

VERFASST VON



Prof. Dr.-Ing. André Leonide

ist Professor für Werkstoffe der Elektrotechnik und Forschungsgruppenleiter am Institut für Angewandte Wasserstoffforschung, Elektro- und Thermochemische Energiesysteme (H2Ohm) der Technischen Hochschule Nürnberg Georg Simon Ohm (Ohm).



Prof. Dr. Sc. ETH Zürich Marcelo Lobo Heldwein

ist Leiter des Lehrstuhls für Hochleistungs-Umrichtersysteme (HLU) an der Technischen Universität München (TUM).

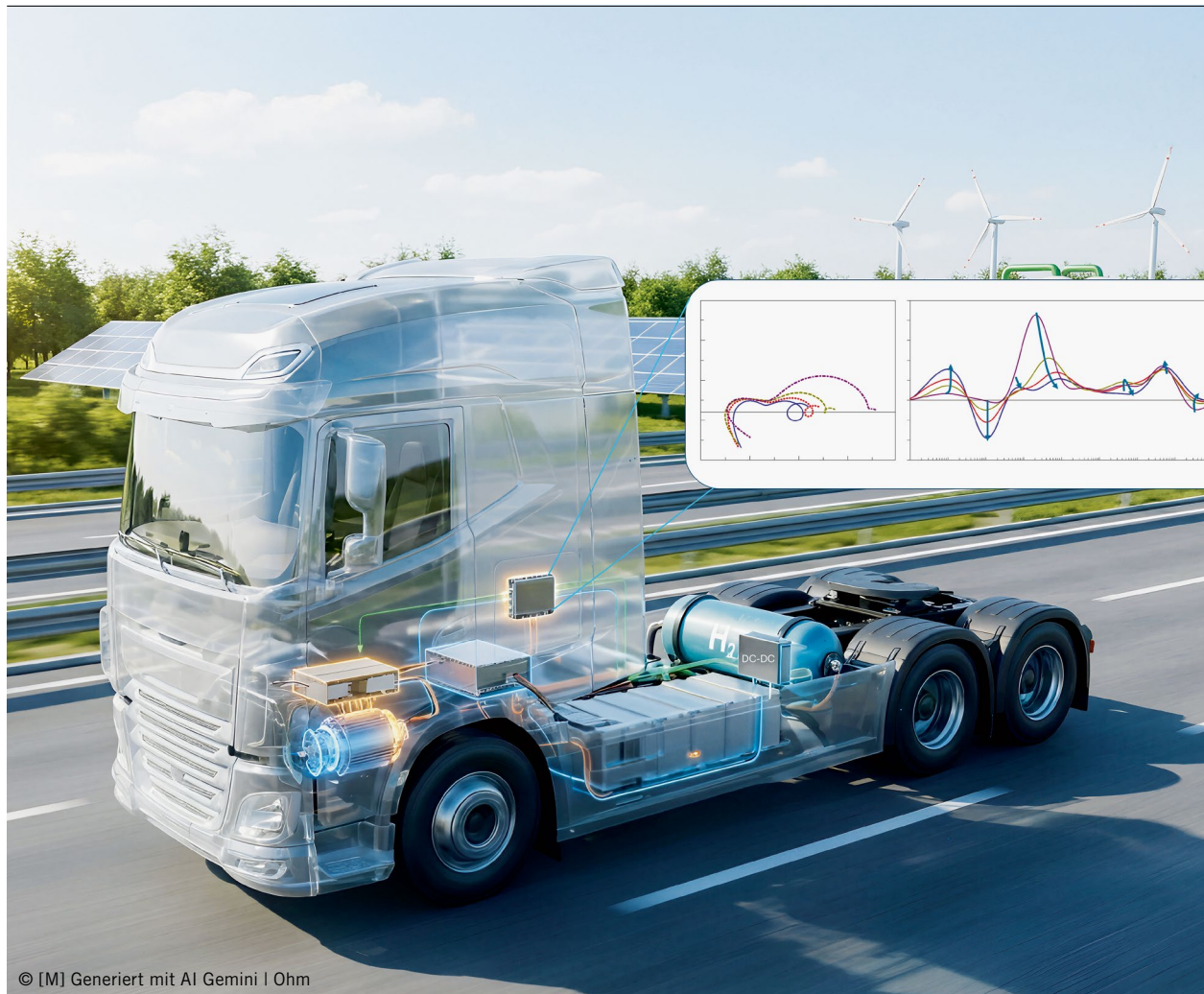


Prof. Dr.-Ing. Armin Dietz

ist Leiter des Instituts für leistungselektronische Systeme (ELSYS) der Technischen Hochschule Nürnberg Georg Simon Ohm (Ohm).

