

Mechanische Charakterisierung von Festoxid-Brennstoffzellen

Carolin Sitzmann¹, Tom Liensdorf¹, Ferdinand Dömling¹, Nico Langhof¹, Walter Krenkel¹

Kurzfassung: Alternative Verfahren zur Stromerzeugung und Speicherung werden immer wichtiger. Die Brennstoffzellentechnologie nimmt dabei einen größer werdenden Stellenwert ein. Neben den elektrochemischen Eigenschaften spielt auch die mechanische Integrität bei Membran-Elektroden-Einheiten eine wichtige Rolle. Nachfolgend soll die mechanische Prüfung von Festoxid-Brennstoffzellen (Solid Oxide Fuel Cells) und deren Elektrolyten dargelegt und die Möglichkeiten am Lehrstuhl Keramische Werkstoffe der Universität Bayreuth beschrieben werden.

Abstract: Alternative methods for power generation and storage are becoming increasingly important. Fuel cell technology is becoming more significant in this context. In addition to the electrochemical properties, the mechanical integrity of membrane electrode units also plays an important role. In the following article, the mechanical testing of solid oxide fuel cells as well as their electrolytes will be presented and the possibilities at the Department of Ceramic Materials Engineering at the University of Bayreuth will be outlined.

Keywords: Brennstoffzelle, SOFC, Charakterisierung, Zugversuch, Doppelring-Biegeversuch

1. Einleitung

Im Rahmen des Klimaschutzes werden alternative Stromerzeugungsprozesse immer wichtiger. Dazu gehören allgemein auch Brennstoffzellen, die umweltschonend Strom erzeugen. Dabei sind sie sehr variabel einsetzbar: Im mobilen Einsatz vermeiden sie bei hoher Effizienz lokale Emissionen. Stationäre Anwendungen sind Kraft-Wärme-Kopplungen in Gebäuden, oder eine vom Stromnetz unabhängige Stromerzeugung, wie zum Beispiel entlang von Pipelines.

Forschungsschwerpunkte im Bereich der Brennstoffzellen sind generell die Entwicklung neuer Materialien sowie neuer Konzepte mit dem Hauptziel der Kostenreduktion bei gleichzeitig erhöhter Lebensdauer. Der Lehrstuhl Keramische Werkstoffe der Universität Bayreuth beschäftigt sich mit der mechanischen und thermomechanischen Charakterisierung von Festoxid-Brennstoffzellen.

2. Brennstoffzellen

Brennstoffzelle ist nicht gleich Brennstoffzelle. Die unterschiedlichen Einsatzbereiche

können nur über verschiedene Bau- und Funktionsweisen erreicht werden. **Tabelle 1** gibt die unterschiedlichen Typen mit den entsprechenden Betriebstemperaturen wieder.

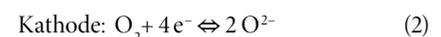
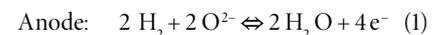
2.1 Funktionsweise

Brennstoffzellen wandeln chemisch gebundene Energie ohne Verbrennungsvorgänge direkt in elektrische Energie um. Hierfür sind drei Elemente zwingend notwendig: eine Brenngaselektrode, ein Elektrolyt sowie eine Sauerstoffelektrode. Der Elektrolyt kann, wie in **Tabelle 1** ersichtlich, flüssig oder fest sein. Das Brenngas ist je nach Brennstoffzellentyp Wasserstoff oder eine fossile Vorstufe, wie zum Beispiel Methan, Ethan oder Erdgas. An der Sauerstoffelektrode wird reiner Sauerstoff oder Luft als Oxidationsmittel zur Verfügung gestellt. Das Reaktionsprodukt Wasser entsteht, je nach Typ der Brennstoffzelle, an der Anode (Brenngaselektrode) oder Kathode (Sauerstoffelektrode). Bei ausreichendem Zustrom der Ausgangsstoffe beziehungsweise Abfluss der Reaktionsprodukte findet die Energieumwandlung kontinuierlich statt. In diesem

Punkt unterscheiden sich die Brennstoffzellen von anderen elektrochemischen Energiewandlern wie der Batterie. [1, 2]

2.2 Festoxid-Brennstoffzellen

Festoxid-Brennstoffzellen arbeiten bei hohen Temperaturen, werden in der Regel stationär eingesetzt und besitzen einen hochtemperaturstabilen, keramischen Elektrolyten. Der Elektrolyt ist häufig ein Yttrium stabilisiertes Zirkoniumdioxid, welches gasdicht ist. Bei SOFC werden die notwendigen Sauerstoffionen durch den Elektrolyten geleitet. Die stattfindenden Reaktionen an Anode (1) und Kathode (2) sind in **Bild 1** grafisch dargestellt.



