

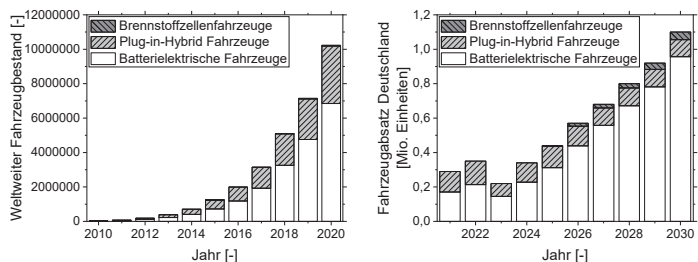
# 1 Einleitung, Motivation und Zielsetzung

## 1.1 Einleitung

Das Fügen von Materialkombinationen elektrisch hochleitender Werkstoffe wie Aluminium und Kupfer ist aufgrund der fortschreitenden Elektrifizierung von Alltagsgegenständen oder Fortbewegungsmitteln von großer Bedeutung in der Industrie. Insbesondere im Bereich der Elektromobilität besteht ein hoher Bedarf an elektrischen Verbindungen. Kupfer- oder Aluminiumbauteile leiten dabei die elektrische Energie vom Speichersystem zum elektrischen Antrieb. Hauptentwicklungstreiber für die Elektrifizierung im Automobilbereich sind in Deutschland die erforderliche Reduzierung der klimaschädlichen CO<sub>2</sub>-Emissionen und die Beendigung der Abhängigkeit von fossilen Brennstoffen. Resultierend daraus steigt die Zahl an batterieelektrischen Fahrzeugen sowohl in Deutschland als auch weltweit an (siehe Bild 1 links). 2020 sind weltweit mehr als 10 Millionen elektrisch angetriebene Fahrzeuge unterwegs [IEA21]. Die weltweit steigende Tendenz ist auch in Prognosen des Fahrzeugabsatzes in Deutschland für die Jahre bis 2030 sichtbar (Bild 1 rechts) [PRO20].

Bild 1:  
Elektromobilität  
weltweit und in  
Deutschland

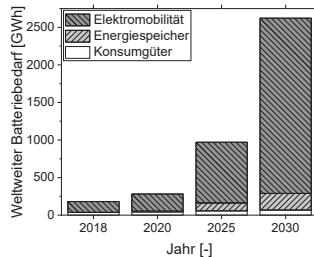
Links: Weltweiter  
Bestand an  
Elektrofahrzeugen  
[IEA21]  
Rechts: Prognose des  
jährlichen  
Fahrzeugabsatzes in  
Deutschland [PRO20]



Der zunehmende Absatz an Elektrofahrzeugen führt zu einem gesteigerten Bedarf an Batteriezellen in den kommenden Jahren. Prognosen geben einen Anstieg um den Faktor 14 von 2018 bis 2030 an, siehe Bild 2. [GLO19] Bei Annahme von Pouchzellen mit einer durchschnittlichen Kapazität von 82 Ah und einer Zellspannung von 3,7 V (Batterieentwicklungsstand 2020, [FRA17]) wurden allein 2020 fast eine Milliarde solcher Zellen benötigt.

Bild 2:  
Prognose des  
weltweiten  
Batteriebedarfs in  
den Jahren 2018-  
2030

[GLO19]



Die Batteriezellen – unabhängig des äußeren Formfaktors – bestehen aus einer beschichteten Kupfer- (Anode) und Aluminiumfolie (Kathode). Für die Verschaltung von Batteriezellen zur Spannungs- und Kapazitätserhöhung für den Einsatz in Elektrofahrzeugen ist eine Fügeverbindung dieser zwei Werkstoffe zwingend erforderlich. Hauptanforderung ist hierbei ein möglichst geringer Übergangswiderstand, um die elektrische Funktionalität der Verbindung annähernd verlustfrei zu gewährleisten. Bei prismatischen Zellen befindet sich diese Verbindung üblicherweise bereits in der Zelle, während bei Rundzellen eine Kontaktierung in der Zelle an das Stahlgehäuse bzw. den Stahldeckel stattfindet. Bei pouchförmigen Batteriezellen wird je ein Aluminium- und ein Kupferableiter aus der Zelle herausgeführt, sodass die artungleiche Verbindung außerhalb der Zelle durchgeführt wird. [LEE10; DAS18]

Die Verbindung von einer Milliarde Zellen pro Jahr benötigt dementsprechend ein Fügeverfahren mit hoher Geschwindigkeit und Kontaktgüte. Bei jeder elektrischen Belastung der Verbindung entsteht ein Wärmeverlust abhängig von dem elektrischen Widerstand in der Fügeverbindung. Eine hohe Verbindungsqualität ist demnach von entscheidender Bedeutung für die Effizienz von Batteriespeichersystemen. Gängige Fügeverfahren für Aluminium-Kupfer-Verbindungen sind für diese Anwendung insbesondere das mechanische Fügen, Ultraschallschweißen und Laserstrahlschweißen. [LEE10; DAS18]

