

© Gumpert

# Reformer-Methanol-Brennstoffzelle als klimaneutraler Antrieb für Nutzfahrzeuge

Wasserstoff wird als zukunftsfähiger Energieträger betrachtet. Dabei sind der sichere Umgang mit Wasserstoff und dessen Speicherung im Fahrzeug technisch höchst anspruchsvoll. Auch der Ausbau der Wasserstoff-Tankstelleninfrastruktur stellt eine Herausforderung dar. Mögliche Abhilfe kann die Verwendung von Methanol als Wasserstoffträger schaffen, da es sich klimaneutral herstellen, nutzen und einfach speichern lässt. Dieser Artikel von Gumpert und der Technischen Hochschule Ingolstadt stellt eine Reformer-Methanol-Brennstoffzelle für Nutzfahrzeuge und ihr Potenzial zur Förderung der nachhaltigen Mobilität vor.

VERFASST VON



**Gero Walter, B. Eng.**  
ist Ingenieur für die Entwicklung von Reformier-Methanol-Brennstoffzellen bei der Gumpert Automobile GmbH in Ingolstadt.



**Prof. Dr.-Ing. Karl Huber**  
ist Professor für Thermodynamik und Verbrennungsmotoren an der Technischen Hochschule Ingolstadt.



**Dipl.-Ing. (FH) Grazian Eller**  
ist Entwicklungsleiter bei der Gumpert Automobile GmbH in Ingolstadt.

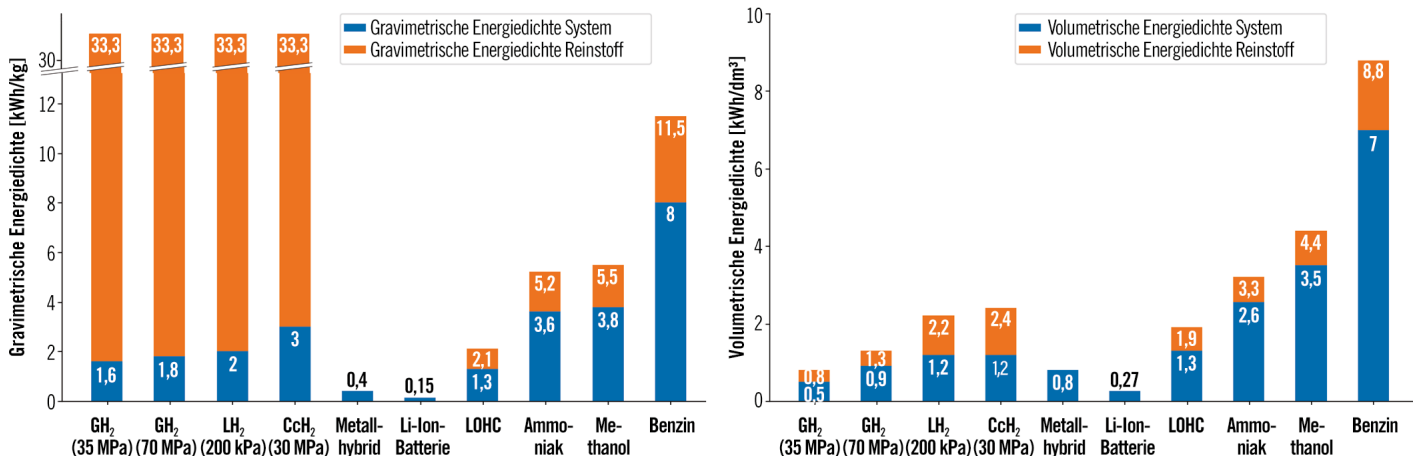


**Mirjam Meusel, B. Eng.**  
ist Wissenschaftliche Mitarbeiterin an der Technischen Hochschule Ingolstadt.

Für einen teilweisen oder vollständigen Ersatz fossiler Energie im Verkehrssektor bedarf es alternativer Energieträger. Aktuell werden hierfür vornehmlich batterieelektrische Antriebe entwickelt. Aufgrund der geringen Energiedichte derzeit am Markt verfügbarer Lithium-Ionen-Batterien sind diese für energieintensive Einsätze in schweren Nutzfahrzeugen nur bedingt geeignet. Zur Verdeutlichung vergleicht **BILD 1** die gravimetrischen und volumetrischen Energiedichten von derzeit für die Mobilität diskutierten Wasserstoffspeichern und Batterien sowie von handelsüblichem Kraftstoff (Benzin). Dabei sind die erreichbaren Werte für den Energieträger als orange Balken und für das komplette Speichersystem als blaue Balken dargestellt. Es zeigt sich, dass chemisch gebundene Speicherformen wie Ammoniak und Methanol zwar verglichen mit Benzin geringere Energiedichten haben, aber deutlich höhere Energiedichten als reine Wasserstoffsysteme aufweisen. Dadurch können wesentliche Leis-

tungsmerkmale, etwa bezüglich Reichweite und Nutzlast, umgesetzt werden. Wird chemisch gebundener Wasserstoff in Form flüssiger organischer Wasserstoffträger (Liquid Organic Hydrogen Carriers, LOHCs) oder Methanol für den Verkehrssektor eingesetzt, kann die bestehende Tankstelleninfrastruktur mit vergleichsweise geringem Aufwand umgerüstet werden. Das aus der Wasserstoffmobilität bekannte „Henne-Ei“-Problem, bei dem zunächst die Errichtung von Tankstellen mit Anschaffungskosten von oft über einer Million Euro pro Einheit [1] notwendig ist, besteht für die Verwendung von Methanol in diesem Umfang nicht. Methanol ist eine chemische Verbindung mit der Halbstrukturformel  $\text{CH}_3\text{OH}$ . Wie in den folgenden Kapiteln näher beschrieben, kann Methanol klimaneutral durch die Synthese von Wasserstoff und  $\text{CO}_2$  hergestellt werden. Zur Erzeugung kann die hohe Verfügbarkeit von Wind- und Sonnenenergie in einigen Regionen der Welt genutzt

werden. Ein Vergleich der mittleren spezifischen Windleistung in den windstärksten Regionen von Deutschland ( $595 \text{ W/m}^2$ ) und Süd-Chile ( $5454 \text{ W/m}^2$ ) [2] (berücksichtigt sind jeweils die 10 % der windreichsten Gesamtlandesfläche) unterstreicht die Notwendigkeit der räumlichen Trennung von Erzeugung und Nutzung. In Süd-Chile befindet sich auch die Pilotanlage Haru Oni [3] zur Erzeugung von E-Fuels wie E-Methanol. Bereits heute wird Methanol im großen Stil nach Europa importiert, im Jahr 2021 im Wert von über 2 Milliarden US-Dollar [4], was über 4,5 Millionen t entspricht. Die Handhabung von Methanol als einem bei Raumtemperatur flüssigen Energieträger ist weitaus einfacher als die von Wasserstoff. Eine Befüllung herkömmlicher Tankstellen mit Methanol ist ohne große Umrüstungsaufwände realisierbar. Antriebe auf reiner Methanolbasis (M100) sind derzeit zwar noch selten, werden insbesondere in China aber bereits im Straßenverkehr eingesetzt. In den von der chinesischen



