

Ansätze zur Betriebsführung und Diagnose von über leistungselektronische Stellglieder netzgekoppelten Brennstoffzellen

Approaches for Operational Management and Diagnosis of Fuel Cells being Coupled to Grid via Power Electronic Converters

Yuriy Bessarab, Mathias Käbisch, Andreas Lindemann, Zbigniew Styczynski
Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, Institut für Elektrische Energiesysteme
Universitätsplatz 2, D – 39106 Magdeburg, www.ovgu.de/iesy

Kurzfassung

Leistungselektronische Stellglieder sind erforderlich, um die von einer Brennstoffzelle abgegebene elektrische Energie ins Wechselspannungsnetz einzuspeisen. Die für die Regelung der Leistungselektronik erfassten elektrischen Größen können genutzt werden, um Parameter eines elektrischen Ersatzschaltbildes der Brennstoffzelle zu bestimmen und so Aussagen über deren Betriebszustand zu treffen.

Abstract

Power electronic converters are required to feed electrical energy generated by a fuel cell into the AC grid. Voltages and currents being measured for purpose of control of power electronics can be used to parametrise an electrical equivalent circuit of the fuel cell and this way to characterise its operating state.

1 Einleitung

Kraft-Wärme-Kopplungs-Anlagen (KWK) auf Brennstoffzellenbasis können zur dezentralen Wärme- und Elektroenergieversorgung dienen. Im wärmegeführten Betrieb erreichen sie einen hohen Gesamtwirkungsgrad, alternativ ist auch stromgeführter Betrieb zur Spitzenlastabdeckung und zur Kompensation fluktuierender Einspeisung von aus erneuerbaren Quellen erzeugter elektrischer Energie, wie sie bei Windkraft- und Photovoltaikanlagen auftritt, denkbar. In beiden Fällen muss eine hohe Lebensdauer gewährleistet sein, um solche Anlagen im Energieversorgungsmarkt zu etablieren [1]. Die Anbindung eines Brennstoffzellensystems an das elektrische Netz ist schematisch in **Bild 1** dargestellt: Die Brennstoffzelle wird mit Prozessmedien — wie Wasserstoff — versorgt; ausgangsseitige Leistungselektronik speist die in Form von Gleichstrom abgegebene elektrische Energie in das Wechselspannungsnetz ein, wobei in der Regel galvanische Trennung vorgesehen ist und die Spannungsebene angepasst wird. Meist wird dies mit einer Kombination aus einem Gleichspannungswandler mit Transformator — z. B. einem Durchflusswandler — sowie einem dessen Ausgang

mit dem ein- oder dreiphasigen Netz verbindenden Spannungszwischenkreis-Wechselrichter realisiert [1][2]. Für die Regelung der Leistungselektronik sowie den Schutz der Brennstoffzelle — beispielsweise gegen Überstrom [1][3] — werden in jedem Falle verschiedene elektrische Größen erfasst.

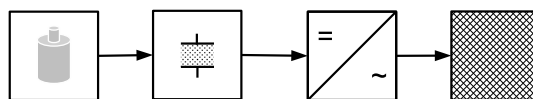


Bild 1: Blockdiagramm eines netzgekoppelten Energieversorgungssystems mit Brennstoffzelle

In diesem Beitrag wird diskutiert, wie am Brennstoffzellenstapel gemessene elektrische Größen, die für die Regelung der Leistungselektronik notwendig sind, genutzt werden können, um ein elektrisches Ersatzschaltbild für PEM-Brennstoffzellen zu parametrieren und für die Betriebsführung relevante Aussagen über deren aktuellen Betriebszustand zu treffen.

