



Maximilian Munsch (Autor)  
**Reduzierung von Eigenspannungen und Verzug in  
der laseradditiven Fertigung**

**TUHH**  
Technische Universität Hamburg-Harburg

---

Maximilian Munsch

**Reduzierung von  
Eigenspannungen und Verzug  
in der laseradditiven Fertigung**



**Schriftenreihe Lasertechnik: Band 6**

Hrsg. von Prof. Dr.-Ing. C. Emmelmann  
Institut für Laser- und Anlagensystemtechnik

<https://cuvillier.de/de/shop/publications/6468>

Copyright:

Cuvillier Verlag, Inhaberin Annette Jentsch-Cuvillier, Nonnenstieg 8, 37075 Göttingen,  
Germany

Telefon: +49 (0)551 54724-0, E-Mail: [info@cuvillier.de](mailto:info@cuvillier.de), Website: <https://cuvillier.de>



## 1 Einleitung

Um die Wettbewerbsfähigkeit industrieller Wertschöpfung im globalisierten Markt zu steigern, müssen niedrigere Herstellkosten und kürzere Lieferzeiten bei zunehmender Kundenindividualisierung realisiert werden. Die engere Verzahnung von Kunden und Lieferanten auch infolge der digitalen Datenverarbeitung führt bereits zu Veränderungen im Produktentstehungsprozess, die einen stetigen Innovationsdruck auf geeignete Fertigungstechnologien ausüben [167].

Großes Potential, die Produktion individuell, schnell und kostengünstig zu realisieren, wird den additiven Technologien zugeschrieben, die aufgrund der schichtweisen Herstellung höchste Gestaltungsfreiheit bei endkonturnaher Fertigung der Bauteile in einem ressourcenschonenden und einstufigen Verfahren ermöglichen [160, 161]. Eine Ausprägung dieser Technologie stellt das laseradditive Fertigungsverfahren dar, das durch den Einsatz des Werkzeugs Laser als Energiequelle die schichtweise Herstellung aus technischen Metallpulverwerkstoffen mit Endproduktcharakter erlaubt [127].

Das Verfahrensprinzip basiert auf einem zeitlich und örtlich definierten Wärmeleitungsschweißprozess, der durch den lokal begrenzten thermischen Energieeintrag und den daraus resultierenden hohen Temperaturgradienten zwangsläufig zu Eigenspannungen führt. Insbesondere für die Titanlegierung Ti-6Al-4V, die große industrielle Relevanz für Anwendungen im Leichtbau und der Medizintechnik besitzt, stellen die negativen Folgen dieser remanenten Spannungen einen Hauptgrund für Prozessinstabilitäten sowie das Nichteinhalten von Qualitätsanforderungen dar. Trotz der bekannten Maßnahmen zur effektiven Verminderung von Eigenspannungen durch eine nachgelagerte Wärmebehandlung können bereits im Fertigungsprozess Rissbildungen und Verzug auftreten, die sich nicht richten lassen und zu Ausschuss führen, vgl. Abbildung 1.1. Darüber hinaus können verzugsbedingte Bauteildeformationen zum Prozessabbruch führen, indem sie die Anlagenmechanik blockieren und das gesamte Fertigungslos unbrauchbar machen, vgl. Abbildung 1.2.

Aufgrund des hochkomplexen Zusammenspiels der Vielzahl an Prozessparametern kann mit dem heutigen Wissensstand der Einfluss der Stell- und Störgrößen auf die resultierenden Spannungen nur unzureichend zugeordnet werden. In der Literatur wird der Zusammenhang mithilfe unterschiedlicher Analyseverfahren und Modelle untersucht, die jedoch kein allgemeingültiges Gesamtbild erschließen lassen [10, 16, 21, 31, 55, 59, 72, 104, 106, 139, 148, 154]. Eine der laseradditiven Fertigung übergeordnete Qualifizierung und Quantifizierung der Einflussgrößen auf die resultierenden Eigenspannungen existiert nicht, so dass eine gezielte Reduzierung bisher typischerweise nur durch nachgelagerte Wärmebehandlungsverfahren erfolgt.

Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist die systematische Identifizierung und vergleichende Qualifizierung und Quantifizierung signifikanter Einflussfaktoren auf thermisch-induzierte Eigenspannungen in der laseradditiven Fertigung für den Versuchswerkstoff Ti-6Al-4V. Mithilfe der durch wissenschaftliche Methoden identifizierten Größen erfolgt eine Ableitung von Strategien zur effektiven Reduzierung der Eigenspannungen bereits im Fertigungsprozess. Schließlich werden diese Strategien für industrielle Prozessketten und deren Anwendungen unter Betrachtung wirtschaftlicher Randbedingungen validiert und der Nachweis erbracht, dass sich die Prozessstabilität mit den wissenschaftlich erforschten Erkenntnissen und hieraus

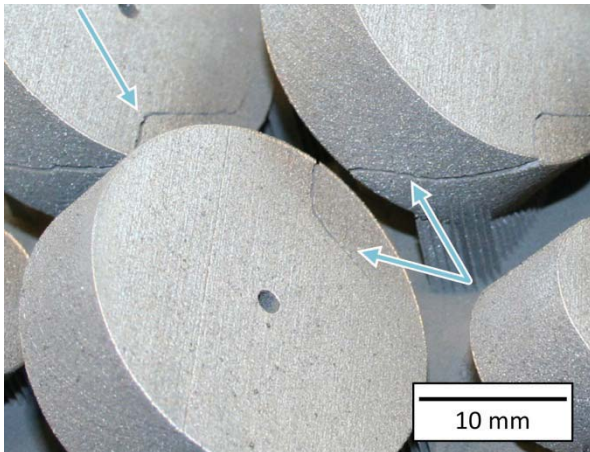


Abbildung 1.1: Rissbildung

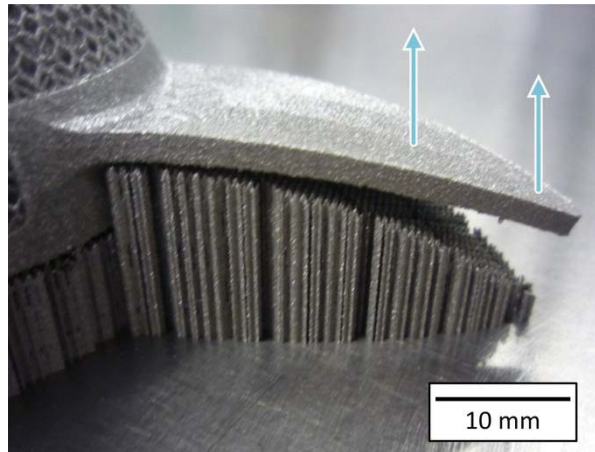


Abbildung 1.2: Verzugsbedingte Ablösung

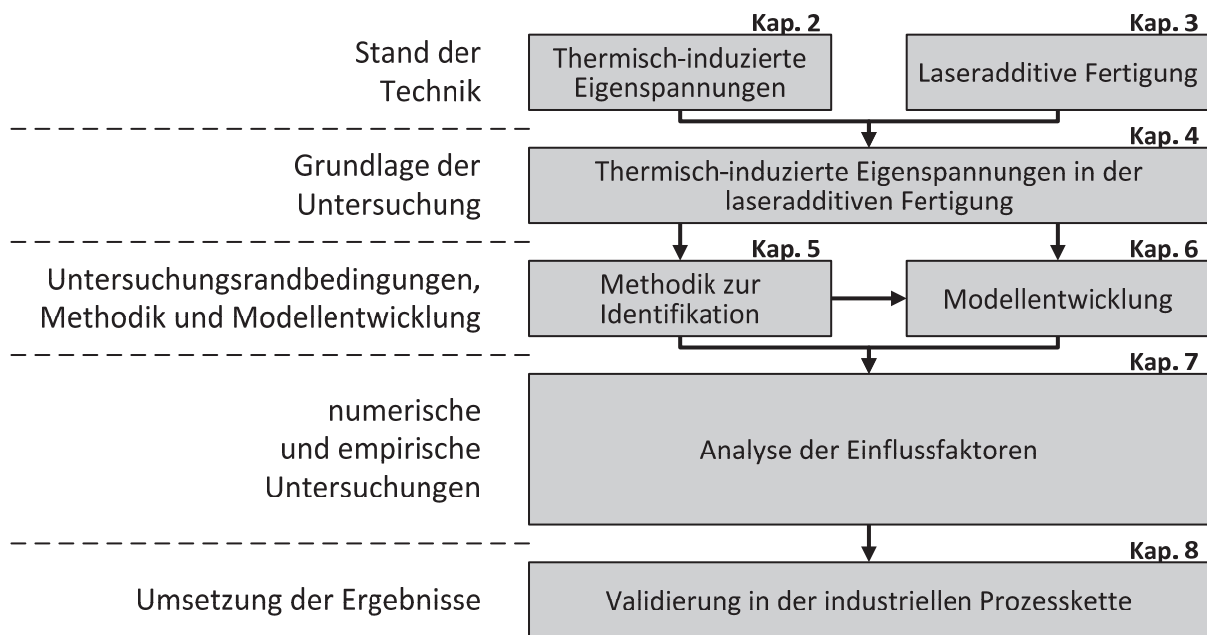
entwickelten Optimierungsstrategien nachhaltig steigern lässt, wodurch die Bauteile den geforderten industriellen Qualitätsanforderungen genügen.