Mit dem Begriff „Brennstoffzelle“ ist eigentlich die sogenannte Membran-Elektroden-Einheit (MEA, membrane electrode assembly) gemeint, die aus dem Elektrolyten und den beiden Elektroden besteht. Eine dieser

Autoren



DR.-ING.
CAROLIN SITZMANN
(carolin.sitzmann@uni-bayreuth.de) promovierte an der Universität Bayreuth im Bereich Materialwissenschaften. Seit 2013 ist sie Akademische Rätin am Lehrstuhl Keramische Werkstoffe der Universität Bayreuth.



DIPL.-ING.
TOM LIENS DORF
(tom.liensdorf@uni-bayreuth.de) studierte an der Universität Bayreuth den Diplomstudiengang Materialwissenschaft. Seit 2013 arbeitet er als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl Keramische Werkstoffe der Universität Bayreuth.

drei Komponenten muss die komplette MEA strukturell stützen. Weit verbreitet ist die Variante mit einer dicken, tragfähigen Anode (Anode Supported Cell, ASC), auf die der Elektrolyt und die Kathode aufgedruckt werden. Daneben gibt es die elektrolytgestützte Zelle (Electrolyte Supported Cell, ESC), bei der, wie in Bild 1 dargestellt, der Elektrolyt für die mechanische Stabilität der MEA sorgt. Die Kathode von SOFC besteht beim aktuellen Stand der Technik aus einer porösen Keramik aus Lanthan-Strontium-Kobalt-Ferrit (LSCF). Anodenseitig wird Nickeloxid verwendet, das vor dem Betrieb zu Nickel reduziert wird.

Um eine gewisse Gesamtleistung des Systems zu erreichen, werden beim planaren Aufbau mehrere MEAs übereinandergestapelt. Eine metallische Platte wirkt dabei als Interkonnektor zwischen zwei MEAs. Das so entstandene System nennt man Stack.

2.3 Elektrolyse

Die Festoxid-Brennstoffzelle kann auch als Festoxid-Elektrolysezelle (Solid Oxide Electrolyzer Cell, SOEC) reversibel betrieben werden. Dies bedeutet, dass ausgehend von

Tabelle 1 Überblick über die unterschiedlichen Brennstoffzellentypen [1, 2] (© Sitzmann)

| | | Betriebs-temperatur | Elektrolyt |
|------|--|---------------------|-------------------------|
| AFC | Alkalische Brennstoffzelle (Alkaline Fuel Cell) | 80 °C | Kalilauge |
| PAFC | Phosphorsaure Brennstoffzelle (Phosphoric Acid Fuel Cell) | 200 °C | konz. Phosphorsäure |
| PEFC | Polymerelektrolyt-Brennstoffzelle (Polymer Electrolyte Fuel Cell) | 80 °C | Polymermembran |
| DMFC | Direktmethanol-Brennstoffzelle (Direct Methanol Fuel Cell) | 90 – 120 °C | Polymermembran |
| MCFC | Carbonatschmelzen-Brennstoffzelle (Molten Carbonate Fuel Cell) | 650 °C | Alkalicarbonat-schmelze |
| SOFC | Festoxid-Brennstoffzelle, oxidkeramische Brennstoffzelle (Solid Oxide Fuel Cell) | 850 – 1000 °C | Zirkoniumdioxid |

Wasser, Strom – vorzugsweise aus erneuerbaren Energien – und Luft mittels Elektrolyse Wasserstoff erzeugt werden kann (Bild 2). Somit kann regenerative Energie in Form von Wasserstoff gespeichert werden. Gibt man im Elektrolyse-Betrieb noch Kohlenstoffdioxid hinzu, entsteht ein Synthesegas, welches als Vorprodukt für die chemische Industrie genutzt werden kann.