2 Komponenten dezentraler Energieversorgungssysteme mit Brennstoffzellen

2.1 Brennstoffzellen

Dem in Bild 1 abgebildeten Brennstoffzellensystem und dessen Peripherie wird über einen Speicher bzw. Reformier Wasserstoff zugeführt und dieser wird in der ersten Halbzellenreaktion an der Anode in Wasserstoffionen und Elektronen aufgespalten. Im zweiten Schritt reagiert Sauerstoff an der Kathode mit den durch die Membran diffundierten Wasserstoffionen und den über den externen Stromkreis fließenden Elektronen zu Wasser. Bei dieser „kalten Verbrennung“ treten naturgemäß Verluste auf. Diese lassen sich in Aktivierungs-, ohmsche und diffusionshemmende Verluste unterteilen. Dabei dominiert die sich nicht linear verhaltende Aktivierungsüberspannung bei geringen Stromdichten, da in diesem Bereich eine hohe Ladungsdurchtrittshemmung vorherrscht. Im Betriebsbereich der Brennstoffzelle dominieren die durch den von der Membranfeuchte abhängigen Elektrolytwiderstand verursachten ohmschen Verluste. Bei hohen Stromdichten stößt die Brennstoffzelle an die Grenze ihrer Belastbarkeit, was durch einen rapiden nichtlinearen Spannungsabfall gekennzeichnet ist, da die Reaktanden nicht mehr genügend schnell durch die Membran diffundieren können [4]. Durch die Verluste ergibt sich der typische Kennlinienverlauf einer PEM-Brennstoffzelle, der in **Bild 2** dargestellt ist. Um Schäden an der Brennstoffzelle zu vermeiden, wird diese real nicht im Bereich der Grenzstromdichte betrieben; damit treten nur geringe diffusionshemmende Verluste auf und dieser Bereich ist in der gemessenen Kurve nicht erkennbar. Weiterhin kann angenommen werden, dass die anodenseitige Halbzellenreaktion wesentlich schneller abläuft als die kathodenseitige, so dass die Anodenverluste ebenfalls vernachlässigt werden können. Unter diesen Annahmen lassen sich die physikalischen Prozesse, die in der Brennstoffzelle stattfinden, auch vereinfacht durch ein elektrisches Ersatzschaltbild beschreiben. In [3] wird ein Äquivalentschaltbild einer Brennstoffzelle hergeleitet, das passive und aktive Zweipole beinhaltet. Durch dieses Modell wird das Verhalten der Klemmenspannung einer Brennstoffzelle nachgebildet. Im Ersatzschaltbild nach **Abbildung 3** kann die Brennstoffzelle aus elektrotechnischer Sicht als Spannungsquelle U_0 mit verlustbehafteten Innenwiderständen interpretiert werden [5][6]. Dabei charakterisiert R_{Mem} die ohmschen Verluste durch die Membran, C_{DK} entsteht durch die sich ausbildende Doppelschicht zwischen Elektroden und Ionenleiter und R_{Akt} beinhaltet die nichtlinearen Aktivierungsverluste.

