

Brennstoffzellensysteme im Straßenverkehr als Antriebskonzept für die Mobilität der Zukunft

Marco Menze*, Markus Schödel, Ole Willers, Jörg Seume

Institut für Turbomaschinen und Fluid-Dynamik, Leibniz Universität Hannover, Appelstraße 9, 30167 Hannover, Deutschland

Abstract

Um die Brennstoffzelle im Kraftfahrzeugsektor als wirtschaftliche Energiequelle weiter zu etablieren, ist es notwendig, die Luftversorgung des Brennstoffzellensystems an die auftretenden Betriebsbedingungen anzupassen. Das Vorhaben ARIEL befasst sich deshalb in interdisziplinärer Zusammenarbeit von mehreren Instituten und Industrieunternehmen mit der Luftversorgungseinheit eines Brennstoffzellensystems. Ziel ist es, den verwendeten, elektrisch angetriebenen Luftverdichter bezüglich Bauraum, Gewicht und Wirkungsgrad zu optimieren.

Schlagwörter/Keywords:

Brennstoffzelle, Turbolader, Kathodenluftversorgung, kennfelderweiternde Maßnahmen, variable Turbinengeometrie

1. Einleitung und Motivation

Ob in der Schifffahrt, im Flugverkehr oder im Automobilbereich – der Einsatz von Brennstoffzellen zählt bekanntlich zu den vielversprechendsten Möglichkeiten im Bereich der Mobilität, um den weltweiten CO₂-Ausstoß erheblich zu reduzieren. In der Vergangenheit wurden bereits zahlreiche Anstrengungen in der Entwicklung und Erforschung von Brennstoffzellensystemen für automobiler Anwendungen unternommen, jedoch gibt es bisher wenige Fahrzeughersteller wie Honda (Sugawara et al. 2017) oder Toyota (Hasegawa et al. 2016), die einen Brennstoffzellenantrieb serienmäßig im Automobil verbauen. Das Bestreben der Forschungen besteht deswegen weiterhin darin, die Brennstoffzelle als Antriebskonzept der Zukunft serienfähig zu gestalten und die Akzeptanz für diese Antriebstechnologie zu steigern, so dass eine deutliche Reduzierung des weltweiten CO₂-Ausstoßes möglich ist.

Durch eine Erhöhung des Druckniveaus der beiden Reaktionspartner Wasserstoff und Sauerstoff ist es möglich, Brennstoffzellen kompakter und energieeffizienter auszuführen. Komprimierter Wasserstoff wird der Brennstoffzelle aus einem Tanksystem zugeführt. Da der benötigte Sauerstoff aus der Umgebungsluft entnommen wird, ist es notwendig, die Umgebungsluft vorher durch ein Aufladesystem auf ein höheres Druckniveau zu bringen.

Im Verbundprojekt ARIEL – kurz für „Aufladung für Brennstoffzellensysteme durch interdisziplinär entwickelte Elektrische Luftverdichter“ – wird deswegen an der Luftversorgungseinheit der Brennstoffzelle geforscht. Bei dem Aggregat handelt es sich um einen elektrisch angetriebenen Turbolader, dessen schematischer Aufbau in Abbildung 1 dargestellt ist. Diese Luftversorgungseinheit ist technisch höchst anspruchsvoll und hat zudem den größten parasitären Leistungsbedarf des gesamten Brennstoffzellensystems. Das Konsortium des Projekts ARIEL besteht aus Instituten der Technischen Universität Braunschweig, der Ostfalia Hochschule für angewandte Wissenschaften und dem Institut für Turbomaschinen und Fluid-Dynamik (TFD) der Leibniz Universität Hannover. Als industrieller Partner ist die Volkswagen AG an dem Vorhaben beteiligt.

Das Hauptziel des Forschungsprojekts besteht darin, einen Nachweis über die Tauglichkeit des Antriebskonzepts für eine automobiler Anwendung zu erbringen und ein vollständig erprobtes und optimiertes Aufladesystem für Brennstoffzellen zu entwickeln. Dafür steht zu Projektbeginn das in Abbildung 2 dargestellte Luftverdichteraggregat zur Verfügung, das bisher ausschließlich bei Versuchen im Labor eingesetzt wurde. Der Reifegrad des elektrisch angetriebenen Turboladers soll nach Projektende ein Technology Readiness Level (TRL) von acht aufweisen und der Turbolader entsprechend aktuell gültiger Fahrzeugnormen einen