Zur Gewinnung der oben genannten Erkenntnisse und Strategien ist die vorliegende Arbeit, wie in Abbildung 1.3 gezeigt, aufgebaut. Im Anschluss an dieses einleitende Kapitel dient das *Kapitel 2* der allgemeinen Definition thermisch-induzierter Eigenspannungen und der abstrahierten Betrachtung genereller Einflussgrößen sowie möglicher Messverfahren. Im anschließenden *Kapitel 3* wird der Stand der Technik zur laseradditiven Fertigung grundlegend erläutert. In *Kapitel 4* erfolgt die Verknüpfung der thermisch-induzierten Eigenspannungen und der laseradditiven Fertigung. Dazu werden zunächst die Entstehungsmechanismen von Eigenspannungen im laseradditiven Prozess analysiert und in der Literatur geschilderte analytische und numerische Ansätze beschrieben. Schließlich werden bekannte Strategien zur Spannungsreduzierung dargestellt und die ableitbaren Einflussfaktoren qualitativ zusammengefasst.

Die Methodik zur systematischen Identifizierung der wesentlichen Einflussfaktoren wird im folgenden *Kapitel 5* hergeleitet. Anschließend werden anhand des physikalischen Prozessablaufs Kausalzusammenhänge und Assoziationsketten gebildet, um potentielle Einflussfaktoren abzuleiten. Das Kapitel endet mit einer Vorstellung und Charakterisierung der Versuchsrandbedingungen, die im Rahmen der weiteren Untersuchung bestehen.

In *Kapitel 6* werden die Modelle zur systematischen Untersuchung mit dem Ziel entwickelt, Eigenspannungen qualifizieren und quantifizieren zu können. Ein numerisches Modell dient dabei dem Aufbau eines vertieften Prozessverständnisses. Die Modellbildung erfolgt durch die Ableitung der zuvor dargestellten physikalischen Prozesse zu einem mathematisch beschreibbaren Modell, das sich numerisch abbilden und lösen lässt. Für ein empirisches Modell wird eine geeignete Mess- und Bewertungsmethodik definiert, die anwendungsnah eine Qualifizierung von Eigenspannungen in laseradditiv gefertigten Probekörpern erlaubt.

Die Analyse der Einflussfaktoren ist ein wichtiger Baustein der Arbeit und erfolgt in *Kapitel 7*. In einem ersten Schritt werden die relevanten Einflussfaktoren kategorisiert und für eine systematische Untersuchung in einen Versuchsplan überführt. Auf Basis des numerischen Modells erfolgt die theoretische Betrachtung durch Variation isolierter Parameter, um den



**Abbildung 1.3: Aufbau der vorliegenden Arbeit**

Einfluss auf die Ergebnisgröße in Form der resultierenden Spannungen darzustellen. Die numerische Modellierung ermöglicht durch die zeit- und orts aufgelöste Darstellung des Spannungszustands eine detaillierte Analyse.

Diese theoretisch gewonnenen Erkenntnisse werden darauffolgend mit einer empirischen Untersuchung im realen Prozess validiert. Aufgrund der hohen Systemkomplexität erfolgt hierbei ebenfalls in einem ersten Untersuchungsschritt eine Versuchsplanung über den Ansatz von Einzelversuchen. Die Probekörper werden unter isolierter Variation definierter Stellgrößen aufgebaut, so dass eine Rückführung des Einflusses des einzelnen Faktors auf die resultierenden Eigenspannungen möglich ist. Durch Anwendung der zuvor definierten Mess- und Bewertungsmethodik können nun statistisch signifikante und insignifikante Einflussgrößen identifiziert und Tendenzen beschrieben werden. In einem zweiten Untersuchungsschritt werden durch Anwendung der statistischen Versuchsplanung die Interaktionen wesentlicher Parameter identifiziert und optimale Stellgrößen abgeleitet. Dies stellt das Fundament für die Entwicklung von Maßnahmen und Strategien der Prozesskettenoptimierung zur Spannungsreduzierung dar.

Die Umsetzung der Ergebnisse wird in *Kapitel 8* im Spannungsfeld von Qualität, Zeit und Kosten betrachtet. Ziel hierbei ist es, eine produktive und ökonomische Lösung mit einer hohen Verwertbarkeit für die industrielle Praxis zu finden. Mit Hilfe der zuvor erfolgten Eingrenzung der signifikanten Einflussfaktoren werden mögliche Strategien abgeleitet und für aktuell bestehende Anlagentechnologie sowie Anwendungsfälle validiert. Eine Bewertung der entwickelten Maßnahmen zur Reduzierung der Eigenspannungen erfolgt hinsichtlich technologischer und wirtschaftlicher Kriterien. Die Arbeit schließt mit einer Zusammenfassung in *Kapitel 9* und legt in einem Ausblick den zukünftigen Forschungsbedarf und Ansatzpunkte für eine Weiterentwicklung dar.





