

1 Einführung

1.1 Einleitung und Motivation

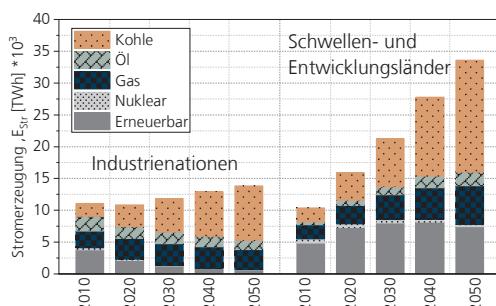
Globale Entwicklungen wie der Klimawandel und die Urbanisierung führen zu gesellschaftlichen Herausforderungen, für die neue und innovative Lösungen in der Elektromobilität und dem Energiesektor nötig sind. Durch strengere Abgasnormen und die steigende Sensibilität der Bevölkerung bezüglich dieser Themen, ist die Entwicklung neuer Mobilitätskonzepte und Energiespeicher von großer Wichtigkeit. Im gleichen Maße müssen diese neuen Technologien auch ökonomisch und technologisch konkurrenzfähig zu aktuellen sein.

Eine Schlüsselrolle spielt dabei die Elektrifizierung des Straßenverkehrs, um lokal geringere Abgas- und Geräuschemissionen zu erreichen. In aktuellen Entwicklungsprojekten werden dafür gezielt Batteriespeichersysteme weiterentwickelt. Ziel dabei ist, Fahrzeuge mit höherer Leistung und Energiedichte als zum heutigen Zeitpunkt zu ermöglichen [TH17, S.4]. Parallel wird der Einsatz von Hochleistungselektronik auf Basis von Kupferverbindern für die mobile Anwendung unverzichtbar, da diese eine hohe elektrische Leitfähigkeit und somit minimale Verluste garantieren.

Zu den zuvor genannten Trends zeigt eine Studie der Internationalen Energie Agentur in Bild 1, dass beim Wandel von fossilen hin zu erneuerbaren Energieträgern besonders die heutigen Schwellen- und Entwicklungsländer eine entscheidende Rolle spielen.

Bild 1:
Energie- und
Ressourcenbedarf
für elektrische
Anwendungen im
Energie- und
Automobilsektor bis
2050

[IEA21, S. 163, 39]



Diese werden bis zum Jahr 2050 einen mehr als doppelt so hohen Strombedarf haben als die heutigen Industrienationen. Zur Deckung dieses Bedarfs muss, zur

Einhaltung von Umweltstandards, bereits frühzeitig auf den Einsatz erneuerbarer Energieträger gesetzt werden. Um diese Technologien attraktiv für heutige Märkte zu gestalten, müssen diese ökonomisch rentabel sein. Preisgetriebene Marktpenetration kann, neben einer Subventionierung, auch durch kostengünstige Produkte erzielt werden. Lösungsansätze hierfür sind beispielsweise die Reduktion der Material- als auch Produktionskosten. Wobei dies in der gesamten Wertschöpfungskette von großer Wichtigkeit ist. Im Sinne einer modernen und effizienten Kreislaufwirtschaft müssen die Menge an eingesetzten Materialien reduziert, die Fertigungseffizienz und -qualität gesteigert und der Ausschuss in der Produktion minimiert werden. Die dafür erforderlichen Materialbearbeitungsprozesse müssen höchste Reproduzierbarkeit und Qualität aufweisen.

In der Produktion der Elektromobilitätskomponenten ist die Lasermaterialbearbeitung eine der Schlüsseltechnologien zum Erreichen dieser Ziele. Laserstrahlquellen werden dabei sowohl für das Zuscheiden der Materialien, die Fertigung der Zellgehäuse und die Kontaktierung der elektrischen Verbinder an die Batteriezellen verwendet. Besonders für die Kontaktierung einzelner Zellen zu Modulen und Packs ist das Laserstrahlschweißen hinsichtlich Prozesszeit, Automatisierbarkeit und dem elektrischen Widerstand der Zellverbinder von Vorteil. [SCH15, S.44] [HÜG09, S.15] Beim Laserstrahlschweißen sind Laserstrahlquellen mit einer Laserstrahlwellenlänge im nahen Infrarotbereich (1030-1070 nm) heutiger Stand der Technik. In diesem Wellenlängenbereich liegt der Grundabsorptionsgrad der Laserstrahlung auf den verwendeten Kupferwerkstoffen im Bereich von < 5%. Durch die Entwicklung hochleistungsfähiger Laserstrahlquellen im Bereich der grünen Laserstrahlwellenlänge (515 nm - 532 nm), wird die Materialbearbeitung mit einem Grundabsorptionsgrad von 50-60% ermöglicht [HEB12, S.13]; [ENG15, S.9]. Dieser grundlegende Unterschied kann für die Entwicklung neuer Fertigungsprozesse für die Bearbeitung von Kupferwerkstoffen genutzt werden [KAI14b, S.6]. Dadurch besteht das Potential, energieeffizientere und kostengünstigere Laserstrahlschweißprozesse, im Vergleich zum Stand der Technik, zu entwickeln.

