

Prof. Dr. Rolf Clasen
Lehrstuhl für Pulvertechnologie von Glas und Keramik
Campus C6 3, D-66123 Saarbrücken



**UNIVERSITÄT
DES
SAARLANDES**

Praktikum Materialwissenschaft und Werkstofftechnik PRII-2 (WS 2010/11)

Leitung (0681) 302 – 5008
Sekretariat (0681) 302 – 5007
Fax (0681) 302 5227
Bearbeiter Dr.-Ing. G. Falk
Durchwahl 5062
e-mail g.falk@nanotech.uni-saarland.de

<http://www.uni-saarland.de/fak8/powdertech>

Projektarbeit Festelektrolyt-Brennstoffzelle (SOFC)

1. Kurzbeschreibung

Inhalt der Projektarbeit:

Im Rahmen der Projektarbeit werden einzelne Hochtemperatur-Brennstoffzellen-Systeme (SOFC) hergestellt und hinsichtlich elektrischer Kenngrößen charakterisiert. Ziel des Versuches ist es, einfache prozesstechnische Methoden der Erzeugung funktionalisierter Hochleistungskeramiken kennen zu lernen und ausgewählte Methoden zur Charakterisierung anzuwenden.

Durchführung der Projektarbeit:

Die Projektarbeit gliedert sich in die einzelnen Teilprojekte (TP) „*Pulvertechnologische Erzeugung und Sinterung von SOFC-Anodensysteme*“ (TP1), „*Feldgestützte Beschichtung von SOFC-Anodensysteme mit 8-YSZ und Co-Sinterung*“ (TP2), „*Nasstechnische Beschichtung von SOFC Anoden-/Elektrolytverbunden mit LSM und Co-Sinterung*“ (TP3), „*Charakterisierung von Strom-Spannungscharakteristika einfacher Modellsysteme*“ (TP4), „*Charakterisierung der Strom-Spannungscharakteristik einer Brennstoffzelle*“ (TP5).

2. Vorbereitung

2.1 Funktionsweise einer SOFC (Grundlagen)

Eine Brennstoffzelle ist ein elektrochemischer Energiewandler, der die chemische Energie eines Brennstoffs ohne Verbrennungsprozess in elektrische Energie umsetzen kann. Das Prinzip gleicht dem einer Batterie, der von außen stets Brennstoff nachgeführt wird. Das zentrale Element jeder Brennstoffzelle ist ein gasdichter, ionenleitender Elektrolyt, dessen elektronische Leitfähigkeit vernachlässigbar ist. Die angrenzenden Elektroden sind porös und elektronisch leitfähig, wobei auf der Anodenseite Brenngas und auf der Kathodenseite Luft zugeführt wird.

Im Fall der Hochtemperaturbrennstoffzelle (SOFC) ist das Elektrolytmaterial ein Sauerstoffionenleiter (vgl. **Abbildung 1**). Eine ausreichende ionische Leitfähigkeit ist in Abhängigkeit des Materials und der Dicke des Elektrolyten zwischen 500 °C und 1000 °C gegeben. Auf der Kathodenseite wird der Sauerstoff der Luft an der Grenzfläche Elektrolyt-Elektrode-Gasraum, der so genannten Drei-Phasen-Grenze, zu O₂- reduziert und gelangt durch Diffusion der Ionen über Sauerstoffstellen im Elektrolytmaterial auf die Anodenseite. Die treibende Kraft ist das Partialdruckgefälle

des Sauerstoffs zwischen Kathode und Anode. Auf der Anodenseite findet, ebenfalls an den Drei-Phasen-Grenzen, eine exotherme Reaktion der Sauerstoffionen mit dem Brenngas statt. Dabei kann es sich um Wasserstoff, Methan oder Reformate höherer Kohlenwasserstoffe handeln. Innerhalb der Zelle laufen die folgenden Reaktionen ab:

