur einstellt. Experimentelle Untersuchungen belegen zudem thermisch bedingte Verän-

derungen der elektrischen Leitfähigkeit des Kühlmittels unter praxisnahen Betriebsbedingungen.

Im weiteren Projektverlauf ist vorgesehen, den BZ-Emulator um zusätzliche Temperaturmessstellen in unmittelbarer Nähe der mit Kühlmitteln beaufschlagten Werkstoffoberflächen zu erweitern. Die thermische Belastung soll dadurch präzisiert und die Simulationsergebnisse weiter validiert werden. Mit der Definition einer praxisrelevanten Prüfbeanspruchung und der Etablierung der elektrischen Leitfähigkeit als objektives Prüfkriterium wird somit ein anwendungsorientiertes Prüfverfahren für Kühlmittel von Brennstoffzellen entwickelt.

LITERATURHINWEISE

[1] Dietsche, K.-H.; Reif, K. (Hrsg.): Automotive Handbook. 11th Edition, Revised and Extended. Karlsruhe: Bosch, 2022
 [2] Reitz, R.; Klink, A.; Engler, C. T.; Oechsner, M.: Emulator zur Entwicklung von Brennstoffzellen-Kühlsystemen. In: ATZelextronik 15 (2020), Nr. 6, S. 56-61
 [3] Schäfer, S.: Modellbasierte Steuerung des Kühlkreislaufes einer Brennstoffzelle mit automatisiertem Test der Software. Darmstadt, Universität, Dissertation, 2012
 [4] Nicoud, F.; Ducros, F.: Subgrid-scale stress modelling based on the square of the velocity gradient tensor. In: Flow Turbulence and Combustion 62 (1999), S. 183-200
 [5] Klell, M.; Eichseder, H.; Trattner, A.: Wasserstoff in der Fahrzeugtechnik: Erzeugung, Speicherung, Anwendung, 4. aktualisierte und erweiterte Auflage. ATZ/MTZ-Fachbuch. Wiesbaden: Springer Fachmedien, 2018

DANKE

Das Forschungsvorhaben (FVV-Projektnr. 1471) wird am Zentrum für Konstruktionswerkstoffe (MPA-IfW) der TU Darmstadt unter der Leitung von Prof. Dr.-Ing. Matthias Oechsner und am Fachgebiet für Strömungslehre und Aerodynamik (SLA) der TU Darmstadt unter der Leitung von Prof. Dr.-Ing. Jeanette Hussong durchgeführt. Es wurde durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) über die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen (AiF) e. V. (IGF-Fördernr. 22097 N) aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestags finanziell gefördert und von einem Arbeitskreis begleitet. Die Autoren bedanken sich bei den Fördergebern, der FVV e. V. und allen Projektbeteiligten für die Unterstützung des Vorhabens.

READ THE ENGLISH E-MAGAZINE
 Test now for 30 days free of charge: www.mtz-worldwide.com