Für die Abbildung des Brennstoffzellenverhaltens

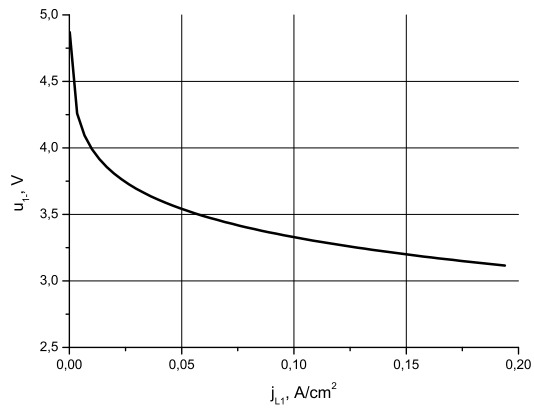


Bild 2: Kennlinie des zu untersuchenden Brennstoffzellenstapels

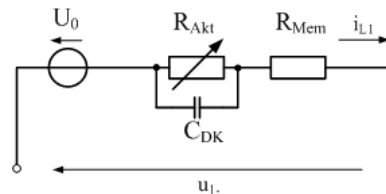


Bild 3: Ersatzschaltbild einer Brennstoffzelle

mit dem Ersatzschaltbild muss dieses parametrieren, was durch Messungen geschehen kann. Verschiedene Methoden zur Untersuchung von elektrochemischen Prozessen sind anwendbar: Neben der stationären Kennlinie und der Ermittlung der Sprungantwort bzw. der Kurzschlussanalyse kommt häufig die elektrochemische Impedanzspektroskopie zum Einsatz [7]. In **Bild 4** ist das Nyquist-Diagramm mit dem für den vermessenen Zellenstapel ermittelten Elektrolyt- und Aktivierungswiderstand abgebildet. Bei niedrigen Frequenzen entspricht der Fußpunkt auf der reellen Achse der Summe beider Widerstände, bei hohen Frequenzen stellt die Kapazität einen Kurzschluss dar und somit lässt sich im Fußpunkt der Elektrolytwiderstand ablesen.

Mit sich unterschiedlich einstellenden Parametern für unterschiedliche Arbeitsbereiche eines bestimmten Brennstoffzellenstapels lassen sich Rückschlüsse auf dessen Zustand bzw. allfällige Degradation ziehen.

Um die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse zu gewährleisten, wurden die bereits genannten Messungen sowie alle folgenden Versuche unter gleichbleibenden Bedingungen durchgeführt: In **Tabelle 1** sind die Kenndaten des Brennstoffzellenstapels und die jeweils manuell eingestellten Betriebsparameter zusammengefasst.

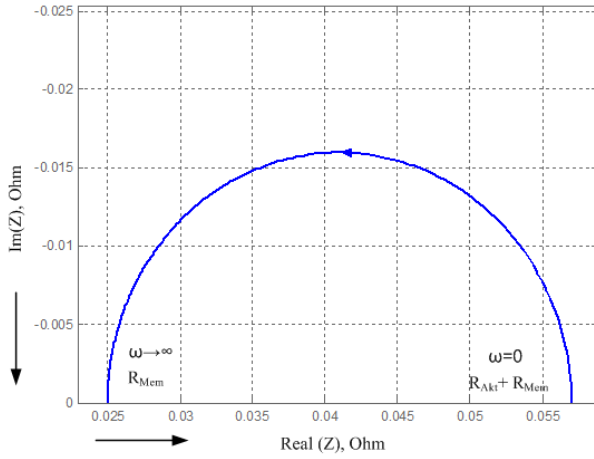


Bild 4: Nyquist-Diagramm zum Ersatzschaltbild der Brennstoffzelle

Tabelle 1: Kenndaten und Betriebsbedingungen des Brennstoffzellenstapels

Zellenzahl	5	
Zellfläche	100cm ²	
Stapeltemperatur	40°C	
Befeuchtertemperatur	30°C	
Betriebstemperatur-Bereich	30°C...60°C	
Max. Druck Anode/Kathode	500mbar	
Max. Druckdifferenz	300mbar	
Drücke	H ₂	100mbar
	O ₂	100mbar

2.2 Leistungselektronische Stellglieder

Als einfachstes Stellglied zur Spannungsanpassung nach Abschnitt 1 kommt der Hochsetzsteller in Frage, wie in **Bild 5** gezeigt und in [8] für Brennstoffzellensysteme untersucht. Charakteristisch für sein Klemmenverhalten ist die taktfrequente Welligkeit des Eingangsstromes, wie sie sich auch bei komplexeren stromgespeisten Topologien mit Transformator findet, welche für größere Spannungsübersetzungsverhältnisse besser geeignet sind; um die Brennstoffzelle nicht zu schädigen, sollte diese Welligkeit nicht zu groß sein, was sich durch geeignete Wahl von Induktivität L_{L1} und Taktfrequenz f_T erreichen lässt.

Ein solcher Hochsetzsteller diene bei den im folgenden beschriebenen Versuchen zur Belastung des fünfzelligen Brennstoffzellenstapels, wobei die Zwischenkreisspannung $U_Z \approx 12V$ betrug. Somit konnten die Interpretation der Ergebnisse erschwerende Unsymmetrien zwischen den Zellen durch deren geringe Zahl auf ein Minimum reduziert werden, wobei auf der niedrigen Spannungsebene naheliegenderweise keine direkte Netzeinspeisung möglich war. Die Spannungsabfälle im Leistungsteil einschließlich der MOSFETs erlaubten stromgeregelten Betrieb

[9] bis etwa $0 \leq I_{L1} \leq 15A$, so dass Arbeitspunkte sowohl im Nenn-Arbeits- als auch im Aktivierungsbereich eingestellt werden konnten.