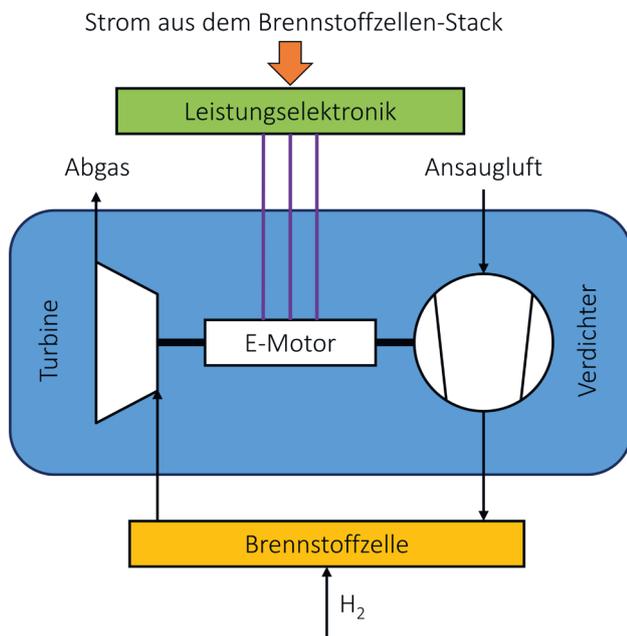
* Korrespondierender Autor.

E-Mail: menze@tfd.uni-hannover.de (M. Menze)

Nachweis über die Funktionstüchtigkeit erbringen (Grundeis 2018).

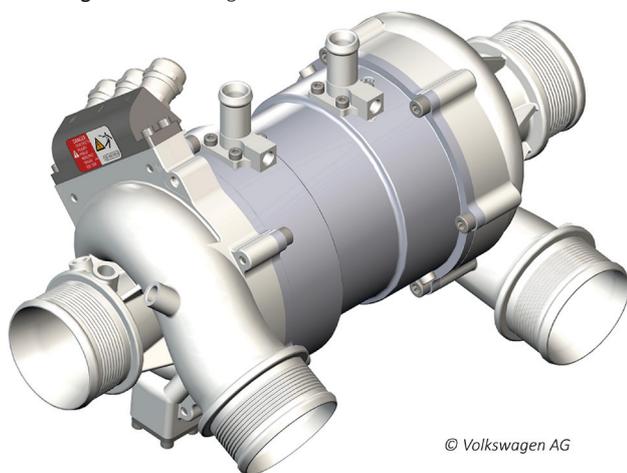
Weitere Ziele des Projekts sind ein gesteigertes Druckverhältnis, eine Erhöhung des Wirkungsgrads von Verdichter und Turbine sowie eine Verringerung von Gewicht und Kosten des Gesamtsystems, was in Tabelle 1 anhand von Zielwerten quantifiziert ist. Um diese Ziele zu erreichen, werden die Verbundpartner während des Projekts sämtliche Bestandteile des Turboladers, wie die Lagerung, die aerodynamischen Komponenten Radialverdichter und -turbine, die Leistungselektronik und den Elektromotor sowie die Fertigung des Gesamtsystems erforschen und optimieren (Grundeis 2018).

Abbildung 1: Schematischer Aufbau eines Brennstoffzellensystems



Quelle: Metz et al. 2013

Abbildung 2: Elektrisch angetriebener Turbolader



Quelle: Volkswagen AG, Salzgitter (aus persönlicher Kommunikation)

Tabelle 1: Zielgrößen des Projekts ARIEL

Zielgröße	Angestrebte prozentuale Veränderung der Zielgröße
Druckverhältnis	ca. 12 %
Max. Wirkungsgrad Verdichter	ca. 3 %
Max. Wirkungsgrad Turbine	ca. 2 %
Leistungsaufnahme im Auslegungspunkt	ca. -3 %
Gewicht	ca. -20 %
Kosten	ca. -70 %
Anzahl Einzelteile	ca. -20 %

Quelle: Grundeis 2018

2. Herausforderungen

Aus den genannten Projektbestandteilen resultieren zahlreiche Herausforderungen für die Verbundpartner. Um den Luftverdichter ölfrei zu halten und damit Verunreinigungen der Luft, welche schädlich für die Brennstoffzelle sind, zu verhindern, besitzt dieser eine aerodynamische Luftlagerung, die als Spiralrillenlager ausgeführt ist. Dieses Lagerungskonzept zeichnet sich durch eine kompakte Bauweise mit geringen Verlusten und hohem Wirkungsgrad aus. Da die Lagerung bisher jedoch keine Anwendung in einem Fahrzeug fand, gilt es zu untersuchen, inwiefern eine konstruktive Umsetzung des Lagerungskonzepts realisierbar ist. Das Konzept besitzt jedoch großes Potential, zur Serientauglichkeit des Luftverdichters beizutragen, da es sich positiv auf Bauraum, Kosten und Wirkungsgrad des Luftversorgungssystems auswirkt (Grundeis 2018).

