

**„Reactive Air Brazing
Löten von Keramik-Keramik- und Keramik-Metall-Verbunden an Luft“**

Von der Fakultät für Maschinenwesen der
Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen zur Erlangung des
akademischen Grades eines Doktors der Ingenieurwissenschaften
genehmigte Dissertation

vorgelegt von

Nils Kopp

Berichter: Univ.-Prof. Dr.-Ing Kirsten Bobzin
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Christoph Broeckmann

Tag der mündlichen Prüfung: 24.01.2012

1	Einleitung	7
2	Löten von Keramiken	10
2.1	Löten metallisierter Keramik	12
2.2	Fügen mit Glasloten	14
2.3	Aktivlöten	16
2.4	Reaktivlöten an sauerstoffhaltigen Atmosphären: Vom Direct Copper Bonding zum Reactive Air Brazing	18
2.5	Gemeinsamkeiten der Verfahren zum Löten von Keramiken	27
3	Prinzipien und Verfahren der Entwicklung und Charakterisierung von Lotwerkstoffen	29
3.1	Prinzipien der Lotentwicklung	30
3.2	Herstellung von Lotwerkstoffen	35
3.3	Untersuchung des Benetzungsverhaltens und des Gefüges von Lötverbindungen – Gestaltung des Lötprozesses	38
3.3.1	Untersuchte keramische Werkstoffe	42
3.3.2	Untersuchte metallische Werkstoffe	43
3.4	Analyse des Schmelz- und Reaktionsverhaltens	45
3.5	Ermittlung der mechanischen Eigenschaften	46
4	RAB – Löten von Keramik an Luft	50
4.1	Das System Ag-CuO und verwandte Systeme	50
4.2	Untersuchung der Lotsysteme AgCu und AgCuTi	55
4.2.1	Einfluss von Zusammensetzung und Temperatur auf das Gefüge	55
4.2.2	Einfluss von Zusammensetzung und Temperatur auf das Benetzungsverhalten	57
4.3	Entwicklung neuer Lotwerkstoffe	61
4.4	Thermodynamik des Lötens von Keramiken an Luft	68
4.5	Festigkeit von RAB-Lötverbindungen	72
4.5.1	Festigkeit neu entwickelter Lote	74
4.5.2	Bruchverhalten und Porosität von RAB-Lötverbindungen	74
4.5.3	Einfluss der Lötparameter auf die Zugfestigkeit	76

4.6	Löten von weiteren Keramiken	78
4.7	Empfehlungen zur Lotauswahl beim Löten von Keramik an Luft	83
5	Löten von Keramik-Metall-Verbunden an Luft	85
5.1	Herausforderungen beim Löten von Keramik-Metall-Verbunden an Luft	86
5.2	Untersuchung der Reaktionen zwischen Lot und Stahlwerkstoffen	89
5.3	Thermodynamik des Lötens von Keramik-Metall-Verbunden an Luft	97
5.4	Entwicklung neuer Lote zum Fügen von Keramik-Metall-Verbunden	100
5.5	Empfehlungen zur Lotauswahl beim Löten von Keramik-Stahl-Verbunden an Luft	103
6	Konturtreue Lote – 2-step-RAB	105
6.1	Möglichkeiten zur Erhöhung der Konturtreue von RAB-Loten	105
6.2	Untersuchung der Konturtreue und ihrer Ursachen	106
6.3	Grundlagen zur Entwicklung des 2-step-RAB-Prozesses	110
7	Aluminiumbasierte RAB-Lote	114
7.1	Ansatz zur Übertragung des RAB auf aluminiumbasierte Lotsysteme	114
7.2	Entwicklung von Aluminium-RAB-Loten und geeigneten Lötprozessen	117
8	Zusammenfassung und Ausblick	127
9	Anhang	130
9.1	Abkürzungsverzeichnis	130
9.2	Abbildungsverzeichnis	133
9.3	Tabellenverzeichnis	138
9.4	Literatur	139