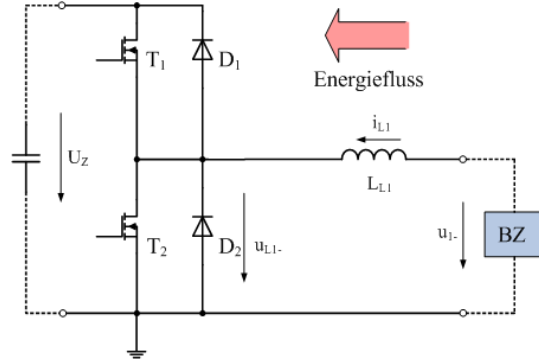


Bild 5: Brennstoffzelle mit Hochsetzsteller

Ein Wechselrichter kann neben der Energieeinspeisung ins Netz Systemdienstleistungen — wie Blindleistungskompensation als aktiver Filter — übernehmen [10]. Bei einphasiger Einspeisung ist zu beachten, dass eine Leistungswelligkeit

$$p = u \cdot i = \sqrt{2}U \cos(\omega t) \cdot \sqrt{2}I \cos(\omega t) \quad (1)$$

$$= UI(1 + \cos 2\omega t)$$

mit doppelter Netzfrequenz auftritt. Damit diese sich nicht im von der Brennstoffzelle abgegebenen Strom abbildet und die letztere damit schädigt [1], können beispielsweise hinreichend große Kapazitäten im Spannungszwischenkreis des Wechselrichters vorgesehen werden. Solche Puffer können auch zweckmäßig sein, um die der Brennstoffzelle entnommene Leistung während Messintervallen von der einzuspeisenden Leistung zu entkoppeln, wie in Abschnitt 3 diskutiert.

3 Ansätze zur Diagnose

3.1 Auswertung der taktfrequenten Welligkeit

Die bereits in Abschnitt 2.2 erwähnte taktfrequente Welligkeit des Ausgangsstroms der Brennstoffzelle wirkt sich auf deren Klemmenspannung aus: Gemäß der statischen Kennlinie nach Bild 2 führt ein Δi_{L1} zu einem Δu_{1-} , das im Bereich der Aktivierungsüberspannung bei kleinen Strömen I_{L1} zunehmen würde. Dieser Zunahme wird allerdings für entsprechend hohe Taktfrequenzen durch die Doppelschichtkapazität C_{DK} — vgl. das elektrische Ersatzschaltbild in Abbildung 3 — entgegengewirkt. Das in **Bild 6** gezeigte Messergebnis bestätigt dies: Die Stromwelligkeit bildet sich in einer entsprechenden Spannungswelligkeit ab. Am Wendepunkt des Stromes i_{L1} ergibt sich jeweils ein Spannungssprung in der Größenordnung von 5mV, der durch die Induktivität des Brennstoffzellenstapels einschließlich

seiner Zuleitungen bis zum Spannungsabgriff erklärbar ist, durch die eine Änderung von $\frac{di_{L1}}{dt}$ eine Änderung von u_{1-} hervorruft. Teilt man die verbleibende Spannungs- durch die Stromwelligkeit, so erhält man $R_{Mem} \approx 12,5\text{m}\Omega$. Die Genauigkeit dieser Messung mit hoher zeitlicher Auflösung wird hierbei durch das Verhältnis der geringen Welligkeit zum Mittelwert von Klemmenspannung und ggf. Klemmenstrom in Verbindung mit der Auflösung der Analog-Digital-Wandlung begrenzt. Dem Vorteil, dass dem Strom keine Testsignale eingepreßt werden müssen, da seine ohnehin vorhandene Welligkeit ausgenutzt wird, stehen mithin die Nachteile begrenzter Genauigkeit des zu ermittelnden Membranwiderstandes bei gleichzeitig aufwendiger Messtechnik gegenüber.

