

# Nachweis von Fehlern in Brennstoffzelementen mit Hilfe von aktiver Thermografie

Udo NETZELMANN<sup>1</sup>, Dietmar WEBER<sup>1</sup>, Holger NEUROHR<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Fraunhofer-Institut für Zerstörungsfreie Prüfverfahren IZFP, Saarbrücken

Kontakt E-Mail: udo.netzelmann@izfp.fraunhofer.de

## Kurzfassung

Brennstoffzellen sind hocheffiziente elektrochemische Energiekonverter, die elektrischen Strom bei niedrigen Schadstoffemissionen erzeugen. Bei den durchgeführten Untersuchungen wurden Festoxid-Brennstoffzellen (solid oxide fuel cells, SOFC) betrachtet, die derzeit besonders für den Einsatz in LKWs, Bussen, Booten, Loks und Campingfahrzeugen geplant sind. Verglichen mit den Polymerelektrolytmembran-Brennstoffzellen stellen die SOFC eine weniger komplexe Technologie dar und können mit unterschiedlichen Arbeitsstoffen realisiert werden. Allerdings bestehen durch die hohen Arbeitstemperaturen von 750 bis 1000°C große Herausforderungen an die Werkstofftechnologie.

Einer der kritischsten Bereiche in SOFCs ist die Versiegelung zwischen den metallischen Interkonnektoren. Der Interkonnektor ist in diesem Fall aus ferritischem Stahl, wohingegen die Abdichtung durch eine Glaslotschicht erfolgt. Sie muss gut am Stahl haften und gasdicht sein, um eine unkontrollierte Mischung des Sauerstoffs mit dem Arbeitsgas zu verhindern. Weiterhin muss sie elektrisch isolierend sein und den Temperaturzyklen im Betrieb widerstehen.

In Versuchsproben von Brennstoffzelementen wurden vor dem Hochtemperatur-Fügeprozess künstliche Fehler wie fehlendes Glaslot und Metalleinlagen eingebracht. Nach dem Fügen wurden diese mit blitzlichtangeregter Thermografie durch die metallischen Interkonnektorplatten detektiert. Die Vorauswertung erfolgte durch eine Puls-Phasen Thermografie Rechnung. Die experimentellen Ergebnisse wurden durch Simulationsrechnungen abgesichert. In einer POD-Studie konnten die Nachweisgrenzen für einen sicheren Nachweis bestimmt werden. Insgesamt konnten die meisten Fehlstellen im Glaslot sowie die größeren Metalleinschlüsse detektiert werden. Kleinere Metallstücke und Porosität im Glaslot waren dagegen nicht nachweisbar. Kurzschlüsse zwischen den Interkonnektorplatten konnten mit induktiv und induktiv angeregter Thermografie lokalisiert werden.

Thermographie-Kolloquium, Vortrag 11  
Saarbrücken 28.9.2022



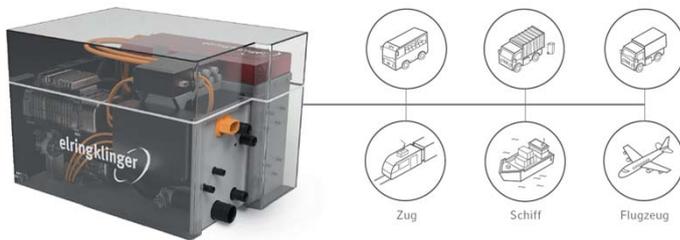
Udo NETZELMANN, Dietmar WEBER, Holger NEUROHR  
Fraunhofer-Institut für Zerstörungsfreie Prüfverfahren IZFP, Saarbrücken

## Nachweis von Fehlern in Brennstoffzelementen mit Hilfe von aktiver Thermografie

### Inhalt

- Einführung
- Experimentelle Technik
- Fehler in der Glaslotversiegelung
- Ergebnisse der Experimente
- Lokalisierung elektrischer Kurzschlüsse
- Nachweisgrenzen, POD Studie
- Zusammenfassung

