



# **Charakterisierung des Werkstoffverhaltens während des Kosinterns einer neuartigen, inert gestützten Festoxid- brennstoffzelle**

Fabian Grimm

Energie & Umwelt / Energy & Environment

Band / Volume 498

ISBN 978-3-95806-482-9

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

# **Charakterisierung des Werkstoffverhaltens während des Kosinterns einer neuartigen, inert gestützten Festoxidbrennstoffzelle**

Fabian Grimm

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

Band / Volume 498

---

ISSN 1866-1793

ISBN 978-3-95806-482-9

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung und Motivation.....</b>	<b>10</b>
<b>2</b>	<b>Grundlagen und Stand der Technik.....</b>	<b>15</b>
2.1	<i>Funktionsprinzip einer Brennstoffzelle .....</i>	<i>15</i>
2.2	<i>Die Festoxidbrennstoffzelle – Grundlagen.....</i>	<i>17</i>
2.3	<i>Verlustmechanismen.....</i>	<i>21</i>
2.3.1	Gasumsetzung.....	22
2.3.2	Ohmsche Verluste .....	22
2.3.3	Polarisationsverluste.....	22
2.4	<i>Zelldesigns und Materialien.....</i>	<i>23</i>
2.4.1	Zellkonzepte.....	24
2.4.2	Materialien.....	27
2.4.2.1	Elektrolyt .....	27
2.4.2.2	Anode.....	28
2.4.2.3	Kathode.....	29
2.4.2.4	Barriere-Schicht.....	32
2.4.2.5	Stromsammlerschicht.....	32
2.5	<i>Inert gestützte Zelle der Firma BOSCH.....</i>	<i>33</i>
2.5.1	Forsterit .....	35
<b>3</b>	<b>Experimentelle Methoden.....</b>	<b>38</b>
3.1	<i>Synthese von Pulvern.....</i>	<i>38</i>
3.1.1	Elektrolytvariation .....	38
3.1.2	Kathodenmaterialien.....	39
3.1.2.1	Auswahl der Materialien.....	40
3.1.2.2	Validierung der Kathodensynthese .....	41
3.2	<i>Probenübersicht.....</i>	<i>42</i>
3.2.1	Pulver-Presslinge .....	43
3.2.1.1	Elektrolyt – 8YSZ.....	43
3.2.1.2	Kathodenmaterialien.....	44
3.2.1.3	Singuläre Oxide.....	44
3.2.2	Siebdruckpasten.....	45
3.2.2.1	Elektrolytpasten.....	45

3.2.2.2	Kathodenpasten .....	46
3.2.2.3	LSM-Stromsammlerpasten-Herstellung.....	47
3.2.2.4	GDC-Barriereschicht.....	48
3.2.3	Gasdichtigkeitsproben .....	48
3.2.4	Einzelzellen – ESC .....	50
3.2.5	Querschliffe für die Mikroskopie.....	51
3.2.5.1	Kathodenquerschliffe.....	51
3.2.6	Modellzellen für die Impedanzmessung .....	51
3.2.6.1	Elektrolytmaterialvariationen.....	51
3.2.6.2	Kathodenmaterialien.....	52
3.3	<i>Analysemethoden</i> .....	53
3.3.1	Partikelgrößenanalyse .....	53
3.3.2	Gaspyknometer .....	54
3.3.3	Dichtemessung (Archimedisches-Prinzip).....	54
3.3.4	Thermooptische Messungen.....	55
3.3.5	Leckraten-Test .....	55
3.3.6	Kristallographische Messungen – XRD .....	56
3.3.7	Mikroskopie.....	57
3.3.7.1	Rasterelektronenmikroskop .....	57
3.3.7.2	Transmissionselektronenmikroskop.....	59
3.3.8	Elektrochemie.....	62
3.3.8.1	Elektrochemische Impedanzmessungen .....	62
3.3.8.2	Einzelzelltests .....	66
<b>4</b>	<b>Ergebnisse</b> .....	<b>68</b>
4.1	<i>Flüssigdotierung von 8YSZ mit Fe(NO<sub>3</sub>)<sub>3</sub></i> .....	68
4.1.1	Partikelgrößenverteilung.....	68
4.1.2	Dichtemessung.....	70
4.1.3	Thermooptische Messungen.....	71
4.1.4	Gasdichtigkeit der 8YSZ-Elektrolytvariationen.....	72
4.1.5	Kristallographische Untersuchungen der 8YSZ+Fe-Proben.....	73
4.1.6	Eisenhaltige Ausscheidungen nach dem Sintern .....	74
4.1.7	Stabilität der 8YSZ+Fe-Proben unter Ar/H <sub>2</sub> .....	76
4.1.8	Einfluss der Fe-Dotierung auf die elektrischen und ionischen Eigenschaften von 8YSZ.....	78
4.1.8.1	Volumen und Korngrenzleitfähigkeit der 8YSZ-Variationen.....	79

4.1.8.2	Einfluss der Eisen-Ausscheidungen auf den Polarisationswiderstand.....	80
4.2	<i>Kathodenwechselwirkungen</i> .....	81
4.2.1	Hochtemperaturstabilität der Kathodenmaterialien.....	82
4.2.2	Optische Bestimmung der Reaktivität mit Forsterit .....	84
4.2.2.1	Optische Reaktionstendenz der Kathoden mit Forsterit.....	84
4.2.2.2	EDX/WDX-Analyse der Fremdphasen.....	86
4.2.2.3	TEM-Analyse der Fremdphasen .....	88
4.2.3	Kristallographische Untersuchung der Fremdphasen.....	90
4.2.4	Abstrahierung der Wechselwirkungsversuche .....	92
4.2.5	Elektrochemische Messungen.....	95
4.2.5.1	Symmetrische Zellen .....	95
4.2.5.2	Zelltests an elektrolytgestützten LSF-Vollzellen .....	96
4.2.5.3	Optische mikrostrukturelle Analysen der Modellzellen.....	99
<b>5</b>	<b>Diskussion</b> .....	<b>103</b>
5.1	<i>Elektrolyt</i> .....	103
5.1.1	Literaturdiskussion zur Wahl des Dotiermittels für 8YSZ .....	104
5.1.2	Sinterprozesse und damit einhergehende Materialparameter .....	106
5.1.3	Elektrochemische Ergebnisse des Elektrolyten .....	111
5.2	<i>Kathoden</i> .....	114
5.2.1	Wechselwirkungen.....	114
5.2.2	Elektrochemie.....	118
5.2.3	GDC-Verdichtung.....	128
<b>6</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b> .....	<b>129</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b> .....	<b>138</b>
	<b>Abbildungsverzeichnis</b> .....	<b>150</b>
	<b>Tabellenverzeichnis</b> .....	<b>154</b>
	<b>Appendix</b> .....	<b>156</b>
	<b>Danksagung</b> .....	<b>167</b>

Energie & Umwelt / Energy & Environment  
Band / Volume 498  
ISBN 978-3-95806-482-9