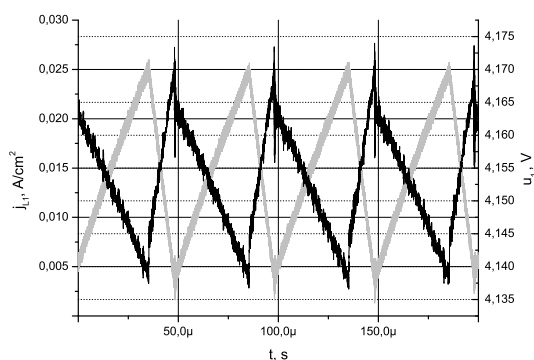


Bild 6: Klemmenspannung des Brennstoffzellenstapels bei hochfrequent welligem Klemmenstrom bedingt durch das leistungselektronisches Stellglied mit Taktfrequenz 20kHz

Dieses Ergebnis steht im Einklang mit [1], wonach das Stellglied zur Identifikation des Membranwiderstands der Brennstoffzelle eingesetzt werden kann, wenn kein zusätzlicher Glättungskondensator am Ausgang der Brennstoffzelle eingesetzt wird und die Taktfrequenz zwischen $2\text{kHz} \leq f_T \leq 20\text{kHz}$ liegt.

Die im folgenden beschriebenen Ansätze sollten demgegenüber auch mit taktfrequent abgetasteten Messsignalen, wie sie üblicherweise für die Regelung des Stromrichters verwendet werden, anwendbar sein.

3.2 Auswertung einer aufmodulierten periodischen Schwingung

Die Impedanzspektroskopie eignet sich besonders für die Untersuchung der Einflüsse von dynamischen Belastungsschwankungen auf das Betriebsverhalten und den Wirkungsgrad der Brennstoffzelle. Hierfür wird um einen stationären Arbeitspunkt ein zusätzlicher kleiner Wechselstrom aufmoduliert, der Konzentrationschwankungen an der Elektroden verursacht. Tritt dabei eine diffusionsbestimmte Re-

aktion auf, pflanzt sich die Schwingung in das Elektrolytinnere fort; da dies in endlicher Zeit geschieht, wird dieser Vorgang dem in der Elektrode fließende Wechselstrom nacheilen, so dass eine Phasenverschiebung auftritt. Die Auswirkungen werden bei unterschiedlichen Amplituden und Frequenzen analysiert [4]. Da das aufmodulierte Signal periodisch sinusförmig wechselt, stellt sich ein quasistationärer Zustand ein, der Aussagen über das Betriebsverhalten in diesem Arbeitspunkt zulässt [1].

In **Bild 7** ist ein sinusförmig aufmodulierter Wechselstrom $\hat{I}_{L1\sim} \approx 0,2\text{A}$ bei mittlerem Strom $I_{L1} \approx 10\text{A}$ und einer Frequenz von 2Hz dargestellt. Mit dem resultierenden Wechselanteil in der Spannung von $\hat{U}_{1-\sim} \approx 14\text{mV}$ ergibt sich für die Impedanz ein Wert von $Z \approx 70\text{m}\Omega$, wobei aufgrund der kleinen Frequenz nach Bild 4 $Z \approx R_{Mem} + R_{Akt}$ gilt.

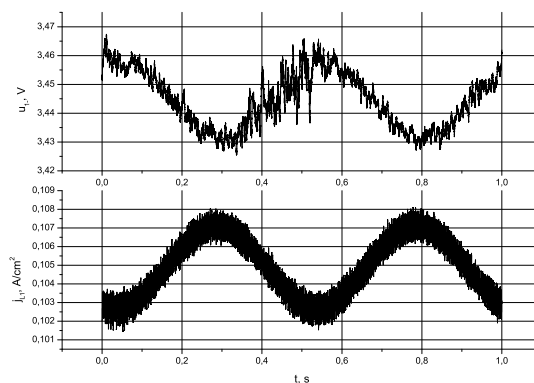


Bild 7: Stromdichte mit aufmoduliertem Wechselanteil und Klemmenspannung des Brennstoffzellenstapels

Bei der Festlegung der Amplitude des Wechselanteils im Strom ist zu berücksichtigen, dass sich bei zu großen Werten nicht der benötigte annähernd stationäre Zustand einstellt [1], während zu kleine Werte zu großen Meßunsicherheiten führen.