3. Mechanische Charakterisierung von SOFC

3.1 Stand der Technik

Bei der Charakterisierung von elektrolytstabilisierten SOFC ist es wichtig, auf das hohe Aspektverhältnis (Dicke zu Länge/Breite) und somit auf die dünnen Substrate beziehungsweise MEA zu achten. Die für

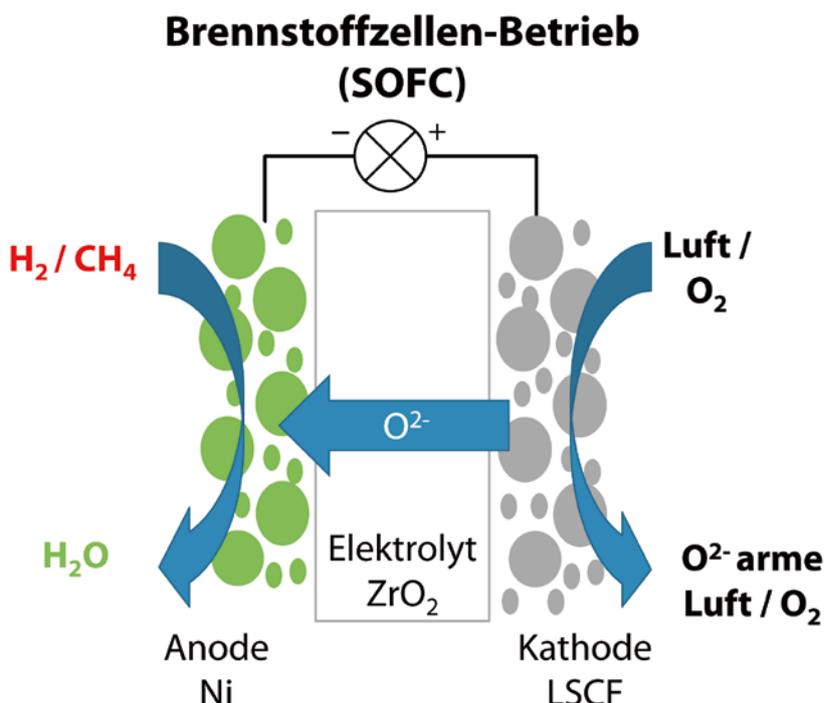


Bild 1 Skizzierter Aufbau einer Festoxid-Brennstoffzelle (© Sitzmann)

Hinweis

Im Rahmen des 14th EUROPEAN SOFC & SOE FORUM 2020 (30.06. – 03.07.2020) veröffentlichten Ferdinand Dömling M.Sc. sowie Dipl.-Ing. Tom Liensdorf aktuelle Forschungsergebnisse mit den Titeln „Evaluation of biaxial strength and fracture surface analysis of electrolyte-supported solid oxide fuel cells“ bzw. „Mechanical characterization of thin 3YSZ electrolyte-supported solid oxide fuel cells (SOFC)“.

monolithische Keramiken üblichen Drei- oder Vierpunktbiegeversuche scheiden aufgrund der nicht zu realisierenden Probengeometrie aus [3].

Für monolithische Keramiken sind keine Zugversuche bekannt, jedoch mit der ISO 15733 Zugversuche an faserverstärkten Keramiken. Für Polymerfolien (Dicke < 1 mm) gibt die DIN EN ISO 527-3 Prüfvorschriften wieder. Die Geometrien orientieren sich an den üblichen polymeren Zugproben, die in der Prüfmaschine geklemmt werden. Zugversuche sind für anodengestützte SOFC bereits in der Literatur bekannt [4, 5]. In diesen Fällen werden die SOFC-Proben zwischen Aluminiumträgern aufgeklebt, die wiederum mit einer Bohrung in der Prüfmaschine fixiert werden. Die Vorteile bei Zugprüfungen liegen in der einachsigen Spannungsverteilung, die in den Proben vorliegt, sowie dem relativ großen Prüfvolumen. Allerdings sind die Kanteneinflüsse bei diesem Prüfverfahren hoch und bedürfen einer Bearbeitung.

Im Bereich der SOFC sind auch Ring-on-Ring-Versuche, auch Doppelringbiegeversuche genannt, weit verbreitet [6, 7]. Hier wird die Probe zwischen zwei konzentrischen Ringen eingelegt und anschließend uniaxial belastet (Bild 3a). Dadurch entsteht in der Probe ein mehrachsiger Spannungszustand im Bereich zwischen den Ringen. Folglich liegen bei Doppelring-Biegeversuchen keine Kanteneinflüsse vor. Eine andere Ausführungsform des Doppelring-Biegeversuchs stellt Bild 3b dar: Als Stützring dient hier ein Ring aus einzelnen Kugeln [8], wodurch die

