



# Der Einfluss von Wasserdampf auf den Sauerstofftransport in keramischen Hochtemperaturmembranen

Florian Thaler

Energie & Umwelt / Energy & Environment

Band / Volume 430

ISBN 978-3-95806-340-2

Forschungszentrum Jülich GmbH  
Institut für Energie- und Klimaforschung  
Werkstoffstruktur und -eigenschaften (IEK-2)

# **Der Einfluss von Wasserdampf auf den Sauerstofftransport in keramischen Hochtemperaturmembranen**

Florian Thaler

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

Band / Volume 430

---

ISSN 1866-1793

ISBN 978-3-95806-340-2

# Inhaltsverzeichnis

|  |           |
|--|-----------|
| <b>1. Einleitung und Zielsetzung</b>   | <b>1</b>  |
| <b>2. Grundlagen</b>   | <b>5</b>  |
| 2.1. Sauerstoffzeugung . . . . .   | 5         |
| 2.1.1. Sauerstoffbedarf für Industrie- und Energieprozesse . . . . .                               | 6         |
| 2.1.2. Konventionelle Verfahren zur Sauerstoffgewinnung . . . . .                                  | 7         |
| 2.1.3. Membranverfahren zur Gastrennung . . . . .  | 8         |
| 2.2. Sauerstofftransportmembranen . . . . .  | 8         |
| 2.2.1. Aufbau und Eigenschaften von Perowskiten . . . . .  | 9         |
| 2.2.2. Sauerstoffionentransport durch Mischionenleiter (MIEC) . . . . .                            | 12        |
| 2.2.3. Aufbau und Funktionsweise von Dual-Phase Membranen . . . . .                                | 17        |
| 2.3. Degradationsmechanismen an Perowskiten . . . . .  | 18        |
| 2.3.1. Temperaturstabilität und Phasenumwandlungen in Perowskiten . . . . .                        | 19        |
| 2.3.2. Degradation durch CO <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> O, Karbonate und Alkalisulfate . . . . . | 19        |
| <b>3. Materialauswahl und experimentelle Methoden</b>  | <b>23</b> |
| 3.1. Membranmaterialien . . . . .  | 23        |
| 3.1.1. Membranaufbau und Herstellung . . . . .   | 24        |
| 3.2. Versuchsaufbau und Bestimmung der Sauerstoffpermeation . . . . .                              | 25        |
| 3.3. Permeationsteststände . . . . .   | 28        |
| 3.3.1. CO <sub>2</sub> -Membranprüfstand . . . . .   | 28        |
| 3.3.2. H <sub>2</sub> O-Sweep Prüfstand im Vierrohrföfen . . . . .                                 | 29        |
| 3.3.3. Auswertung der Permeationsmessungen . . . . .   | 34        |
| 3.3.4. Quantitative Gasanalyse mittels Massenspektrometrie . . . . .                               | 35        |
| 3.3.5. Quantitative Gasanalyse mittels Gaschromatographie . . . . .                                | 37        |
| 3.4. Analytische Methoden zur Materialcharakterisierung . . . . .                                  | 39        |
| 3.4.1. Licht- und Elektronenmikroskopie mit EDXS . . . . .   | 39        |
| 3.4.2. Röntgendiffraktometrie . . . . .  | 43        |

|   |               |
|---|---------------|
| <b>4. Ergebnisse und Diskussion</b>   | <b>45</b>     |
| 4.1. Temperaturabhängigkeit der Sauerstoffpermeation . . . . .                                  | 46            |
| 4.2. Auslagerung in H <sub>2</sub> O-Atmosphäre (Transportexperiment) . . . . .                 | 47            |
| 4.3. Bestimmung der Sauerstoffpermeation mit Wasserdampf als Sweepgas . .                       | 49            |
| 4.3.1. Ansteigender Gesamtvolumenstrom . . . . .  | 50            |
| 4.3.2. Konstanter Gesamtvolumenstrom . . . . .  | 52            |
| 4.4. Wasserdampf-Loop Experimente . . . . .   | 54            |
| 4.5. Langzeitpermeationsmessungen mit Wasserdampf im Sweep . . . . .                            | 60            |
| 4.5.1. Langzeitpermeation BSCF5582 . . . . .  | 61            |
| 4.5.2. Langzeitpermeation LSCF6428 . . . . .  | 65            |
| 4.5.3. Langzeitpermeation CGO:FCO 85:15 . . . . .   | 68            |
| 4.6. Degradation der Membranmaterialien durch Permeationsbetrieb mit Was-<br>serdampf . . . . . | 70            |
| 4.6.1. Degradation BSCF5582 . . . . .   | 70            |
| 4.6.2. Degradation LSCF6428 . . . . .   | 75            |
| 4.6.3. Degradation CGO:FCO 85:15 . . . . .  | 80            |
| 4.7. Diskussion . . . . .   | 84            |
| <br>  |               |
| <b>5. Zusammenfassung</b>   | <b>87</b>     |
| <br>  |               |
| <b>A. Diagramme und Tabellen</b>  | <b>III</b>    |
| A.1. Berechnung Wasserdampfgehalt . . . . .   | III           |
| <br>  |               |
| <b>B. REM und EDX-Analysen</b>  | <b>VII</b>    |
| <br>  |               |
| <b>C. Röntgenbeugungsuntersuchungen (XRD)</b>   | <b>XI</b>     |
| C.1. XRD an Spülgasrohr aus SiO <sub>2</sub> . . . . .  | XI            |
| <br>  |               |
| <b>Literaturverzeichnis</b>   | <b>XXII</b>   |
| <br>  |               |
| <b>Abkürzungen und Symbole</b>  | <b>XXIII</b>  |
| <br>  |               |
| <b>Glossar</b>  | <b>XXVIII</b> |
| <br>  |               |
| <b>Tabellenverzeichnis</b>  | <b>XXXI</b>   |

Energie & Umwelt / Energy & Environment  
Band / Volume 430  
ISBN 978-3-95806-340-2