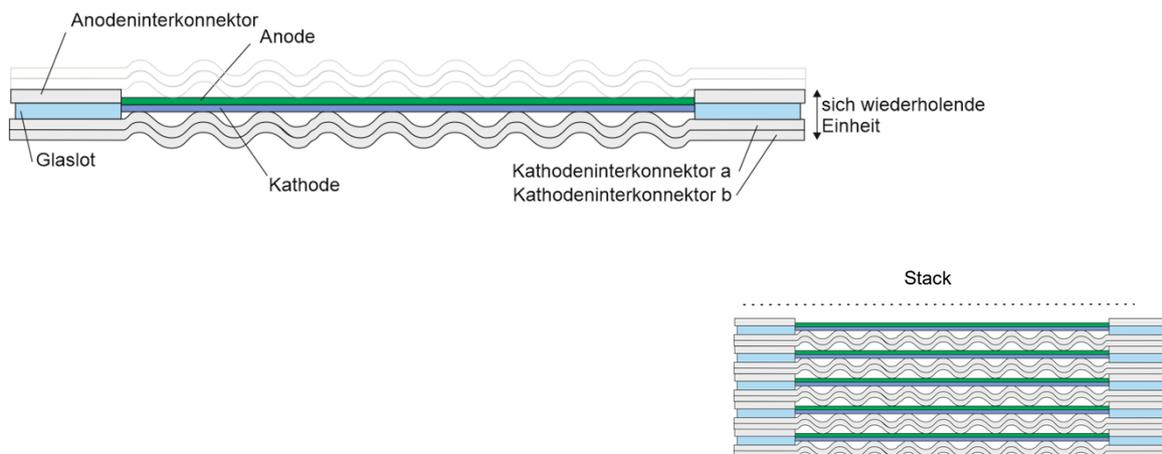
## Einführung



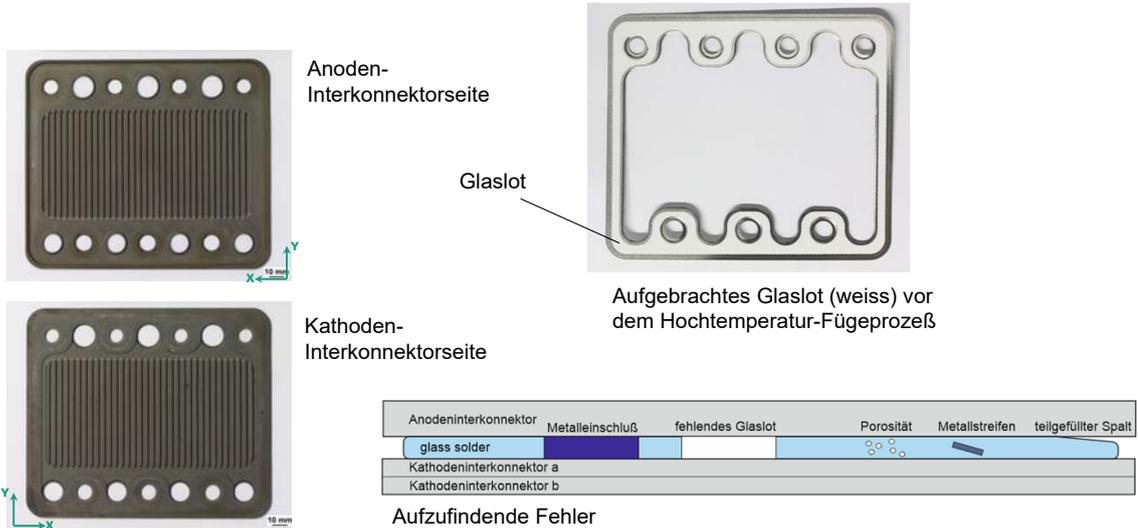
Prototyp einer Brennstoffzelle für die Automobilanwendung

- Brennstoffzellen sind hocheffiziente elektrochemische Energiewandler
- Hier: Solid oxide fuel cells (SOFC)
- Hohe Arbeitstemperaturen von 750 bis 1000°C, es gibt hohe Anforderungen an die Werkstofftechnologie
- Forschungsprojekt mit drei Instituten und einer Firma