Aufgrund der schlechten Schweißbarkeit und der Bildung von spröden intermetallischen Phasen gilt die schmelzflüssige Verbindung von Aluminium und Kupfer als herausfordernd. Diese Arbeit befasst sich mit der Entwicklung eines funktionsorientierten Laserstrahlschweißprozesses sowie der Überwachung dieses kritischen Prozesses in einer Produktionskette. Bei den Untersuchungen steht die Funktion der Verbindung, das Leiten des elektrischen Stroms, für den Einsatz in elektrotechnischen Anwendungen im Vordergrund. Ziel ist das Aufzeigen einer industriellen Einsatzmöglichkeit des

Laserstrahlschweißprozesses bei Aluminium-Kupfer-Verbindungen trotz auftretender metallurgischer Defekte, wie den intermetallischen Phasen.

## 1.2 Motivation und Anforderungen

Die vorliegende Arbeit stellt eine ganzheitliche, funktionale Betrachtung des Laserstrahl-Mikroschweißens von Aluminium-Kupfer-Verbindungen dar. Die Mikroverbindungen (verwendete Blechdicken kleiner 500 µm) werden auf mechanische und metallurgische Eigenschaften, aber auch auf die Hauptfunktionen der Verbindungen, die elektrischen Eigenschaften und die elektrische Belastbarkeit, untersucht. Erweitert werden die Untersuchungen durch den Einsatz von zwei Prozessüberwachungssystemen, um eine mögliche Umsetzung des Prozesses in der Produktion zu unterstützen.

Grundlegende Prozessanalysemethoden zur Auswertung von Schweißversuchen, wie Zugprüfung oder metallographische Analyse gelangen bei Aluminium-Kupfer-Verbindungen an ihre Grenzen. Schweißfehler wie Poren und Risse sowie die Bildung von harten und spröden intermetallischen Phasen sind üblich für diese Mischverbindung. Der Einfluss auf die Funktionsfähigkeit der Verbindung und deren Langzeitstabilität sind derzeit nicht ausreichend erforscht. Die Prozessentwicklung und -kontrolle durch Prozessüberwachungsmethoden (insbesondere der Einschweißtiefe) werden in dieser Arbeit durch die Prüfung des Übergangswiderstands, der Temperaturstabilität, der Stromtragfähigkeit und einer erweiterten mechanischen Belastung wie Vibration unterstützt.

Für den industriellen Einsatz von Aluminium-Kupfer-Verbindungen bestehen verschiedene Anforderungen, die im Folgenden in funktionale und prozesstechnische Anforderungen unterteilt werden:

### Funktionale Anforderungen

- Mechanisch stabile Verbindung über die Lebensdauer
- Elektrische Kontaktierung mit möglichst geringem Übergangswiderstand (konstant über die Lebensdauer)

### Prozesstechnische Anforderungen

- Spritzerarmer Prozess, um metallische Verunreinigungen in elektrotechnischen Bauteilen zu vermeiden
- Porenarme Verbindung
- Geringe Temperaturbelastung zum Schutz thermisch sensibler Bauteile (z.B. Batteriezellen)

- Konstante Einschweißtiefe zur Beherrschung der Materialdurchmischung
- Hohe Reproduzierbarkeit und Prozessgeschwindigkeit für den rentablen, industriellen Einsatz

Für die Beeinflussung der prozesstechnischen Anforderungen wird in der Arbeit das Laserstrahlschweißen mit brillanten Strahlquellen in Kombination mit einer örtlichen Leistungsmodulation also einer Überlagerung der Vorschubbewegung mit einer beispielsweise kreisförmigen Oszillation verwendet.

### 1.3 Zielsetzung

Ziel dieser Arbeit ist die zuverlässige Funktion von lasergeschweißten Aluminium-Kupfer-Verbindungen für elektrotechnische Anwendungen. Die Arbeit orientiert sich an folgenden drei Forschungsfragen:

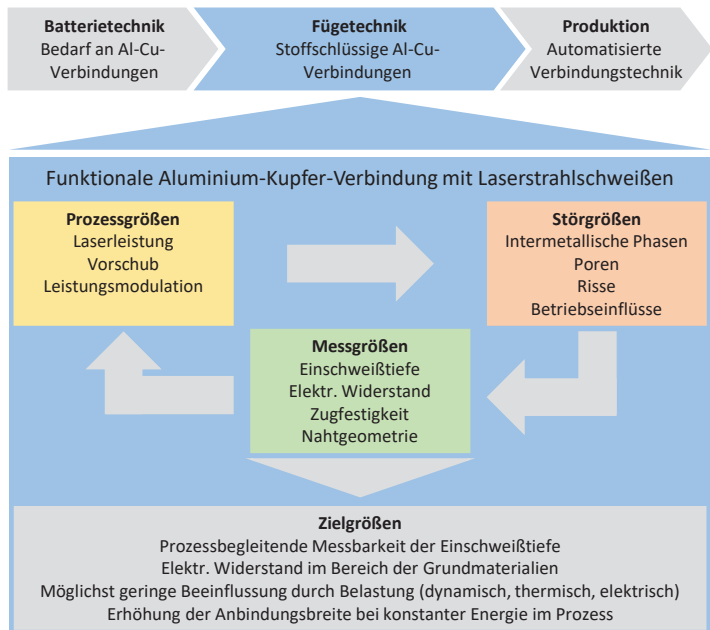
- Welchen Einfluss haben die Prozessparameter (Leistung, Vorschubgeschwindigkeit, Leistungsmodulation) und die Schweißgeometrie auf die Nahtausbildung, die Materialdurchmischung und die Funktionseigenschaften?
- Welchen Einfluss haben thermische, elektrische und dynamische Belastungen auf die Funktionalität?
- Wie und mit welcher Präzision kann die Einschweißtiefe in Aluminium-Kupfer-Verbindungen prozessbegleitend durch Interferometrie und Spektrometrie bestimmt werden?

Zur Beantwortung der Fragen wird zunächst die funktionale und quantifizierbare Messgröße, der elektrische Übergangswiderstand, betrachtet (Kapitel 4). Mit Hilfe von Simulation und experimenteller Validierung wird der Einfluss von Nahteigenschaften und Nahtausführung auf den Widerstand analysiert. Ziel ist die Reduktion des Übergangswiderstands auf den Mittelwert der Grundmaterialien Aluminium und Kupfer. Durch stromflussoptimierte Nahtpositionierung soll der Übergangswiderstand der Verbindung zusätzlich gesenkt werden. Die relevanten Prozessgrößen (Laserleistung, Vorschub und Leistungsmodulation) besitzen einen großen Einfluss auf die Nahtform und Durchmischung der Materialien. Kapitel 5 stellt die Auswirkungen der Parameter im Überlapp- und Stumpfstoß dar. Im Überlappstoß wird mit der örtlichen Leistungsmodulation bei gleichbleibender, dem Prozess bereitgestellter Energie (konstante Laserleistung und Vorschubgeschwindigkeit) eine Erhöhung des stromtragenden Anbindungsquerschnitts angestrebt. Mit Hilfe von in-situ Durchstrahlversuchen mit Synchrotronstrahlung wird die Durchmischung der Werkstoffe während des Prozesses beobachtet. Für die funktionsorientierte Analyse der Verbindungen werden die Proben dynamisch,

thermisch sowie elektrisch belastet und anhand der quantifizierbaren Messgrößen Übergangswiderstand und Zugfestigkeit ausgewertet. Ziel ist eine Schweißverbindung, die den Belastungen widersteht und eine möglichst geringe Veränderung der beiden Messwerte aufweist. Die resultierende, maßgebliche Messgröße mit Bezug zur Durchmischung der Werkstoffe ist die Einschweißtiefe, deren Messung in Kapitel 6 mit zwei Ansätzen erarbeitet wird. Optische Kohärenztomographie ermöglicht eine Messung der Dampfkapillartiefe, während eine spektrometrische Analyse der Prozessemissionen indirekt einen Rückschluss auf die Durchmischung und Einschweißtiefe im unteren Fügepartner eines Überlappstoßes zulässt.

Wie einleitend dargestellt besteht ein Bedarf an Aluminium-Kupfer-Verbindungen in der Batterietechnik. Diese Arbeit führt eine funktionsorientierte, fügetechnische Prozessentwicklung für den Einsatz von Aluminium-Kupfer-Verbindungen in einer automatisierten Produktion durch. Die Zielgrößen der Arbeit lassen sich mit Bild 3 zusammenfassen.

Bild 3:  
Zusammenhang von  
Prozess-, Stör-, und  
Messgrößen



Das Analysedreieck besteht dabei aus Prozess-, Stör- und Messgrößen. Auf die Schweißverbindung wirken Störgrößen, deren Einfluss mit Hilfe der Messgrößen beschrieben werden kann. Auf Basis der Messgrößen können die Prozessgrößen beeinflusst werden, sodass die negativen Auswirkungen der Störgrößen auf die Verbindungsqualität reduziert und die Ziele erreicht werden.