3.3 Auswertung aufmodulierter Sprungfunktionen

Die Ermittlung der Sprungantwort bei einem Stromsprung ist eine relativ einfache Methode zur Parametrierung des vereinfachten Ersatzschaltbildes. Von entscheidender Bedeutung dabei ist ein ausreichend großer Gradient der Stromänderung, um eine signifikante Spannungsänderung hervorzurufen [1]; hierfür ist eine hinreichend kleine Induktivität im Hochsetzsteller bzw. eine ausreichende Regeldynamik desselben erforderlich. Es wurden Sprungantworten mit positiven und negativen Stromflanken aufgezeichnet; dabei konnten wie in [3] keine qualitativen Unterschiede beim Spannungsverlauf festgestellt werden; allerdings hängen

die zu bestimmenden Parameter des Ersatzschaltbildes vom Arbeitspunkt im Ausgangszustand ab. Dieser Tatsache trägt das in [1] vorgeschlagene Verfahren zur Auswertung von Messintervallen mit kurzzeitig abgesenktem Strom Rechnung.

In **Bild 8** ist ein solcher Stromsprung von 16A auf 5A dargestellt: Parallel zum Sprung weist die Klemmenspannung einen steilen linearen Anstieg auf, der durch den Widerstand R_{Mem} bestimmt wird; es folgt ein exponentieller Verlauf, der der Reaktion des RC-Gliedes $R_{Akt} - C_{DK}$ entspricht. Entsprechend dem Ansatz nach [3] können die Parameter des Ersatzschaltbildes hieraus bestimmt werden zu:

$$\begin{aligned} R_{Mem} &= \frac{U_{Mem}}{I} = \frac{0,28V}{11A} = 25m\Omega \\ R_{Akt} &= \frac{U_{RC}}{I} = \frac{0,36V}{11A} = 33m\Omega \\ C_{DK} &= \frac{\tau}{R_{Akt}} = \frac{0,02s}{0,033\Omega} = 0,61F \end{aligned} \quad (2)$$

Dieses Ergebnis — auf dem auch das Nyquist-Diagramm **Bild 4** basiert — liegt in der gleichen Größenordnung wie die nach Abschnitt 3.2 ermittelte Summe $R_{Mem} + R_{Akt}$. Dies gilt auch für die aus weiteren Sprungantworten ermittelten Parameter nach **Tabelle 2**.

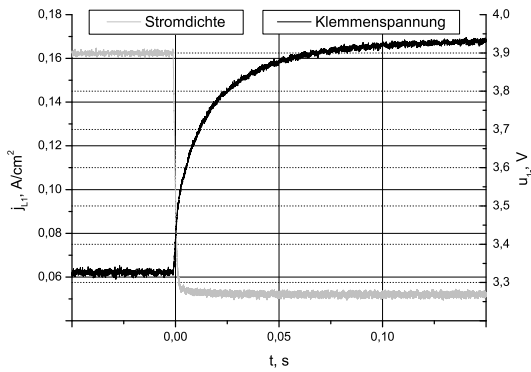


Bild 8: Spannungsverhalten bei einem Stromsprung von ca. 16A auf 5A

Tabelle 2: Aus Sprungantworten ermittelte Parameter des Ersatzschaltbildes

I_{L1}	$\frac{R_{Mem}}{m\Omega}$	$\frac{R_{Akt}}{m\Omega}$	$\frac{C_{DK}}{F}$
16A → 5A	25	33	0,61
10A → 5A	24	42	0,48
5A → 16A	25	29	0,69