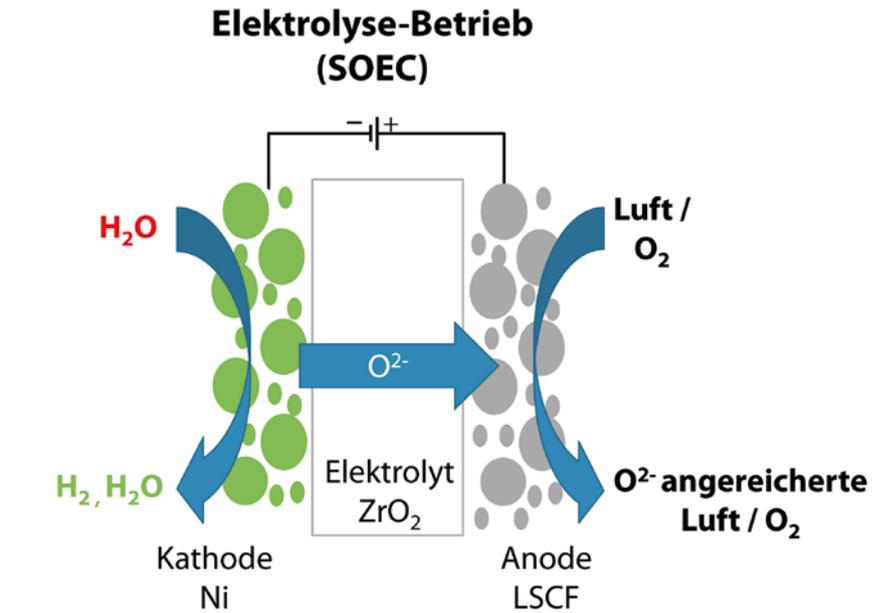


Bild 2 Skizzierter Aufbau einer Festoxid-Elektrolysezelle (© Sitzmann)

Reibung zwischen dem Stützring und der Probe reduziert wird.

Die resultierende Spannung kann bei geringen Durchbiegungen nach Gleichung (3) aus der Durchbiegung, der Dicke sowie dem Elastizitätsmodul berechnet werden [9]. Die Formel gilt jedoch nur für einlagige, homogene Werkstoffe bei großen Durchbiegungen. Der Elastizitätsmodul kann zerstörungsfrei mittels der Impulserregungstechnik (Impulse Excitation Technique, IET) an Proben mit der

Größe 13 mm x 7 mm x 90 µm ermittelt werden.

$$\sigma = E \left(0,1216 \left(\frac{d}{t} \right)^3 + 0,1643 \left(\frac{d}{t} \right)^2 + 1,6987 \left(\frac{d}{t} \right) + 0,02378 \right) \frac{t^2}{l^2} \quad (3)$$

Einen ähnlichen Aufbau wie der Doppelring-Biegeversuch zeigt der Ball-on-three-Ball-Versuch (B3B-Versuch) in Bild 4 [10]. Hier befinden sich auf einer Seite der Probe drei Kugeln

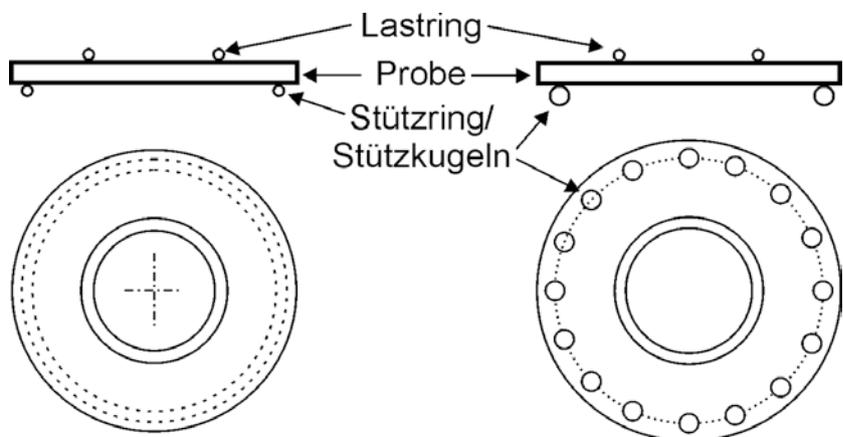


Bild 3 a) Prüfaufbau des Ring-on-Ring-Tests (Doppelring-Biegeversuch) b) Ring-on-Bearing ring Versuch [8] (© Sitzmann)