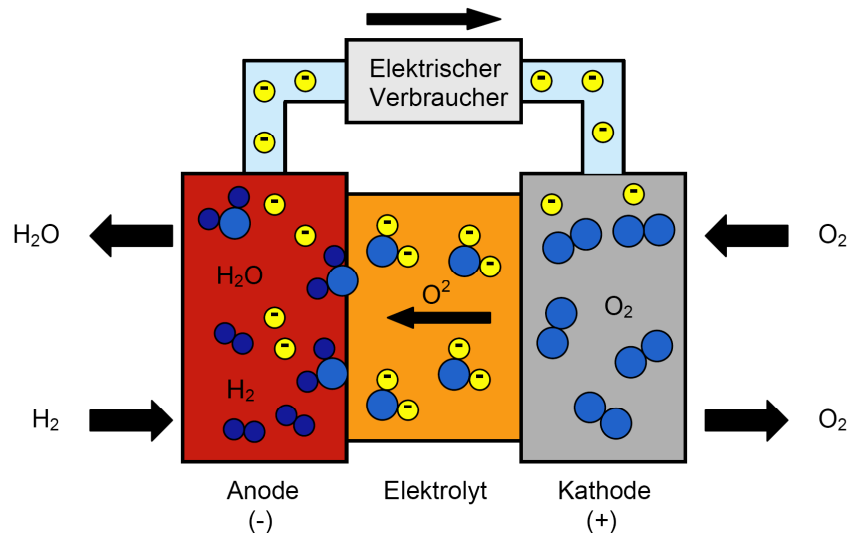
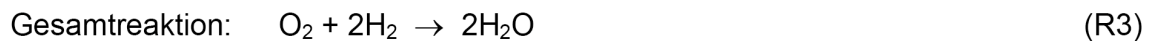
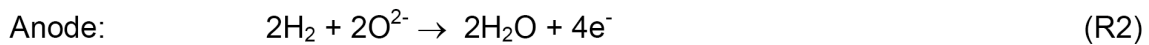


Abb. 1: Schematische Darstellung einer SOFC mit den ablaufenden Reaktionen

Bei einem Betrieb mit Wasserstoff entsteht lediglich Wasser als Reaktionsprodukt, werden Kohlenwasserstoffe verwendet, wird zusätzlich CO₂ produziert. Beim Einsatz von Benzin oder Diesel als Treibstoff kann ein CO₂ Ausstoß also nicht vermieden aber reduziert werden. Der Grund ist die höhere Effizienz einer SOFC-APU im Vergleich zum konventionellen Generator, der über den Verbrennungsmotor angetrieben wird.

Wie beschrieben, laufen die elektrochemischen Reaktionen an den Drei-Phasen-Grenzflächen ab. Um viele dieser Grenzflächen zu erzeugen, sollten die Elektroden möglichst fein strukturiert sein. Zusätzlich kann den Elektroden Elektrolytmaterial beigemischt werden, um die Drei-Phasen-Grenze in die Elektroden hinein auszuweiten. Auch der Einsatz von ionisch und elektronisch leitfähigen Elektrodenmaterialien führt zu einer Erweiterung der elektrochemisch aktiven Zone.

Durch die Sauerstoffionenwanderung von der Kathoden- auf die Anodenseite entsteht eine elektrochemische Potentialdifferenz. Werden Kathode und Anode über einen Stromkreis außerhalb der Zelle verbunden, können durch den Stromfluss Verbraucher angetrieben werden. Der Elektronenfluss wird durch die kontinuierliche Zuführung der Prozessgase aufrechterhalten. Als treibende Kraft wirkt die Differenz der Sauerstoffpartialdrücke auf Kathoden- und Anodenseite.

