

# 1 Einleitung

Die Elektromobilität ist ein vielversprechender Lösungsansatz für eine umweltverträgliche und individuelle Mobilität der Zukunft. Sowohl die Automobilindustrie als auch die Zulieferer arbeiten derzeit mit Hochdruck an der Entwicklung und Umsetzung leistungsfähiger und zugleich wirtschaftlicher elektrischer Energiespeicher- und Antriebssysteme. Nachdem bereits erste Kleinserien an Elektrofahrzeugen dem Markt zugänglich gemacht wurden, steht in den kommenden Jahren und Jahrzehnten die Herausforderung an, diese Technologie für die breite Masse tauglich zu machen.

Zur Verwirklichung dieser Zielvorstellung kommt der Produktionstechnik eine entscheidende Rolle zu. So ist eine präzise, automatisierte und großserientaugliche Fertigung erforderlich, um die Anforderungen an den Wirkungsgrad, die Lebensdauer und Rentabilität der Produkte bzw. Komponenten zu erfüllen. Ein zentraler Fertigungsschritt in dieser Prozesskette ist das Fügen bzw. elektrische Kontaktieren stromführender Bauteile im energietechnischen Bereich mit der Prämisse, elektrische Energie möglichst verlustfrei zu übertragen. Dies ist insbesondere deshalb von Bedeutung, da jeder Einzelkontakt entlang des Hauptstrompfades aufgrund der ohmschen Verluste entscheidend ist für die Leistungsfähigkeit des Gesamtsystems. Um einen hohen Gesamtwirkungsgrad zu erreichen, besteht die Notwendigkeit, die Schnittstellen so zu gestalten, dass der elektrische Übergangswiderstand der Kontaktstelle gering und langzeitstabil zugleich ist.

Eine Aufgabenstellung in diesem Zusammenhang ist das stoffschlüssige Fügen von Aluminium und Kupfer. Mischverbindungen stellen für die Fügetechnik eine besondere Herausforderung dar, da Materialien mit unterschiedlichen thermophysikalischen und stofflichen Eigenschaften miteinander verbunden werden. So bilden sich beispielsweise beim Einsatz von Schmelzschweißverfahren während des Abkühlens unerwünschte intermetallische Phasen aus. Die hohe Härte und Sprödigkeit derartiger Phasen machen das Gefüge in der Fügezone rissanfällig, so dass die erreichbare Festigkeit eingeschränkt sein kann. Weiterhin führen intermetallische Phasen im Kontaktbereich der Bauteile zur Senkung der elektrischen Leitfähigkeit. Gerade für das Werkstoffsystem Aluminium-Kupfer ist die Sprödphasenbildung jedoch kaum zu vermeiden. Das Zustandsdiagramm Aluminium-Kupfer weist nur eine geringe vollständige Mischbarkeit beider Werkstoffe auf.

Lötverfahren bieten grundsätzlich die Möglichkeit des stoffschlüssigen Fügens, ohne die Liquidustemperatur der Grundwerkstoffe zu überschreiten. Erreicht wird dies durch das Einbringen eines niedrig schmelzenden Lotes, das nach dem Erstarren die Grenzflächen beider Bauteile benetzt und somit den Stoffschluss bildet. Entgegen punkt- oder linienförmigen Verbindungen kann beim Löten ein flächiger Kontakt geschaffen werden. Größere Verbindungsflächen führen zu einer geringeren Stromdichte im Kontaktbereich und senken somit die Gefahr lokal erhöhter Temperaturgradienten.

Trotz der erzielbaren Verbindungseigenschaften wird das Löten oftmals nicht eingesetzt. Einer der Gründe ist die Art und Dauer des Wärmeeintrags. Dieser erfolgt in der Regel von außen, so dass die Wärmeenergie durch thermische Diffusion innerhalb der Bauteile bis zur Fügezone transportiert wird. Zusätzlich müssen die Temperaturen über eine definierte Zeitdauer gehalten



werden, um die erforderlichen Diffusionsprozesse zwischen Lot und Grundwerkstoff sicherzustellen. Die Folge ist eine hohe thermische Beanspruchung der Bauteile. Temperatursensitive Baugruppen und -komponenten sowie angrenzende Isolierungen können irreparabel geschädigt werden. Verstärkt wird dieser Effekt bei stromleitenden Verbindungen durch die hohe thermische Leitfähigkeit der Kontaktmaterialien. Um die Vorteile einer flächigen Verbindung zur Kontaktierung temperatursensitiver Bauteile nutzen zu können, ist es notwendig, die Wärmeenergie gezielt, kontrolliert und kurzzeitig einzubringen.

