

1 Einleitung

1.1 Motivation und Problemstellung

Der seit Jahren anhaltende Trend zur Miniaturisierung, Parallelisierung und Diversifizierung stellt die Mikrosystem- und Kunststofftechnik vor vielfältige Herausforderungen. Ein prominentes Beispiel sind Lab-on-a-Chip (LoC) Systeme auf Kunststoffbasis, welche teure labordiagnostische Systeme auf einem Chip vereinen. Bekannte Anwendungsbeispiele sind Blutzuckermessgeräte oder Antikörpertests. Das Herzstück eines LoC ist die mikrofluidische Plattform, welche die Filterung, Mischung und Transport von kleinsten Flüssigkeitsmengen bis in den Pikoliter-Bereich ermöglicht. Die Vorteile eines solchen miniaturisierten Analysegeräts sind immens. Die einfache Transportmöglichkeit erlaubt eine vor Ort Testung in Gegenden, in denen keine oder nur eine unzureichende Laborinfrastruktur vorhanden ist wie z.B. in Krisengebieten oder in Entwicklungsländern. Aufgrund ihrer hohen Komplexität bestehen diese Bauteile oftmals aus mehreren Komponenten, welche mittels Fügeverfahren verbunden werden. [1–3]

Klassische Fügeverfahren in der Kunststofftechnik sind z.B. das Ultraschall-, Heizelement- oder Reibschweißen. Für die Verkapselung hochsensitiver und komplexer Bauteile wie z.B. elektronischer Komponenten stoßen diese Verfahren an ihre technologischen Grenzen. Gefordert ist eine Fügetechnik, welche eine gezielte, reproduzierbare und berührungslose Aufschmelzung des Materials ermöglicht. Hierdurch werden mechanische Spannungen im Bauteil verhindert und das umliegende Material wird thermisch nicht belastet. Aufgrund des hochpräzisen und berührungslosen Energieeintrags bietet sich in solchen Fällen das Laserdurchstrahlschweißen (LDS) an. Bedingt durch die Entwicklung kostengünstiger Diodenlaser konnte sich das LDS seit seiner Einführung in den 90er Jahren in Forschung und Industrie etablieren. Die Verschweißung erfolgt in der Regel in Überlappanordnung: der Laserstrahl durchdringt den oberen transparenten Fügepartner und wird im unteren absorbierenden Fügepartner absorbiert. Das Absorptionsverhalten kann durch die Zugabe von Absorbermaterialien wie z.B. Ruß induziert werden. Durch die Absorption der Laserstrahlung kommt es zu einer Temperaturerhöhung im bestrahlten Bereich des unteren Fügepartners, wodurch dieser aufgeschmolzen wird. Über Wärmeleitung wird der obere Fügepartner ebenfalls aufgeschmolzen und die Schweißnaht entsteht nach der Erstarrung der Schweißnaht. [4–7]

In Anwendungsbereichen wie der eingangs vorgestellten LoC Technologie oder weiteren Produkten aus der Medizin- oder Verpackungstechnik ist die Nutzung eines Absorbermaterials oftmals unerwünscht oder gar unzulässig. Gründe

hierfür sind, dass die in diesen Bereichen verwendeten Kunststoffe eine hohe Transparenz aufweisen müssen, wie z.B. Infusionsbeutel oder Lebensmittelverpackungen. Des Weiteren herrschen insbesondere im Bereich der Medizintechnik hohe Anforderungen an die Biokompatibilität der verwendeten Materialien, sodass Absorbermaterialien strengen Zulassungsprozessen unterliegen. Die Anschaffungskosten von speziellen biokompatiblen Absorbermaterialien, welche zudem die Transparenz des Kunststoffs nicht beeinträchtigen, sind deutlich höher als bei klassischen Absorbermaterialien. Insbesondere in großvolumigen Bauteilen führt dies zu hohen Materialkosten. [8, 9]

Einen Lösungsansatz bildet das absorberfreie LDS, welches seit mehr als 10 Jahren am Fraunhofer ILT erforscht und weiterentwickelt wird. Hierbei werden Strahlquellen wie z.B. Thulium-Faserlaser verwendet, welche im natürlichen Absorptionsbereich (der sog. „intrinsicen Absorption“) der Kunststoffe Strahlung emittieren. Mit Hilfe dieses Verfahrens ist es möglich, transparente Kunststoffe ohne jegliche Absorbermaterialien zu fügen. Da beide Fügepartner identische optische Eigenschaften besitzen, wird im Gegensatz zum klassischen LDS die auftreffende Laserstrahlung im gesamten bestrahlten Volumen absorbiert. Dies führt zu einer vertikal stark ausgedehnten Wärmeeinflusszone (WEZ), welche sich entlang des gesamten Materialquerschnitts erstrecken kann. Die erhöhte Schmelzebildung führt zu einer höheren thermischen Belastung im Bauteil. Insbesondere bei flachen Bauteilen kann dies zum Verzug, zur Rissbildung und somit zum Ausschuss des Bauteils führen. [9–11]