4 Folgerungen für die Betriebsführung

Für die Lebensdauer einer Brennstoffzelle bzw. eines Brennstoffzellenstapels spielen reversible und irreversible Degradationsmechanismen eine wichtige Rolle, die eine Vergrößerung der Innenwiderstände verursachen. Zur reversiblen Degradation zählt zum Beispiel eine nicht ausreichend befeuchtete Membran, die einen erhöhten Membranwiderstand aufweist. Bei der irreversiblen Degradation kann es zum Beispiel zu einer Agglomeration von Platinpartikeln — die als reaktionsbeschleunigendes Katalysatormaterial in PEM-Brennstoffzellen verwendet werden — oder zu der so genannten „Platinkorrosion“ bzw. Auflösung des Platins an der Drei-Phasen-Grenze — dem Reaktionsraum zwischen Elektrolyt, Medium und Katalysator — kommen, was zu einer Verringerung der aktiven Zellfläche führt [11]. Dadurch sinkt die Leistungsfähigkeit der Zelle, was mit einem Anstieg der Innenwiderstände einhergeht. Dies wirkt sich auf die Komponenten im elektrischen Ersatzschaltbild aus, da sich andere Parameter für die Widerstände einstellen. Somit lassen sich die in Abschnitt 3 identifizierten Parameter zur Detektion des Betriebszustandes und darauf aufbauend zur Betriebsführung nutzen.

In **Bild 9** ist dies für den zuvor untersuchten Brennstoffzellenstapel illustriert, der hier mit zu geringer Befeuchtung betrieben wurde: Wie in Abschnitt 3.2 beschrieben, ist ein sinusförmiger Wechselstrom ($\hat{I}_{L1} \approx 0,2A$) aufmoduliert, wobei die Einstellung des mittleren Stroms ($I_{L1} \approx 1,5A$) dem verminderten Kurzschlussstrom des zu trockenen Stapels Rechnung trägt und eine Frequenz von 1Hz verwendet wurde. Man erkennt, dass der stationäre Arbeitspunkt bei $U_{L1-} = 3,35V$ deutlich unterhalb der stationären Kennlinie nach **Bild 2** liegt; die in **Bild 9** oszillographierten Einzelzellenspannungen machen deutlich, dass dies durch eine gestaffelt unsymmetrische Spannungsverteilung innerhalb des Stapels verursacht wird. Die unterschiedlichen Impedanzen der Einzelzellen bilden sich auch im Wechselanteil der Zellenspannungen ab; mit dem Wechselanteil der Klemmenspannung über alle Zellen von $\hat{U}_{1-\sim} \approx 140mV$ ergibt sich für die Impedanz ein Wert von $Z \approx 700m\Omega$ — mithin etwa das Zehnfache, wie zuvor für eine ordnungsgemäß betriebene Zelle gemessen. Das Messergebnis bei zu geringer Befeuchtung ist mithin durch zu hohe und — wegen des an der Kathodenseite der Zellen durch die laufende Reaktion entstehenden Wassers, welche die mangelhafte Befeuchtung teilweise kompensiert — zur Anodenseite des Stapels hin ansteigende Membranwiderstände charakterisiert, vgl. Abschnitt 2.1. Da es sich wie erwähnt um einen reversiblen Zustand handelt, kann diesem durch Herstellen der notwendigen Befeuchtung abgeholfen werden.