Impedanzanalysemethoden für die On-Board-Diagnose von Brennstoffzellensystemen

Brennstoffzellenelektrofahrzeuge sind vielversprechende Lösungen für einen nachhaltigen Transport, insbesondere bei hohen Leistungsbedarfen und großen Reichweiten. Zur Überwachung des Zustands eines Brennstoffzellenstapels sind fortschrittliche On-Board-Diagnosewerkzeuge erforderlich. Im Rahmen des FVV-Projekts (Nr. 1511) evaluierten Forscher der Technischen Hochschule Nürnberg und der Technischen Universität München die elektrochemische Impedanzspektroskopie als nichtinvasive, leichtgewichtige und kostengünstige Diagnoselösung mit großem Potenzial für die Integration in die bestehende Fahrzeugelektronik.



© [M] Generiert mit AI Gemini | Ohm

1 MOTIVATION

2 HERAUSFORDERUNGEN BEI DER ON-BOARD-IMPEDANZMESSUNG

3 KONZEPTE FÜR DIE ON-BOARD-EIS-SIGNALEINSPEISUNG

4 STÖRUNGSUNEMPFLINDLICHKEIT UND DIAGNOSTISCHE AUSWIRKUNGEN

5 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

1 MOTIVATION

Brennstoffzellenelektrofahrzeuge (Fuel Cell Electric Vehicles, FCEVs) werden zunehmend als Schlüsseltechnologie für einen nachhaltigen Verkehr angesehen, insbesondere bei Anwendungen, die eine hohe Leistungsdichte und große Reichweiten erfordern. Brennstoffzellen(BZ)-Systeme zeichnen sich durch ihre Effizienz und kurze Betankungszeiten aus; die breitere Einführung hängt jedoch stark von ihrer Zuverlässigkeit, Langlebigkeit und der Verfügbarkeit fortschrittlicher On-Board-Diagnosemethoden ab. Herkömmliche Überwachungsstrategien beschränken sich oft auf die Messung von Spannung, Strom und Temperatur, was nicht ausreicht, um frühzeitige Degradationsmechanismen im BZ-Stapel zu erkennen. In diesem Zusammenhang hat sich die Elektrochemische Impedanzspektroskopie (EIS) als vielversprechendes Diagnosewerkzeug herausgestellt, da sie eine nichtinvasive Charakterisierung der elektrochemischen Prozesse im Stapel während des Betriebs ermöglicht [1, 2].

Die Motivation für den Einsatz von EIS in automobilen BZ-Systemen liegt in ihrer Fähigkeit, zwischen einzelnen Verlustmechanismen im Frequenzbereich zu unterscheiden: Ohm'sche Widerstände, Ladungstransfereffekte und Stofftransportphänomene treten bei bestimmten charakteristischen Frequenzen auf und können daher mittels Impedanzanalyse voneinander abgegrenzt werden [3]. **BILD 1** zeigt eine generische FCEV-Architektur, wobei hervorgehoben wird, dass der BZ-Stapel über einen DC/DC-Wandler mit dem DC-Bus verbunden ist und in Gegenwart mehrerer elektrischer Antriebe, Energiespeichersysteme und Hilfseinheiten betrieben wird. Diese Integration auf Systemebene erschwert die Impedanzmessung im Vergleich zu Laborbedingungen erheblich. Im FVV-Projekt „Impedanzanalyse für Brennstoffzellen“ haben das Institut für Angewandte Wasserstoffforschung, Elektro- und Thermochemische Energiesysteme (H2OHM) und das ELSYS-Institut für Leistungselektronische Systeme der Technischen Hochschule Nürnberg Georg Simon Ohm (Ohm) sowie der Lehrstuhl für Hochleistungs-Umrichtersysteme (HLU) der Technischen Universität München (TUM) in Zusammenarbeit mit Industriepartnern ein Konzept entwickelt, das die Nachteile aufwiegt und eine kostenoptimierte On-Board-Integration ermöglicht.