Eine weitere Herausforderung stellt die Leistungselektronik dar. Um einen Fahrzeugbetrieb auf öffentlichen Straßen zu ermöglichen, müssen besondere Sicherheitsanforderungen an das elektrische System und die Leistungselektronik berücksichtigt werden. Zudem muss sichergestellt sein, dass die erzeugte Wärme der Leistungselektronik bei extremen Witterungsbedingungen aus dem System abgeführt wird. Dafür wird der elektrisch angetriebene Turbolader im Versuchsbetrieb bei höheren Kühlmitteltemperaturen betrieben und die Temperatur des Gesamtsystems überwacht und analysiert (Grundeis 2018).

Das Institut für Turbomaschinen und Fluid-Dynamik wird sich im Rahmen des Projekts vorrangig mit der numerischen und experimentellen Untersuchung des Turboladers beschäftigen. Insbesondere die Steigerung des Betriebsdrucks der Brennstoffzelle und damit des Druckniveaus der angesaugten Umgebungsluft in Verbindung mit einer Vergrößerung der Verdichter-Kennfeldbreite ist von großem Interesse. Damit einhergehend wären beispielsweise eine Steigerung des Wirkungsgrads, ein verringerter Bauraumbedarf oder Gewichts- und Kostenersparnisse zu erwarten. Da der elektrisch angetriebene Luftverdichter wie erwähnt

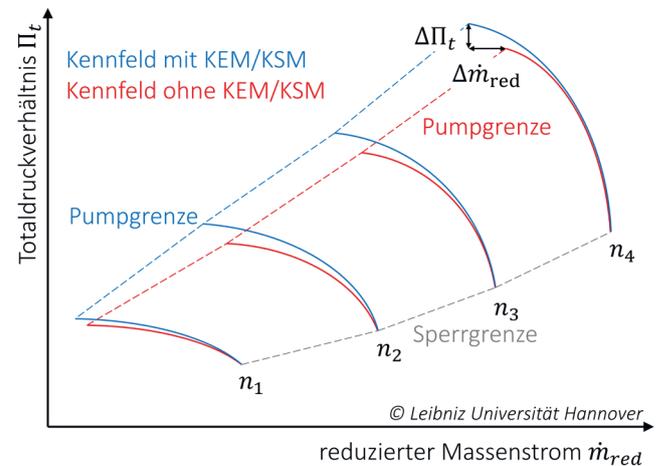
den größten parasitären Verbraucher im Gesamtsystem darstellt, wird der Einsatz einer Radialturbine unter Variation der Leitbeschaufelung untersucht, die aus dem Abgasmassenstrom der Brennstoffzelle Energie zurückgewinnen kann. Diese Maßnahme würde zu einer Verbesserung des Gesamtwirkungsgrads des Antriebskonzepts beitragen. Als herausfordernd gestaltet sich dabei vor allem, dass das Brennstoffzellenabgas im Vergleich zu Verbrennungsabgasen in herkömmlichen Abgasturbinen sehr geringe Temperaturen, kleiner als 100 °C, besitzt (Grundeis 2018).

