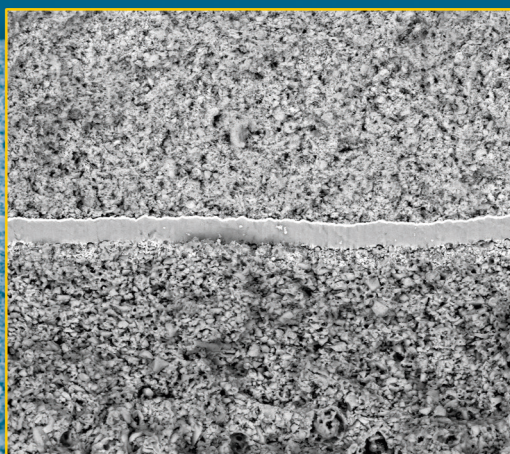


# Entwicklung und Charakterisierung von Nickel / Gadolinium-Ceroxid-basierten Anoden für die metallgestützte Festoxid-Brennstoffzelle

Veronika Anna Rojek-Wöckner



Energie & Umwelt /  
Energy & Environment  
Band / Volume 343  
ISBN 978-3-95806-182-8

Forschungszentrum Jülich GmbH  
Institut für Energie- und Klimaforschung  
Werkstoffsynthese und Herstellungsverfahren (IEK-1)

# Entwicklung und Charakterisierung von Nickel / Gadolinium-Ceroxid-basierten Anoden für die metallgestützte Festoxid-Brennstoffzelle

Veronika Anna Rojek-Wöckner

Schriften des Forschungszentrums Jülich  
Reihe Energie & Umwelt / Energy & Environment

Band / Volume 343

---

ISSN 1866-1793

ISBN 978-3-95806-182-8

# Inhalt

<b>KURZZUSAMMENFASSUNG</b>	<b>V</b>
<b>ABSTRACT</b>	<b>VII</b>
<b>BEREITS VERÖFFENTLICHTE TEILE DIESER ARBEIT</b>	<b>IX</b>
<b>ABKÜRZUNGEN</b>	<b>XI</b>
<b>INHALT</b>	<b>XII</b>
<b>1 EINLEITUNG</b>	<b>1</b>
<b>2 BRENNSTOFFZELLEN – STAND DER TECHNIK</b>	<b>4</b>
<b>2.1 Grundlagen einer Brennstoffzelle</b> .....	<b>4</b>
<b>2.2 Arten von Brennstoffzellen</b> .....	<b>6</b>
<b>2.3 Die Festoxid-Brennstoffzelle (Solid Oxide Fuel Cell SOFC)</b> .....	<b>7</b>
2.3.1 Das Funktionsprinzip einer SOFC .....	7
2.3.2 Bauformen der SOFC .....	8
2.3.3 Werkstoffe für die SOFC .....	11
<b>2.4 Spezifische Eigenschaften des Werkstoffs GDC</b> .....	<b>15</b>
2.4.1 Elektronische und ionische Mischleitung: Defektchemie.....	15
2.4.2 Einfluss des $p(\text{O}_2)$ auf die elektrochemischen Eigenschaften.....	16
2.4.3 Einfluss der Dotierung auf elektrochemische Eigenschaften .....	18
2.4.4 Einfluss der Defektchemie auf das Sinterverhalten .....	20
<b>2.5 Elektrochemische Charakterisierung von Einzelzellen und Funktionsschichten</b> .....	<b>23</b>
2.5.1 Theoretische Zellspannung .....	23
2.5.2 Verlustmechanismen der Brennstoffzelle .....	24
2.5.3 Kennlinien-Modell.....	26
2.5.4 Impedanzspektroskopie.....	27
<b>2.6 Degradationsmechanismen einer SOFC</b> .....	<b>33</b>
2.6.1 Nickelagglomeration in der Anode.....	33
2.6.2 Reoxidation der Anode .....	34
2.6.3 Schwefel-Vergiftung der Anode .....	35
2.6.4 Verkokung der Anode.....	36
2.6.5 Alterung des Elektrolyten .....	38
2.6.6 Cr-Vergiftung der Kathode.....	38
2.6.7 Korrosion des Metallsubstrats.....	38
<b>2.7 Integration der MSC in einen Brennstoffzellen-Generator</b> .....	<b>39</b>
<b>3 VERFAHREN UND METHODEN</b>	<b>42</b>
<b>3.1 Verwendete Materialien</b> .....	<b>42</b>
3.1.1 Ausgangspulver.....	42
3.1.2 Das metallische Substrat .....	42
3.1.3 Organik .....	43
3.1.4 Elektrolytfolien .....	43
<b>3.2 Herstellung der Proben und MSC-Zellen</b> .....	<b>43</b>
3.2.1 Probenherstellung durch Pressen .....	43
3.2.2 Probenherstellung durch Siebdruck .....	44