2 HERAUSFORDERUNGEN BEI DER ON-BOARD-IMPEDANZMESSUNG

Eine der größten Herausforderungen bei der Impedanzmessung an Bord liegt in der geringen effektiven Impedanz großer BZ-Stapel. Aufgrund der großen aktiven Zellflächen liegen die resultierenden Impedanzwerte typischerweise im m Ω -Bereich oder (bei Messungen nur über wenige sich wiederholende Zelleinheiten des Stapels) sogar im Sub-m Ω -Bereich. Solche niedrigen Impedanzen reagieren sehr empfindlich auf Messstörungen, die durch Sensorrauschen, Verkabelung, elektromagnetische Interferenzen und

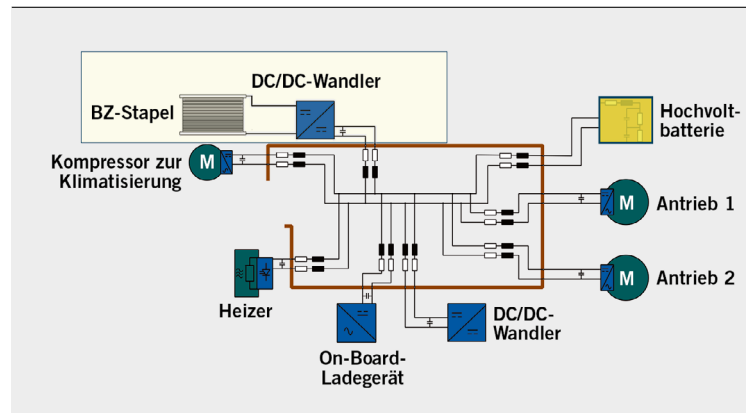


BILD 1 Generischer Aufbau eines FCEV (© Ohm)

Schwankungen in der Gasversorgung verursacht werden. Darüber hinaus liefern EIS-Messungen auf Stapel Ebene gemittelte Daten über mehrere Zellen hinweg, wodurch lokale Phänomene wie Flutung oder Katalysatorverschleiß verdeckt werden.

Ein weiterer kritischer Punkt ist die Betriebsumgebung eines Fahrzeugs. Online-EIS-Messungen müssen unter realen Fahrbedingungen durchgeführt werden, unter denen es schwierig ist, stationäre Betriebspunkte stabil zu halten. Laständerungen während der Beschleunigung, beim regenerativen Bremsen oder im Hilfsbetrieb führen zu dynamischen Effekten, die das Impedanzspektrum verzerren können. Darüber hinaus können Komponenten, die an denselben Gleichstrombus angeschlossen sind, zum Beispiel Batterien, Filter und Wechselrichter, die gemessenen Signale beeinflussen und zu Fehlinterpretationen führen, wenn sie nicht richtig berücksichtigt werden. Eine genaue Impedanzmessung über weite Frequenzbereiche erfordert daher hochauflösende Sensoren, optimierte Analog-Digital-Wandler und eine ausgeklügelte Signalverarbeitung, um ein angemessenes Signal-Rausch-Verhältnis (Signal to Noise Ratio, SNR) zu erreichen.

Herkömmliche EIS-Verfahren werden in der Regel sequenziell durchgeführt, indem einzelne sinusförmige Anregungssignale bei diskreten Frequenzen eingespeist werden [3]. Dieser Ansatz bietet zwar eine hohe Genauigkeit, ist jedoch für die Echtzeit-On-Board-Diagnose zu langsam. Eine schnelle und zuverlässige Impedanzmessung ist jedoch unerlässlich, um kritische Betriebsbedingungen zu erkennen, bevor es zu schweren Schäden am BZ-Stapel kommt. Die hier genannten Herausforderungen der integrierten EIS-Messung sind in **BILD 2** zusammengefasst.