1.2 Zielsetzung

Das zentrale Ziel dieser Arbeit ist die detaillierte Analyse der Absorptionsvorgänge und der lokalen Energiedeposition in transparenten Kunststoffen. Ein weiterer Bestandteil der Arbeit ist die Entwicklung einer Fügetechnik zur gezielten Aufschmelzung des Kunststoffes in der Fügezone, um eine lokale Begrenzung der WEZ zu erreichen. Durch die Realisierung von komplexen und feinen Nahtgeometrien mit Nahtbreiten zwischen 50 – 400 µm soll die thermische Belastung im Kunststoff gering gehalten werden. Hierfür müssen grundlegende Kenntnisse zum Einfluss der Energiedeposition auf die Ausbildung der WEZ geschaffen werden. Weitere wichtige Anforderungen zur Etablierung des absorberfreien LDS sind die Vermeidung von Schädigungen des Kunststoffes (z.B. Verbrennungen und Rissbildung) sowie die Erzeugung homogener Nahteigenschaften entlang der Schweißkontur.

Als Bestrahlungsstrategien werden sowohl das Konturschweißen (KS) als auch das Quasimultanschweißen (QS) untersucht, welche sich in der Art der Energieeinbringung unterscheiden. Beim KS wird durch den Einsatz kurzbrennweitiger Linsen die zum Aufschmelzen notwendige Schwellintensität

lediglich im Bereich des Fokus überschritten. Beim QS wird der Laserstrahl mit Hilfe eines Scannersystems mehrfach mit hohen Geschwindigkeiten entlang der Schweißkontur geführt. Hierdurch kommt es zu einer Wärmeakkumulation im Materialinneren, während an den Außenflächen des Kunststoffes Wärme abgeführt wird. Ein weiterer zu untersuchender Aspekt dieser Arbeit ist der Einfluss der Gefügestruktur auf die Ausbildung der WEZ. Während die Laserstrahlung in amorphen Kunststoffen nahezu ungehindert passieren kann, findet in teilkristallinen Kunststoffen Lichtstreuung statt, welche wiederum die Energieeinbringung und folglich die Ausbildung der WEZ beeinflusst. Die folgende Abbildung (s. Bild 1) stellt die unterschiedlichen Mechanismen der Energiedeposition beim KS und QS gegenüber.

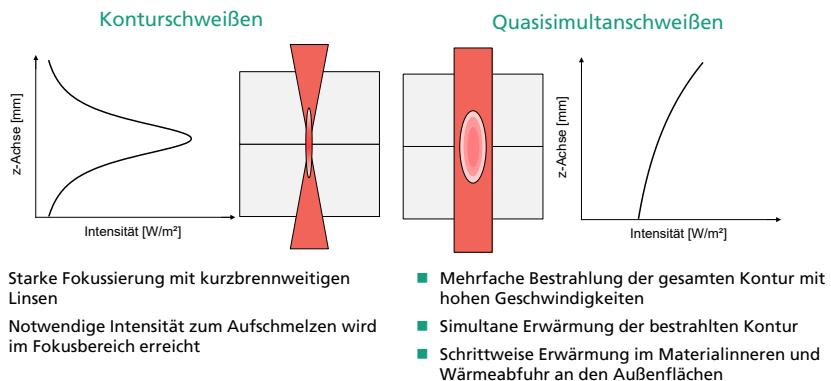


Bild 1: Die unterschiedlichen Mechanismen der Energiedeposition beim KS und QS.

Zusammengefasst sollen in dieser Arbeit drei zentrale Forschungsfragen beantwortet werden:

- Wie kann beim LDS von absorberfreien Kunststoffen die Strahlungsenergie in der Fügezone gezielt lokal deponiert werden und durch die Variation welcher Einflussgrößen wird dies erreicht (siehe Kapitel 3.6 und 4.6)?
- Welchen Einfluss hat das Materialgefüge auf die Energiedeposition und die Ausbildung der WEZ beim absorberfreien LDS (siehe Kapitel 3.5)?
- Wie kann die Nahtqualität zerstörungsfrei überwacht und sichergestellt werden und welche Voraussetzungen müssen hierfür erfüllt werden (siehe Kapitel 5.4 und 6.5)?

Die folgende Abbildung (s. Bild 2) zeigt die schematische Zielsetzung der Arbeit im Vergleich zum Stand der Technik.

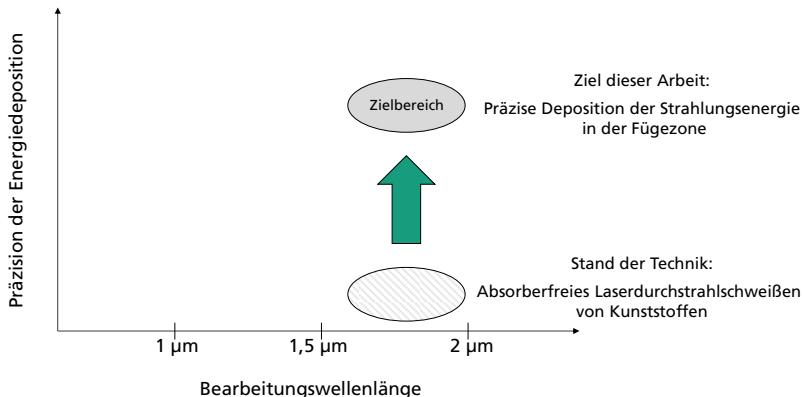


Bild 2: Schematische Zielsetzung dieser Arbeit im Vergleich zum Stand der Technik hinsichtlich der Präzision der Energiedeposition beim absorberfreien LDS.

