

ProLipEM

Lipid-like liquid crystals as proton conducting materials for fuel cells

Programm / Ausschreibung	Spin-off Fellowship, Spin-off Fellowship, 2. AS Spin Off Fellowship 2022-2027	Status	laufend
Projektstart	01.03.2024	Projektende	31.01.2026
Zeitraum	2024 - 2026	Projektlaufzeit	23 Monate
Keywords	Proton-exchange membranes; organic materials; fuel cell;		

Projektbeschreibung

Die Zukunft der Energieerzeugung liegt jenseits der fossilen Brennstoffe, da die weltweiten Ressourcen abnehmen und die vom Menschen verursachte Verschmutzung durch deren übermäßige Nutzung den Klimawandel vorantreibt. Eine vielversprechende Möglichkeit der Energieerzeugung sind Brennstoffzellen (FC), die elektrische Energie aus der elektrochemischen Reaktion von Wasserstoff und Sauerstoff gewinnen. Brennstoffzellensysteme werden derzeit in Fahrzeugen und stationären Stromversorgungsanlagen eingesetzt, und es wird erwartet, dass sie sich zunehmend verbreiten werden. Polymermembranen spielen eine Schlüsselrolle in mehreren Klassen von FC, darunter Polymerelektrolytmembranen (PEMFC), Direktmethanolmembranen (DMFC) und alkalische Membranen (AFC), die für Fahrzeuge und tragbare Geräte konzipiert sind. PEMs bestehen jedoch in der Regel aus Perfluorsulfonsäuren (PFSA), meist Nafion™. PFSA haben mehrere Nachteile, darunter eine begrenzte Bandbreite an Betriebsbedingungen, hohe Kosten (>\$500/sq.m) und die Umweltproblematik im Zusammenhang mit perfluorierten Verbindungen. Die von Toyota, GM und dem US-DoE für das Jahr 2030 gesteckten Ziele verlangen nach FC mit höherem Wirkungsgrad und höheren Betriebstemperaturen (>120°C). Die derzeitigen PFSA-Membranen können diese Ziele nicht erfüllen, und die Suche nach Alternativen ist von höchster Priorität. Im Rahmen dieses Projekts werden vielversprechende Kohlenwasserstoff-Alternativen zu PEMs entwickelt, die auf unserem urheberrechtlich geschützten Wissen über Flüssigkristalle (LCs) aus lipidähnlichen Molekülen (Lipidoiden), die Protonen leiten, aufbauen: ProLipEMs. ProLipEMs bilden sich, wenn Lipidoide mit Säuren gemischt werden, die sie in LCs mit ionischen Nanokanälen (0,5-2 nm breit) verwandeln, durch die Protonen geleitet werden. Die Lipidoid-Bausteine von ProLipEMs werden in einem umweltfreundlichen Prozess aus kostengünstigen Ausgangsmaterialien synthetisiert, und die Materialkosten werden nach dem Scale-up voraussichtlich <\$100/sq.m betragen. ProLipEMs haben grundlegende Vorteile bezüglich Materialeigenschaften gegenüber den derzeitigen PEMs: Da sie nur ein Minimum an Wasser enthalten, sind sie unempfindlich gegenüber Änderungen der relativen Luftfeuchtigkeit und zeigen eine erhöhte Leitfähigkeit bei höheren Temperaturen. Im Gegensatz dazu leiden PFSA unter Dehydrierung und die Leitfähigkeit nimmt oberhalb von 80°C ab. Die Widerstandsfähigkeit von ProLipEM gegenüber hohen Temperaturen und niedriger Luftfeuchtigkeit dürfte daher ihre Verwendung in verschiedenen Klassen von FC erleichtern und das Spektrum der FC-Anwendungen erweitern. Die Entwicklung von ProLipEMs in Richtung Kommerzialisierung wird durch mehrere Meilensteine erreicht. Erstens werden die am besten protonenleitenden Materialien aus den Hunderten von möglichen Strukturen durch Hochdurchsatz-Screening

mit Hilfe von maschinellem Lernen identifiziert. Von den vielversprechenden "Hit"-ProLipEM-Materialien werden durch die Messung grundlegender temperatur- und feuchtigkeitsabhängiger Eigenschaften ihre potenziellen Einsatzbereiche in FCs ermittelt. Das Projekt wird auch die Maßstabsvergrößerung der Membranproduktion umfassen, damit sie in die Membranmontageprozesse passt. Schließlich werden die wichtigsten Leistungsindikatoren von ProLipEMs in FC-Umgebungen getestet, einschließlich Leistungsdichte, Gasdurchlässigkeit, Betriebslebensdauer und Langzeitdegradation.