3. Arbeitsinhalte und Methodik des TFD

Um die Funktionsfähigkeit des Brennstoffzellensystems für alle Fahrzustände eines Automobils sicherzustellen, ist es wichtig, dass die Brennstoffzelle über einen sehr großen Betriebsbereich verfügt. Bestimmend für diesen ist der Betriebsbereich des Luftversorgungssystems, der durch die maximal und minimal möglichen Massenströme durch Verdichter bzw. Turbine festgelegt wird. Abbildung 3 zeigt ein beispielhaftes Verdichterkennfeld mit verschiedenen Drehzahllinien ($n_1 \dots n_4$). Die Sperrgrenze kennzeichnet dabei den abhängig von der Drehzahl maximalen Verdichtermassenstrom, welcher sich ergibt, wenn im engsten Querschnitt Schallgeschwindigkeit erreicht wird und der Massenstrom somit nicht weiter gesteigert werden kann. Dagegen gibt die Pumpgrenze den minimalen Verdichtermassenstrom vor. Dieser wird erreicht, wenn die Strömung innerhalb der Schaufelreihe oder im Diffusor instabil wird und es zu einer Strömungsumkehr kommt – dem sogenannten Pumpen. Verdichterpumpen führt, vor allem wenn es nach kurzzeitiger Strömungstabilisierung erneut auftritt, zu starken mechanischen Belastungen des Verdichters und muss im Betrieb unbedingt vermieden werden. Deshalb darf der Verdichter nur mit einem bestimmten Sicherheitsabstand zur Pumpgrenze betrieben werden.

Durch den Vergleich und die Auswahl unterschiedlicher kennfelderweiternder und -stabilisierender Maßnahmen (KEM/KSM) soll im Projekt ARIEL der Betriebsbereich des untersuchten Luftversorgungssystems optimiert werden. Zu diesem Zweck wird das aktuelle Verdichterdesign zunächst mithilfe von numerischen Strömungssimulationen untersucht, um aus den Simulationsergebnissen Maßnahmen abzuleiten, durch die Verdichterstabilitäten und damit auch die Pumpgrenze hin zu geringeren Massenströmen verschoben werden können. In Abbildung 3 wird veranschaulicht, wie sich KEM/KSM auf die Lage der Pumpgrenze im Kennfeld auswirken können. Beispielsweise kommen als KEM/KSM sogenannte Casing Treatments (Du, Seume 2017) oder Vorleitgitter (Kleine Sextro et al. 2018) infrage, welche die Laufradanströmung positiv beeinflussen und somit die Strömung stabilisieren. Die ausgewählten Maßnahmen werden im folgenden Schritt ebenfalls durch CFD-Methoden analysiert und optimiert. Auf Basis dieser CFD-Ergeb-

Abbildung 3: Beispielhaftes Verdichterkennfeld



Quelle: TFD, Leibniz Universität Hannover

nisse werden schließlich die vielversprechendsten KEM/KSM ausgewählt und in einem hochinstrumentierten Verdichteraggregat experimentell untersucht.

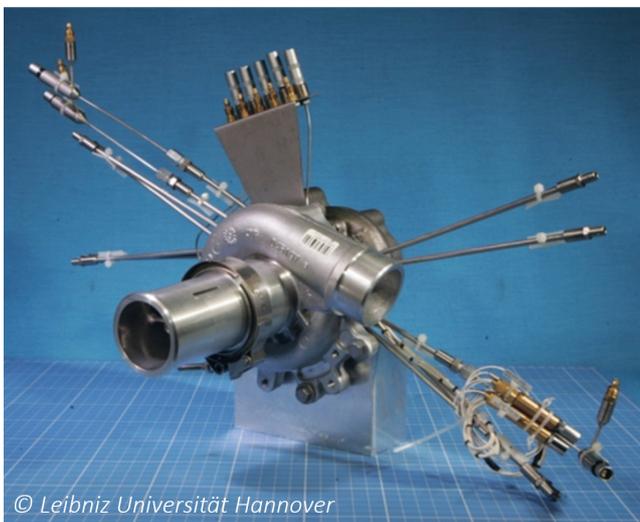
In ähnlicher Weise werden auf der Turbinenseite auf Grundlage von numerischen Simulationen geeignete Geometrievariabilitäten ausgewählt und experimentell untersucht. Durch diese Konzepte soll vor allem die rekuperierte Turbinenleistung gesteigert und die Einstellung des Brennstoffzellenarbeitsdrucks ermöglicht werden.

