

# 1 Einleitung

## 1.1 Motivation

Kunststoffbasierte Produkte sind aus dem heutigen Alltag nicht mehr wegzudenken. Sie finden Anwendung in unterschiedlichen Gebieten wie der Fahrzeugindustrie, der Medizintechnik oder dem Konsumgüterbereich. Viele komplexe Produkte wären technisch oder wirtschaftlich nicht realisierbar ohne den Einsatz von Kunststoffen und deren Verarbeitung. Der weltweite Kunststoffverbrauch ist in den vergangenen Jahrzehnten stark angestiegen [Pla18]. Insbesondere durch Trends wie Leichtbau oder Ressourceneffizienz wird der Bedarf weiter steigen [lgb14]. Aus den Eigenschaften der Kunststoffe ergibt sich ein hohes Gestaltungspotential. Kunststoffe sind leicht und durchlässig. Sie besitzen eine niedrige Leitfähigkeit, sind beständig gegenüber Chemikalien und wiederverwertbar. Zu den Vorteilen von Kunststoffen gehört, dass sie sich gut verarbeiten lassen und es durch das Einbringen von Additiven möglich ist, ihre Eigenschaften gezielt zu verändern.

Die meisten kunststoffbasierten Produkte setzen sich aus mehreren Einzelteilen zusammen, die aus verschiedenen Kunststoffen gefertigt werden. Die geometrische Komplexität des Produktes und der Einsatz unterschiedlicher Kunststoffe innerhalb eines Produktes erlaubt es bisher nicht, dieses in einem einzigen Umformprozess herzustellen. Eine wesentliche Herausforderung ist die Art und Weise des Zusammenfügens der Einzelteile zum Gesamtprodukt. Die Beschaffenheit der Verbindung entscheidet beispielsweise wesentlich darüber, ob das Produkt dicht bleibt oder bspw. Wasser eindringen kann und dadurch z.B. die in das Gesamtteil integrierte Elektronik beschädigt wird.

Das Verbinden der Einzelteile zum Gesamtkonstrukt erfolgt mit Fügetechnik. In der Produktion hat die Fügetechnik einen hohen Stellenwert. Sie trägt maßgeblich zur Wertschöpfung in Deutschland bei [WV12]. Eine der wichtigsten Fügetechniken ist das Laserdurchstrahlschweißverfahren (LDS). Es bietet einerseits wirtschaftliche Vorteile in der Produktion. Seine hohe Flexibilität erlaubt z.B. kurze Taktzeiten. Es hat zum anderen entscheidende technologische Vorteile. Die erzeugten Schweißnähte sind optisch hochwertig, das Schweißen ist partikelfrei und die Bauteile werden durch den Laserenergieeintrag nur geringfügig und lokal thermisch belastet.

Eine wesentliche Herausforderung beim LDS besteht in der Anpassung des Verfahrens an neue Materialien, die Entwicklung einer optimalen schweißtechnischen Lösung für diese sowie der Kontrolle des Fügeprozesses. Die Laserprozesse sind bei bekannten Materialien zwar sehr stabil und bestehende Überwachungsmethoden (z.B. Pyrometer-basierte Methoden oder Fügewegüberwachung) liefern sehr gute Resultate beim Fügen von Kunststoffen, jedoch besteht bei der Online-Qualitätssicherung - dem nicht-invasiven und nicht-destructiven Überwachen des laufenden Prozesses und dem damit verbundenen Eingreifen zur Korrektur von Prozessparametern - nach wie vor erhöhter Forschungsbedarf. Dieser betrifft die Handhabung von Prozessunsicherheiten, wie z.B. herstellungsbedingte Materialschwankungen, Degradation von Prozesskomponenten oder Umwelt- und Bediener-