und auf der Gegenseite eine Kugel auf den Mittelachsen der Kugeln. Wie bereits beim Doppelring-Biegeversuch beeinflussen die Kanten die Prüfergebnisse auch in diesem Fall nicht. Das geprüfte Volumen ist hingegen deutlich kleiner und wird durch die Mittelpunkte der drei Stützkugeln definiert. Der Versuchsaufbau ist relativ einfach, wobei der Messfehler durch die Dickenmessung dominiert wird. Im Gegensatz zum Doppelring-Biegeversuch hat eine vorhandene Wölbung der Probe beim B3B-Versuch keinen Einfluss und verfälscht das Ergebnis nicht. Studien zeigen, dass die Außenkonturen der Probe sowohl kreisförmig als auch rechteckig sein können, was die Probenpräparation erleichtert [10].

In **Tabelle 2** werden die vier Prüfverfahren mit den Vor- und Nachteilen zusammengefasst und die Eignung für die mechanische Charakterisierung von Elektrolyten oder MEAs eingeschätzt.

3.2 SOFC-Charakterisierung am Lehrstuhl Keramische Werkstoffe

Für die mechanische Prüfung von Elektrolyten und MEAs stehen am Lehrstuhl Keramische Werkstoffe (Universität Bayreuth) zwei der oben genannten Verfahren zur Verfügung: der Doppelring-Biegeversuch mit unterschiedlichen Ringdurchmessern sowie der Zugversuch.

Durch die einfache Probengeometrie bietet sich der Doppelring-Biegeversuch ($d_a = 16 \text{ mm}$, $d_i = 6 \text{ mm}$) insbesondere für die mechanische Charakterisierung des reinen Elektrolyten an (**Bild 5**). Untersucht werden vor allem der Einfluss des Elektrolytwerkstoffes, der Elektrolytdicke und des unterkritischen Risswachstums des Zirkoniumdioxids auf die Festigkeit.

Für die Berechnung der Festigkeit mittels Gleichung (3) wird der Elastizitätsmodul über die zerstörungsfreie Impulserregungstechnik ermittelt (**Bild 6**). Hierfür wird eine Probe aus dem gleichen Werkstoff ($13 \text{ mm} \times 7 \text{ mm} \times 90 \mu\text{m}$) auf zwei Keile aufgelegt, so dass die Probe jeweils $2,9 \text{ mm}$ übersteht. Die Probe wird durch einen Impulserreger mit Keramikugel mittig angeschlagen und das Mikrofon (links) nimmt die entstehenden Frequenzen auf. Anhand einer schnellen Fourier-Transformation werden die Resonanzfrequenzen

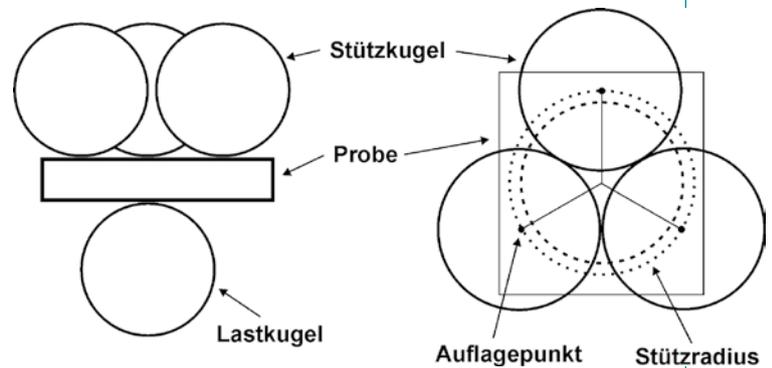


Bild 4 Prüfaufbau des Ball-on-three-Ball-Tests, links: Schnittansicht seitlich, rechts: Draufsicht [10] (© Sitzmann)



Bild 5 Doppelring-Biegeversuch, links: eingelegte MEA-Probe, rechts: zerstörte Doppelring-Biegeprobe (Durchmesser 24 mm) (© Liensdorf)

bestimmt und mit Hilfe von Gleichung (4) kann nach ASTM E 1876 – 01 der Elastizitätsmodul berechnet werden:

$$E = 0,9465 \frac{m \cdot f_r^2}{b} \left(\frac{l^3}{d^3} \right) \cdot T_1 \quad (4)$$

mit
 m = Masse (g)
 f_r = Frequenz der BiegeWellen (Hz)
 b = Breite (mm)
 l = Länge (mm)
 d = Dicke (mm)

T_1 = Korrekturfaktor

In den Versuchen wurde festgestellt, dass die Probengröße und damit der Überhang über den Stützring hinaus einen großen Einfluss auf die Ergebnisse und das Versagensverhalten hat. Wird der Überhang zu gering gewählt, kommt es aufgrund der starken Verformung der Probe zu starken Randspannungen, welche durch die fehlende Steifigkeit der zu kleinen Probengeometrie zu einem Versagen ausgehend vom Rand führen (**Bild 7**).