**BILD 1** Gravimetrische (links) und volumetrische (rechts) Energiedichte von Speichersystemen im Verkehrssektor (die Darstellung betrachtet die Speicherung und nicht den Wirkungsgrad bei der Energiewandlung; GH<sub>2</sub>: Gasförmiger Wasserstoff; LH<sub>2</sub>: Flüssigwasserstoff; CcH<sub>2</sub>: Kryo-komprimierter Wasserstoff) (© Gumpert)

Regierung publizierten Leitlinien zum Einsatz von Methanolfahrzeugen in verschiedenen Bereichen [5] wird beispielsweise festgelegt, dass die Entwicklung von Methanolfahrzeugen mit Verbrennungsmotor oder Brennstoffzellenantrieb sowie deren Einsatz in einigen chinesischen Regionen gefördert werden soll. Im Rahmen eines Forschungsprojekts namens C3-Mobility wurden zudem im europäischen Rahmen die Grundlagen für die Standardisierung von Methanol als Kraftstoff untersucht [6].

**REGENERATIVES METHANOL**

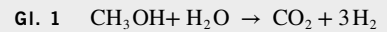
Mit einer weltweiten Jahresproduktion von über 106 Millionen t im Jahr 2022 [7] ist Methanol bereits heute eine der weltweit bedeutendsten Basischemikalien. Methanol wird stets aus einem Synthesegas hergestellt. Je nach Verfahren sind dafür unterschiedliche Teilprozesse notwendig, die hier vereinfacht als Synthese bezeichnet werden. Maßgeblich für die Klimabilanz des Methanols sind die Herstellung und der Ursprung des Synthesegases. In der Literatur wird zur Einordnung häufig dieselbe Farblehre wie bei Wasserstoff verwendet. Eine Darstellung der Herstellpfade für regeneratives Methanol findet sich in **BILD 2**. Regenerativ erzeugtes und auf Basis fossiler Brennstoffe hergestelltes Methanol sind chemisch identisch, das erstere verursacht jedoch über seine Lebenszeit geringere Treibhausgasemissionen [8].

Zur Herstellung von Bio-Methanol wird das Synthesegas für die Methanolherstellung aus Biomasse gewonnen, wobei für den Herstellprozess mehrere Konzepte verfügbar sind: direkte Vergasung, Reformierung von Biogas und Extraktion aus dem Zellstoffkreislauf von Zellstofffabriken. Die Prozesse zur Biomethanolsynthese sind für alle Konzepte gleich: Die Grundstoffe werden zunächst mehrfach gereinigt und zu einem Synthesegas umgewandelt, dieses wird dann zu „grünem“ Methanol synthetisiert [8, 9].

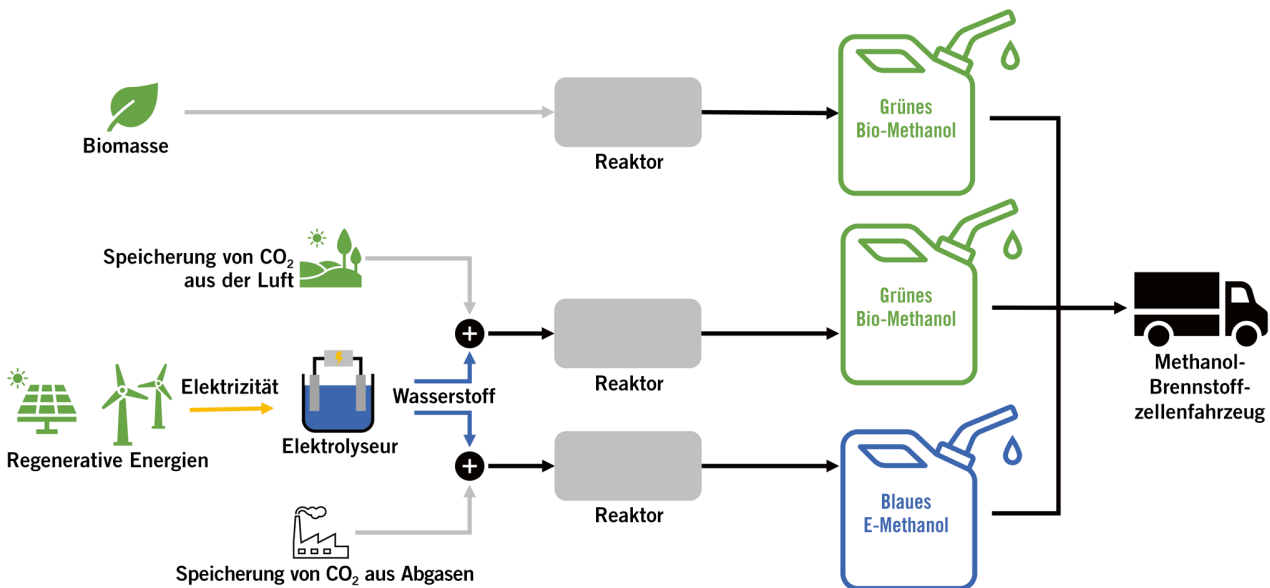
Die Basis von E-Methanol bildet die Elektrolyse mit regenerativ erzeugter Elektrizität. Auch für die Herstellung von E-Methanol sind mehrere Herstellungsverfahren möglich. Bei der gängigsten Methode wird durch Elektrolyse mit regenerativem Strom gewonnener Wasserstoff in einer katalytischen Reaktion mit CO<sub>2</sub> zu Methanol synthetisiert. Alternative Syntheseprozesse produzieren das Synthesegas aus CO und H<sub>2</sub> unter Zufuhr von regenerativer Elektrizität, Wasser und CO<sub>2</sub> bei der Elektrolyse und wandeln dieses im Folgeschritt zu E-Methanol um. Auch die Nutzung eines direkten elektrochemischen Umwandlungsverfahrens von CO<sub>2</sub> und Wasser zu E-Methanol ist möglich [8]. Wenn das verwendete CO<sub>2</sub> aus der Luft entnommen wurde, spricht man von „grünem“ E-Methanol [8]. Entsteht es beispielsweise Abgasen aus Industrieanlagen, entsteht „blaues“ E-Methanol [8].