Ist der äußere Stromkreis unterbrochen, stellt sich die so genannte offene Zellspannung (OCV) ein. Die theoretische offene Zellspannung E_0 einer SOFC berechnet sich nach der Nernst-Gleichung

$$E_0 = \frac{R \cdot T}{z \cdot F} \cdot \ln \frac{pO_2(Kathode)}{pO_2(Anode)}$$

mit: R=Allgemeine Gaskonstante, T=Temperatur, z=Anzahl der Ladungsträger (Elektronen), F=Faraday-Konstante, $pO_2(Kathode)$ =Sauerstoffpartialdruck Kathode (0,21 bar) und $pO_2(Anode)$ =Sauerstoffpartialdruck Anode (ca. 10-21 bar bei 800 °C). Bei einer Betriebstemperatur von 800 °C liegt die theoretische offene Zellspannung bei rund 1,1 V. In der Praxis kann sie durch Leckagen oder geringe Anteile elektronischer Leitfähigkeit des Elektrolyten geringer sein.

Unter Belastung zeigen Brennstoffzellen einen typischen U-I-Kennlinienverlauf (vgl. **Abbildung 2**), der wesentlich von Aktivierungsüberspannungen, die durch kinetische Hemmungen der Elektrodenprozesse wie Adsorption, Desorption und Oxidation bzw. Reduktion der Prozessgase hervorgerufen werden, ohmschen Verlusten, die aus den Widerständen der verwendeten Materialien und Übergangswiderständen zwischen den Schichten resultieren sowie Diffusions-Überspannungen, die bei Gasunterversorgung auftreten, beeinflusst wird.

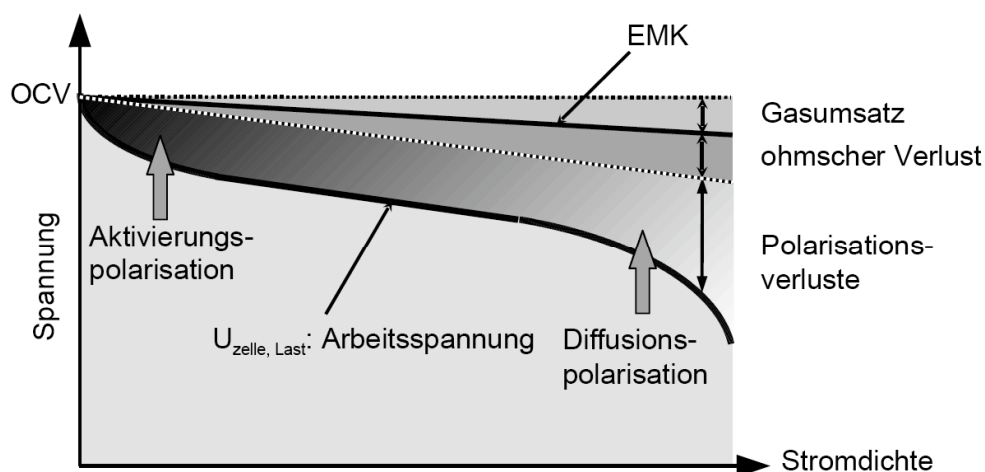


Abb. 2: Prinzipieller Verlauf der Strom/Spannungs-Kennlinie einer Brennstoffzelle. Die verschiedenen Verlustanteile führen zu einer Abnahme der Zellspannung mit steigender elektrischer Belastung.

Um die für ein System nötige Spannung und Gesamtleistung zu erreichen, werden einzelne Brennstoffzellen in Brennstoffzellenstapeln (engl.: Stacks) in Reihe geschaltet. Zwischen zwei Zellen befindet sich jeweils ein Interkonnektor, dessen Funktion die Trennung der Gasräume benachbarter Zellen, die gleichmäßige Zuführung der Prozessgase über Gasverteilerstrukturen sowie die elektrische Verbindung benachbarter Zellen ist.