Einen Lösungsansatz bietet die Nutzung von Nanoeffekten in der Fügetechnik. Die außergewöhnlichen Eigenschaften von Nanostrukturen werden bereits in unterschiedlichen Forschungs- und Industriefeldern genutzt. Die Fügetechnik stellt dies einerseits vor die Herausforderung, Bauteile mit immer kleiner werdenden Dimensionen und Materialien mit nanostrukturiertem Gefüge unter Beibehaltung ihrer Eigenschaften zu verbinden. Andererseits ergeben sich für die Fügetechnologie selbst durch den Vorstoß in Größenordnungen im Nanometerbereich neuartige Möglichkeiten. Eine Innovation im Bereich des Fügens, die die Effekte der Nanoskaligkeit nutzt, stellen reaktive Nanometer-Multischichten dar.

Der Begriff der reaktiven Nanometer-Multischichten oder auch Reaktivmultischichten (RMS) beschreibt ein Werkstoffsystem, bestehend aus der Stapelung mindestens zweier unterschiedlicher, alternierender Materialschichten. Die Dicke der Schichten beträgt bis zu wenige Nanometer. Das Gesamtsystem kann aus mehreren hundert dieser Einzelschichten bestehen. Wird dem System eine Aktivierungsenergie zugeführt, so starten zwischen den einzelnen Schichten atomare Diffusionsprozesse. Aufgrund der kurzen Diffusionswege laufen diese extrem schnell ab. Die Interdiffusionsprozesse bzw. die Umsetzung der Reaktanden und die Ausbildung des Reaktionsproduktes verlaufen stark exotherm, so dass Energie in Form von Wärme freigesetzt wird. Charakteristisch ist weiterhin die lokal begrenzt stattfindende Reaktion, die selbstfortschreitend bis zur vollständigen Umsetzung der Reaktanden durch den Schichtaufbau wandert. Die Wärme der exotherm ablaufenden Reaktion kann als Energie zum Fügen genutzt werden.

Entgegen konventioneller Wärmequellen zum Löten, bei denen der Energieeintrag über die Wärmeleitung der Bauteile erfolgt, wird die Energie bei diesem Verfahren in der Fügezone zugeführt. Möglich macht dies die Herstellung des Schichtsystems als freistehende Folie, so dass diese zwischen die zu fügenden Bauteile platziert werden kann. Durch die sehr konzentrierte Wärmeentwicklung, die geringe Wärmekapazität der Folie und die hohe Geschwindigkeit der Reaktion können selbst große Flächen mit geringer thermischer Belastung der Bauteile gelötet werden. Reaktive Nanometer-Multischichten bieten somit einen neuartigen Ansatz zum wärme- und eigenspannungsarmen Fügen. Trotz des hohen Potentials ist das Verfahren bislang nur eine Randerscheinung in der Fügetechnik. Gründe hierfür sind vor allem der hohe technologische Aufwand der Herstellung und die (noch) hohen Fertigungskosten. Aber auch Defizite im Prozessverständnis und die nicht eindeutig identifizierten Verbindungseigenschaften erschweren den Einsatz.

Die vorliegende Arbeit resultiert aus dem Bedarf, ein ganzheitliches Prozessverständnis dieser Technologie zu entwickeln. Dieses soll als weitere Grundlage dienen, um die Technologie für den industriellen Einsatz zu etablieren. Dafür werden im folgenden Kapitel „Stand der Forschung und Technik“ zunächst die Funktionsweise des Verfahrens und die dahinterstehenden Nano-



effekte näher erläutert. Aufbauend darauf wird in Kapitel 4 der Prozessablauf in einem Simulationsmodell abgebildet, um Einflüsse und Wechselwirkungen analysieren zu können. Die Güte der Vorhersagen wird anschließend in Kapitel 5 und 6 durch experimentelle Untersuchungen geklärt. Ein weiterer wesentlicher Bestandteil der Arbeit ist die Feststellung der Verbindungseigenschaften und die Stabilität dieser gegenüber äußeren Einflüssen (Kapitel 6-9). Den Abschluss bildet eine übergreifende Diskussion in Kapitel 10, in der die wichtigsten Einflüsse und Wechselwirkungen für eine erfolgreiche Anwendung zusammengefasst werden.