

HumAir

Optimization of the Water Management of a PEM Fuel Cell with Grid-Free Simulation Methods

Programm / Ausschreibung	FORPA, Dissertaionen 2024, Industrienahe Dissertationen 2025	Status	laufend
Projektstart	01.10.2025	Projektende	31.03.2028
Zeitraum	2025 - 2028	Projektaufzeit	30 Monate
Keywords	Meshfree, fuel cell, optimization, simulation, humidity, drowning		

Projektbeschreibung

Brennstoffzellen sind aufgrund der hohen Energiedichte, kurzen Betankungszeiten und der lokalen Emissionsfreiheit eine Schlüsseltechnologie zur Erreichung der Ziele, die von der Europäischen Union im Green Deal definiert sind. Der Green Deal ist ein umfassendes Maßnahmenpaket zur Erreichung der Klimaneutralität. Brennstoffzellen werden dabei in der Mobilität vor allem bei schweren Nutzfahrzeugen und Sondermaschinen eine wichtige Rolle spielen, stationäre Brennstoffzellen werden zur Strom- und Wärmeerzeugung und zur Dekarbonisierung energieintensiver Industrien verwendet werden.

Rund 60%-70% der weltweit installierten Brennstoffzellenleistung entfällt auf Proton-Exchange-Membran-Brennstoffzellen (PEM-BZ). Für den Wirkungsgrad dieser Brennstoffzellentechnologie ist das Wassermanagement von entscheidender Bedeutung. Der höchste Wirkungsgrad wird bei einer Luftfeuchte von 100% erreicht, der für eine Luftfeuchte von 50% auf rund ein Drittel absinkt. Im Gegensatz dazu produziert die PEM-BZ laufend Wasser, das vom Gas in der Kathode aufgenommen werden muss. Flüssiges Wasser in der Brennstoffzelle führt zum sogenannten „Drowning“ und zu einem Effizienzverlust und zu einer vorzeitigen Schädigung der Membran.

Die Aufgabe des Wassermanagements einer PEM-BZ ist es auch bei stark volatilen Randbedingungen, wie sie bei Mobilitätsanwendungen üblich sind, die Luftfeuchte zu optimieren und gleichzeitig eine Flutung der Brennstoffzelle zu vermeiden.

Um die Entwicklungszeiten und Kosten zu minimieren und den Bau und die Untersuchung von teuren Prototypen zu vermeiden, wird auch in diesem Technologiebereich auf simulatorische Methoden zurückgegriffen. Derzeit sind gitterbasierte Methoden Stand der Technik bei denen das Volumen der Brennstoffzelle diskretisiert wird und die physikalischen Gleichungen für alle Zellen gelöst werden. Im Gegensatz dazu stehen gitterfreie Methoden, bei denen die Ausbreitung von Punktvolumen berechnet wird. Gitterfreie Methoden sind bei porösen Medien, bei der Simulation von Phasenübergängen (Gas-Wasser-Interaktion), bei dynamischen Phasengrenzen gitterbasierten Methoden und beim Wassertransport überlegen. Damit sie sind für die Simulation des Wassermanagements einer PEM-BZ den konventionellen gitterbasierten Verfahren vorzuziehen.

Im Rahmen dieser Dissertation wird ein Simulationsframework basierend auf der Software MeshFree entwickelt, mit dem eine Optimierung des Wassermanagements einer PEM-BZ durchgeführt werden kann.

In einem ersten Schritt werden Modelle für das Verdampfen von Wassertropfen sowie den Transport von Wassertropfen oder Wassersträhnen unter Scherströmung erstellt und mit Messdaten validiert.

Für die aktive Befeuchtung der Zuluft in der Kathode wird auf ein einfaches Spraymodell zurückgegriffen, weil mit dieser Methode dynamisch auf die geforderte Luftfeuchte reagiert werden kann. Es werden Tröpfchenverdampfung, Wandfilmbildung und Wandfilmtransport modelliert.

Das Flowfield (Strömungsfeld) einer Brennstoffzelle beschreibt die speziell gestalteten Kanäle auf den Bipolarplatten, durch die die Reaktionsgase (Wasserstoff und Sauerstoff bzw. Luft) zur Membran-Elektroden-Einheit (MEA) geführt werden. Die Durchströmung, Wasserbildung und Wassertransport in diesem Flowfield wird in einem nächsten Schritt simuliert.

Die Validierung des Simulationsmodells erfolgt anschließend an einem Komponentenprüfstand sowie auf einem Brennstoffzellenprüfstand.

Abstract

Due to their high energy density, short refuelling times and zero local emissions, fuel cells are a key technology for achieving the targets defined by the European Union in the Green Deal. The Green Deal is a comprehensive package of measures to achieve climate neutrality. Fuel cells will play an important role in mobility, especially in heavy commercial vehicles and special machinery, while stationary fuel cells will be used to generate electricity and heat and to decarbonise energy-intensive industries.

Proton exchange membrane fuel cells (PEM FCs) account for around 60%-70% of the fuel cell capacity installed worldwide. Water management is of crucial importance for the efficiency of this fuel cell technology. The highest efficiency is achieved at an air humidity of 100%, which drops to around a third at an air humidity of 50%. In contrast, the PEM fuel cell continuously produces water, which must be absorbed by the gas in the cathode. Liquid water in the fuel cell leads to so-called 'drowning' and to a loss of efficiency and premature damage to the membrane.

The task of water management in a PEM fuel cell is to optimise the humidity and at the same time prevent flooding of the fuel cell, even under highly volatile boundary conditions, as is common in mobility applications.

In order to minimise development times and costs and to avoid the construction and testing of expensive prototypes, simulative methods are also used in this area of technology. Currently, grid-based methods are state of the art, in which the volume of the fuel cell is discretised and the physical equations are solved for all cells. This contrasts with grid-free methods, in which the propagation of point volumes is calculated. Grid-free methods are superior to grid-based methods for porous media, for the simulation of phase transitions (gas-water interaction), for dynamic phase boundaries and for water transport. They are therefore preferable to conventional grid-based methods for the simulation of water management in a PEM FC.

This dissertation develops a simulation framework based on the MeshFree software that can be used to optimise the water

management of a PEM FC.

In a first step, models for the evaporation of water droplets and the transport of water droplets or water strands under shear flow are created and validated with measurement data.

For the active humidification of the supply air in the cathode, a simple spray model is used because this method can react dynamically to the required air humidity. Droplet evaporation, wall film formation and wall film transport are modelled.

The flow field of a fuel cell describes the specially designed channels on the bipolar plates through which the reaction gases (hydrogen and oxygen or air) are channelled to the membrane electrode assembly (MEA). The flow, water formation and water transport in this flow field is simulated in the next step.

The simulation model is then validated on a component test bench and on a fuel cell test bench.

Projektpartner

- Virtual Vehicle Research GmbH