

1 Einleitung und Zielsetzung

Keine andere Werkstoffgruppe erlaubt es, die an ein Produkt gestellten Anforderungen hinsichtlich Form und Funktion so gut zu erfüllen, wie Kunststoffe. Sie lassen sich schnell und kostengünstig in nahezu jede beliebige Form bringen und verfügen zudem über ein breit einstellbares Eigenschaftsspektrum [1]. Wurden Kunststoffe anfangs für eher einfache Produkte eingesetzt, konnten durch die Entwicklung immer leistungsfähigerer Polymere stetig neue Anwendungsfelder erschlossen werden, die zuvor klassischen Konstruktionswerkstoffen wie den Gläsern oder Metallen vorbehalten waren. Heutzutage umfasst das Einsatzspektrum von Kunststoffen nahezu jeden Lebensbereich und reicht vom Verpackungsmaterial, über Freizeit- und Haushaltsartikel bis hin zu Hightech-Anwendungen in der Luft- und Raumfahrt [2].

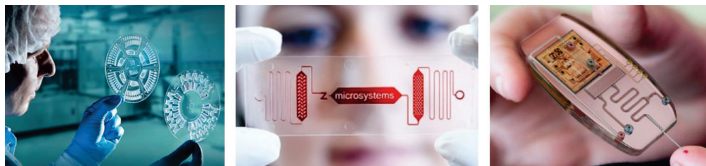
Um die gewünschte Beschaffenheit zu erhalten, werden insbesondere im technischen Bereich viele Kunststoffprodukte modular, d.h. durch die Zusammenführung mehrerer Komponenten, hergestellt. Auf diese Weise lassen sich im Bauteilinneren Elektronikkomponenten einfassen oder Bauteilgeometrien realisieren, die durch Urformprozesse allein nicht möglich sind. Die Herstellung erfolgt in dem Fall durch das Zusammenfügen separat hergestellter Komponenten. Dazu stehen dem Anwender diverse Fügeverfahren zur Auswahl, deren individuelle Eignung von wirtschaftlichen sowie bauteilspezifischen Anforderungen abhängt [3].

Das Schweißen zählt in der industriellen Fertigung zu den wichtigsten Fügeverfahren für Kunststoffteile und kommt insbesondere dort zum Einsatz, wo eine dauerhafte und mediendichte Verbindung zwischen den Fügepartnern gefragt ist [4]. Ein Verfahren, das sich in den letzten beiden Jahrzehnten in zahlreichen Industriezweigen etablieren konnte, ist das Laserdurchstrahlschweißen. Obwohl der Einsatz von Laserstrahlung zum Schweißen von Kunststoffen bereits Ende der 60er erstmalig Erwähnung fand, gelang es erst mit der Erfindung des Durchstrahlverfahrens im Jahr 1985, Laserstrahlung so einzusetzen, dass sich daraus gegenüber konventionellen Fügeverfahren wie dem Ultraschall- oder Heizelementschweißen Vorteile ergaben [5]. Die Möglichkeit den Fügebereich präzise, schwingungs- und partikelfrei zu erwärmen, bot neue Perspektiven und rückte das Laserdurchstrahlschweißen schnell in den Fokus der Forschung.

Begünstigt durch die Markteinführung effizienter sowie kostengünstiger Hochleistungsdiodenlaser, entwickelte sich das Verfahren rasant und überschritt bereits nach wenigen Jahren die Schwelle zum industriellen Serieneinsatz [6, 7]. Seitdem hat es sich in vielen Bereichen erfolgreich etablieren können, nicht zuletzt aufgrund der hohen optischen Nahtqualität, den kurzen Taktzeiten, dem großen Automatisierungspotential sowie den vielfältigen Möglichkeiten der Prozessüberwachung [8, 9].

Namensgebend für das Laserdurchstrahlschweißen ist die Tatsache, dass eines der beiden zu fügenden Bauteile durchstrahlt wird, während das andere Teil die Strahlungsenergie aufnimmt. Dazu müssen sich die optischen Eigenschaften beider Fügeteile voneinander unterscheiden. Entsprechend ist die Grenze des Verfahrens dann erreicht, wenn optisch gleiche Kunststoffe miteinander zu fügen sind. Ein Anwendungsfeld, in dem diese Anforderung häufig anzutreffen ist, sind sogenannten Lab-on-a-Chip-(LoC)-Applikationen. Es handelt sich dabei um miniaturisierte Analyseeinheiten, die Funktionen teurer Laborgeräte auf dem Format einer Kreditkarte abbilden (Bild 1).