2.2 Aufbau einer SOFC (Grundlagen)

2.2.1 Elektrolyt

Der Elektrolyt ist das zentrale Element einer SOFC und muss eine Reihe von Anforderungen erfüllen. Vor allem sollte er eine möglichst hohe ionische Leitfähigkeit

besitzen. Nach Brandon et al. sollte keine der Zellschichten Anode, Elektrolyt und Kathode mehr als $0,15 \Omega \cdot \text{cm}^2$ zum flächenspezifischen Widerstand einer SOFC beitragen, um bei $0,7 \text{ V}$ eine Leistung von $0,5 \text{ W/cm}^2$ erreichen zu können. Ist die spezifische Leitfähigkeit eines Elektrolytmaterials bekannt, kann in Abhängigkeit der Dicke die Mindestbetriebstemperatur abgeschätzt werden. Umgekehrt kann für eine gewünschte Betriebstemperatur für jedes Material eine maximale Dicke abgeleitet werden (vgl. **Abbildung 3**). Für eine SOFC-APU wird eine Betriebstemperatur von höchstens $800 \text{ }^\circ\text{C}$ angestrebt, insbesondere wenn ferritische Metallsubstrate zum Einsatz kommen. Wenn 10YSZ als Elektrolytmaterial verwendet wird, sollte eine Elektrolytdicke von $30 \mu\text{m}$ nicht überschritten werden, um eine Leistungsdichte von $0,5 \text{ W/cm}^2$ erreichen zu können (Abb. 2-3). Dies gilt unter der Annahme, dass Kathode und Anode jeweils $0,15 \Omega \cdot \text{cm}^2$ zum Zellwiderstand beitragen.

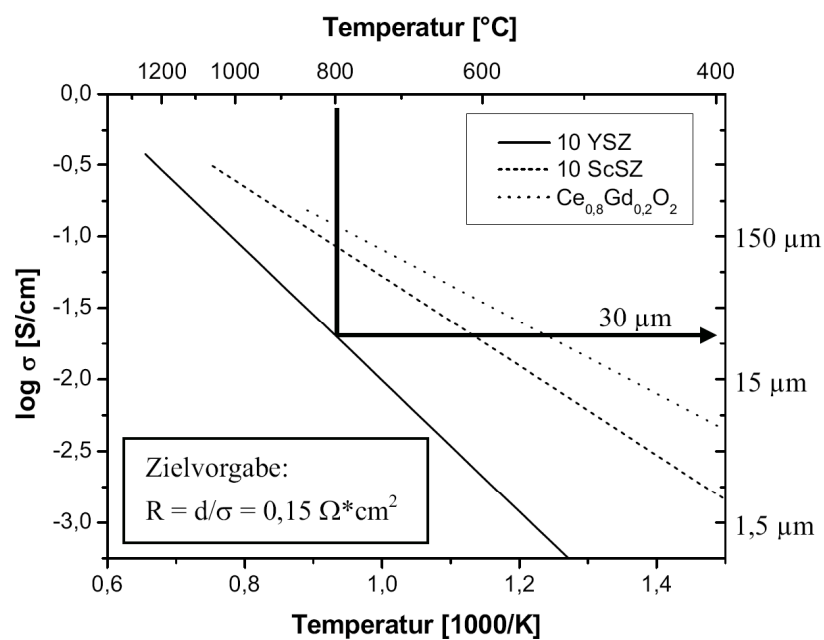


Abb. 3: Leitfähigkeit von Elektrolytmaterialien in Abhängigkeit der Temperatur. Je nach Elektrolytdicke kann eine geeignete Betriebstemperatur abgeschätzt werden, oberhalb derer der Beitrag des Elektrolyten zum ASR (area specific resistance) unter $0,15 \Omega \cdot \text{cm}^2$ liegt.

Das Elektrolytmaterial sollte jedoch nicht nur eine hohe ionische sondern auch eine vernachlässigbare elektronische Leitfähigkeit aufweisen, um zellinterne Kurzschlussströme, die zu einer Verringerung der Zellspannung und Leistung führen würden, zu vermeiden. Dieser Aspekt verhindert für Gd_2O_3 dotiertes CeO_2 (CGO) einen sinnvollen Einsatz oberhalb einer Temperatur von $600 \text{ }^\circ\text{C}$. Die Ursache der elektronischen Leitfähigkeit ist ein Sauerstoffausbau aus dem Kristallgitter unter Anodenbedingungen ($p\text{O}_2 = 10^{-17}$ bis 10^{-21} bar), der durch einen Valenzwechsel von Ce^{4+} zu Ce^{3+} kompensiert wird. Außerdem führt der Valenzwechsel zu einer Änderung des thermischen Ausdehnungsverhaltens, wodurch Spannungen im Material und infolgedessen Rissbildungen initiiert werden.