Die bei Lasermaterialbearbeitungsprozessen auftretenden Prozesswechselwirkungen, sind in Bild 2 anhand eines Prozessdiagramms aufgezeigt. Der Überblick in Bild 2 ermöglicht die in der Literatur gängig diskutierten Einflussfaktoren und zu untersuchenden Phänomene übersichtlich darzustellen und in Zusammenhang zu bringen.

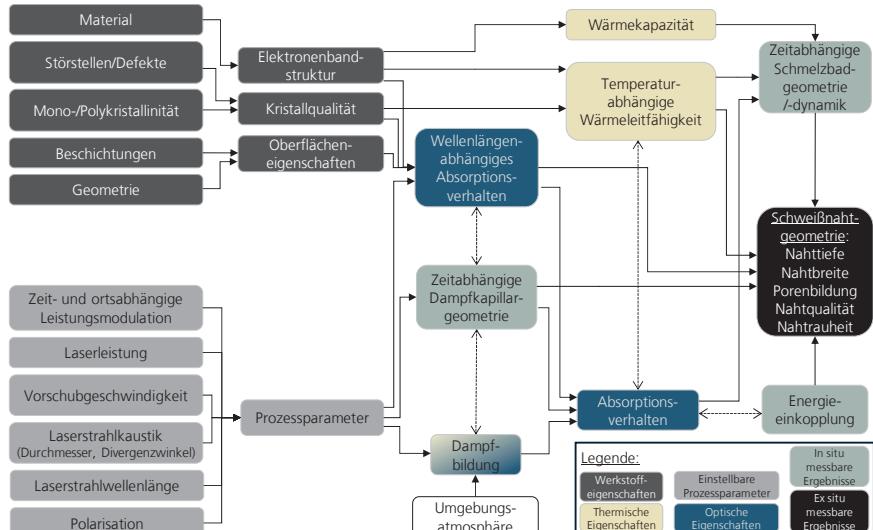


Bild 2: Wechselwirkung zwischen Material- und Prozessgrößen beim Laserstrahlschweißen metallischer Werkstoffe
Nach: [BER08, S.22]; [HEL22, S.14]; [POP05, S.14]; [ENG15, S.8]; [HÜG22, S.310]

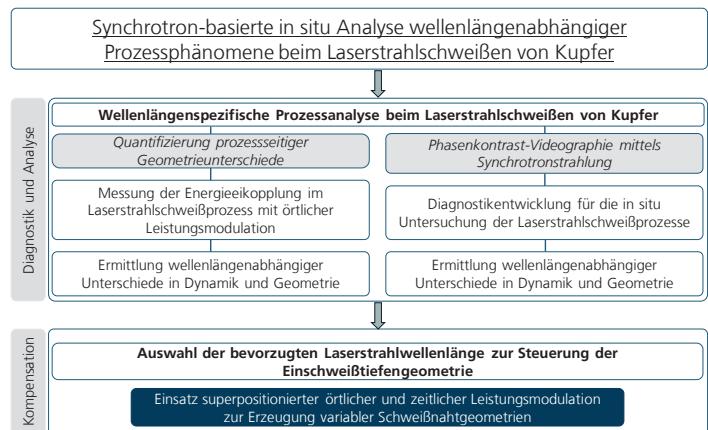
Die beiden Haupteinflussfaktoren sind dabei auf der einen Seite der Werkstoff und dessen physikalische Beschaffenheit, auf der anderen Seite stehen die Prozessparameter, mit denen der Werkstoff bearbeitet wird. Eine trennscharfe, alleinstehende Betrachtung dieser beiden Bereiche ist nicht möglich. Vielmehr muss die Wechselwirkung auf Basis der auftretenden Prozessphänomene immer in Bezug auf deren gegenseitige Beeinflussung betrachtet werden.