**FAHRZEUGKONZEPT MIT REFORMER-METHANOL-BRENNSTOFFZELLE**

In der Grundfunktion sind Fahrzeuge mit Reformer-Methanol-Brennstoffzelle (Reformed Methanol Fuel Cell, RMFC) und mit reinem Wasserstoff gespeisten Brennstoffzellen identisch. Der Unterschied liegt hauptsächlich in der Speicherform des Wasserstoffs. Fahrzeuge mit RMFC speichern Methanol in flüssiger Form unter Umgebungstemperatur, während mit reinem Wasserstoff betriebene Fahrzeuge diesen üblicherweise tiefkalt oder unter hohem Druck speichern und direkt ohne Umwandlungsprozesse in die Brennstoffzelle leiten. Fahrzeuge mit RMFC verwenden ebenfalls Wasserstoff in der Brennstoffzelle. Dieser muss jedoch zunächst im Rahmen einer exothermen Reaktion, der sogenannten Dampfreformierung, aus Methanol gewonnen werden. Im Reformer wird dazu ein zuvor im Verdampfer erzeugtes und verdampftes Gemisch aus 60 % Methanol und 40 % Wasser unter weiterer Wärmezufuhr über einen Katalysator geleitet. Wie in Gl. 1 beschrieben, resultiert daraus ein Reformat mit den Hauptbestandteilen Wasserstoff und CO<sub>2</sub>:



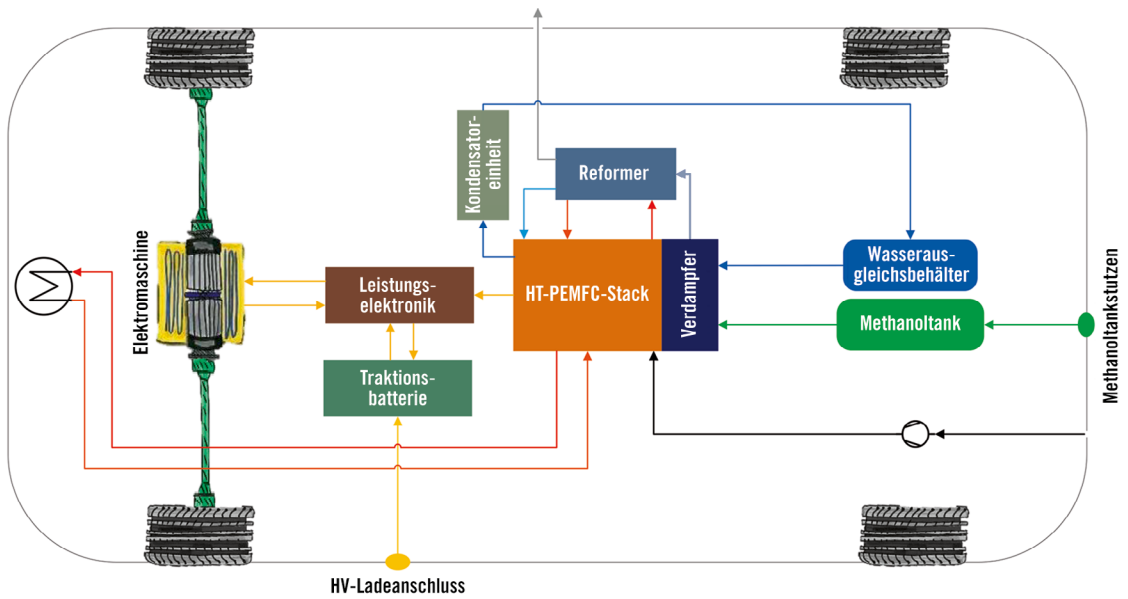
Die Reinheit des hierbei entstehenden Reformats ist deutlich geringer als bei reinem Wasserstoff für herkömm-



**BILD 2** Produktionspfade von klimaneutralem Methanol (© Gumpert)

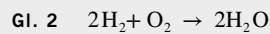
**BILD 3** Schematischer Aufbau eines RMFC-Systems im Fahrzeug (© Gumpert)

- CO<sub>2</sub>
- Elektrizität
- Wasser
- Methanol
- Methanol-Wasser-Gemisch
- Wasserstoff
- Umgebungsluft
- Wärme



liche Fahrzeuganwendungen. Durch die Verwendung einer gegen Verunreinigungen des Anodengases deutlich unempfindlicheren Hochtemperatur-Polymerelektrolyt-Brennstoffzelle (HT-PEMFC) kann auch Reformat als Edukt verwendet werden. In einem zusätzlichen Schritt wird ein Teil des Reformats im Reformer thermisch verwertet, um dessen Betriebstemperatur zu erhalten.

Wie bei einer Niedertemperatur PEMFC reagiert der Wasserstoff in der HT-PEMFC mit dem Sauerstoff aus der Umgebungsluft gemäß Gl. 2 zu Wasser, wobei elektrische Energie zum Antrieb des Fahrzeugs frei wird.



Um kein zusätzliches Wasser für den Reformierungsprozess mitführen zu müssen, wird in aktuellen RMFC-Konzepten ein Teil des an der Brennstoffzelle entstehenden Wassers an der Kondensatoreinheit aufgefangen und zur Bildung des Wasser-Methanol-Gemischs im Verdampfungsprozess verwendet.

Wie in **BILD 3** ersichtlich, entspricht der restliche Aufbau eines Fahrzeugs mit RMFC dem eines herkömmlichen Brennstoffzellenfahrzeugs. Die in der Brennstoffzelle erzeugte elektrische

Energie wird an eine eigene Leistungselektronik geleitet, die die Ausgangsspannung der Brennstoffzelle für Batterie und Elektromaschine wandelt. Abhängig vom aktuellen Fahr- und Ladezustand der Batterie wird die Leistung auf das Antriebssystem und die Traktionsbatterie verteilt. Bei rekuperativen Bremsvorgängen wird die in der Elektromaschine erzeugte Energie in die Traktionsbatterie rückgespeist. Der Kraftstoffbehälter für das Methanol wird über einen eigenen Tankstutzen befüllt. Über eine Ladebuchse kann die Traktionsbatterie auch an einer Ladesäule aufgeladen werden.



**FEV**  
propulsion

# Sustainable mobility solutions

Die Ingenieure bei FEV bauen auf jahrzehntelange Erfahrung in der Entwicklung von innovativen Antriebslösungen. In hochmodernen unternehmenseigenen Entwicklungszentren werden CO<sub>2</sub>-neutrale Technologien entwickelt, die FEVs Kunden weltweit den entscheidenden Vorsprung sichern. FEV hinterfragt, erforscht, testet und entwickelt kontinuierlich weiter – so verschiebt FEV, ein weltweit führender Entwicklungsdienstleister, die Grenzen nachhaltiger Innovation für eine bessere, saubere Zukunft.

