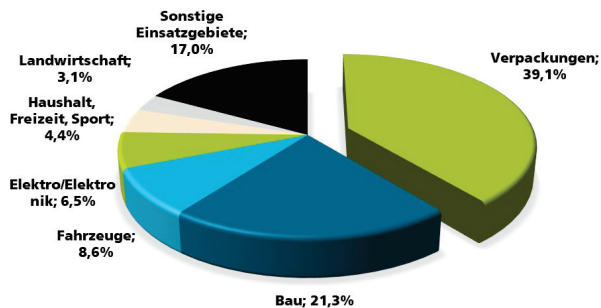


# 1 Einleitung

## 1.1 Motivation

Thermoplastische Polymerfolien sind in einem breiten Spektrum unterschiedlicher industrieller Branchen von großer Bedeutung. Dies reicht von der Lebensmittelindustrie über die Medizintechnik, die Automobilindustrie bis hin zur Displayproduktion und Produktion flexibler organischer Elektronik [Fep13]. Den mengenmäßig größten Markt stellt dabei die Anwendung im Bereich der Verpackungstechnik dar. Wird die gesamte Kunststoffbranche betrachtet, stellt die Verpackungstechnik zudem das größte Anwendungsgebiet für Kunststoffe dar (vgl. Bild 1-1) [Sta22].

Bild 1-1:  
Absatzmärkte in  
Europa für  
Kunststoffe im  
Jahr 2021 nach  
unterschiedlichen  
Branchen  
nach [Sta22]



Die Anforderungen an eine moderne Verpackung nehmen stetig zu und der globale Warenhandel intensiviert sich [Wto22]. Verpackte Waren legen weite interkontinentale Strecken zurück. Die verpackten Güter werden, im Falle von elektronischen Geräten, zunehmend sensibler gegen Außeneinflüsse [Zve13]. Für einen ausreichenden Schutz sind angepasste mehrschichtige Foliensysteme notwendig, die wiederum, aufgrund ihrer Materialvielfalt, höhere Anforderungen an ihre Verarbeitung stellen. Eine Produktverpackung erfüllt zudem nicht die alleinige Aufgabe das Produkt zu schützen, sondern dient auch als marketingtechnische Werbe- und Informationsplattform. Produktverpackungen werden für höherpreisige und wertige Produkte zunehmend zu Designobjekten, die die Käufer mit der

Marke verbinden sollen [Kor17; Oss01]. Der Trend geht zudem zu einer individualisierten Verpackung [Lau24, Fes24, Mux16] womit die Losgröße sich reduziert und gegen eins streben kann. Moderne Produktverpackungen sollen mit dem Verbraucher kommunizieren und müssen in einer alternden Gesellschaft zudem auch einer „Easy-Opening“ Funktionalität, einem Öffnen des Produktes auch mit geringem Kraftaufwand, bei gleichzeitigem Schutz des Produktes während des Transportes gerecht werden [lv11, Buc99].

Die Industrie 4.0 Bewegung verlangt nach formatunabhängigen und hochflexiblen Verpackungsprozessen [Jän14]. Dabei stehen insbesondere auch Fragestellungen der Effizienz und Nachhaltigkeit der eingesetzten Ressourcen im Fokus. Dies betrifft den Ursprung der eingesetzten Polymere aber auch die benötigte Energie für Fügeprozesse von Polymerfolien. Verbraucher beziehen diese Faktoren bei ihrer Kaufentscheidung zunehmend mit ein [Pos21; Buc99].

Durch die digitale Vernetzung und dem damit verbundenen internationalen Warenverkehr ist eine eindeutige und fälschungssichere Kennzeichnung des Produktes zunehmend von hoher Bedeutung, besonders wenn es sich um sensible Güter wie Medikamente handelt [Bay23]. Neueste Normierungen und Standards, wie sie in der Medizintechnik durch die Europäische Union vorgeschrieben sind, erfordern zudem eine Pflicht der Dokumentation der Produktion und Rückverfolgbarkeit eines Produktes [Mpg20]. Hierfür müssen schon in der Produktion neue Möglichkeiten der Qualitätssicherung geschaffen werden, die idealerweise eine 100 % Prüfung ermöglichen.