Ein zweiter Effekt, welcher beobachtet werden konnte, ist in **Bild 8** grafisch darge-

stellt. Aufgrund der geringen Elektrolytdicke und starken Verformungen während der mechanischen Prüfung wölbt sich die Probe nicht wie erwartet. Aufgrund sogenannter Membranspannungen richtet sich der Elektrolyt entgegen der Erwartungen unter dem Lastring aus, so dass vermehrt Zugspannungen im Elektrolyten induziert werden. Dies konnte mittels lasergestützter Verformungsmessung in der Probenmitte am Lehrstuhl Keramische Werkstoffe bestätigt werden.

Für die Untersuchung des unterkritischen Risswachstums des Zirkoniumdioxids werden in Anlehnung an DIN EN 843-3 Doppelring-Biegeversuche (jeweils $n = 15$) mit vier unterschiedlichen Belastungsgeschwindigkeiten ($0,01 \text{ N/s}$, $0,1 \text{ N/s}$, 1 N/s , 10 N/s) durchgeführt. Durch die doppellogarithmische Darstellung der Festigkeit über der Belastungsgeschwindigkeit kann der unterkritische Risswachstumsparameter n (subcritical crack growth exponent) aus der Steigung der gemittelten Kurve abgelesen werden. [11]

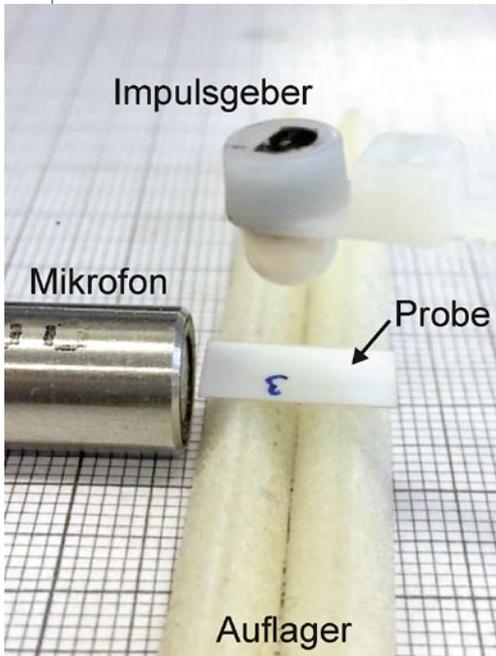


Bild 6 Aufbau der Impulserregungstechnik zur Ermittlung des Elastizitätsmoduls (© Dömling)

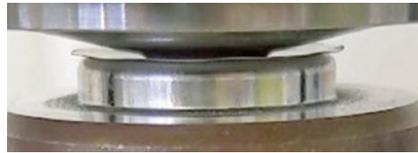


Bild 7 Gewellte Probe im Doppelring-Biegeversuch aufgrund eines zu kleinen Probendurchmessers (© Liensdorf)

Bei der Charakterisierung der MEA wird am Lehrstuhl die Doppelring-Biegeprüfung für qualitative Vergleiche zwischen neuen und bereits verwendeten MEAs herangezogen. Allerdings muss man in diesem Fall beachten, dass Gleichung (3) nicht für mehrschichtige MEAs gültig ist. Hierfür wird am Lehrstuhl Keramische Werkstoffe aktuell eine Methode mit Hilfe der Finite-Elemente-Methode entwickelt, um Festigkeitsaussagen auch im Bereich der MEAs treffen zu können.

Für die Zugprüfung von keramischen Proben wurde eine Zugaufnahme angefer-

tigt, die die Kraft über Bolzen in Stahlaufleimer einleitet, die mit einem Hochleistungskleber auf die keramischen Proben aufgebracht werden (Bild 9a). Die Bohrungen in der Keramik sind etwas größer, so dass der Bolzen keine Kraft direkt auf die Kanten ausübt. Die taillierten Zugproben werden mit einem Krümmungsradius von 9 mm und einer Gesamtlänge von 50 mm mit Hilfe eines Lasers aus Elektrolytfolien beziehungsweise Zellen herausgearbeitet. Die Zugprüfung wird mit einer Belastungsgeschwindigkeit von 1 mm/min durchgeführt. Mit dem gleichen Aufbau konnten bereits auch Proben aus MEAs geprüft werden.