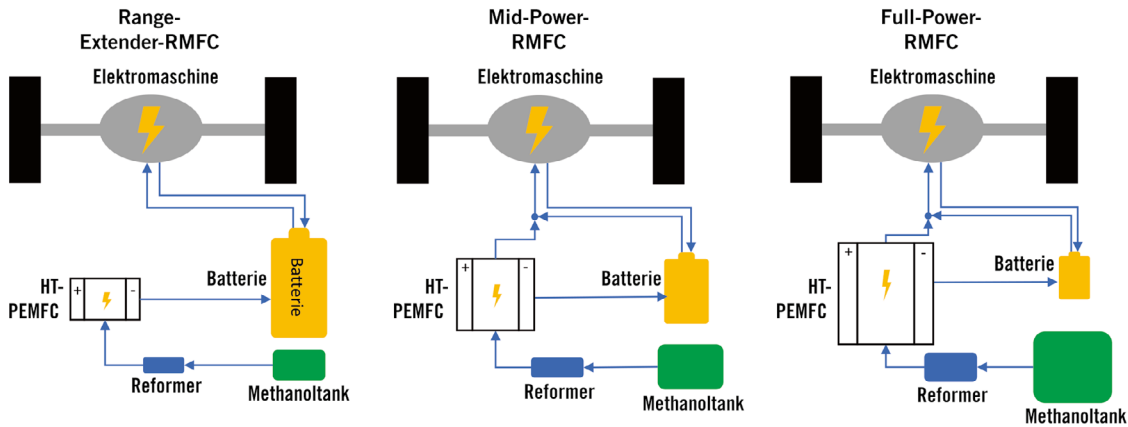


BILD 4 Auslegungsvarianten von RMFC-Systemen im Fahrzeug (© Gumpert)

Für die Auslegung des Antriebsstrangs in Nutzfahrzeugen kommen verschiedene Antriebstopologien infrage. Diese werden üblicherweise in brennstoffzellendominante und Range-Extender-Antriebe unterteilt. Je nach Ausführung werden dabei die Brennstoffzellenleistung, der gespeicherte Kraftstoff und die Batteriekapazität variiert, BILD 4. Ein Range-Extender-Brennstoffzellensystem bezieht die im Betrieb benötigte Leistung ausschließlich aus der Batterie. Die Brennstoffzelle liefert nicht genügend Leistung, um das Fahrzeug in den meisten Fahrzuständen anzutreiben. Sie lädt die Batterie auf und speist keine Leistung direkt in den Antrieb ein.

Ein sogenanntes Full-Power-Brennstoffzellensystem ist dafür ausgelegt, die benötigte Leistung aller Fahrzustände über die Brennstoffzelle abzu-

decken. Die Brennstoffzelle versorgt direkt die Elektromaschine. Dafür werden ein großer Brennstoffspeicher und eine leistungsfähige Brennstoffzelle verwendet. Die Batterie dient hauptsächlich zum Starten der Brennstoffzelle sowie zum Aufnehmen der durch Rekuperation rückgespeisten Energie und muss nur eine geringe Kapazität haben.

Als Abstufung zwischen den zuvor genannten Auslegungen kann das sogenannte Mid-Power-System betrachtet werden. Dieses ist in der Lage, einen Großteil der Fahrzustände mit der Brennstoffzelle abzudecken und leitet die Brennstoffzellenleistung wahlweise in Antriebsstrang oder Batterie. Fahrzustände mit hohem Leistungsbedarf wie Bergfahrten werden zusätzlich durch die Batterie abgedeckt. Für eine größere Flexibilität kann zudem ein Hochvolt(HV)-Ladeanschluss zum Aufladen der Fahrzeugbatterie verbaut

werden. Die richtige Dimensionierung von Brennstoffzellen- und Batteriesystem hängt vom erwarteten Nutzungsprofil des jeweiligen Nutzfahrzeugs ab und kann über Simulationsmodelle bestimmt werden.

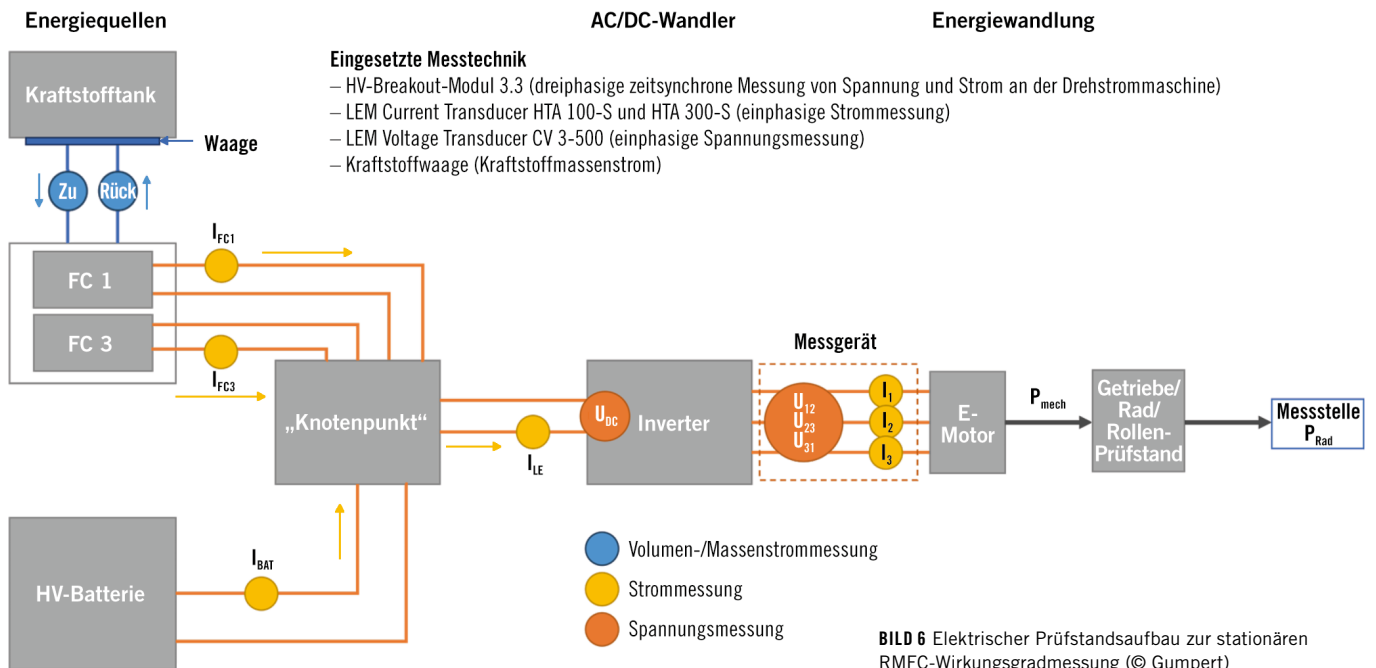
Brennstoffzellenfahrzeuge weisen weniger Verschleißteile als vergleichbare Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor auf, was den Wartungsaufwand und damit die laufenden Kosten reduzieren kann. Zum aktuellen Zeitpunkt besteht hinsichtlich Zuverlässigkeit und Langlebigkeit von Brennstoffzellen im Fahrzeug noch ein größeres Entwicklungspotenzial, wobei zukünftig das Erreichen einer hohen Lebensdauer zu erwarten ist [10].