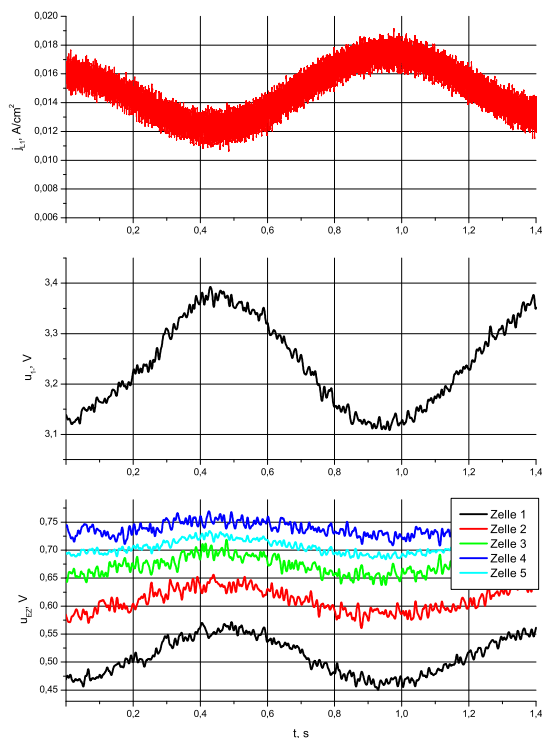


Bild 9: Verhalten eines mangelhaft befeuchteten Brennstoffzellenstapels: Stromdichte mit aufmoduliertem Wechselanteil, Klemmenspannung des Stapels und einzelne Zellenspannungen

5 Zusammenfassung

Parameter des elektrischen Ersatzschaltbildes eines Brennstoffzellenstapels können im Betrieb aus für die Regelung der diesen ans Netz koppelnden Leistungselektronik ermittelten Größen näherungsweise bestimmt werden. Insbesondere kann bei ausreichender Messgenauigkeit Impedanzspektroskopie mittels einer dem Strom aufmodulierten Schwingung kleiner Amplitude vorgenommen werden; alternativ bietet sich die Auswertung von Sprungantworten bei Einprägung von Stromsprüngen an. In beiden Fällen muss entweder ein hinreichend großer Energiespeicher — z. B. in Form des Zwischenkreis-kondensators des Wechselrichters — vorgesehen oder die ins Netz eingespeiste Leistung verändert werden. Aus den so ermittelten Parametern lassen sich Aussagen über den Zustand des Brennstoffzellenstapels ableiten, die zur Betriebsführung und Fehlerdiagnose verwendbar sind.

Danksagung

Die Verfasser danken dem Kultusministerium des Landes Sachsen-Anhalt für die Förderung der vorliegenden Arbeit.

Literatur

- [1] L. Schindele: Einsatz eines leistungselektronischen Stellgliedes zur Parameteridentifikation und optimalen Betriebsführung von Brennstoffzellensystemen; Dissertation, Universität Karlsruhe (TH), 2006
- [2] M. Mohr, F.-W. Fuchs: Voltage Fed and Current Fed Full Bridge Converter for the Use in Three Phase Grid Connected Fuel Cell Systems; IPEMC Conference, 2006
- [3] J. Haubrock: Parametrierung elektrischer Äquivalentschaltbilder von PEM Brennstoffzellen; Dissertation, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, 2007
- [4] C.H. Hamann, W. Vielstich: Elektrochemie. 3. vollständig überarbeitete Auflage, Wiley/VCH Verlag, Weinheim 1998
- [5] R. Cownden, M. Nahon, M. A. Rosen: Modelling and Analysis of a Solid Polymer Fuel Cell System for Transportation Applications. Int. J. Hydrogen Energy, Vol. 26. Elsevir 2001
- [6] O. Justus: Berechnung linearer und nichtlinearer Netzwerke. Fachbuchverlag Leipzig-Köln, ISBN 3-343-00865-6, Köln 1994
- [7] Macdonald, I. und J. Ross: Impedance Spectroscopy. John Wiley Sons, 1987
- [8] H. Solmecke: Optimierte Stromrichter für Brennstoffzellenanlagen; Dissertation, Fernuniversität Hagen, 1998
- [9] Y. Bessarab: Comparison of different control methods of DC-DC converters; Power Electronics and Energy Efficiency Conference, Alushta, 2008
- [10] I. Merfert, A. Lindemann: Application of a Simplified Control Scheme for the Generalised Instantaneous Reactive Power Theory in Active Power Filters for Decentralised Energy Generation; PCIM Conference, Nürnberg, 2007
- [11] K. Kinoshita, J.T. Lundquist, P. Stonehart: Potential Cycling Effects on Platinum Electrocatalyst Surfaces; J. Electroanal. Chem., 48:157-166, 1973