3 KONZEPTE FÜR DIE ON-BOARD-EIS-SIGNALEINSPEISUNG

Im Allgemeinen kann die EIS-Implementierung für FCEVs in Off-Board- und On-Board-Methoden unterteilt werden, **BILD 3**. Off-Board-Messungen werden in Laboren unter Verwendung kommerzieller elektrochemischer Workstations durchgeführt und bieten maximale Genauigkeit und Flexibilität. Aufgrund ihrer hohen Kosten, ihrer Größe und ihres Gewichts sind diese Systeme jedoch für die Integration in Fahrzeuge ungeeignet. Im Gegensatz dazu zielt die On-Board-EIS darauf ab, vorhandene Fahrzeugkomponenten wie DC/DC-Wandler, Stromsensoren und Spannungssensoren zu nutzen, um die Impedanz des Stapels während des Betriebs zu



BILD 2 Herausforderungen der integrierten EIS-Messung
© [M] Adobe | Ohm

messen. Daher wurden in der vorgestellten Studie drei Optionen für die On-Board-Implementierung untersucht:

- überschwingungsbasierte Anregung (Ripple) über den Haupt-DC/DC-Wandler
- steuerungsbasierte Anregung über den Haupt-DC/DC-Wandler
- Anregung über einen separaten beziehungsweise zusätzlichen Hochfrequenz-DC/DC-Wandler (mit deutlich höherer Schaltfrequenz als beim Haupt-DC/DC-Wandler), **BILD 4**.

Jede Methode wurde anhand der sogenannten SWOT-Analyse bewertet, die Dimensionen Stärken, Schwächen, Chancen, Risiken heranzieht. Die Ergebnisse sind in **TABELLE 1** zusammengefasst.

Der erste Ansatz ist die überschwingungsbasierte Anregung unter Verwendung des Haupt-DC/DC-Wandlers. Bei dieser Methode wird die natürliche Ausgangswelligkeit des Wandlers als Anregungssignal genutzt. Ein großer Vorteil ist die Einfachheit, da keine zusätzliche Regelschleife erforderlich ist. Darüber hinaus ermöglicht dieser Ansatz eine hochfrequente Impedanzmessung,

möglicherweise sogar bei Messfrequenzen über der Schaltfrequenz. Das Verfahren erfordert jedoch sehr hohe Abtastraten, da Spannung und Strom innerhalb einer Schaltperiode mit ausreichender Auflösung erfasst werden müssen. Außerdem ist die Impedanzmessung auf Frequenzen beschränkt, die mit der Schaltfrequenz zusammenhängen, was die Flexibilität einschränkt. Kleine Anregungsamplituden erschweren zudem eine genaue Phasenmessung unter stark rauschbehafteten Messbedingungen.

Die zweite Option ist die regelungsbasierte Signaleinspeisung unter Verwendung des Haupt-DC/DC-Wandlers. In diesem Fall speist ein zusätzlicher Regelkreis ein definiertes Störsignal mit einstellbarer Amplitude und Frequenz ein. Diese Methode bietet eine hohe Flexibilität und Genauigkeit, da die Frequenzanregung auf den gewünschten Frequenzbereich und das gewünschte SNR zugeschnitten werden kann. Da vorhandene Hardware verwendet wird, ist sie auch aus Kostengründen attraktiv. Der Nachteil dieses Ansatzes ist, dass er in der Regel auf Frequenzen unterhalb der Schalt-