**ANWENDUNG IN VERSCHIEDENEN FAHRZEUGKLASSEN**

Aufgrund des höheren Wirkungsgrads batterieelektrischer Fahrzeuge ist es sinnvoll, Fahrzeuge im urbanen Raum sowie für Kurzstreckenfahrten primär mit dieser Fahrzeugtopologie auszustatten. RMFCs sind für Anwendungen mit einem hohen täglichen Energiebedarf sinnvoll. Aufgrund der stark variierenden Belastungsprofile im Nutzfahrzeugbereich kann kein allgemeingültiger Grenzwert genannt werden, ab dem der Einsatz von RMFC sinnvoll ist. Fahrzeuge wie Abfallsammelfahrzeuge oder landwirtschaftliche Erntemaschinen weisen auch ohne größere Fahrstrecken oftmals einen sehr hohen Energieverbrauch auf. RMFC können ebenso bei leichten Nutzfahrzeugen zielführend sein, wenn diese täglich größere Fahrstrecken bewältigen. Weitere Einsatz-



BILD 5 RMFC-Transporter-Prototyp auf dem Rollenprüfstand (© Gumpert)



möglichkeiten sind in Bussen sowie land- und forstwirtschaftlichen Arbeitsmaschinen denkbar. Durch eine stärkere Auslegung des Brennstoffzellensystems kann bei Bedarf ein Betrieb abseits von Gegenden mit elektrischer Ladeinfrastruktur gewährleistet werden. Da das Brennstoffzellensystem auch bei geparktem Fahrzeug aktiv bleiben und die Batterie aufladen kann, ist ein Betrieb solcher Fahrzeuge in abgelegenen Regionen auch über längere Zeiträume möglich.

### EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNGEN DES BETRIEBSVERHALTENS

Zur Bewertung des neuen Antriebskonzepts wurde ein prototypisches Versuchsfahrzeug auf Basis des elektrisch angetriebenen Transporters MAN eTGE aufgebaut, **BILD 5**. Kernelement der Umrüstung war der Einbau von vier bauglei-

chen RMFCs mit einer Nennleistung von je 5 kW elektrischer Leistung, die über einen vorgeschalteten Reformier zur Wasserstoffherzeugung verfügen. Die Brennstoffzellen sind durch eine Mid-Power-Konfiguration direkt mit Antriebsstrang und Batterie verbunden. Der Zellstapel wird bei einer Temperatur von 160 bis 180 °C betrieben und mit einer volumetrischen Mischung aus 60 % Methanol und 40 % Wasser im Tank versorgt.

Der Antriebsmotor, der Antriebsstrang und der Batteriespeicher wurden weitestgehend unverändert übernommen. Zur Analyse der Energieflüsse wurden hochgenaue Strom- und Spannungsmesser, ein Leistungsmesssystem für Drehstromanwendungen sowie eine Kraftstoffwaage verbaut. Die Messstellen und die verwendete Messtechnik sind im Detail **BILD 6** zu entnehmen. Da am Ausgang der Antriebsmaschine keine Drehmomentmessung vorgesehen war, sind bei

den ermittelten Wirkungsgraden der Elektromaschine auch die Verluste des Antriebsstrangs enthalten. Mit dem Versuchsfahrzeug konnten in dieser Konfiguration stationäre Messungen auf einem Rollenprüfstand bei unterschiedlichen Drehzahlen und Lasten und voller Zuladung durchgeführt werden, wobei zwei von vier Brennstoffzellen mit einer mittleren Gesamtleistung von 6,5 kW aktiv waren. Die sich aus den Energiebilanzen im Fahrzeug (Tank-to-Wheel) ergebenden Wirkungsgrade sind für ausgewählte Betriebspunkte in **BILD 7** dargestellt. Die bei 8 und 19 kW Radleistung gemessenen Wirkungsgrade entsprechen wichtigen Betriebspunkten dieses Fahrzeugs bei jeweils 50 und 80 km/h der Fahrwiderstandlinie in der Ebene.

Für die Bilanzierung der Energieströme und Wirkungsgrade wird die Brennstoffzelle samt Reformier als

ANZEIGE

**DAS BESTE,  
WAS DEM MOTOR  
PASSIEREN KANN.**

**CLEANFIX**

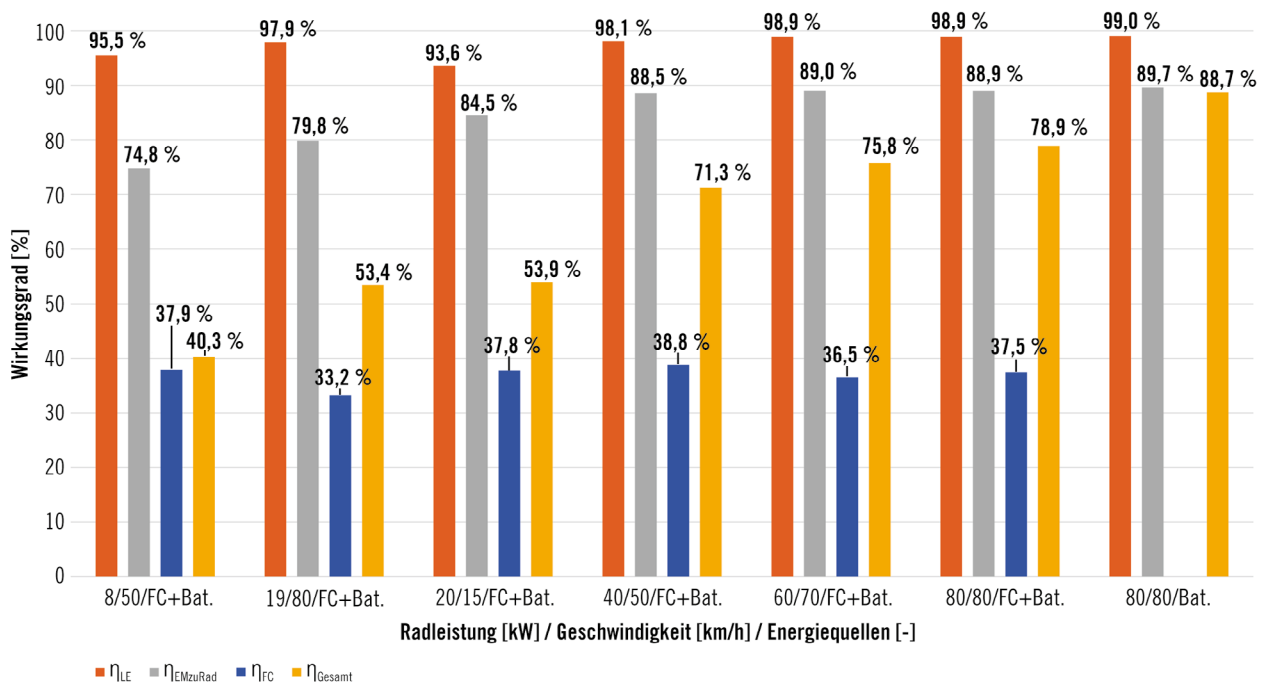
[www.cleanfix.org](http://www.cleanfix.org)