Zum 05.07.2017 ist ein für die Bundesrepublik Deutschland geltendes Verpackungsgesetz erlassen worden und zum 01.01.2019 in Kraft getreten. Dieses hat zum Ziel, die Auswirkungen von Verpackungsabfällen auf die Umwelt deutlich zu reduzieren, indem als Hauptinstrument die Recyclingquoten erhöht werden sollen. Um diese gesetzlichen Vorgaben einzuhalten, ist die Verpackungsindustrie gefordert ihre bisherigen Produkte entsprechend anzupassen. Potenzielle Lösungsansätze reichen dabei von der Reduzierung der im Materialverbund enthaltenen Materialvielfalt bis hin zum Einsatz von neuen ressourcenschonenden und nachhaltigen Biopolymeren.

Infolgedessen ändert sich auch das Anforderungsprofil an den Fügeprozess. Weitverbreitete und etablierte Verfahren, wie das Heizelementschweißen, sind technologisch durch ihre Energieeinbringung mittels Wärmepropagation von außen in die Fügezone limitiert. Dies führt zu einer thermischen Belastung des gesamten Folienverbundes. Die lokale Deposition von Wärme, selektiv in nur eine einzelne Schicht, ist dadurch nicht realisierbar. Das Ultraschallschweißen lässt eine Selektion zu, begrenzt auf den Berührungspunkt der Polymerfolien in der Fügezone. Die thermische Belastung des gesamten Folienverbundes kann so eliminiert werden. Die zunehmend an Bedeutung gewinnende Formatflexibilität lässt sich bei beiden Verfahren aber nur durch einen Tausch der Werkzeuge realisieren. In Verpackungsprozessen, in denen zudem eine hohe Präzision bezogen auf die Siegenaht- bzw. Schweißnahtbreite erforderlich ist, sind die beiden Verfahrensprinzipien limitiert. Typische Anwendungen sind hier die Verpackung/Verkapselung von organischer Elektronik oder die Deckelung von Mikrofluidikchips im Medizinproduktebereich. Demzufolge sind neue technologische Lösungsansätze erforderlich. Idealerweise sollte dabei sowohl eine Verbesserung der Selektivität als auch der Präzision erfolgen. Einen vielversprechenden Verfahrensansatz stellt das Fügen mittels Laserstrahlung dar. Mit dem Werkzeug Laser kann eine hohe Formatflexibilität bei gleichzeitiger sehr gut steuerbarer Energiedeposition, sowohl bezogen auf die Schicht im Folienverbund als auch die Breite der Schweißnaht, erreicht werden. Durch geeignete und schnelle Strahlablenkungssysteme kann zudem eine Hochgeschwindigkeitsbearbeitung z.B. für Rolle zu Rolle Anwendungen realisiert werden. Die gute Zugänglichkeit der Wechselwirkungszone zwischen Laserstrahlung und Polymerfolie ermöglicht den komfortablen Einsatz von Prozesssensorik im Sinne der Industrie 4.0.

## 1.2 Vorgehen - Methodik - Wissenschaftliche Fragestellungen

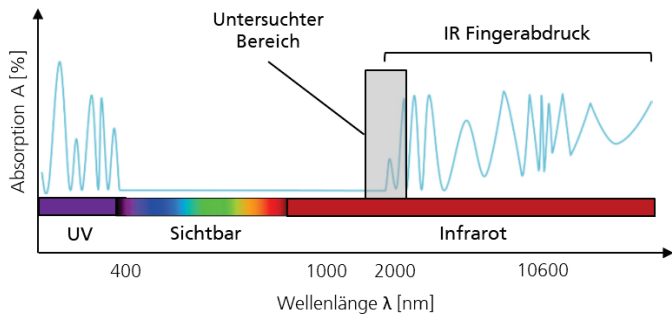
Um hierfür ein detailliertes Grundprozessverständnis zu erlangen, widmet sich diese Arbeit der für diesen Prozess elementaren zugrunde liegenden Fragestellung:

**Welche Wechselwirkungsprozesse finden zwischen Laserstrahlung und einer mehrschichtigen Polymerfolie statt und wie lassen sich diese beeinflussen, um eine gewünschte selektive Energiedeposition zu erzielen?**

Diese Arbeit beschränkt sich hierfür, bis auf wenige Ausnahmen, primär auf mehrschichtige Thermoplastfolien. Des Weiteren werden in dieser Arbeit nur Fälle betrachtet, bei denen die gesamte Polymerfolie innerhalb der Rayleighlänge der fokussierten Laserstrahlung liegt. Das Fügen von Mono-Polymerplatten mit wellenlängenangepassten Laserstrahlquellen wurde unter anderem von V. Mamuschkin [Mam20] sowie P. Nguyen [Ngy23] in Dissertationen untersucht.

Spezialisierte Untersuchungen im Bereich der Polymerfolien gibt es bisher nur zum Einsatz von klassischen CO<sub>2</sub>-Laserstrahlquellen zum Schweißen von Verpackungen [Jon02; Coe00]. Diese eignen sich aber nur für sehr dünne Folien, bei denen die Gesamtdicke unterhalb der optischen Eindringtiefe von infraroter Laserstrahlung von CO<sub>2</sub>-Gaslasern liegt [Jon02]. Zudem erfordert der Einsatz von CO<sub>2</sub>-Laserstrahlquellen eine aufwendige Strahlführung. Dies gilt ebenfalls, wenn diese Strahlquellen für Schneidprozesse eingesetzt werden. Hingegen sind sowohl für die Nutzung der wellenlängenangepassten Laserstrahlquellen zum Laserschneiden von Polymerfolien als auch für den simultanen Prozess bisher keine Untersuchungen bekannt. Da entgegen den konventionellen Siegel- und Fügeverfahren bei laserbasierten Verfahren die Energiedeposition optisch über das Prinzip der Absorption erfolgt, sind die optischen Eigenschaften der Polymerfolie von essenzieller Bedeutung [Bac02]. Polymere besitzen material- und wellenlängenabhängige Absorptionseigenschaften. Während Polymere im sichtbaren und infraroten Bereich bis 1500 nm eine geringe Absorption aufweisen, verfügen sie im nahen infraroten Bereich (1500 – 2000 nm vgl. Bild 1-2) über intrinsische Absorptionsbanden und Bereiche höherer Absorption.

Bild 1-2:  
Beispielhafter Verlauf der Absorption bei einem Polymer über der Wellenlänge mit in dieser Arbeit untersuchten Bereich



Aufgrund des materialabhängigen Absorptionsverlaufes lassen sich Polymertypen auch anhand des sogenannten IR-Fingerabdrucks eindeutig identifizieren. Werden jetzt Laserstrahlquellen verwendet, deren Emissionswellenlängen im Bereich von 1500 – 2000 nm liegen, also deren Wellenlängen auf die Anwendung „angepasst“ sind, können diese Absorptionsbanden adressiert werden. Dadurch ist eine direkte Energiedeposition im Polymer ohne dessen Modifikation möglich.

Die Charakterisierung und Steuerung der Energiedeposition stellt das zentrale Element dieser Arbeit dar. Deshalb erfolgen die Untersuchung und Darstellung anhand von drei sukzessiven Herangehensweisen aus denen abschließend dann anhand eines Fazits eine Bewertung vorgenommen wird.