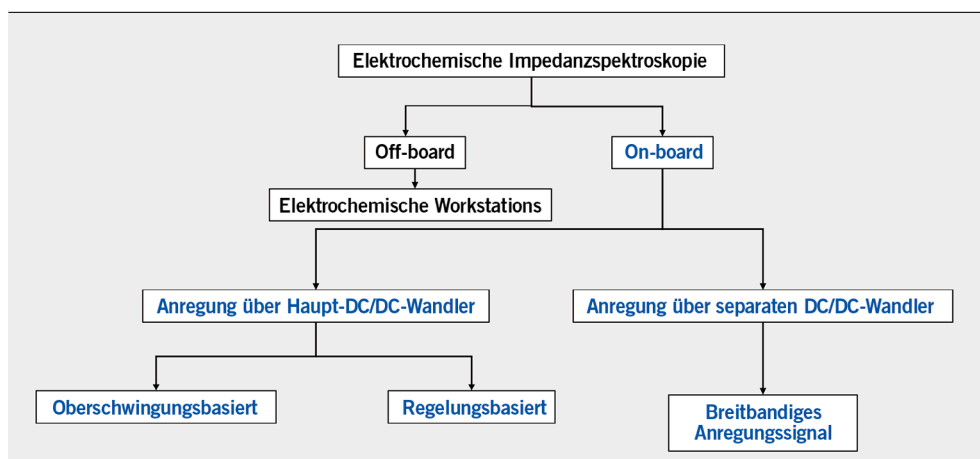


BILD 3 Überblick über EIS-Methoden
© Ohm

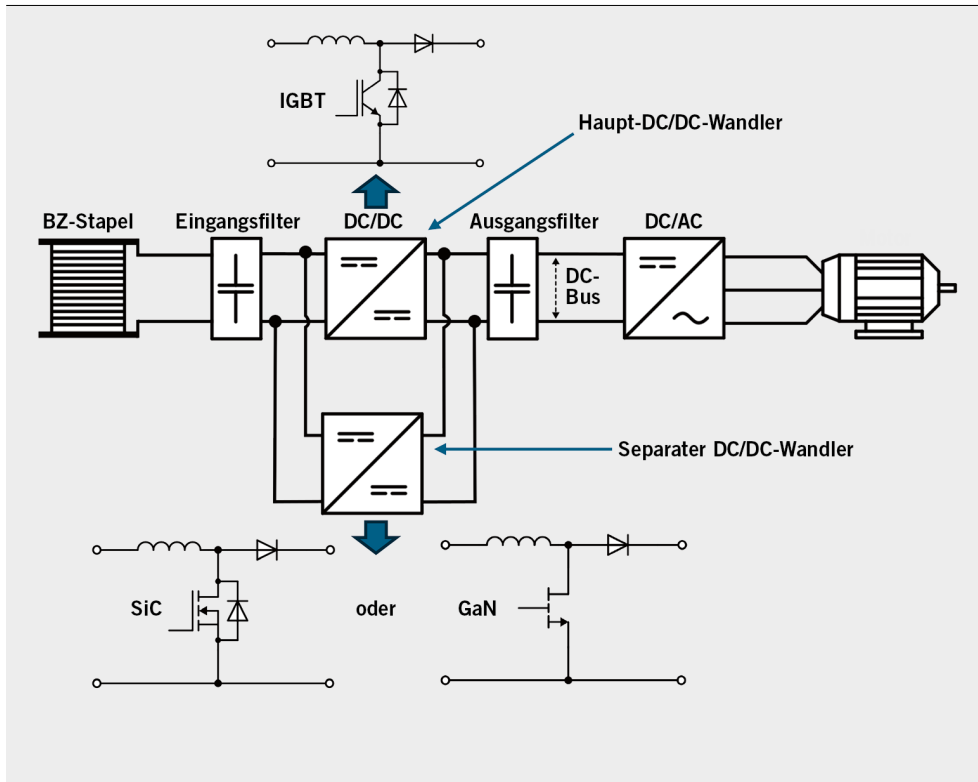


BILD 4 Haupt-DC/DC-Wandler mit einem zusätzlichen Signalanregungs-DC/DC-Wandler; IGBT = Isolierter Gate-Bipolar-Transistor (© TUM)

frequenz beschränkt ist und eine komplexere Reglerstruktur erfordert. Der erhöhte Rechenaufwand kann leistungsfähigere Mikrocontroller oder digitale Signalprozessoren erforderlich machen.