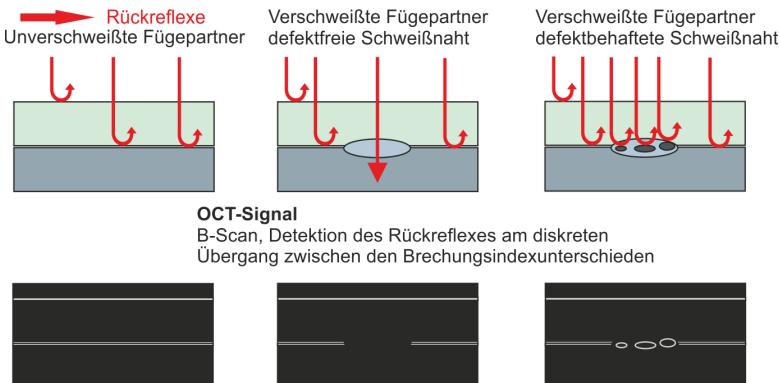
einflüsse. Der Einsatz adäquater Messtechnik bietet ein hohes Potential, um Prozessunsicherheiten zu minimieren und ggf. bislang nicht in Betracht gezogene Parameter zu überwachen.

Die oben beispielhaft genannten Überwachungsmethoden (z.B. Pyrometer-basiert oder Fügewegüberwachung) haben einen entscheidenden Nachteil. Sie liefern zwar Informationen zum Prozessablauf und zu den Prozessparametern, die eigentliche Überwachung der erzeugten Schweißnaht ist mit ihnen aber nicht möglich, da sie keine geometrischen Informationen über den Fügeprozess liefern. Hierzu muss - je nach Lage der erzeugten Schweißnaht - das Materialinnere tomographisch geprüft werden, was mit vielen Prüfmethoden physikalisch nicht realisierbar ist. Computer Tomographen bieten hierzu zwar die nötige Umsetzungsmöglichkeit, sind aber im regulären Einsatz als Prozessüberwachung zu aufwändig bzw. ermöglichen nicht die Integration in bestehende Laseranlagen für Online-Messungen. Sie erfordern daher einen separaten und nachgelagerten Messeinsatz. Um den Blick ins Materialinnere zu ermöglichen, wird in der Regel auf destruktive Verfahren zurück-gegriffen. Nachteil der destruktiven Verfahren ist der - je nach Prüfprozess und Prüfart (Stichproben oder 100% Prüfung) - unnötig hohe Ausschuss. Die Produkte sind im Anschluss nicht mehr nutzbar. Dies zeigen auch die Veröffentlichungen in diesem Bereich [KPJ+18, Bmw18, MZKR18]. In der Praxis nutzen Unternehmen das Verfahren daher mehr oder weniger unter der Annahme einwandfrei laufender Prozesse und fehlerfreier Produkte.

Eine andere Möglichkeit des Zugangs zu geometrischen Parametern bieten nicht-destruktive und nicht-invasive Messmethoden, die in Laseranlagen integriert werden und online den Prozess überwachen, d.h. die entstehende Schweißnaht detektieren. Diese Methoden erlauben bisher nicht, die bedarfsweise Anpassung des Prozesses anhand geometrischer Daten während der Online-Überwachung, wodurch Kosten und Ausschuss gesenkt werden können.

Ein vielversprechendes optisches Messverfahren ist die Optische Kohärenztomographie (OCT). Sie basiert auf der Detektion kurzkohärenter Strahlung. Im Messprozess interferieren die von, aus oder an einem Messobjekt gestreute bzw. reflektierte Strahlung, sowie die reflektierte Strahlung aus einem Referenzpfad. Das tomographische Signal liefert nach der Fourier-Transformation des spektralen Reflexions- und Streuprofils eine Tiefeninformation, die Auskunft über Materialgegebenheiten in unterschiedlichen Tiefenabständen liefert [DF15]. Neben der technologischen Bedeutung für die unterschiedlichsten Anwendungsfälle hat die OCT eine wirtschaftliche Relevanz [Bio09, Swa16, Mar09].

Abb. 1.1 zeigt eine schematische Darstellung des OCT-Messprinzips.