1.3 Aufbau der Arbeit

Der Aufbau dieser Arbeit ist in Bild 3 dargestellt. In Kapitel 2 wird der Stand der Forschung und Technik beim LDS von Kunststoffen vorgestellt. Dabei wird zunächst auf das klassische LDS mit Absorbereinsatz eingegangen. Insbesondere werden hier die Nachteile des Absorbereinsatzes behandelt. Als neues Fügeverfahren wird das absorberfreie LDS vorgestellt, bei dem Strahlquellen verwendet werden, welche im intrinsischen Absorptionsbereich der Kunststoffe Strahlung emittieren. Der Einfluss der Volumenabsorption auf die Ausbildung der WEZ wird diskutiert.

In Kapitel 3 wird die Temperaturverteilung beim absorberfreien KS und QS mit Hilfe der Finiten Elemente Methode (FEM) simuliert. Das Simulationsmodell erlaubt einen Einblick in die Temperaturverteilung und -entwicklung im Materialinneren während des Schweißprozesses, welche sonst mit Kamerasystemen nicht erfassbar sind. Des Weiteren wird der Einfluss der Intensitätsverteilung sowie weiterer Faktoren auf die resultierende Temperaturverteilung untersucht. Ein wichtiger Aspekt ist die Berücksichtigung der Lichtstreuung in teilkristallinen Kunststoffen auf den Schweißprozess.

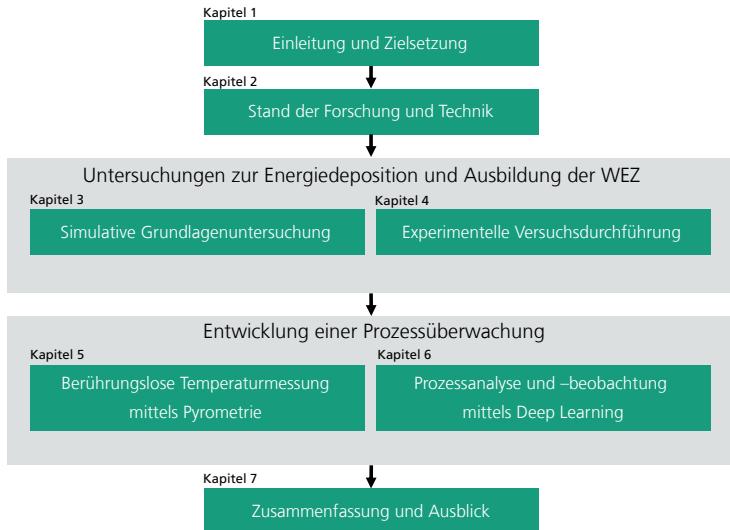


Bild 3: Aufbau und Vorgehensweise der Arbeit.

Im experimentellen Teil der Arbeit (Kapitel 4) findet eine Bewertung des Simulationsmodells statt. Des Weiteren wird beispielhaft das QS unter bauteilspezifischen Aspekten untersucht. Der Einfluss der notwendigen Mindestwechselwirkungszeit zwischen Laserstrahlung und Material für eine Aufschmelzung wird untersucht. Im Anschluss findet ein Verfahrensvergleich statt, bei dem die jeweiligen Vor- und Nachteile der Verfahren gegenübergestellt werden.

Im Rahmen dieser Arbeit werden zwei Ansätze zur Prozessüberwachung untersucht und vorgestellt. Die pyrometrische Prozessüberwachung (Kapitel 5) wird am Beispiel des QS vorgestellt. Durch die feinen Nahtgeometrien wird lediglich Wärmestrahlung im Bereich 10^{-9} W emittiert. Die Berechnung der emittierten Wärmestrahlung beim LDS wird in Kapitel 5.2 vorgestellt. Die Herausforderung besteht in einer möglichst verlustfreien Detektion der Wärmestrahlung, um ein zuverlässiges Messergebnis zu erhalten. Da die Emissionswellenlänge der beim absorberfreien LDS verwendeten Strahlquellen ferner im Messbereich des verwendeten Pyrometers liegt, wird der Laser gepulst betrieben, während die Temperaturmessung zwischen den Laserpulsen durchgeführt wird. In Kapitel 6 wird für das KS eine Prozessanalyse und -beobachtung mittels Deep Learning Algorithmen vorgestellt, welche ein

Einleitung

Teilgebiet der Künstlichen Intelligenz (KI) darstellen. Bei dem als Semantische Segmentierung bekannten Verfahren werden Anomalien wie z.B. Verbrennungen oder Blasenbildungen während des Schweißprozesses erkannt und klassifiziert.

In Kapitel 7 werden die zentralen Aspekte zusammengefasst und es wird ein Ausblick auf weitere zu untersuchende Fragestellungen gegeben.