Bild 1:
Beispiele für Lab-on-a-Chip-Bauteile,
Quellen: Hahn-Schickard (links), z-microsystems (mitte), imec (rechts)



Besonders in den letzten Jahren hat der Markt für LoC-Anwendungen ein beeindruckendes Wachstum erfahren, das noch lange nicht am Ende zu sein scheint. Experten gehen davon aus, dass der Markt in den kommenden Jahren durchschnittlich um ca. 12% weiter wachsen und im Jahr 2024 ein Volumen von über 17 Mrd. Dollar erreichen wird [10]. Treibende Kraft dieser Entwicklung sind vor allem patientennahe Schnelltests für die In-vitro Diagnostik, die die LoC-Technologie nutzen, um entnommene Proben direkt am Patientenbett zu analysieren und das Ergebnis binnen weniger Minuten bereitzustellen. Auch in der Wirkstoffforschung, der Biotechnologie, der Luft- und Wasserqualitätsüberwachung oder der Dopingkontrolle halten die handlichen Schnelltests zunehmend Einzug, so dass in Zukunft mit einer breiten Nutzung der LoC-Technologie zu rechnen ist [11, 12].

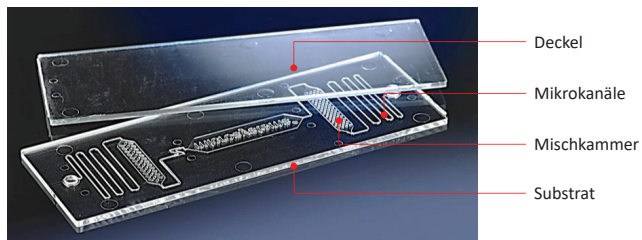
Die Vorteile dieser „Westentaschenlabore“ liegen auf der Hand. Sie vereinfachen durch ihre geringe Größe nicht nur die Handhabung, sondern erlauben es auch Probenvolumina und damit Kosten für teure Reagenzien zu reduzieren. Kleine Probenvolumina lassen sich schnell vermischen oder thermisch konditionieren und verkürzen dadurch die Reaktions- bzw. Analysezeiten gegenüber konventionellen Laborgeräten signifikant. In den feinen Kanälen der LoC-Systeme können oftmals Kapillarkräfte ausgenutzt werden, um Flüssigkeiten passiv zwischen verschiedenen Kammern zu transportieren. Die Strömungsverhältnisse sind in der Regel laminar, so dass die im Bauteil ablaufenden Reaktionen unter definierten Bedingungen stattfinden [13, 14].

Um das Potential der LoC-Technologie nutzen zu können, bedarf es geeigneter Herstellungsverfahren, die eine wirtschaftliche Fertigung im industriellen Maßstab erlauben. Nach wie vor werden viele LoC-Bauteile aus Glas hergestellt, weil der Werkstoff über ausgezeichnete Eigenschaften verfügt und seine Bearbeitungsverfahren, von denen viele ihren Ursprung in der Halbleiterherstellung haben, als praxiserprobt und beherrscht gelten [15]. Für eine wirtschaftliche Massenfertigung sind diese Verfahren jedoch insbesondere vor dem Hintergrund, dass viele potentielle LoC-Anwendungen Einwegartikel sind, oft zu kostenintensiv und damit nur bedingt geeignet [16]. Kunststoffe bieten der kommerziellen Produktion aufgrund ihres Eigenschaftsspektrums und der massentauglichen Replikationsverfahren eine weit-aus günstigere Plattform und kommen in der Herstellung von LoC-Bauteilen daher immer häufiger zum Einsatz [17, 18].

Das Basiselement eines LoC-Bauteils ist das Substrat, auf dem verschiedene Reservoirs und Reaktionskammern durch feine Kanäle miteinander verbunden sind (Bild 2). Zur Erzeugung einer geschlossenen Struktur muss das Substrat zumeist mit einem Deckel oder einer Folie mediendicht versiegelt werden, ohne dabei die Kanäle durch Schmelze oder Klebstoff zu verschließen [19]. Bisher eingesetzte Fügeverfahren stoßen aufgrund des zunehmend komplexeren Aufbaus der LoC-Systeme und der Forderung nach kürzeren Taktzeiten zunehmend an ihre technologischen Grenzen. Auf den ersten Blick scheint das Laserdurchstrahlschweißen mit seinem Eigenschaftsprofil für diese Fügeaufgabe prädestiniert zu sein, wären da nicht die Anforderungen an die optischen Eigenschaften der Fügeteile. Um die Laserstrahlung zu absorbieren, werden dem Kunststoff Zusatzstoffe beigemischt, die in vielen LoC-Anwendungen aus optischen, wirtschaftlichen, biologischen oder technischen Gründen nicht zulässig sind. So werden beispielsweise die Flüssigkeiten im Inneren von LoC-Bauteilen oftmals mit