## Umdenken einbauen!

Der innovative Umkehrlüfter.  
Das Original von **CLEANFIX**.

**CLEANFIX**

invented & made by Hägels



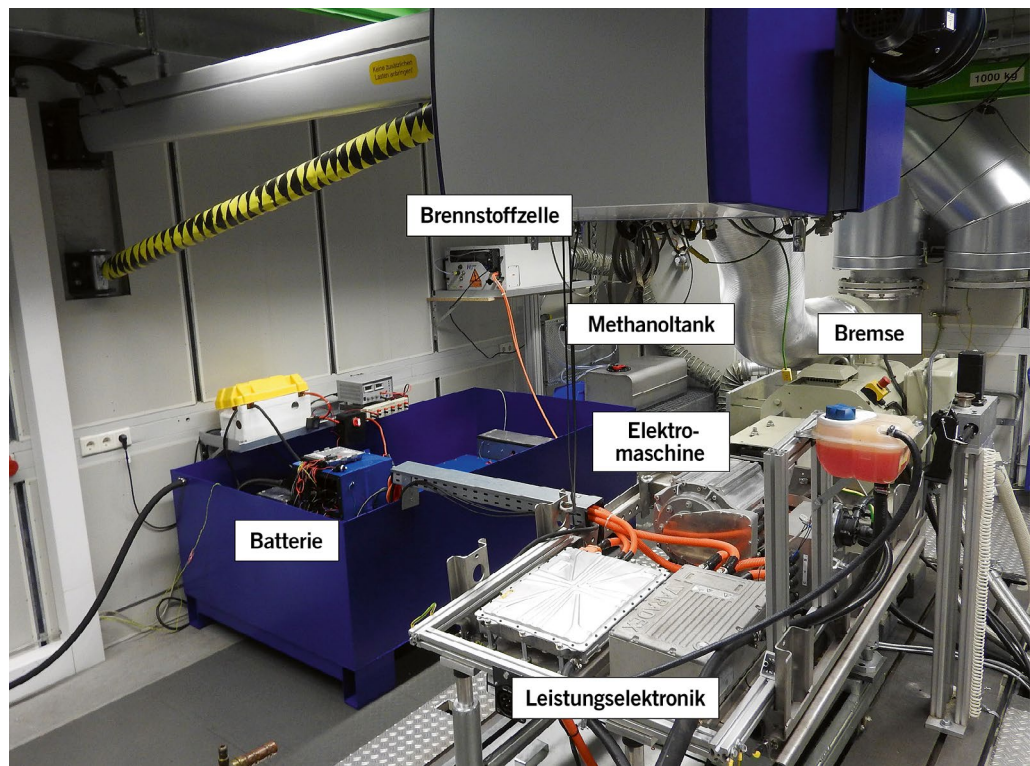
**BILD 7** Der Einfluss des Brennstoffzellenwirkungsgrads auf das Gesamtsystem berechnet sich anteilig am Anteil der eingebrachten Energie durch die Brennstoffzelle im Verhältnis zur Gesamtenergie (Bat. = Batterie) (© Gumpert)

eine Einheit betrachtet, zu der auch der elektrische Antrieb der Nebaggregate wie Gebläse oder Kühlmittel- und Kraftstoffpumpe gehört. Das Wasser verlässt das System gasförmig, weshalb der untere Heizwert als Betrachtungskenngröße verwendet wird. Dies ermöglicht auch eine gute Vergleichbarkeit zu Wärmekraftmaschinen. Der untere Heizwert von wasserfreiem Methanol beträgt 19,9 MJ/kg. Beim Mischen von Wasser und Methanol kommt es zur Volumenreduktion um den Faktor 0,9637. Unter Berücksichtigung der Verdampfungsenthalpie des Wasseranteils ergibt sich für die Mischung ein Heizwert von 9,69 MJ/kg, mit dem die zugeführte Kraftstoffenergie aus der gemessenen Kraftstoffmasse berechnet werden kann. Die Wirkungsgrade der Batterie wurden näherungsweise auf 100 % gesetzt.

Bei der Bewertung des Gesamtwirkungsgrads ist zu beachten, dass dieser von der Leistungsaufteilung zwischen Batterie und Brennstoffzelle abhängt. Bei rein batterieelektrischem Fahrbetrieb (Betriebspunkt in **BILD 7** ganz rechts) sind Gesamtwirkungsgrade bis zu 88,7 % und bei reinem Brennstoffzellenbetrieb bis zu 34 % (nicht dargestellt) möglich. Aus diesen Gründen wurden bei aktiver Brennstoffzelle Gesamtwirkungsgrade von 40,3 bis 78,9 % gemessen. Die Wir-

kungsgrade der Elektromaschine zeigen wie erwartet eine Last- und Drehzahlabhängigkeit und liegen unter Berücksichtigung der Verluste des Antriebsstrangs

auf einem für Elektrofahrzeuge bekannten Niveau. Dies gilt mit einem durchweg sehr hohen Wirkungsgrad von bis zu 99 % auch für die Leistungselektronik.



**BILD 8** Prüfstands Aufbau zur Messung des instationären Betriebsverhaltens der RMFC (© Gumpert)

Zur weiteren Analyse des neuen Antriebskonzepts wurde ergänzend auf einem Funktionsprüfstand ein Elektroantrieb mit Batterie und der oben beschriebenen Brennstoffzellentechnik aufgebaut, **BILD 8**. Die Messungen auf diesem Prüfstand dienten schwerpunktmäßig der Analyse der Brennstoffzelle, um damit eine Modellbildung und Simulation zu unterstützen und in Folge eine gezielte Weiterentwicklung zu ermöglichen. Die eingesetzte Messtechnik wurde vom oben beschriebenen Versuchsfahrzeug übernommen.