Die angesprochenen Experimente werden unter anderem am Prüfstand für Auflade- und elektrisch angetriebene Verdichtersysteme des Instituts für Turbomaschinen und Fluid-Dynamik (siehe Abbildung 4) durchgeführt. Dieser ist mit einer erdgasbefeuerten Doppelbrennkammeranlage ausgestattet, wodurch eine thermische Leistung zwischen 5 und 800 kW erzeugt werden kann. Es lassen sich Turbineneintrittstemperaturen zwischen 25 und 1050 °C bei einem Abgasmassenstrom von 0,001 bis 0,8 kg/s realisieren. Weiterhin steht ein bidirektionales Netzgerät mit einer Leistung von 30 kW für die Energieversorgung der Leistungselektronik zur Verfügung, die den Betrieb des Luftverdichters steuert. Um einen Versuchsbetrieb für Brennstoffzellen zu gewährleisten, kann der Versuchsstand ölfrei betrieben werden. Durch den genannten Betriebsbereich und die zusätzlichen Funktionen werden die notwendigen Randbedingungen für den Betrieb des elektrisch angetriebenen Luftverdichters des vorgestellten Projekts vollständig abgedeckt. Bei den experimentellen Untersuchungen werden unter anderem stationäre Druckmesstechnik, unterschiedliche Temperaturmesstechnik (Typ K, Pt100), Beschleunigungssensoren zur Schwingungsüberwachung und Wirbelstromsensoren für Wellenbahnmessungen zum Einsatz kommen. Die aufwendige und technisch sehr anspruchsvolle Instrumentierung der Versuchsträger erfolgt in der TFD-eigenen Feinwerkmechaniker-Werkstatt. Abbildung 5 zeigt beispielhaft einen am Institut instrumentierten Abgasturbolader.

Abbildung 4: Prüfstand für Auflade- und elektrisch angetriebene Verdichtersysteme des TFD

© Leibniz Universität Hannover

Quelle: TFD, Leibniz Universität Hannover

Abbildung 5: Instrumentierter Abgasturbolader

© Leibniz Universität Hannover

Quelle: TFD, Leibniz Universität Hannover

4. Fazit

Das vorgestellte Verbundprojekt hat eine Laufzeit von etwa dreieinhalb Jahren und befindet sich mittlerweile in Bearbeitung. Mit den ersten Ergebnissen und zugehörigen Veröffentlichungen wird in absehbarer Zeit zu rechnen sein. Nach erfolgreichem Projektabschluss sollen alle gewonnenen Erkenntnisse anhand eines vollständig erprobten und optimierten Aufladesystems für Brennstoffzellen präsentiert und als Basis für eine Serienfertigung genutzt werden.

Danksagung und Förderhinweis

Diese Untersuchungen sind Teil des Forschungsprojekts „Aufladung für Brennstoffzellensysteme durch interdisziplinär entwickelte Elektrische Luftverdichter“. Die Autoren danken dem Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI), welches diese Arbeit im Rahmen des Nationalen Innovationsprogramms Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie (NIP) mit insgesamt etwa 6,4 Millionen Euro fördert. Außerdem gilt der Dank der NOW GmbH, welche die Förderrichtlinien koordiniert, und dem Projektträger Jülich (PtJ), der für die Umsetzung der Förderrichtlinien zuständig ist. Weiterhin bedanken sich die Autoren ebenfalls bei dem gesamten Projektkonsortium, bestehend aus der Volkswagen AG und allen teilnehmenden Instituten der Technischen Universität Braunschweig und der Ostfalia Hochschule für angewandte Wissenschaften.



Gefördert durch:

Bundesministerium
für Verkehr und
digitale Infrastruktur

Kooridiert durch:



Projektträger:



Literatur

Du, J.; Seume, J.R. (2017): Design of Casing Treatment on a Mixed-Flow Compressor, Proceedings of ASME Turbo Expo 2017, June 26-30, 2017, Charlotte, NC, USA, GT2017-65226

Grundeis, D. (Volkswagen AG) (2018): Aufladung für Brennstoffzellen durch interdisziplinär entwickelte Luftverdichter (ARIEL), NIP-Vollversammlung, Berlin, 05.12.2018

Hasegawa, T.; Imanishi, H.; Nada, M.; Ikosi, Y. (2016): Development of the Fuel Cell System in the Mirai FCV, SAE Technical Paper 2016-01-1185

Kleine Sextro, T.; Fischer, T.; Flinte, J. (2018): Leitgitterblende für Turbolader-Verdichter zur Erweiterung des stabilen Betriebsbereichs, FVV-Abschlussbericht, Vorhaben-Nr. 1194

Metz, D.; Werner, J.; Münz, S.; Becker, M. (2013): Charging System for Fuel Cell Applications, MTZ Worldwide, April 2013, Vol. 74, Issue 4, pp. 40-434

Sugawara, T.; Kanazawa, T.; Imai, N.; Tachibana, Y. (2017): Development of Motorized Turbo Compressor for Clarity Fuel Cell, SAE Technical Paper 2017-01-1187