## Komponenten des Zellelements



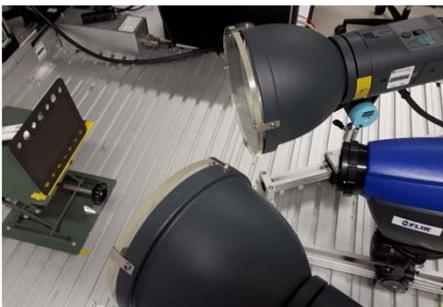
## Komponenten des Zellelements und Fehler



Seite 5

© Fraunhofer IZFP

## Experimentelle Techniken



Zwei Blitzlampen je 6,4 kJ

Bildaufzeichnung über 2 s  
bei 150 Hz BildrateVorverarbeitung mit Puls-  
Phasen Thermografie

- Aktive Thermografie mit Blitzlichtanregung
- Konduktive und induktiv angeregte Thermografie zur Lokalisierung von Kurzschlüssen

Hochfrequenz-Ultraschall in Tauchtechnik

Luftgekoppelter Ultraschall in Transmission

Röntgen Mikroradiographie

U. Netzelmann, A. Mross, T. Waschkies, D. Weber, E. Toma, H. Neurohr, 'Nondestructive Testing of the Integrity of Solid Oxide Fuel Cell Stack Elements by Ultrasound and Thermographic Techniques', *Energies* 2022, 15 (2022) 831

Automatisierter Prüfstand

<https://www.youtube.com/watch?v=3M6P8XjPN3A>

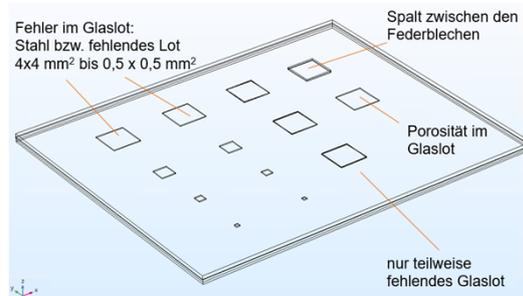
Automatische Fehlererkennung basierend auf Machine-Learning

Z. Wei, A. Osman, D. Gross, and U. Netzelmann, 'Artificial Intelligence for Defect Detection in Infrared Images of Solid Oxide Fuel Cells', *Infrared Physics and Technology* (2021) 103815, DOI: 10.1016/j.infrared.2021.103815

Seite 6

© Fraunhofer IZFP

## Numerische Simulation mit COMSOL Multiphysics

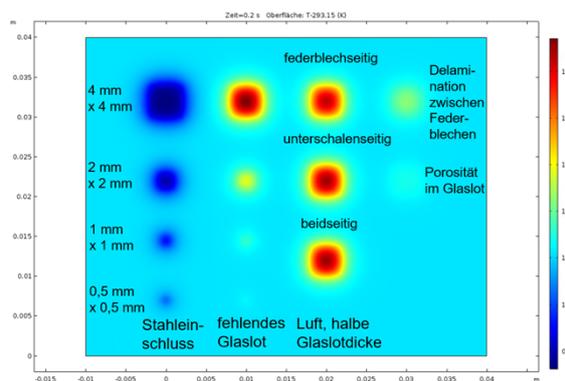


- Modellierung eines Zellelements mit realen Dickenabmessungen der Metall- und der Glaslotsschicht
- Wärmepuls mit 5 ms Länge durch Blitzlichtanregung, Absorption an der äußeren Oberfläche der Anoden- bzw. Kathodeninterkonnectorplatte

Seite 7

© Fraunhofer IZFP

## Numerische Simulation mit COMSOL Multiphysics

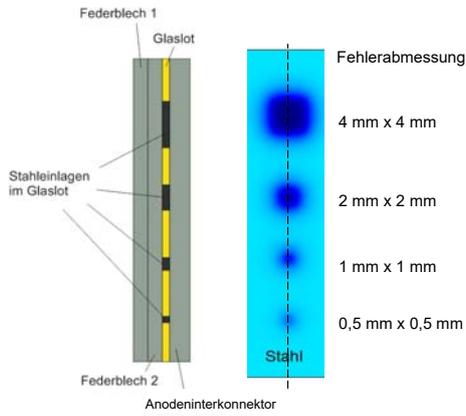


- Temperaturverteilung an der erwärmten Oberfläche zu einer Zeit von 0,2 s nach der Blitzlichtanregung
- Stahleinschlüsse erscheinen als Minima, Lufteinschlüsse als Maxima in der relativen Temperaturänderung