Zur Analyse der Wirkungsgrade der RMFC wurde diese zunächst stationär bei unterschiedlichen Lasten betrieben. **BILD 9** (oben) zeigt die gemessenen Wirkungsgrade der Brennstoffzelle über der abgegebenen Leistung als Verhältnisgröße zur Maximalleistung. Der Bestpunkt wird nahe bei 50 % der Maximalleistung erreicht und sinkt bei Nominalleistung (entspricht 75 % der Maximalleistung) auf 40 % ab. Für eine optimale Betriebsführung muss dieses Verhalten Eingang in die Betriebsstrategie finden.

Eine weitere Fragestellung galt dem Startverhalten der Brennstoffzelle. Da das Brennstoffzellensystem erst auf Temperatur gebracht werden muss, vergeht eine gewisse Zeit, bis dieses betriebsbereit ist. Für die hier verwendete RMFC bedeutet dies eine Zeitspanne von knapp 30 min, bis elektrische Energie geliefert wird und weitere 9 min, bis der stationäre Betrieb erreicht ist, **BILD 9** (Mitte).

Bilanziert man die Energien bis zum Wechsel der Stromrichtung an der Brennstoffzelle, so nimmt die Brennstoffzelle beim Startvorgang 0,513 kWh Energie aus dem Kraftstoff und 0,439 kWh elektrische Energie aus der Batterie auf. Das schmälert den Wirkungsgrad der Brennstoffzelle umso mehr, je kürzer die nachfolgende stationäre Betriebsphase ist. Zur Veranschaulichung der Einflussgrößen auf das Verhältnis der Brennstoffzellenwirkungsgrade „instationär zu stationär“ wurde eine Parametervariation durchgeführt, **BILD 9** (unten). Neben der Startenergie wurden dabei die Startzeit und die elektrische Leistung der Brennstoffzelle variiert. Für die Basisvariante ist nach 150 min der stationäre Wirkungsgrad zu 95 % erreicht. Verbesserungen ergeben sich insbesondere durch Reduzierung der notwendigen Startenergie, aber auch durch Erhöhung der elektrischen Leistung der Brennstoffzelle bei sonst gleichen Verhältnissen. Dieses instationäre Betriebsverhalten ist bei Weiterentwicklungen der Brennstoffzelle zu berücksichtigen, um einerseits die tatsächliche Effizienz zu erhöhen und andererseits den Einsatzbereich dieses Antriebskonzepts zu erweitern.

#### ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Dieser Artikel gibt einen Überblick über Methanol als klimaneutralen Kraftstoff

und seinen Einsatz in Nutzfahrzeugen mit Reformier-Methanol-Brennstoffzelle. Fahrzeuge, die mit dieser Technik ausgestattet sind, wandeln das Methanol zunächst an Bord zu Wasserstoff und führen diesen anschließend einer Hochtemperatur PEM-Brennstoffzelle zu. Dabei verwenden sie zusätzlich eine Traktionsbatterie, deren Energieinhalt je nach Konfiguration des Gesamtsystems variiert werden kann. Der Einsatz von Reformier-Methanol-Brennstoffzellen im Fahrzeug ist insbesondere dann sinnvoll, wenn sich deren Betriebsphasen über einen längeren Zeitraum erstrecken. Das gilt sowohl für Fahrzeuge mit hohen Dauerlasten als auch für Anwendungen mit Stillstandphasen und wechselnden Lastanteilen. Das Potenzial der Reformier-Methanol-Brennstoffzellentechnik steigt mit zunehmendem Fahrzeuggewicht beziehungsweise benötigter Energie. Das Konzept ist daher insbesondere für den Transport- und Schwerlastsektor interessant.

Insgesamt zeigt sich, dass Methanol batterieelektrische Fahrzeuge aufgrund seiner Vorteile hinsichtlich Distribution, Infrastruktur und Systemenergiedichten sinnvoll ergänzen kann. Entwicklungspotenziale auf dem Weg hin zu einer Serienreife von Reformier-Methanol-Brennstoffzellenantrieben liegen primär in der Weiterentwicklung der Betriebsstrategien, der Leistungsskalierung und des Aufstartverhaltens.



## Universitätsprofessur für Nachhaltige Antriebssysteme & angewandte Thermodynamik

Zu besetzen ab März 2025  
Bewerbungsende: 20. April 2024

Details zur Bewerbung siehe unter:

> [jobs.tugraz.at](https://jobs.tugraz.at)

LITERATURHINWEISE

- [1] FH Münster: Wasserstoff-Tankstellen – Welche Arten gibt es und wie baue ich eine? Online: [https://www.fh-muenster.de/egu/fue/fue\\_gebiete/sektorenkopplung/hymat/FRAGEDESMONATSAUG.php](https://www.fh-muenster.de/egu/fue/fue_gebiete/sektorenkopplung/hymat/FRAGEDESMONATSAUG.php), aufgerufen: 4. Oktober 2023
- [2] Global Wind Atlas 3.0. Online: <https://globalwindatlas.info/en>, aufgerufen: 2. November 2023
- [3] Hydrogen Council: Haru Oni: Treibstoff aus Wind

- und Wasser. Online: <https://hydrogencouncil.com/de/haru-oni-fuel-from-wind-and-water/>, aufgerufen: 26. Oktober 2023
- [4] World Integrated Trade Solution: Alcohols; saturated monohydric, methanol (methyl alcohol) imports by country in 2021. Online: <https://wits.worldbank.org/trade/comtrade/en/country/ALL/year/2021/tradeflow/exports/partner/WLD/product/290511>, aufgerufen: 19. Oktober 2023

