

## Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung .....	VI
Abstract.....	VII
Abkürzungs- und Formelverzeichnis.....	XIII
1. Einleitung .....	1
2. Technische Grundlagen .....	5
2.1. Technische Keramik.....	5
2.2. $ZrO_2$ und $Y_2O_3$ dotiertes $ZrO_2$ .....	7
2.3. Löttechnik.....	12
2.4. Löten von Keramik und Metall .....	15
3. Stand der Technik .....	21
3.1. TLP- und PTLP-Löten .....	21
3.1.1. Abgrenzung.....	21
3.1.2. TLP-Löten .....	23
3.1.3. PTLP-Löten.....	25
3.1.4. Eigenspannungen .....	29
3.1.5. Kritische Schichtdicke .....	31
3.2. Festoxidbrennstoffzellen .....	32
3.2.1. Ökologische & ökonomische Bedeutung .....	32
3.2.2. Funktionsprinzip .....	35
3.2.3. Abdichtungskonzepte .....	40
3.2.4. Löten von $X1CrTiLa22$ und $Y_2O_3$ dotiertem $ZrO_2$ .....	45
4. Zielsetzung, Forschungshypothesen und Vorgehensweise .....	53
5. Experimentelle Methoden und Vorgehen.....	57
5.1. Werkstoffauswahl.....	57
5.2. iPTLP-Lötprozess.....	60
5.2.1. Grundwerkstoffe und Probengeometrie .....	60
5.2.2. Zusatzwerkstoffe.....	63
5.2.2.1. Aktivelemente (PVD) .....	63
5.2.2.2. Zusatzwerkstoffe (Folien).....	69
5.2.3. Lötvorrichtung.....	69
5.2.4. Probenvorbehandlung und -aufbau.....	74

5.2.5.	Versuchsdurchführung.....	76
5.2.5.1.	Verwendete Anlagentechnik.....	76
5.2.5.2.	Lötversuche.....	77
5.3.	Festigkeitsuntersuchung.....	80
5.3.1.	Scherdruckversuch.....	80
5.4.	Untersuchung der Hochtemperaturstabilität.....	82
5.4.1.	Hochtemperaturoxidation.....	82
5.5.	Analytik.....	84
5.5.1.	Morphologie.....	84
5.5.2.	Element- und Phasenbestimmung.....	84
5.5.3.	Raman-Spektroskopie.....	85
5.5.4.	Ultraschalluntersuchung.....	86
5.5.5.	(Nano-)Härtemessung.....	86
5.5.6.	Bildauswertung.....	87
5.6.	Thermochemische Berechnungen.....	87
5.6.1.	Berechnung mit ThermoCalc.....	88
5.6.2.	Berechnung der Gibbs-Energie für Reaktionen.....	88
5.7.	Anwendungsbezogene Untersuchung.....	90
5.7.1.	Beständigkeit der Festoxidbrennstoffzelle unter Lötbedingungen.....	90
5.7.2.	Dichtigkeitsprüfung.....	91
6.	Ergebnisse und Diskussion.....	93
6.1.	Thermochemische Phasenberechnung.....	93
6.1.1.	Mögliche Reaktionen, Phasen und Vorgänge.....	93
6.1.1.1.	Werkstoffsystem Aktivelement + Zusatzwerkstoff.....	94
6.1.1.2.	Werkstoffsystem 3YSZ + Aktivelement.....	107
6.1.1.3.	Werkstoffsystem 3YSZ + Zusatzwerkstoff.....	117
6.1.1.4.	Werkstoffsystem X1CrTiLa22 + Aktivelement + Zusatzwerkstoff.....	121
6.1.2.	Zusammenfassung und Schlussfolgerung zum Abschnitt.....	126
6.2.	Morphologie nickelbasierter iPLTP-Lötungen.....	128
6.2.1.	Lötgefüge mit Nickel als Zusatzwerkstoff.....	129
6.2.2.	Lötgefüge mit CuNi44 als Zusatzwerkstoff.....	137
6.2.3.	Lötgefüge mit Ni20Cr als Zusatzwerkstoff.....	144
6.2.4.	Morphologie der Reaktionszonen.....	152
6.2.5.	Einflussgrößen auf die Morphologie.....	163
6.2.6.	Zusammenfassung und Schlussfolgerung zum Abschnitt.....	170
6.3.	Festigkeit nickelbasierter iTLP-Lötungen.....	173

---

6.3.1.	Nickel als Zusatzwerkstoff .....	173
6.3.1.1.	Ultraschalluntersuchung .....	173
6.3.1.2.	Scherdruckversuch .....	177
6.3.1.3.	Bruchflächenanalyse .....	178
6.3.2.	Ni20Cr als Zusatzwerkstoff.....	187
6.3.2.1.	Ultraschalluntersuchung .....	187
6.3.2.2.	Scherdruckversuch .....	190
6.3.2.3.	Bruchflächenanalyse .....	191
6.3.3.	Phasenbestimmung mittels Raman-Spektroskopie .....	197
6.3.4.	Zusammenfassung und Schlussfolgerung zum Abschnitt.....	201
6.4.	Hochtemperaturstabilität nickelbasierter iPTLP-Lötungen .....	205
6.4.1.	Nickel als Zusatzwerkstoff .....	205
6.4.1.1.	Korrosionskinetik .....	205
6.4.1.2.	Korrosionsprodukte.....	213
6.4.2.	Ni20Cr als Zusatzwerkstoff.....	220
6.4.2.1.	Korrosionskinetik .....	221
6.4.2.2.	Korrosionsprodukte.....	223
6.4.3.	Oxidation von Nickel, Ni20Cr und CuNi44 .....	227
6.4.4.	Zusammenfassung und Schlussfolgerung zum Abschnitt.....	230
6.5.	Anwendungsbezogene Untersuchungen .....	233
6.5.1.	Einfluss des Lötprozesses auf SOFC-Elektrolyte .....	233
6.5.2.	Gasdichtigkeit von iPTLP-Lötungen .....	244
6.5.3.	Zusammenfassung und Schlussfolgerung zum Abschnitt.....	246
7.	Schlussfolgerung und Ausblick.....	249
	Anhang.....	255
	Literaturverzeichnis .....	263