Seite 8

© Fraunhofer IZFP

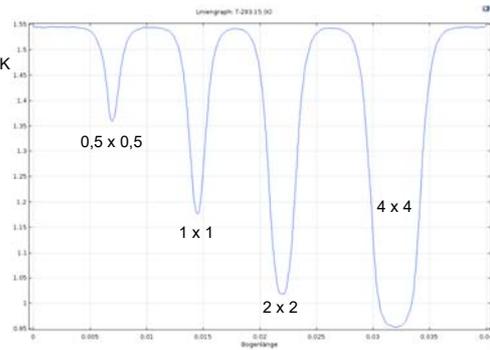
## Numerische Simulation mit COMSOL Multiphysics, Stahleinschlüsse



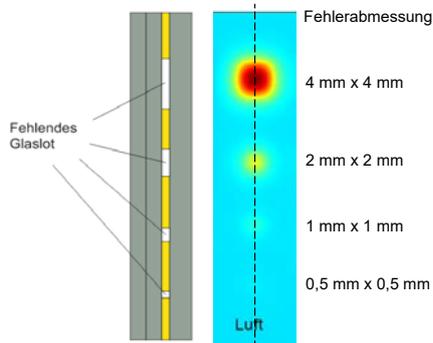
Fehlerabmessung  
4 mm x 4 mm  
2 mm x 2 mm  
1 mm x 1 mm  
0,5 mm x 0,5 mm

■ Deutlicher negativer Temperaturkontrast über den Stahleinschlüssen

Temperaturkontrast entlang der gestrichelten Linie in K



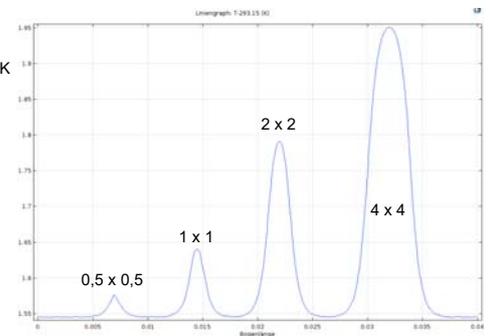
## Numerische Simulation mit COMSOL Multiphysics, fehlendes Glaslot



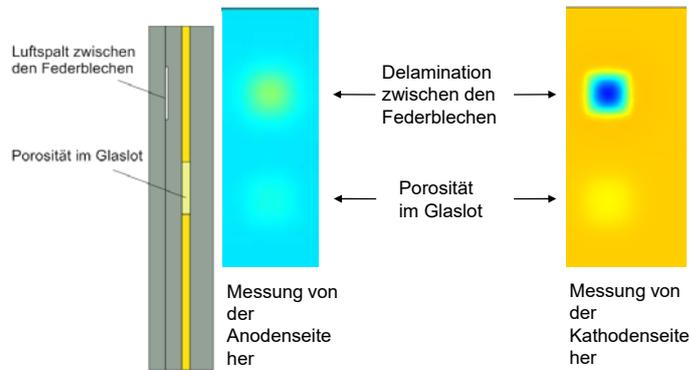
Fehlerabmessung  
4 mm x 4 mm  
2 mm x 2 mm  
1 mm x 1 mm  
0,5 mm x 0,5 mm

■ Deutlicher positiver Temperaturkontrast über den Lufteinschlüssen. Der Kontrast ist kleiner als bei den Stahleinschlüssen.