- [5] Ministerium für Industrie und Informationstechnologie der Volksrepublik China: 八部门关于在部分地区开展甲醇汽车应用的指导意见. Online: [https://www.miit.gov.cn/zwgk/zcwj/wjfb/zh/art/2020/art\\_8a39c51488544dba924e641efb81d511.html](https://www.miit.gov.cn/zwgk/zcwj/wjfb/zh/art/2020/art_8a39c51488544dba924e641efb81d511.html), aufgerufen: 26. Juni 2023
- [6] OWI: Methanol Standard. Untersuchung der technischen Grundlagen zur Standardisierung von Methanol-Kraftstoffen in Europa. Online: <https://www.owi-aachen.de/forschung-entwicklung/brennkraftstoffe/projekte-zu-brenn-kraft-und-schmierstoffen/methanol-standard/>, aufgerufen: 6. Juli 2023
- [7] Methanol Market Services Asia: Global Methanol Supply and Demand Data Balance. Online: <https://www.methanol.org/wp-content/uploads/2023/05/MMSA-World-Supply-and-Demand-Summary-for-Methanol-Institute-2.xlsx>, aufgerufen: 28. September 2023
- [8] International Renewable Energy Agency: Innovation Outlook: Renewable Methanol. Online: <https://www.irena.org/publications/2021/Jan/Innovation-Outlook-Renewable-Methanol>, aufgerufen: 5. Juni 2023
- [9] Ajdari, S.: Biomethanol. Production and use as fuel. Online: [https://www.etipbioenergy.eu/images/ETIP\\_Bioenergy\\_Biomethanol\\_production\\_and\\_use\\_as\\_fuel.pdf](https://www.etipbioenergy.eu/images/ETIP_Bioenergy_Biomethanol_production_and_use_as_fuel.pdf), aufgerufen: 30. September 2023
- [10] Mayr, K. et al.: Systemvergleich zwischen Wasserstoffverbrennungsmotor und Brennstoffzelle im schweren Nutzfahrzeug, Online: [https://www.e-mobilbw.de/fileadmin/media/e-mobilbw/Publikationen/Studien/e-mobilBW-Studie\\_H2-Systemvergleich.pdf](https://www.e-mobilbw.de/fileadmin/media/e-mobilbw/Publikationen/Studien/e-mobilBW-Studie_H2-Systemvergleich.pdf), aufgerufen: 22. September 2023

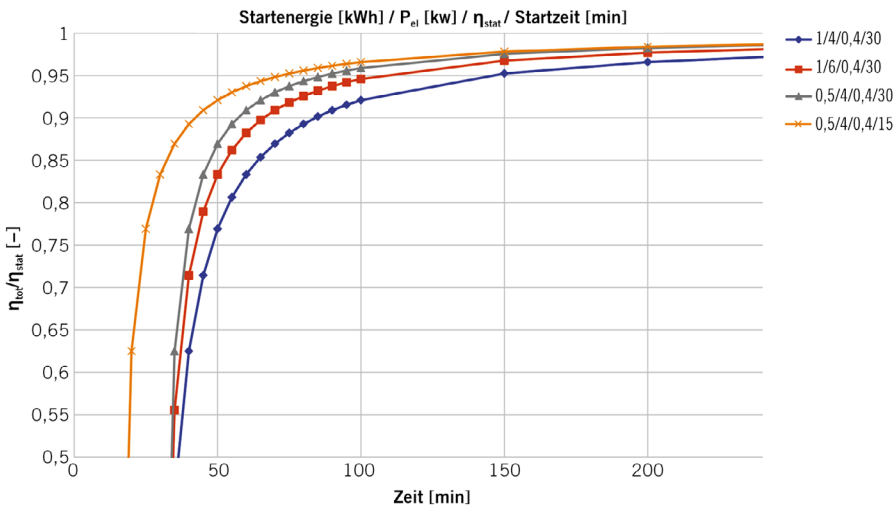
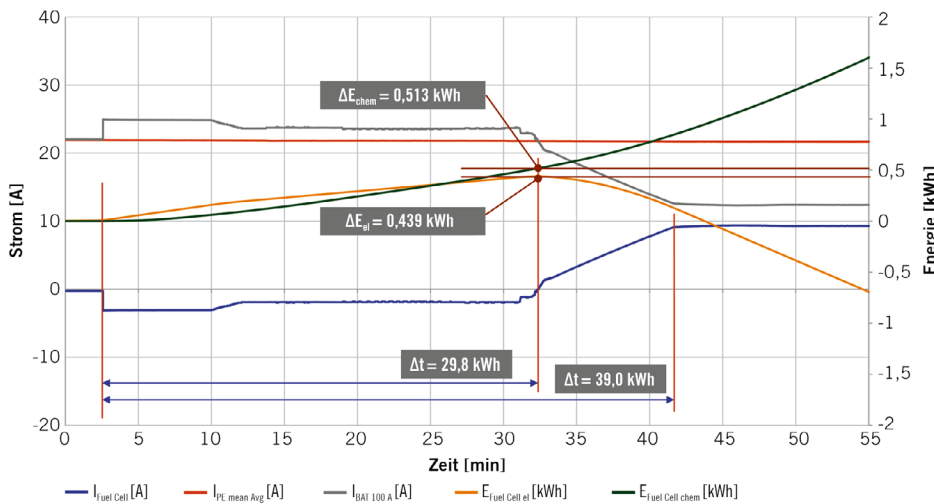
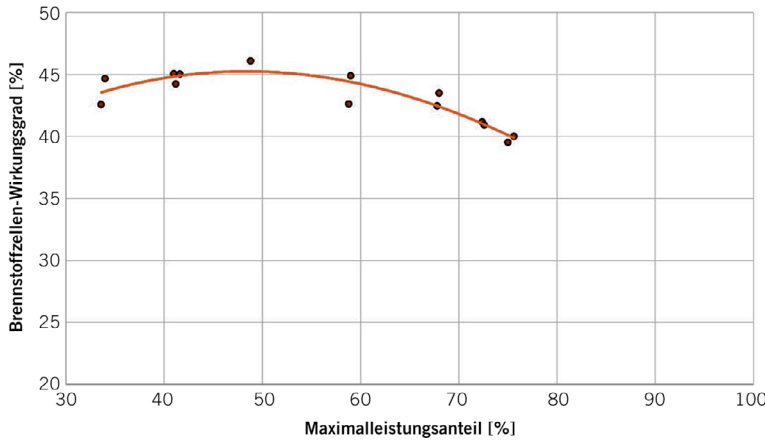


BILD 9 Wirkungsgradverlauf der RMFC über Last (oben), Kaltstartverhalten der RMFC (Mitte) und RMFC-Wirkungsgradverlauf unter Berücksichtigung des Startverhaltens (unten) © Gumpert

## DANKE

Die vorliegende Publikation ist Gegenstand eines vom Bayerischen Staatsministerium für Wirtschaft, Landesentwicklung und Energie geförderten Forschungsprojekts. Die Autoren danken allen Beteiligten für ihren Beitrag zur Erlangung der Entwicklungsfortschritte und ihren Beitrag zu diesem Artikel. Ein besonderer Dank gilt Paul Müller, Jonas Meier und Martin Schmidt für ihre wertvolle Unterstützung.



**READ THE ENGLISH E-MAGAZINE**  
Test now for 30 days free of charge:  
[www.mtz-worldwide.com](http://www.mtz-worldwide.com)