Der dritte Ansatz basiert auf einem separaten oder zusätzlichen DC/DC-Wandler, der speziell für die Anregung vorgesehen ist. Dieser Wandler arbeitet mit relativ geringer Leistung und injiziert einen kleinen Diagnosestrom in den BZ-Stapel. Aufgrund des niedrigen Strompegels bleiben die Leit- und Schaltverluste gering, und es können Halbleiter mit großer Bandlücke wie Siliziumkarbid (SiC) oder Galliumnitrid (GaN) verwendet werden, um hohe Schaltfrequenzen zu erreichen. Das ermöglicht eine breitbandige Impedanzmessung, ohne den Hauptstromwandlungspfad wesentlich zu beeinträchtigen. Die Hauptnachteile dieses Ansatzes sind seine Komplexität und erhöhte Systemkosten, da zusätzliche Komponenten und Sensoren erforderlich sind. Darüber hinaus müssen die Wechselwirkungen zwischen dem Hilfswandler und dem

Haupt-DC/DC-Wandler austariert werden, um einen stabilen Systembetrieb zu gewährleisten.

4 STÖRUNGSUNEMPFLINDLICHKEIT UND DIAGNOSTISCHE AUSWIRKUNGEN

Neben der Methode der Anregungssignaleinspeisung wird die Qualität der Impedanzspektren stark von der Störfestigkeit beeinflusst. Daher wird der Einfluss von Störungen auf die Impedanzanalyse anhand simulierter Spektren zwischen 100 mHz und 100 kHz bewertet, **BILD 5**. Die Impedanzspektren wurden auf der Grundlage von Impedanzmessungen an BZ für Fahrzeuge geschätzt, die in [4] vorgestellt wurden. In diesem Zusammenhang ist zu beachten, dass in [4] nicht alle Parameter der Impedanzkurve verfügbar waren, sondern nur die Parameter des Hochfrequenzhalbkreises aufgeführt wurden. Daher wurden hier die Parameter für den Niederfrequenz-zweig der Impedanzkurve durch optische Inspektion geschätzt.

Es wurde die Methode der Verteilung der Relaxationszeiten (Distribution of Relaxation Times, DRT) verwendet, da sie modellfrei ist und sich gut für die Analyse überlappender elektrochemischer Prozesse eignet [3]. Wie in **BILD 5** (b) dargestellt, führt ein sinkendes SNR zu Peakverbreiterungen, Frequenzverschiebungen, Peakaufspaltung und dem Auftreten von Pseudopeaks in der jeweiligen DRT. Diese Effekte sind unterhalb eines SNR von etwa 60 dB besonders ausgeprägt. Selbst vereinzelte Ausreißer können die Ergebnisse erheblich verfälschen, wenn sie in der Nähe der charakteristischen Frequenzen ($f_{c,n}$) auftreten.

Die Analyse zeigt, dass insbesondere breitere DRT-Verteilungen empfindlich gegenüber Rauschen und einzelnen Ausreißern sind, was die Notwendigkeit einer robusten Signalverarbeitung und Unterdrückung von Ausreißern unterstreicht. Aus praktischer Sicht bedeu-

Methode Kennzahl	Oberschwingungs- basiert	Regelungs- basiert	Anregung über separaten DC/DC-Wandler
Frequenzband	Hohe Frequenzen (10~200 kHz)	Niedrige Frequenzen (1~1 kHz)	Von niedrigen bis zu hohen Frequenzen (1~200 kHz)
Genauigkeit	Gering	Gut	Gut
Kosten	Niedrig	Niedrig	Hoch
Verluste	Sehr niedrig	Hoch	Niedrig
Abtastfrequenz	Sehr hoch	Niedrig	Hoch

TABELLE 1 Zusammenfassung der SWOT-Analyse der drei Signalanregungsmethoden (© TUM | Ohm)

