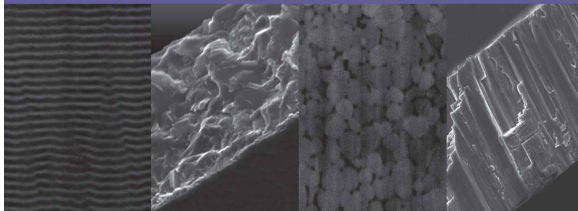




Matthias Herr (Autor)  
**Fügen von Hochvolt-Komponenten mittels reaktiver  
Nanometer-Multschichten**

Schriftenreihe des Lehrstuhls für Kontinuumsmechanik und Materialtheorie  
der Technischen Universität Berlin

Herausgegeben von Prof. Dr. rer. nat. Wolfgang H. Müller



Matthias Herr

**Fügen von Hochvolt-Komponenten mittels  
reaktiver Nanometer-Multschichten**



Cuvillier Verlag Göttingen  
Internationaler wissenschaftlicher Fachverlag



<https://cuvillier.de/de/shop/publications/6264>

Copyright:

Cuvillier Verlag, Inhaberin Annette Jentsch-Cuvillier, Nonnenstieg 8, 37075 Göttingen, Germany  
Telefon: +49 (0)551 54724-0, E-Mail: [info@cuvillier.de](mailto:info@cuvillier.de), Website: <https://cuvillier.de>



# Inhaltsverzeichnis

<b>Formelzeichen und Abkürzungen</b>	<b>V</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2 Stand der Forschung und Technik</b>	<b>4</b>
2.1 Effekte der Nanoskaligkeit	4
2.1.1 Oberflächen und Grenzflächen	4
2.1.2 Thermodynamik der Phasentransformation	5
2.1.3 Größenabhängigkeit der Schmelztemperatur	8
2.1.4 Diffusion in nanokristallinen Materialien	11
2.2 Reaktive Nanometer-Multischichten	14
2.2.1 Selbstfortschreitende exotherme Reaktionen in Pulversystemen	14
2.2.2 Aufbau und Funktion reaktiver Nanometer-Multischichtfolien	15
2.2.3 Forschungsarbeiten zur Beschreibung der Reaktionskinetik	17
2.2.4 Fügetechnische Anwendung	19
2.2.5 Herstellung von reaktiven Nanometer-Multischichten mittels Sputterdeposition	21
2.2.6 Materialsysteme	22
2.2.7 Vorbelotung	24
2.2.8 Berechnungsansätze	25
2.3 Zusammenfassende Betrachtung und Handlungsbedarf	30
<b>3 Zielsetzung und Vorgehensweise</b>	<b>32</b>
3.1 Zielsetzung	32
3.2 Vorgehensweise	33
<b>4 Simulation</b>	<b>34</b>
4.1 Numerische Simulation der Reaktion	34
4.1.1 Berechnung der Maximaltemperaturen	34
4.1.2 Berechnung der Geschwindigkeit	35
4.2 Finite-Elemente-Simulation der Fügeoperation	38
4.2.1 Modellierung	38
4.2.2 Zeit-Temperatur-Verläufe	40
4.2.3 Variation der Wärmeleitfähigkeit	42
4.2.4 Variation der Lotschichtdicke	43
4.2.5 Temperatursymmetrie	45
4.2.6 Variation der Reaktionsgeschwindigkeit	46
4.3 Zusammenfassende Betrachtung	47



<b>5</b>	<b>Versuchseinrichtung und -durchführung</b>	<b>49</b>
5.1	Untersuchungsgegenstand	49
5.1.1	Probengeometrie	49
5.1.2	Verbindungsaufbau	50
5.1.3	Ni/Al-Nanometer-Multischichten	51
5.2	Fügeeinrichtung	51
5.3	Methoden der Prozesscharakterisierung	52
5.3.1	Thermografiesystem	52
5.3.2	Hochgeschwindigkeitskamarasystem	53
5.4	Methoden der Verbindungscharakterisierung	53
5.4.1	Widerstandsmessung	54
5.4.2	Scherzugfestigkeitsprüfung	58
5.4.3	Nanoindentationsmessung	58
<b>6</b>	<b>Bestimmung der Eigenschaften von freistehenden Ni/Al-Multischichten</b>	<b>61</b>
6.1	Charakterisierung	61
6.1.1	Schichtstruktur vor der Reaktion	61
6.1.2	Gefüge nach der Reaktion	62
6.2	Geschwindigkeits- und Temperaturmessung	64
6.2.1	Versuchsaufbau und –auswertung	64
6.2.2	Einfluss der Periodendicke	66
6.2.3	Einfluss der Gesamtdicke	68
6.3	Alterungsuntersuchung	70
6.3.1	Alterung von Multischichtfolien ohne Belotung	71
6.3.2	Alterung von Multischichtfolien mit Belotung	73
6.4	Zusammenfassende Betrachtung	74
<b>7</b>	<b>Fügen mittels beloteter Ni/Al-Multischichten</b>	<b>75</b>
7.1	Charakterisierung des Fügeprozesses	75
7.2	Bestimmung der Reaktionsgeschwindigkeit	77
7.3	Bestimmung der Temperaturverläufe in der Fügezone	78
7.4	Bestimmung der Lotschmelzdauer	82
7.5	Temperaturbelastung der zu kontaktierenden Komponenten während des Fügeprozesses	83
7.6	Zusammenfassende Betrachtung	85
<b>8</b>	<b>Charakterisierung der Fügeverbindung</b>	<b>87</b>
8.1	Metallographische Analyse	87
8.1.1	Allgemeine Fügestellenbeurteilung	87
8.1.2	Fügestellenbeurteilung bei Sn-Vorbelotung	93
8.1.3	Fügestellenbeurteilung bei SnAg <sub>3,5</sub> -Vorbelotung	95



8.2	Übergangswiderstandsmessung	97
8.2.1	Verfahrensvergleich	97
8.2.2	Einfluss der Flächenpressung	100
8.2.3	Einfluss der Lotwerkstoffe und –dicke	101
8.3	Statische Festigkeitsprüfung	101
8.3.1	Einfluss der Flächenpressung	102
8.3.2	Einfluss der Lotwerkstoffe und –dicke	104
8.4	Nanoindentermessung	105
8.4.1	Nanohärte	107
8.4.2	Elastizitätsmodul	109
8.5	Zusammenfassende Betrachtung	110
<b>9</b>	<b>Zuverlässigkeitsuntersuchung der Fügeverbindung</b>	<b>111</b>
9.1	Temperaturkonstantbeanspruchung	111
9.2	Temperaturwechselbeanspruchung	112
9.2.1	Übergangswiderstand	114
9.2.2	Scherzugfestigkeit	114
9.2.3	Nanoindentermessung	115
9.3	Kondenswasser-Konstantklimabeanspruchung	118
9.3.1	Übergangswiderstand	119
9.3.2	Scherzugfestigkeit	120
9.3.3	Nanoindentermessung	121
9.4	Zusammenfassende Betrachtung	124
<b>10</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>125</b>
10.1	Zusammenfassung	125
10.2	Ausblick	128
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>129</b>
	<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>139</b>
	<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>143</b>