Abstract

The future of energy production lies beyond fossil fuels, as global resources decrease and manmade pollution from its overuse drives climate change. One highly promising means of energy generation is through fuel cells (FCs), which derive electrical energy from the electrochemical reaction of hydrogen and oxygen. FC systems are currently used in vehicles and stationary power applications and are expected to become increasingly widespread. Polymer membranes play a key role in several classes of FCs including polymer electrolyte membrane (PEMFC), direct methanol (DMFCs) and alkaline (AFCs), which are designed for vehicles and portable devices. However, PEMs are typically composed of perfluorosulfonic acids (PFSA), most commonly Nafion™. PFSA have several drawbacks, including a limited range of operating conditions, high cost (>\$500/sq.m), and the environmental issues surrounding perfluorinated compounds. Targets set by Toyota, GM, and US DoE for 2030 outline demands for FCs with higher efficiency and higher operating temperatures (>120°C). Current PFSA membranes cannot meet these targets and finding alternatives is an imminent priority.

This project will develop promising hydrocarbon alternatives to PEMs, building on our proprietary knowledge of liquid crystals (LCs) of lipid-like molecules (lipidoids) that conduct protons: ProLipEMs. ProLipEMs form when lipidoids are mixed with acids, transforming them into LCs containing ionic nanochannels (0.5-2 nm wide) through which protons are conducted. The lipidoid building blocks of ProLipEMs are synthesized in an environmentally-friendly process from low cost starting materials, and material costs after scale-up are anticipated to be <\$100/sq.m. ProLipEMs have fundamental material property advantages over current PEMs: because they contain minimal water, they are unaffected by changes in relative humidity (RH) and show increased conductivity at higher temperatures. In contrast, PFSA suffer dehydration and conductivity decreases above 80°C. Thus, the resilience of ProLipEM to high temperatures and low humidities should facilitate their use in different classes of FCs, broadening the range of FC applications.

Developing ProLipEMs towards commercialization will be achieved through several milestones. Firstly, the highest proton conducting materials will be identified from the 100s of possible structures using high-throughput screening facilitated by machine learning. From the promising "hit" ProLipEM materials, measuring fundamental temperature and RH-dependent properties will identify their potential windows of operation within FCs. The project will also encompass scale-up of membrane production to fit into membrane assembly processes. Finally, key performance indicators of ProLipEMs will be tested within FC environments, including power density, gas permeability, operating lifetime and long-term degradation.

Endberichtkurzfassung

ProLipEM accelerated the development of a new class of PFAS-free proton-exchange membranes for fuel cells and electrolyzers. Proton-exchange membranes are key components in hydrogen technologies, enabling ion transport processes inside electrochemical devices. Today's commercial membranes are mainly based on fluorinated materials and often require high humidity and limited operating temperatures. The aim of ProLipEM was therefore to develop more sustainable membrane materials with improved stability and a wider operating window.

During the project, more than 60 structurally distinct precursor molecules were synthesised and processed into over 300

different membrane prototypes with distinct chemical properties. This broad screening approach allowed the project team to identify important structure-property relationships and optimise the materials with respect to proton conductivity, thermal stability, chemical resistance and dimensional stability.

A major project outcome was the development of two generations of novel precursor molecules and corresponding membrane fabrication routes for low- and high-temperature PEM applications. These developments formed the basis for two patent applications submitted in January 2026. The synthesis and membrane preparation processes were advanced to laboratory prototype level, and reproducible membrane fabrication up to 10 × 10 cm was demonstrated. In parallel, first steps towards production scale-up were initiated.

The developed membranes showed a promising combination of properties relevant for future hydrogen technologies. Selected membrane prototypes exhibited proton conductivity under highly demanding conditions, thermal stability over 180 °C, and high chemical resistance against acidic and oxidative environments. In addition, the membranes showed very low dimensional changes upon exposure to water, with shrinking and swelling less than 5% (3 times less than market leading membranes).

These properties address key limitations of current PEM systems. Improved dimensional stability can reduce mechanical stress during membrane electrode assembly fabrication and operation, where repeated swelling and shrinking may contribute to defects such as cracks or delamination. Higher thermal stability and conductivity under demanding conditions indicate potential for future fuel cells and electrolyzers with reduced humidification requirements and improved tolerance towards harsher operating environments. One relevant use-case is heavy-duty fuel-cell mobility, where membranes that are more stable at elevated temperatures and lower humidity could reduce the complexity, size and energy demand of humidification and cooling systems.

Overall, ProLipEM established a promising PFAS-free membrane platform, protected key intellectual property, generated first scalable fabrication know-how. The team have created a clear basis for further development towards fuel-cell and electrolyser testing, industrial validation and commercialisation. Building on these results, the project was already successfully transferred into the newly founded start-up ionida FlexCo.

Projektpartner

- Universität Graz