Durch das Pulsen des Lasers entstehen beim Zuschnitt Riefen senkrecht zur Probenoberfläche und somit quer zur Zugrichtung. Wie bereits beschrieben, haben Kanten in der Zugprüfung einen großen Einfluss auf das Messergebnis. Um diese Riefen zu beseitigen, werden die Kanten durch ein ultraschallunterstütztes Schleifen geglättet.

Tabelle 2 Zusammenfassung der genannten Prüfverfahren (© Sitzmann)

| | Biegeversuch (uniaxial) | Zugversuch (uniaxial) | Doppelring-Biegeversuch (biaxial) | Ball-on-three-Ball Test (biaxial) |
|--|---|--|---|--|
| Normen (Auswahl) | ASTM C 1161 DIN 843-1 | ASTM E 8 DIN EN 6892-1 ASTM D 638 DIN 527-2 ISO 15733 | ASTM C 1499 DIN 51105 | Keine Norm bekannt |
| Anwendung | Monolithische Keramik | Polymerfolien Metallfolien | Keramik(folien) Gläser | Keramikfolien |
| Vorteile | Klar definierter Spannungszustand Aufnahmen vorhanden Einfacher Aufbau Keine Simulation notwendig | Einachsiger Spannungszustand Großes Prüfvolumen Prüfung des Querschnittes anstatt nur der Oberfläche Keine Simulation notwendig | Keine Kanteneinflüsse Einfacher Versuchsaufbau Biaxialer Test entspricht der Realität Großes Prüfvolumen | Keine Kanteneinflüsse Einfacher Versuchsaufbau Geringe Messfehler (Dickenbestimmung ist kritischer Faktor) Wölbung unkritisch Variation der Probenkörperform (Scheibe oder Rechteck) |
| Nachteile | Kanteneinflüsse Aufwendige Probenpräparation Hohe Durchbiegung ggfs. Durchrutschen der Proben | Nichtlineare Anteile durch Einspannung Aufwendige Probenpräparation Kanteneinflüsse | Reibung an den Ringen Durchbiegung dünner Proben FEA für hohe Durchbiegungen notwendig | Komplexer Spannungszustand FEA notwendig Geringes Prüfvolumen |
| Eignung für keramische Folien (< 100 µm) | Für Elektrolyte ungeeignet (Durchbiegung) Test von Zellen mittels 3-Punkt Methode denkbar (bedingt geeignet) | Bedingt geeignet (Einspannung, Ausrichtung der dünnen Keramikfolien kritisch) | Geeignet (erprobt, genormt, repräsentatives Testvolumen) | Geeignet (sehr kleines Prüfvolumen, gut für unterkrit. Risswachstum und Festigkeitsänderung in Abhängigkeit der Temperatur) |

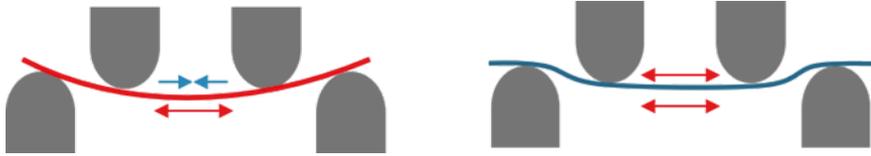


Bild 8 Skizze zum Einfluss von Membranspannungen auf die Durchbiegung im Doppelring-Biegeversuch, links: ideale Durchbiegung, rechts: Durchbiegung aufgrund von zusätzlichen Membranspannungen (© Liensdorf)

Dadurch entstehen entlang der Kanten feine Rillen, die in Zugrichtung verlaufen und somit nicht negativ auf das Prüfergebnis einwirken. Im direkten Vergleich liegen die Werte der geschliffenen Proben um den Faktor 2,3 höher als die der ungeschliffenen. Durch das Überschlifen der Kanten wurden Zugfestigkeiten des Elektrolyten (ca. 90 μm) aus Yttrium-stabilisiertem Zirkoniumdioxid von knapp über 1.000 MPa ermittelt.

Im Nachgang zur Zugprüfung muss anhand der Bruchstücke kontrolliert werden, ob der Bruch normgerecht im verjüngten Bereich eingetreten ist (Bild 9b). Versuche mit einer Hochgeschwindigkeitskamera zeigen bei einer Framerate von 100.000 fps den Bruchverlauf während der Zugprüfung.