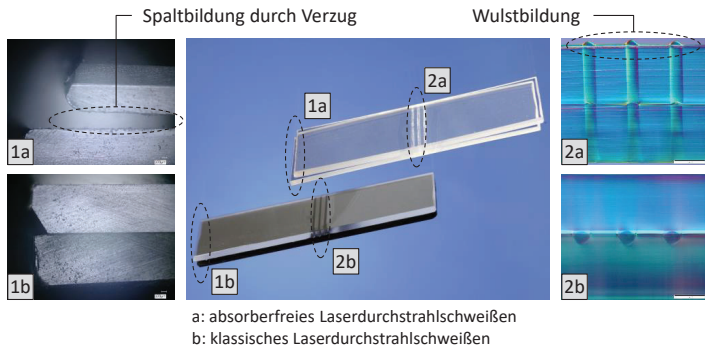
optischen Methoden wie z.B. der Infrarot- oder Fluoreszenzspektroskopie analysiert, die eine vollkommene Transparenz des Bauteilwerkstoffs über einen breiten Spektralbereich erfordern. Der Einsatz absorptionssteigernder Zusatzstoffe ist in dem Fall unzulässig, da er die Transparenz des Kunststoffes erheblich beeinträchtigen würde. Das gilt auch für sogenannte Infrarot-Absorber, deren Absorptionsvermögen auf ein schmales Band begrenzt sind. Da die Laserwellenlängen, auf die diese Absorber abgestimmt sind, typischerweise nah am sichtbaren Spektrum liegen, fällt dieser teilweise in die Absorptionsbande des jeweiligen Absorbers. Die Transparenz des Kunststoffes bleibt damit auch mit Infrarot-Absorbern nie unbeeinträchtigt.

Bild 2:
Grundbausteine eines
LoC-Bauteils, Quelle:
z-microsystems



Eine Möglichkeit, Kunststoffteile ohne Modifikation ihrer optischen Eigenschaften im Durchstrahlverfahren miteinander zu verschweißen, besteht darin, deren intrinsisches Absorptionsvermögen im nahen Infrarot (NIR) durch entsprechende Laserquellen auszunutzen. Dabei stellt sich die Frage, wie die Strahlungsenergie ortsselektiv im Fügebereich deponiert werden kann. Anders als beim Schweißen eines lasertransparenten mit einem laserabsorbierenden Teil, existiert bei zwei optisch gleichen Fügepartnern kein Bereich, in dem die Strahlung bevorzugt absorbiert wird. Die Absorption erfolgt im gesamten Wirkungsbereich der Laserstrahlung, so dass Fügepartner über den gesamten Querschnitt erwärmt werden (Bild 3). Ein solcher Energieeintrag kann aus unterschiedlichen Gründen ungünstig sein. Durch die abnehmende Strahlungsintensität im Kunststoffinneren sind höhergelegene Schichten stets einer höheren Intensität ausgesetzt. Auf der bestrahlten Oberfläche kann somit eine thermische Zersetzung einsetzen, bevor der Kunststoff in der Fügeebene den Schmelzpunkt erreicht. Ferner kann sich der erwärmte Kunststoff zur Oberfläche hin frei ausdehnen und dort einen unerwünschten Wulst bilden (Bild 3, 2a). Dieser beeinträchtigt nicht nur die Form und Optik der bestrahlten Oberfläche, sondern wirkt sich auch auf den Spannungszustand im Bauteil aus, der besonders bei flachen Bauteilen schnell zu Verzug führen kann (Bild 3, 1a).

Bild 3:
Wulstbildung und Verzug beim absorberfreien Schweißen im Vergleich zum konventionellen Laserdurchstrahl-schweißen



Das Ziel dieser Arbeit ist es daher, den klassischen Prozess des Laserdurchstrahl-schweißens so weiter zu entwickeln, das transparente Kunststoffteile ohne Zusatzstoffe sicher und ohne Beeinträchtigung miteinander gefügt werden können. Die wissenschaftlichen Fragestellungen, die es in dem Zusammenhang zu beantworten gilt, sind:

- **Welche prozess- und materialeitigen Faktoren beeinflussen den Energieeintrag?**
- **Wie ist die Wechselwirkung dieser Faktoren bezogen auf die Volumenselektivität des Energieeintrags?**

Bei Erreichen des Ziels stünde ein Verfahren zur Verfügung, das bereits in seiner klassischen Form gegenüber konkurrierenden Fügeverfahren viele prozesstechnische Vorteile aufweist. Durch die Entwicklung einer Prozess- und Anlagentechnik, die keine Zusatzstoffe benötigt, könnte der bislang größte Nachteil des Verfahrens beseitigt und der Einsatz auf Bereiche wie z.B. LoC-Anwendungen ausgeweitet werden, bei denen Zusatzstoffe oftmals nicht zulässig sind. Für die industrielle Akzeptanz der neuen Füge-technik ist die Beherrschung des Prozesses eine wichtige Voraussetzung, die nur durch ein fundiertes Prozessverständnis erreicht werden kann. Dieses soll im Rahmen dieser Arbeit erarbeitet werden. Ferner sollen die Möglichkeiten und Grenzen des Verfahrens aufgezeigt werden, um den potentiellen Anwender bei der Entscheidung unterstützen zu können, ob das Fügeverfahren für seine Applikation geeignet ist.