Neben den Anforderungen bezüglich der Leitfähigkeit, muss das Elektrolytmaterial zu gasdichten Schichten verarbeitet werden können, eine ausreichende Festigkeit aufweisen, unter Kathoden- und Anodenbedingungen chemisch stabil und zu den

angrenzenden Elektroden chemisch kompatibel sein. Dotiertes Zirkoniumdioxid (ZrO_2) ist bislang das am weitesten verbreitete Elektrolytmaterial, weil es den besten Kompromiss zwischen allen Anforderungen bietet. Eine Dotierung mit di- oder trivalenten Ionen wie Y^{3+} , Sc^{3+} , Ca^{2+} oder Mg^{2+} führt zu einer Stabilisierung der kubischen Kristallstruktur, die im reinen ZrO_2 nur bei hohen Temperaturen über $2370\text{ }^\circ\text{C}$ stabil ist. Der Einbau niedriger valenter Kationen in das ZrO_2 -Gitter führt zudem zu einer Erhöhung der Sauerstofffehlstellenkonzentration, was eine Verbesserung der ionischen Leitfähigkeit zur Folge hat. Meist wird das Material mit 8 bis 10 Mol.-% Y_2O_3 oder 10-11 Mol.-% Sc_2O_3 dotiert.

2.2.2 Kathode

Die luftseitige Kathode einer SOFC ist für die Reduktion des Sauerstoffs zuständig, was ein Material hoher katalytischer Aktivität erfordert. Außerdem sollte das Kathodenmaterial eine hohe elektronische Leitfähigkeit besitzen, um dem Transport von Elektronen zur Drei-Phasen-Grenze möglichst wenig Widerstand entgegen zu setzen. Es ist vorteilhaft, wenn der thermische Ausdehnungskoeffizient dem des Elektrolyten ähnlich ist, da dies die Gefahr von Rissbildungen verringert. Zudem muss die chemische Stabilität des Materials gewährleistet sein und es darf keine unerwünschten Reaktionen mit benachbarten Zellkomponenten geben.

Unabhängig vom Material ist eine ausreichende Porosität erforderlich, um Sauerstoff an die elektrochemisch aktive Grenzfläche nahe des Elektrolyten transportieren zu können. Anfänglich wurde das Edelmetall Platin als Kathodenwerkstoff genutzt, was jedoch mit erheblichen Kosten verbunden war. Inzwischen haben sich keramische Kathoden mit perowskitischer Kristallstruktur durchgesetzt. $(\text{La},\text{Sr})\text{MnO}_3$ (LSM) ist wohl das am häufigsten genutzte Material, wobei es oftmals in einer unterstöchiometrischen Zusammensetzung auf dem A-Platz (z.B. $(\text{La}_{0,65}\text{Sr}_{0,3})\text{MnO}_{3-\delta}$) eingesetzt wird. $(\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x)(\text{Co}_{1-y}\text{Fe}_y)\text{O}_{3-\delta}$ (LSCF) zeigt noch bessere elektrochemische Eigenschaften als LSM, was insbesondere für eine Absenkung der Betriebstemperatur von zentraler Bedeutung ist. Beimischungen von Elektrolytmaterial zur Kathode dienen einer besseren Anpassung des thermischen Ausdehnungskoeffizienten an den Elektrolyten und einer Erweiterung der Drei-Phasen-Grenze in die Kathode hinein. Letzteres ist für ionisch und elektronisch leitfähige Materialien wie LSCF nicht notwendig. Die hohe elektrochemische Aktivität der LSCF-Kathoden resultiert aus einer geringeren thermodynamischen Stabilität verglichen mit LSM. Dies ist im Hinblick auf die Kompatibilität mit YSZ-Elektrolyten problematisch, da es während der Sinterung zu einer Bildung von $\text{La}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$ und SrZrO_3 an der Grenzfläche zum Elektrolyten kommt. Beide Phasen zeichnen sich durch einen hohen elektrischen Widerstand aus, was zu einer erheblichen Leistungsminderung der Zelle führen kann. Die Ausbildung der unerwünschten Phasen kann jedoch durch eine Barrierschicht aus CGO wirkungsvoll unterbunden werden.