4. Zusammenfassung

Die mechanische Charakterisierung von elektrolytgestützten SOFC ist aufgrund der geringen Dicke des Elektrolyten (90 μm und dünner) sehr aufwändig und komplex. Wie oben gezeigt, stehen am Lehrstuhl Keramische Werkstoffe mit dem Doppelring-Biegeversuch und dem Zugversuch zwei unterschiedliche Verfahren zur Verfügung, um Elektrolyte und MEAs qualitativ und quantitativ mechanisch zu charakterisieren.

Der Doppelring-Biegeversuch ist aufgrund der einfachen Probenpräparation insbesondere für Vergleiche beispielsweise zwi-

schen unterschiedlichen Chargen oder Betriebsdauern die beste Wahl. Allerdings ist die Berechnung der resultierenden Festigkeit nur bei Elektrolyten, also homogenen, einlagigen Proben in der Literatur beschrieben. Dafür muss der Elastizitätsmodul mittels Impulserregungstechnik zerstörungsfrei ermittelt werden.

Als zweite Prüfmethode wurde trotz der zurückhaltenden Einschätzung in Tabelle 2 der Zugversuch am Lehrstuhl Keramische Werkstoffe aufgebaut. Mit entsprechend hohem Präparationsaufwand (Überschlifen der Kanten, Aufbringen der Aufleimer) werden Festigkeitskennwerte mit geringerer Streuung (7,4 % bei $n = 33$) als im Doppelring-Biegeversuch (10,2 % bei $n = 36$) erreicht. ◀

Literaturhinweise

- [1] Kurzweil P. Brennstoffzellentechnik. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden; 2016.
- [2] Kaur G. Solid Oxide Fuel Cell Components. Cham: Springer International Publishing; 2016.
- [3] DIN. Hochleistungskeramik - Mechanische Eigenschaften monolithischer Keramik bei Raumtemperatur: Teil 1: Bestimmung der Biegefestigkeit. 2008th ed.(843-1). Berlin: Beuth Verlag GmbH; 2008. doi:10.31030/1457589.
- [4] Faes A, Frandsen HL, Kaiser A, Pihlatie M. Strength of Anode-Supported Solid Oxide Fuel Cells. Fuel Cells 2011;11(5):682–9.
- [5] Frandsen HL, Ramos T, Faes A, Pihlatie M, Brodersen K. Optimization of the strength of SOFC anode supports. Journal of the European Ceramic Society 2012;32(5):1041–52.

- [6] American Society for Testing and Materials. Standard Test Method for Monotonic Equibiaxial Flexural Strength of Advanced Ceramics at Ambient Temperature. 19th ed.(C1499); 2019.
- [7] DIN. Hochleistungskeramik - Mechanische Eigenschaften monolithischer Keramik bei Raumtemperatur - Bestimmung der Doppelring-Biegefestigkeit. 2010th ed.(51105). Berlin: Beuth Verlag GmbH; 2010. doi:10.31030/1671414.
- [8] Fett T, Rizzi G, Ernst E, Müller R, Oberacker R. A 3-balls-on-3-balls strength test for ceramic disks. Journal of the European Ceramic Society 2007;27(1):1–12.
- [9] Malzbender J, Steinbrech RW. Fracture test of thin sheet electrolytes for solid oxide fuel cells. Journal of the European Ceramic Society 2007;27(7):2597–603.
- [10] Danzer R, Supancic P, HARRER W. Biaxial Tensile Strength Test for Brittle Rectangular Plates. J. Ceram. Soc. Japan 2006;114(1335):1054–60.
- [11] Munz D, Fett T. Mechanisches Verhalten keramischer Werkstoffe: Versagensablauf, Werkstoffauswahl, Dimensionierung. Berlin, Heidelberg: Springer; 1989.



Bild 9 links: Eingespannte Zugprobe aus ZrO_2 ; rechts: versagte Zugprobe (© Liensdorf)

Danksagung

Das Projekt „Kostenoptimierter Stack und Offgrid-System (KOSOS)“ wird durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) unterstützt (FKZ: 03ETB005D). Die Autoren möchten sich dafür herzlich bedanken. Ebenso gilt der Dank an die Projektpartner für die gute Zusammenarbeit..

1 Lehrstuhl Keramische Werkstoffe, Universität Bayreuth, Prof.-Rüdiger-Bormann-Str. 1, 95447 Bayreuth