Temperaturkontrast entlang der gestrichelten Linie in K



## Numerische Simulation mit COMSOL Multiphysics, Delaminationen und Porosität



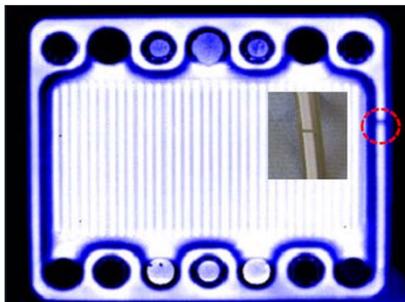
- Die störenden Delaminationen zwischen den Interkonnektoren 2a und 2b erscheinen viel stärker, wenn sie von der Kathodenseite gemessen werden
- Porosität hat nur einen sehr kleinen Effekt

- Die Messung von der Anodenseite her wird bevorzugt

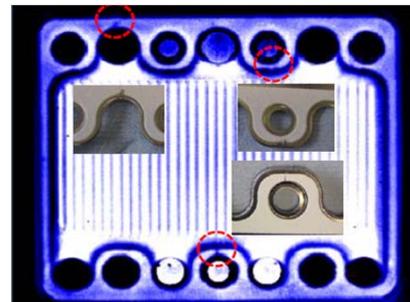
Seite 11

© Fraunhofer IZFP

## Nachweis künstlicher Fehler I



Puls-Phasen Thermografiebild einer Testprobe mit Unterbrechung in der Glaslotschicht



Puls-Phasen Thermografiebild einer Testprobe mit lokal fehlendem Glaslot

Seite 12

© Fraunhofer IZFP

## Nachweis künstlicher Fehler II

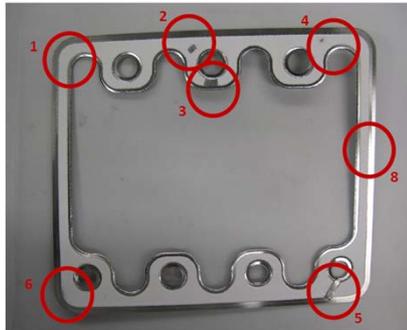
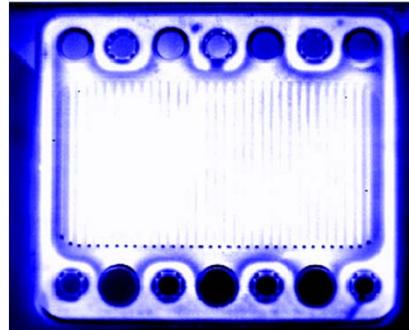


Foto vor dem Fügeprozess

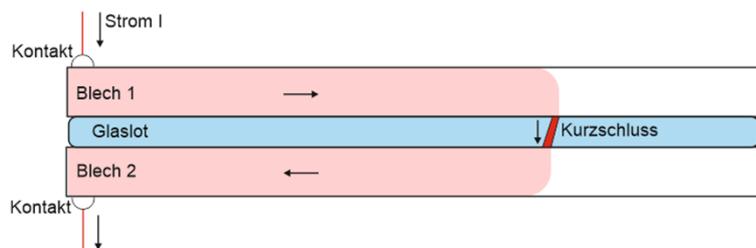
- (1) beschädigte Lotschicht
- (2) fehlendes Lot, 3 mm x 3 mm
- (3) fehlendes Lot, etwa 6 mm breit
- (4) Metallspan, etwa 1 mm x 1 mm



Resultierendes Puls-Phasen Thermografiebild

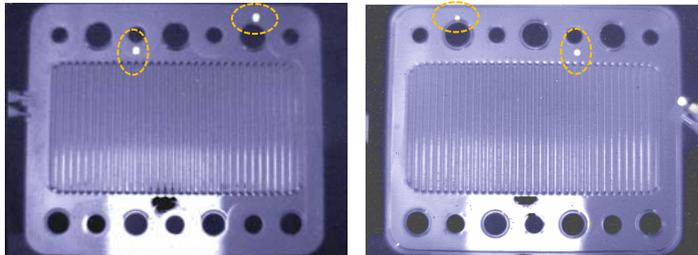
- (5) Metallstreifen, 3 mm breit
- (6) abnehmende Dicke der Glaslotschicht
- (8) Metallspan 1 mm x 3 mm