2.2.3 Anode

Das Anodenmaterial muss ähnliche Aufgaben erfüllen wie die Kathode. Es muss eine hohe katalytische Aktivität für die Oxidation des Brenngases aufweisen. Weiterhin sollte die elektronische Leitfähigkeit hoch sein, der thermische Ausdehnungskoeffizient sollte dem des Elektrolyten gleichen, die chemische Stabilität unter Anodenbedingungen muss sichergestellt sein und auch im Kontakt zum Elektrolyten dürfen keine unerwünschten Reaktionen auftreten. Zusätzlich ist eine ausreichende Porosität für die Sicherstellung der Gasversorgung an der Grenzfläche Anode-Elektrolyt notwendig. Unter anodenseitigen Betriebsbedingungen ist der Einsatz mancher Übergangsmetalle möglich, da der niedrige Sauerstoff-

partialdruck ihre Oxidation verhindert. Ni hat sich als geeignetes katalytisch aktives Material mit hoher elektronischer Leitfähigkeit bewährt. Allerdings hat reines Ni einen zu hohen thermischen Ausdehnungskoeffizienten verglichen mit dem Elektrolyten und es neigt zur Agglomeration bei Betriebstemperatur, was zu Leistungseinbußen durch eine Verringerung der katalytischen Oberfläche führen kann. Um diese beiden Probleme zu minimieren, wird üblicherweise ein Cermet, eine Mischung aus keramischem und metallischem Material, verwendet. In der Regel kommen Elektrolytmaterial (meist YSZ) und Ni zum Einsatz. Durch die Zugabe von YSZ wird der Ausdehnungskoeffizient herabgesetzt und einer Vergrößerung des Ni entgegengewirkt. Als positiver Nebeneffekt wird durch die Mischung mit Elektrolytmaterial die Drei-Phasen-Grenze in die Anode hinein ausgedehnt. Bezüglich des Mischungsverhältnisses YSZ:Ni ist zu beachten, dass eine Überschreitung der Ni-Perkolationsgrenze, d.h. eine Berührung der Ni-Partikel, gewährleistet sein muss, andernfalls ist keine elektronische Leitfähigkeit gegeben. Die Herstellung der Anoden erfolgt üblicherweise ausgehend von NiO, da es sich an Luft sintern lässt. Die Umwandlung in metallisches Ni erfolgt im Zuge einer Reduktion vor Betriebsbeginn, wodurch eine zusätzliche Porositätserhöhung erzielt wird. Aber auch ein Ni/YSZ-Cermet, das derzeit am weitesten verbreitet ist, eignet sich nicht ohne Einschränkung als Anodenmaterial. Bei der Verwendung von Kohlenwasserstoffen als Brennstoff führt die hohe katalytische Aktivität des Ni zur Bildung von Kohlenstoff, was eine Passivierung der Ni-Oberfläche und eine Verstopfung der Poren nach sich zieht. Leistungseinbußen sind die Folge. Durch Wasserdampfzugabe oder eine Vorreformierung des Brennstoffs kann dieses Problem umgangen werden. Eine zweite Schwierigkeit bei Ni/YSZ Anoden ist deren Anfälligkeit gegenüber einem Lufteinbruch auf der Anodenseite. Dieser Fall kann bei Fehlfunktionen oder beim Abschaltprozess eines Systems auftreten. Liegt die Temperatur der SOFC bei Lufteinbruch oberhalb von 400 °C, setzt eine schnelle Re-Oxidation des Ni ein. Diese Re-Oxidation ist mit einer mikrostrukturellen Veränderung gegenüber dem Ausgangszustand verbunden. Die Ausbildung einer zusätzlichen Mikroporosität führt zu einer größeren Volumenzunahme als sie durch die reine Umwandlung von Ni zu NiO zu erwarten wäre. Ab einem kritischen Re-Oxidationsgrad tritt eine Zerstörung der Zelle durch Rissbildung im Elektrolyten auf. Es gibt daher Bestrebungen, vollkeramische Anoden zu verwenden. Ihre Leistung ist jedoch noch nicht mit denen eines Ni/YSZ-Cermets vergleichbar, weil die katalytische Aktivität für die Oxidation des Brenngases geringer ist. Auch andere Cermets, wie beispielsweise Cu/CeO₂, sind im Gespräch, wobei Cu als elektronischer Leiter und CeO₂ als Katalysator fungiert. Diese befinden sich jedoch im Versuchsstadium. Der Funktionsnachweis als langzeitstabile Anode im Stack steht noch aus.