**Bild 1.1:** Schematische Darstellung der Signalerzeugung und Detektion von Defekten*Schematic of signal generation and defect detection*

Im biomedizinischen Bereich und bei Life Science-Anwendungen ist OCT bereits heute ein etabliertes Diagnostik-Tool. Die kommerzielle Verbreitung begann schon zu Beginn der 1990er Jahre. Ursprünglich genutzt in der Ophthalmologie, wo es als Diagnosestandard gilt, hat sich das Verfahren inzwischen auch in anderen medizinischen Bereichen etabliert. Der Einsatz in nicht-medizinischen und nicht-biologischen Anwendungen ist bislang deutlich geringer. Ein besonders interessanter, da vielversprechender Anwendungsbereich ist die Qualitätskontrolle transparenter technischer Materialien. In den letzten Jahren zeigt sich verstärkt das Potential dieser Technologie in der Anwendung für NDT (Non-destructive testing). [Sti07] bietet eine Übersicht der OCT-Technologie-Nutzung außerhalb der Biomedizin. [Kaw13] beschreibt verschiedene industrielle Anwendungsgebiete. Diese reichen von Schichtdickenmessungen über Laserstrukturierungen von Oberflächen bis Polymeranwendungen oder die Datierung und Restaurierung von Kunstwerken. In [SM13] wird der Einsatz von OCT-Verfahren zur Überwachung von Laserstrukturierverfahren beschrieben. Das Verfahren wird bereits kommerziell von Firmen wie Precitec oder Lessmüller zur topographischen Überwachung von Laserprozessen eingesetzt. Die Lösung hat wirtschaftliche Vorteile, weil sich der Aufwand durch die Nutzung vorhandener Komponenten (z.B. des Scanobjektivs) reduziert. Es gibt bereits eine Reihe von Firmen, die OCT für verschiedene Anwendungen vermarkten oder Komponenten für OCT-Systeme anbieten [Swa16]. [RM17] und [MRF18] liefern eine Marktanalyse, mehrheitlich für medizinische Anwendungen, für die nächsten vier bis sieben Jahre.

Auf den Ablauf des Laserprozesses können sich unterschiedliche Parameter auswirken. Generell gilt, dass geometrische Parameter wie etwa Materialoberfläche oder -beschaffenheit, Schweißnaht- oder Bauteilgeometrie bislang nicht erfasst und zur Prozessüberwachung herangezogen werden. Gerade diese können aber bei entsprechender Auswertung eine qualitative Aussage liefern, d. h. eine Höheninformati-

on, die eine Aussage über das Vorhandensein eines Defekts trifft, und damit ermöglicht, nach Rückspeisung der Daten in den Prozess diesen anzupassen.

Bei der Nutzung der OCT als prozessüberwachendes Messsystem ist die Integration in die Laseranlage ein entscheidender Faktor. Die optische Kopplung erfolgt im Laserkopf mittels eines dichroitischen Spiegels. Hierbei werden die Bearbeitungslaserstrahlung sowie der Messstrahl überlagert und auf das Bauteil geführt.

## 1.2 Forschungsansatz

Die Nutzung von OCT als nicht-destructive in den Prozess integrierte Prozessüberwachungsmethode ermöglicht die Generierung qualitativer Informationen zur entstehenden Schweißnaht. Die Anwendung des Verfahrens im laufenden Prozess soll die Detektion möglicher Fehlstellen, Prozess- oder Materialfehler erlauben und dadurch einen direkten Einblick in den Prozess gewähren.

Die übergeordnete Forschungsfrage, welche in dieser Dissertation beantwortet werden soll, lautet: „Kann ein optisches, kurz-kohärentes tomographisches Messsystem zur Überwachung von LDS-Prozessen dienen und diese dadurch verbessern?“ Um diese Fragestellung zu behandeln, werden folgende Teilfragen Berücksichtigung finden:

- Welche messbaren Indikatoren (geometrisch-beobachtbare Parameter) sind zur Überwachung und Regelung von LDS-Prozessen notwendig? Indikatoren sind beispielsweise Defekte in der Schweißnaht oder die Eindringtiefe ins Material
- Wie muss ein OCT-System aufgebaut sein, um die Anforderungen zur Überwachung von LDS-Prozessen zu erfüllen

Zur gezielten Beantwortung der aufgeworfenen Forschungsfrage wird die Forschungsmethodik von Ulrich angewendet [UDP84]. Die vorliegende Arbeit hat einen klaren Bezug zur Praxis. Der Prozess beginnt und endet in der Praxis und dem Anwendungszusammenhang. Der Aufbau der Dissertation nach der Forschungsmethodik von Ulrich ist in Tab. 1 dargestellt. Hier wird eine Gegenüberstellung bzw. Anwendung des Forschungsprozesses auf die einzelnen Kapitel der Dissertation vorgenommen.