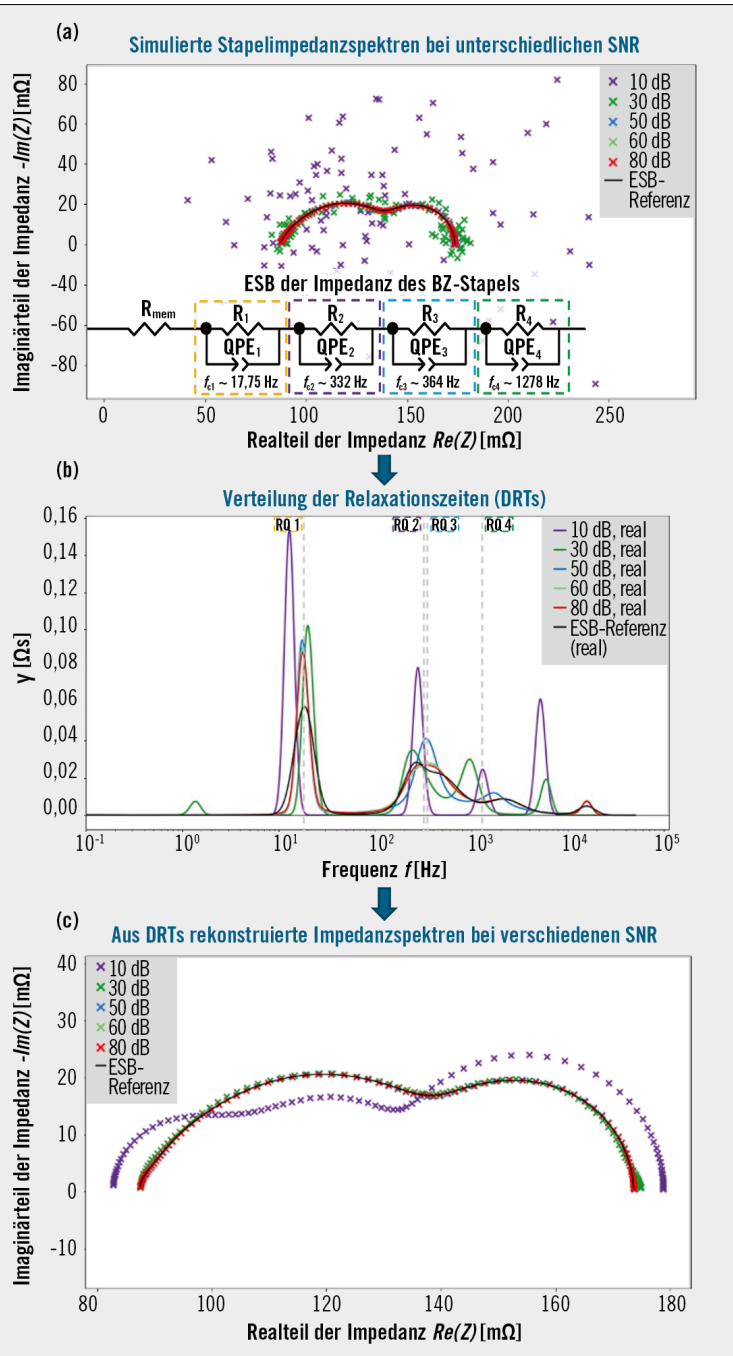


BILD 5 Simulierte Impedanzspektren und DRT bei unterschiedlichem SNR (10 bis 80 dB): (a) mit Einfügung des für die Simulation verwendeten Ersatzschaltbildmodells (ESB), bestehend aus einer Reihenschaltung des Membranwiderstands R_{mem} und vier R-QPE-Elementen (auch bezeichnet als RQ-Element), wobei QPE für ein Konstantphasenelement steht, f_{cn} bezeichnet die charakteristische Frequenz des jeweiligen RQ-Elements; (b) DRT mit Variable y der Verteilungsfunktion berechnet aus Impedanzspektren; (c) aus DRT rekonstruierte Impedanzspektren (© Ohm)

Oberschwingungsbasierte, steuerungsbasierte und separate DC/DC-Wandler zur Anregung weisen jeweils unterschiedliche Kompromisse in Bezug auf Kosten, Komplexität und Frequenzfähigkeit auf. Insbesondere die Robustheit gegenüber Rauschen erweist sich als ein entscheidender Faktor für die Genauigkeit der Diagnosekette.

Zukünftige Arbeiten sollten sich auf die Integration adaptiver Frequenzstrategien, die Verbesserung der Sensorqualität und die Nutzung von Halbleitern mit großer Bandlücke für den Hochfrequenzbetrieb konzentrieren. Diese Maßnahmen werden dazu beitragen, schnelle, genaue und kostengünstige EIS-basierte Diagnosemethoden für FCEVs der nächsten Generation zu realisieren.