1.2 Aufbau der Arbeit

Diese Arbeit behandelt das Thema der Energiesektortransformation aus dem fertigungstechnischen Blickwinkel des Laserstrahlschweißens. Dafür wird die Weiterentwicklung des Laserstrahlschweißens für die Bearbeitung von Kupfer adressiert. Diese Entwicklung wird ausgerichtet mit dem Ziel wichtige Qualitätsmerkmale der Schweißnaht, wie die Einschweißtiefensteuerung und die Porosität, zu verstehen und gezielt zu beeinflussen. Anhand dieser Größen werden Parametereinflüsse quantifizierbar gemessen und für den Einsatz bei der Bearbeitung von Kupferwerkstoffen bewertet. Die gewonnenen Erkenntnisse werden abschließend genutzt, um die zuvor genannten qualitätsbestimmenden Merkmale zu verbessern.

Für die grundlegende Möglichkeit präziser Analysen wird eine hochdynamische Prozessvisualisierung im ersten Schritt der Arbeit definiert und für die *in situ* Anwendung beim Laserstrahlschweißen von Kupfer optimiert (Kapitel 4). Diese basiert auf dem Einsatz kohärenter Röntgenstrahlung (Synchrotronstrahlung) zur Nutzung von Interferenzeffekten in Form der sogenannten Phasenkontrast-Bildgebung. Daran anschließend werden im Rahmen der Untersuchungen die prinzipiellen, metallographischen Unterschiede in Schweißnähten, gefertigt mit 515 nm und 1030/1070 nm Laserstrahlwellenlänge, untersucht (Kapitel 5.1). Diese Unterschiede werden mittels des Einsatzes von Synchrotronstrahlung am Speicherring Petra 3 des Deutschen Elektronen-Synchrotrons in Hamburg detailliert visualisiert und analysiert (Kapitel 5.2 und 5.3). Die Ursache für unterschiedliche Dynamiken im Schweißprozess soll dadurch erklärt werden. Im letzten Schritt werden die Eigenschaften der jeweiligen Laserstrahlwellenlänge bei der Bearbeitung von Kupfer und Kupferbasislegierungen aufgezeigt. In Bild 3 ist der strukturelle Aufbau der Arbeit dargestellt.

Bild 3:
Struktur und Aufbau
der Arbeitsinhalte



Im letzten Schritt werden die gewonnenen Erkenntnisse genutzt, um eine Verbesserung der Einschweißtiefenkonstanz beim Einsatz von örtlicher und zeitlicher Leistungsmodulation zu erreichen und eine Steuerung der Einschweißtiefe zu ermöglichen (Kapitel 6.1). Die Methodik wird abschließend beim Schweißen von artungleichen Materialkombinationen von Kupfer und Edelstahl im Stumpfstoß demonstriert (Kapitel 6.2).

Die Aufteilung der Arbeit orientiert sich an einer dreistufigen Herangehensweise, welche unterteilt ist in die Analyse, das Verstehen und die finale Steuerung. Folgende Schritte stehen in den jeweiligen Teilen im Fokus der Betrachtung:

- **Analysieren:** Die Analyse von wellenlängenabhängigen Prozessphänomenen bildet die Grundlage für die präzise Prozessentwicklung. Für die Ermittlung von Prozessparametereinflüssen beim Schweißen mit 515 nm und 1030-1070 nm Laserstrahlwellenlänge auf Kupferbasislegierungen werden grundlegende Unterschiede metallographisch bewertet.
- **Verstehen:** Die ermittelten, grundlegenden Unterschiede im Prozess zwischen den beiden Laserstrahlwellenlängen werden mittels Phasenkontrast-Bildgebung im Synchrotron verglichen, um Lösungsansätze abzuleiten und bestehende Laserstrahlschweißprozesse weiterzuentwickeln.
- **Steuern:** Abschließend werden die Eigenschaften der jeweiligen Laserstrahlwellenlänge gegenübergestellt und für den Einsatz zur Steuerung der Einschweißtiefe entsprechend eingesetzt.

Bei den Betrachtungen dienen Einschweiß-/Dampfkapillartiefe, Einschweißtiefen-/Dampfkapillartiefenkonstanz, Schweißnahtbreite, Kapillarfrontwinkel und die Position des Laserstrahls zur Kapillarfrontwand als messbare Größen.