3.2.3	Sinterparameter.....	45
3.2.4	Herstellung von symmetrischen Zellen .....	46
3.2.5	Herstellung von MSC .....	47
<b>3.3</b>	<b>Analytik.....</b>	<b>49</b>
3.3.1	Röntgendiffraktometrie.....	49
3.3.2	Partikelgrößenanalyse (PSD).....	49
3.3.3	Spezifische Oberfläche (BET) .....	49
3.3.4	Rasterelektronenmikroskopie .....	50
3.3.5	Sinterdilatometrie.....	50
3.3.6	Thermogravimetrie .....	51
3.3.7	Rheologie.....	51
3.3.8	Bestimmung der Leckrate .....	52
3.3.9	Oberflächencharakterisierung durch ein optisches Tastverfahren.....	52
3.3.10	Gründichtebestimmung .....	53
<b>3.4</b>	<b>Elektrochemie.....</b>	<b>53</b>
3.4.1	Symmetrisches Modellsystem .....	53
3.4.2	Einzelzellmessungen.....	54
3.4.3	Messablauf Einzelzellmessungen .....	55
<b>4</b>	<b>ERGEBNISSE UND DISKUSSION .....</b>	<b>57</b>
<b>4.1</b>	<b>Sinterverhalten von Gadolinium-dotiertem Ceroxid .....</b>	<b>57</b>
4.1.1	Korngrößenverteilung und spezifische Oberfläche .....	57
4.1.2	Sinterstudien an Bulkmaterial.....	58
4.1.3	Dilatometrie .....	63
4.1.4	Thermische Analyse mit Massenspektrometrie .....	65
4.1.5	Phasenstabilität .....	66
<b>4.2</b>	<b>Processing und Sinterverhalten von Ni/GDC Cermets .....</b>	<b>67</b>
4.2.1	Pastenentwicklung .....	67
4.2.2	Sinterversuche von Cermetschichten auf Metallsubstrat.....	68
4.2.3	Einfluss der Gründichte auf die Anodenmikrostruktur.....	71
4.2.4	Freie Sinterung.....	72
4.2.5	Phasenstabilität des Anodenmaterials.....	72
<b>4.3</b>	<b>Integration der Ni/GDC-Keramik in die Plansee MSC.....</b>	<b>73</b>
4.3.1	Substratkrümmung und Oberflächenrauigkeit.....	73
4.3.2	Leckratenbestimmung und Dichtigkeit des Elektrolyten.....	74
<b>4.4</b>	<b>Elektrochemische Charakterisierung von symmetrischen Zellen.....</b>	<b>74</b>
4.4.1	Systematische Optimierung des Messaufbaus und Fehlerbetrachtung.....	75
4.4.2	Reproduzierbarkeit der Messergebnisse und Fehlerbetrachtung .....	77
4.4.3	Temperaturabhängigkeit .....	78
4.4.4	Stabilität der Widerstände innerhalb der ersten 150 h.....	81
4.4.5	Variation der Brenngaskonzentration .....	83
4.4.6	Strukturierung der Anodenoberfläche.....	84
4.4.7	Deaktivierung durch H <sub>2</sub> S im Brenngas.....	85
4.4.8	Nutztiefe der Anodenschicht.....	90
4.4.9	Gegenüberstellung Ni/GDC-Anoden und Ni/YSZ-Anoden .....	92
<b>4.5</b>	<b>Elektrochemische Charakterisierung von Einzelzellen.....</b>	<b>93</b>
4.5.1	Einzelzelltests von Plansee MSCs mit Ni/YSZ-Anode .....	94
4.5.2	Einzelzelltest von MSCs mit <i>Best Choice</i> Ni/GDC-Anode.....	100

4.5.3	Vergleich von MSCs mit Standard Ni/YSZ-Anode und <i>Best Choice</i> Ni/GDC-Anode.....	110
4.5.4	Benchmark: Vergleich zur Literatur .....	112
<b>5</b>	<b>ZUSAMMENFASSUNG</b>	<b>114</b>
<b>6</b>	<b>AUSBlick UND WEITERE ENTWICKLUNGSOPTIONEN</b>	<b>119</b>
<b>7</b>	<b>LITERATURVERZEICHNIS</b>	<b>121</b>
	<b>DANKSAGUNG</b>	<b>133</b>

**Energie & Umwelt /  
Energy & Environment  
Band / Volume 343  
ISBN 978-3-95806-182-8**