LITERATURHINWEISE

- [1] Knoblach, J.; Özcan, M.; Elattar, O.; Tian, W.; Leonide, A.; Dietz, A.; Lobo Heldwein, M.: Impedance Analysis for Fuel Cells. In: Proceedings of the FVV Transfer + Networking Event, September 2025: Final and interim reports presented by the RTD performers, 612 (2025), S. 27-61
- [2] Yan, C.; Chen, J.; Liu, H.; Kumar, L.; Lu, H.: Health Management for PEM Fuel Cells Based on an Active Fault Tolerant Control Strategy. In: IEEE Transactions on Sustainable Energy 12 (2021), Nr. 2, S. 1311-1320
- [3] Heinzmann, M.; Weber, A.; Ivers-Tiffée, E.: Advanced impedance study of polymer electrolyte membrane single cells by means of distribution of relaxation times. In: Journal of Power Sources 402 (2018), S. 24-33
- [4] Lochner, T.: Impedance Analysis and Monitoring of Automotive Fuel Cells. München, Technische Universität, Dissertation, 2021

DANKE

Die präsentierten Ergebnisse sind aus einem Forschungsprojekt (FVV-Nr. 1511), das am Institut für Angewandte Wasserstoffforschung, Elektro- und Thermochemische Energiesysteme (H2Ohm) der Technischen Hochschule Nürnberg Georg Simon Ohm unter der Leitung von Prof. Dr.-Ing. André Leonide und am Lehrstuhl für Hochleistungs-Umrichtersysteme (HLU) der Technischen Universität München unter der Leitung von Prof. Dr. Sc. ETH Zürich Marcelo Lobo Heldwein durchgeführt wurde. Das Vorhaben wurde von der FVV finanziert (Fördernummer 601511) und von einem Arbeitskreis unter der Leitung von Dipl.-Ing. Tassilo Pflanz (MAN Truck & Bus SE) und Dr. Volker Formanski (BMW Group) begleitet. Die Autoren bedanken sich bei der FVV für die Finanzierung des Projekts und bei allen Mitgliedern des Projektnutzerausschusses für deren Unterstützung. Besonderer Dank für die Umsetzung des Projekts gilt den wissenschaftlichen Mitarbeitenden Josef Knoblach, Mertkan Özcan, Omar Elattar, Lisa Machard, Martin Regnet (Ohm) und Wei Tian (TUM).

tet das, dass integrierte EIS-Systeme nicht nur mit ausreichender Anregungsleistung ausgelegt sein müssen, sondern auch unter sorgfältiger Berücksichtigung der Sensorqualität, der Abtastarchitektur und der Nachbearbeitungsalgorithmen. Adaptive Strategien wie die Kombination von schnellen Breitbandmessungen mit gezielter Verifizierung bei ausgewählten Frequenzen erscheinen vielversprechend, um die Messgeschwindigkeit und die Diagnostiefe zu optimieren.

5 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

EIS bietet großes Potenzial für die On-Board-Diagnose in FCEVs, erfordert jedoch eine sorgfältige Konzeption auf Systemebene.



READ THE ENGLISH E-MAGAZINE

Test now for 30 days free of charge: www.mtz-worldwide.com

VISIONEN. ENTWICKLUNG. MOBILITÄT.

Die Welt der Mobilität verändert sich – die Herausforderung der Automobilentwicklung ist das Wissen von morgen mit Blick auf Technologien von übermorgen. Die Komplexität des Mobilitätswandels erfordert wegweisende Lösungen für den Transformationsprozess. ATZechnik bietet hochaktuelle Informationen aus dem gesamten Spektrum der Automobilelektronik. Nutzen Sie zusätzlich zu den Printausgaben das **interaktive E-Magazin** und profitieren Sie von der einzigartigen **Wissensdatenbank des Onlinearchivs mit pdf-Download**.

ATZ elektronik

60 TAGE
KOSTENLOS!



www.mein-fachwissen.de/ATZechnik