## Nachweis künstlicher Fehler III, Lokalisierung innerer Kurzschlüsse



- Die Erkennung elektrischer Kurzschlüsse im Zellelement ist per Widerstandsmessung einfach möglich, anders als deren Lokalisierung
- Mit der Konduktionsthermografie oder der induktiv angeregten Thermografie erhält man über einen von außen eingebrachten Stromfluß eine Widerstandserwärmung im Bereich des Kurzschlusses proportional zum Quadrat der lokalen Stromdichte
- Dieser Erwärmungsfleck wird von IR-Kamera detektiert

## Nachweis künstlicher Fehler III, konduktive Anregung

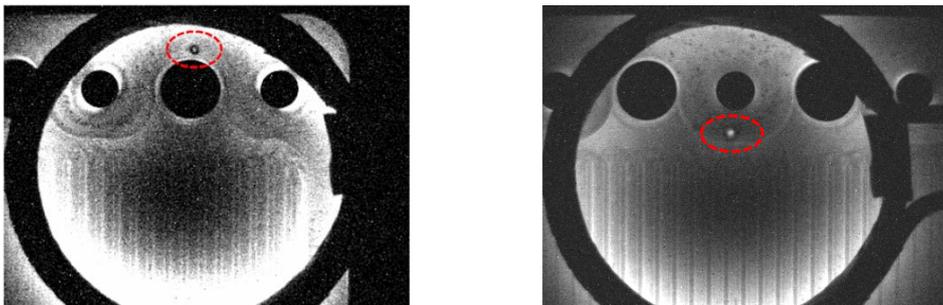


von der Kathodeninterkonnektorseite

von der Anodeninterkonnektorseite

- Mit 9 Hz amplitudenmodulierter Strom wird über Kontakte eingespeist, Lock-in Thermografie
- Zwei Kurzschlüsse sind von beiden Probenseiten her sichtbar (Markierungen)
- Dargestellt ist eine Überlagerung des Lock-in Amplitudenbilds und des passiven Thermografiebilds für eine bessere Lokalisierbarkeit der Erwärmungsflecken

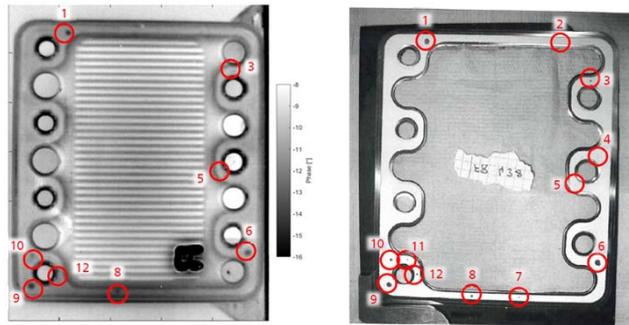
## Nachweis künstlicher Fehler III, induktive Anregung



Lock-in Induktionsthermografie Amplitudenbilder bei 166 kHz Induktionsfrequenz und 9 Hz Modulationsfrequenz

- Eine Induktionsspule erzeugt Wirbelströme in den Interkonnektoren
- Wirbelströme fließen auch über den Kurzschluß zwischen Anoden- und Kathodeninterkonnektor und erwärmen ihn
- Störunterdrückung und verbesserte Lokalisierung durch Lock-in Technik über Amplitudenmodulation des Induktionsstroms bei 9 Hz

## Untersuchungen zur Nachweisbarkeit (Probability of Detection (POD) Studie)



- 14 Proben mit Stahleinlagen unterschiedlicher Größe im Glaslot
- 10 Proben mit Luftschlüssen unterschiedlicher Größe im Glaslot
- Jeweils drei Fehler mit 0,5 mm x 0,5 mm, 1 mm x 1 mm, 2 mm x 2 mm, 4 mm x 4 mm Größe
- Jede Fehlergröße lag somit 42 mal bei den Stahleinlagen und 30 mal bei den Hohlräumen vor