2.2 Literatur

Grundlagen

- [1] K. Kinoshita, F. R. M. Larnon and E. J. Cairns, *Solid oxide fuel cell*, in: *Fuell cell handbook*. (1988), S. 87-104.
- [2] O. O. F. E. US Department of Energy, *Fuel Cell Handbook*. 5 ed. (2000), Springfield, VA, USA: National Technical Information Service, U.S. Department of Commerce. 352.
- [3] *Fuel Cell Handbook*. 5 ed. (2000), Morgantown, West Virginia (USA): U.S. Department for Energy.
- [4] I. EG & G Technical Services, *Fuel Cell Handbook*. Vol. 7. (2004), Morgantown, USA: U.S. Department of Energy. 427.

Weiterführende Literatur

- [5] S. P. S. Badwal and K. Foger, *Solid Oxide Electrolyte Fuel Cell Review*. Ceram. Intern. 22 (1996) 257-265.
- [6] V. V. Kharton, F. M. Figueiredo, L. Navarro, E. N. Naumovich, A. V. Kovalevsky, A. A. Yaremchenko, A. P. Viskup, A. Carneiro, F. M. B. Marques and J. R. Frade, *Ceria-based materials for solid oxide fuel cells*. J. Mater. Sci. 36 (2001) 1105-1117.
- [7] R. J. Gorte, S. Park, J. M. Vohs and C. H. Wang, *Anodes for direct oxidation of dry hydrocarbons in a solid-oxide fuel cell*. Adv. Mater. 12 (2000) 1465-1469.
- [8] W. Z. Zhu and S. C. Deevi, *A review on the status of anode materials for solid oxide fuel cells*. Mater. Sci. Eng. A 362 (2003) 228-239.
- [9] R. J. Bratton and P. Singh, *A review of tubular solid oxide fuel cell developments*. Ceramic Transactions 65 (1996) 239-262.
- [10] S. P. Jiang and S. H. Chan, *A review of anode materials development in solid oxide fuel cells*. J. Mater. Sci. 39 (2004) 4405 - 4439.
- [11] S. P. Jiang, *A review of wet impregnation—An alternative method for the fabrication of high performance and nano-structured electrodes of solid oxide fuel cells*. Mat. Sci. Eng. A 418 (2006) 199-210.
- [12] A. B. Stambouli and E. Traversa, *Solid oxide fuel cells (SOFCs): a review of an environmentally clean and efficient source of energy*. Renewable Sustainable Energy Rev. 6 (2002) 433-455.