Bild 1-3:  
Schematische  
Vorgehensweise  
innerhalb der  
vorliegenden Arbeit  
über drei  
sukzessive  
Schritte und Fazit



Zunächst werden mit Vereinfachungen und Annahmen die Aspekte der Strahlpropagation der eingestrahnten Laserstrahlung durch die einzelnen Monoschichten eines Polymerfolienverbundes und die sich hieraus ableitenden Wärmeleitungsvorgänge physikalisch beschrieben. Die Durchführung von experimentellen Untersuchungen stellt den zweiten konsekutiven Schritt dar. Hierbei werden bedeutende Parametereinflüsse und Einflussgrößen untersucht. Die weitergehende und detailliertere Betrachtung und Beweisführung erfolgt anschließend sowohl anhand einer aufgestellten Simulation zur Strahlpropagation und Wärmeleitung im dreidimensionalen Raum als auch an bildgebenden Thermografieaufnahmen und Dünnschnitten an physischen Proben. Dabei werden insbesondere Fragestellungen zur Mindestwechselwirkungszeit, zu Aufheizraten, zu Wärmeleitungsvorgängen und zu Temperaturverteilungen innerhalb der einzelnen Folienschichten untersucht und diskutiert.

Um das laserbasierte Fügen mit wellenlängenangepassten Laserstrahlquellen hinsichtlich der in der Motivation beschriebenen Anforderungen an

eine moderne Verpackung zu beleuchten, werden experimentelle Untersuchungen sowohl an marktüblichen sowie in der Entwicklung befindlichen mehrschichtigen Thermoplastfolien aber auch Ultrahochbarrierefolien durchgeführt. Bearbeitungsprozesse von Polymerfolien müssen, besonders bei Rolle-zu-Rolle Verfahren, vielfach mit hoher Geschwindigkeit erfolgen. Daher ist es besonders wichtig, hier die Produktivität zu betrachten. Um Polymere miteinander zu verschweißen, ist eine ausreichende Energiedeposition bzw. Erwärmung notwendig. Zum Trennen sind ein Aufschmelzen bzw. direktes Verdampfen des Polymers gewünscht. In beiden Fällen ist hierfür eine definierte Energiemenge nötig. Inwieweit diese Energiemenge Randbedingungen unterliegt, beeinflusst und räumlich begrenzt werden kann, wird anhand der nachfolgenden Fragestellungen untersucht:

1. Wie lässt sich die Energiedeposition für ein mehrschichtiges Materialsystem beschreiben?
2. Ist eine präzise und selektive Energiedeposition in eine ausgewählte Schicht innerhalb eines Folienverbundes, ohne Beeinflussung der umliegenden Schichten möglich?
3. In welchem Bezug zueinander stehen dabei die Wechselwirkungszeit, die maximale Temperatur und die deponierte Energiemenge?
4. Ist es möglich, durch die Höhe der deponierten Energie die Naht- bzw. Peelnahtfestigkeit direkt zu beeinflussen?
5. Welche Limitationen gibt es hinsichtlich einer Erhöhung der Vorschubgeschwindigkeit und Skalierung der Größe der Bearbeitungsfläche?

Ein Einsatz der Lasertechnik in Produktionsumgebungen erfordert zudem Aussagen zu typischen verpackungstechnischen Problemstellungen, wie Lagensprünge, Mindestfügedruck, Schweißignung marktüblicher Folien-systeme, Dickenschwankungen und Bahnschwankungen. Diese werden anhand von experimentellen Untersuchungen getroffen. Ziel ist es dabei, die als marktüblich fest geltenden Peelnahtfestigkeiten zu erreichen. Den Anforderungen an Qualitätssicherheit wird mit Untersuchungen zu geeigneten infraroten, thermografischen, spektralen und bildgebenden Sensoren Rechnung getragen. Da die Produktivität für eine industrielle Umsetzung der untersuchten laserbasierten Verfahren eine bedeutende Rolle

spielt, wird die Steigerung der Produktivität durch Skalierung der Laserleistung und Parallelisierung sowie durch angepasste Prozesssystematik genauer diskutiert. Dabei wird untersucht, welche Aspekte zum Beispiel bei der Übertragung in einen Rolle-zu-Rolle Prozess berücksichtigt werden müssen. Untersucht wird auch, ob sich das laserbasierte Fügen und Trennen in einen simultanen Prozess zusammenführen lassen und wie diese Prozesse sich wiederum gegenseitig beeinflussen.