## Ergebnisse einer Hit-miss Statistik, Proben mit Bereichen fehlenden Glaslots

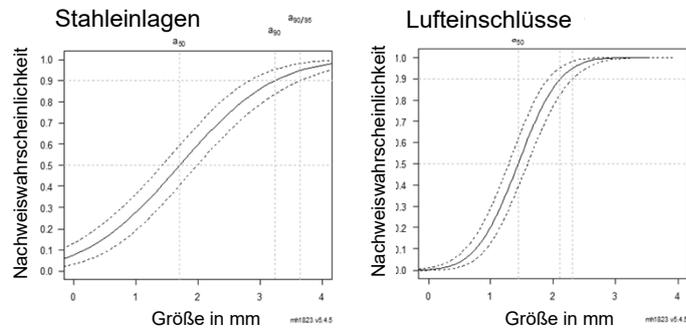
	von Kathodenseite her											von Anodenseite her												
Fehler Nr.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	1	1	1	1	2	3	4	5	6	7	8	9	1	1	1
T20	+	-	-	-	o	+	-	-	+	o	-	-	+	-	o	-	+	-	o	+	+	-	-	
T21	+	-	o	-	-	+	-	-	+	o	-	-	+	-	o	-	+	+	-	-	+	+	-	
T22	+	-	+	-	o	+	-	-	+	o	-	o	+	-	o	-	+	+	-	o	+	+	+	
T23	-	-	-	-	+	+	-	-	+	o	-	-	+	-	-	+	+	-	o	+	+	-	-	
T24	+	-	-	-	o	+	-	-	+	o	-	+	+	-	-	+	+	+	+	+	+	-	o	
T26	+	-	-	-	o	+	-	-	+	+	-	-	+	-	-	+	+	-	+	+	+	o	-	
T27	+	-	-	-	+	-	-	o	-	-	-	-	+	-	o	-	+	+	+	+	+	-	-	
T29	+	-	-	-	o	+	-	-	+	o	-	-	+	-	o	-	o	+	-	o	+	+	-	
T30	+	-	-	-	+	+	-	o	+	-	-	+	+	-	o	+	+	+	+	+	+	o	+	
T31	+	-	o	-	o	o	-	-	+	o	-	-	+	-	o	-	+	+	-	o	+	+	-	

+: Der Fehler wird visuell im Phasenbild zweifelsfrei erkannt und er wäre auch ohne Vorkenntnisse als Fehler erkannt worden

o: Der Fehler wird erkannt, aber nur weil die Fehlerposition vorab bekannt war

-: Der Fehler wird an seiner bekannten Position nicht erkannt

## POD Analyse mit der mhl1823 Software von C. Annis



- $a_{50}$  = 1,8 mm für Stahleinlagen und 1,4 mm für Lufteninschlüsse
- $a_{90/95}$  = 3,6 mm für Stahleinlagen und 2,3 mm für Lufteninschlüsse
- Bei den kleinsten Fehlern ist thermografische Prüftechnik empfindlicher auf Stahleininschlüsse als auf Lufteninschlüsse

Seite 19

© Fraunhofer IZFP

## Zusammenfassung

- Zellelemente einer Brennstoffzelle wurden erfolgreich auf Fehler im Glaslot mit Hilfe der aktiven Thermografie geprüft. Fast alle Fehler konnten mit der blitzlichtangeregten Thermografie erkannt werden.
- Kurzschlüsse konnten mit konduktiv oder induktiv angeregter Thermografie lokalisiert werden
- Blitzlichtthermografie konnte Hohlräume im Glaslot und metallische Einschlüsse mit Größen von 2,3 mm bzw. 3,6 mm sicher detektieren.
- Experimentelle Ergebnisse wurden durch Finite-Elemente Simulationen bestätigt.
- Die Prüfung eines Zellelements ist mit Thermografie innerhalb von 2 s Messzeit möglich.

Seite 20

© Fraunhofer IZFP

## Danksagung

---

Das Forschungsvorhaben wurde im Rahmen des Vorhabens (BMWl Nr. 03ET6112B) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Wir danken auch den Kollegen und Kolleginnen vom

- Fraunhofer ISC Würzburg
- Karlsruhe Institute of Technology IAM-KWT
- ElringKlinger AG

für die gute Zusammenarbeit.

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

# Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit

---

• Lassen Sie uns Kontakt halten!

- [info@izfp.fraunhofer.de](mailto:info@izfp.fraunhofer.de)
- [www.izfp.fraunhofer.de](http://www.izfp.fraunhofer.de)