2.3 Fragen zur Vertiefung der Vorbereitung

1. Definieren Sie die elektromotorische Kraft. Wie ist der Wirkungsgrad einer SOFC definiert?
2. Welche Vorteile resultieren aus der hohen Betriebstemperatur der SOFC? Welche Nachteile ergeben sich daraus?
3. Welche Bedeutung kommt dem elektrochemischen Potenzial als treibende Kraft für den Transport von Ionen und Elektronen zu.
4. Geben Sie die Kröger-Vink Notation von Yttrium dotiertem Zirkonoxid an und leiten Sie daraus den Verlauf der ionischen Leitfähigkeit versus reziproke Temperatur ab.
5. Wie lässt sich der elektrische Widerstand einer SOFC-Komponente messtechnisch bestimmen (Skizze)?
6. Wie ist die Zellspannung einer SOFC-Zelle definiert?
7. Warum komme es in einer SOFC-Zelle zu einer Überspannung? Wie lässt sich diese reduzieren?
8. Wie lässt sich der Verlauf der Spannung einer SOFC-Zelle mit zunehmendem Strom definieren?
9. Welche elektrischen Verluste einer SOFC-Zelle werden unterschieden? Welcher Verlust ist der wichtigste?
10. Wie lässt sich die Leistung einer Zelle als Funktion des Stromes berechnen?

3. Durchführung:

3.1 Pulvertechnologische Erzeugung und Sinterung von SOFC-Anodensysteme (TP1)

Die Erzeugung von Anodensubstraten der Dickenabmessung von 2 mm erfolgt durch Vergießen von NiO-YSZ-Suspensionen in eigens dafür vorgesehene Gießformen. Die Suspensionsherstellung erfolgt über Abwiegen der Pulvermengen unter dem Abzug (NiO:YSZ = 30:10), dispergieren der Pulver in bidestilliertem Wasser (50 Gew.-%) bei einer Feststoffkonzentration (NiO-YSZ-Pulver) von 40 Gew.-%, 5 Gew.-% Stärke, 4 Gew.-% Glycerin und 1 Gew.-% eines polyelektrolytischen Dispergierhilfsmittel (Dolapix CE 64, Zschimmer und Schwarz, Lahnstein). Nach dem Vergießen der Suspension erfolgt die Trocknung in einem Trockenschrank über einen Zeitraum von 48 Stunden.

Nach erfolgter Trocknung werden die Anodensubstrate bei einer Temperatur von 1350 °C über eine Stunde an Luft bei einer Heizrate von 1 K/min gesintert.

3.2 Feldgestützte Beschichtung von SOFC-Anodensysteme mit 8-YSZ und Co-Sinterung (TP2)

3.3 Nasstechnische Beschichtung von SOFC Anoden-/ Elektrolytverbunden mit LSM und Co-Sinterung (TP3)

3.4 „Charakterisierung von Strom-Spannungscharakteristika einfacher Modellsysteme“ (TP4)

3.5 Charakterisierung der Strom-Spannungscharakteristik einer Brennstoffzelle“ (TP5).

Die konkreten Arbeitsanleitungen zu den Teilprojekten 2 bis 5 werden während des Projektes erarbeitet.

4. Auswertung und Protokoll

4.1 Auswertung:

1. Bestimmen Sie den Widerstand einer 8YSZ Probe mit Hilfe der 4-Punkt-Messung. Berechnen Sie den spezifischen Widerstand. Vergleichen Sie die Werte mit Literaturdaten.
2. Bestimmen Sie experimentell die Strom-Spannungs-Charakteristik einer Zelle bei 800 °C. Messen Sie als Funktion des Stromes die Spannung der Zelle, die Überspannung der Kathode und der Anode sowie die Spannung zwischen beiden Referenzelektroden.
3. Bestimmen Sie den spezifischen Widerstand des Elektrolyten und vergleichen Sie ihn mit dem am Anfang des Versuches berechneten Wert.
4. Berechnen Sie die Leistung der Zelle als Funktion des Stromes.

4.2 Protokoll:

Im Protokoll sind die Fragen schriftlich zu beantworten, der Versuchsaufbau und die Versuchsdurchführung sind zu beschreiben und die Auswertung mit den daraus gewonnen Erkenntnissen **handschriftlich** festzuhalten.