## 2 Thermisch-induzierte Eigenspannungen

Eigenspannungen haben einen erheblichen Einfluss auf das Funktions- und Einsatzverhalten von Bauteilen. Da diese eine Vorbelastung des Werkstücks darstellen, kann eine in Betrag und Richtung definierte Induktion von Eigenspannungen die Bauteilstandfestigkeit erhöhen [125]. Im Umkehrschluss kann jedoch eine vernachlässigte Berücksichtigung der inneren Spannungen ein unerwünschtes Bauteilverhalten hervorrufen. Die Eigenspannungen superponieren sich zu den Lastspannungen und können ein frühzeitiges Bauteilversagen verursachen. Im Folgenden wird eine Übersicht zu der Entstehung und Charakteristik von Eigenspannungen gegeben.

### 2.1 Definition und Einteilung

Eigenspannungen in einem Körper sind werkstoff- und abmessungsabhängige innere Spannungen, die ohne Einwirkung äußerer Kräfte oder Momente einen zeitlich unveränderlichen Gleichgewichtszustand aufweisen [107, 117, 159]. Innerhalb eines Bauteils sind die Summen der Kräfte  $F_i$  und Momente  $M_i$  gleich null,

$$\sum F_i = 0, \quad (2.1)$$

$$\sum M_i = 0, \quad (2.2)$$

und Bereiche von Zugspannungen stehen Bereichen von Druckspannungen gegenüber [2, 116]. Eigenspannungen eines Körpers sind nicht notwendig, um ein Gleichgewicht mit der Umgebung herzustellen [158]. Treten an einem Bauteil sowohl Eigen- als auch Lastspannungen auf, so addieren sich diese.

Die Einteilung von Eigenspannungen erfolgt nach dem Ausmaß der Fernwirkung und es wird typischerweise zwischen den Eigenspannungen I., II. und III. Art unterschieden, vgl. Tabelle 2.1. Dabei beschreibt die Fernwirkung die Distanz, auf der sich die Wirkung der Eigenspannung aufhebt [158].

Die mechanisch-technologischen Eigenschaften werden maßgeblich durch Makrospannungen beeinflusst. Insbesondere für die Umwandlung von Eigenspannungen in plastische Verformungen ist der Einfluss der Mikro- als auch Submikrospannungen vernachlässigbar [116].

**Tabelle 2.1: Einteilung der Eigenspannungen nach der Fernwirkung nach [6]**

Art	Größenordnung	Fernwirkung
I.	Makrospannungen	Die remanenten Spannungen stehen über weite Entfernungen im Gleichgewicht, häufig in Bauteildimension.
II.	Mikrospannungen	Die Spannungen sind innerhalb der Dimension eines Kornes ausgeglichen.
III.	Submikrospannungen	Der Ausgleich auf atomarer Ebene bis hin zum Subkornbereich erfolgt über diese Spannungen.

## 2.2 Entstehung und Eigenschaften thermisch-induzierter Eigenspannungen

Wird ein isotropes Bauteil ohne äußere Einspannung erwärmt, dehnt es sich unter Vernachlässigung von Nichtlinearitäten gleichermaßen in alle Raumrichtungen aus. Erfolgt der Abkühlvorgang innerhalb der Gleichgewichtsbedingungen und ebenfalls ohne äußeren Zwang des Bauteils, so liegt das Bauteil schließlich wieder im Ausgangszustand vor [2]. Rein elastische Spannungen verschwinden somit nach der Temperaturänderung und werden folglich nicht den thermisch-induzierten Spannungen zugeordnet [117].

Kühlt ein Körper jedoch unter einem wirkenden Zwang ab, so kommt es zur Bildung remanenter Eigenspannungen. Durch einen lokal begrenzten Wärmeeintrag, der beispielsweise bei einem Schweißprozess vorliegt, entsteht ein quasistationäres Temperaturfeld, das Volumenänderungen als auch Gefügeänderungen durch behinderte Wärmedehnung und Abkühlung bedingt, vgl. Abbildung 2.1. Der umliegende kältere Werkstoff übt dabei einen äußeren Zwang aus und ruft Eigenspannungen hervor [2, 116]. Nach dem Abkühlen des Werkstoffs bleiben thermisch-induzierte Eigenspannungen im Bauteil zurück, die bei Überschreiten der Streckgrenze zum Verzug oder lokal zur Rissbildung bis hin zur vollständigen Zerstörung des Bauteils führen können [28].

Unterschieden wird im Allgemeinen zwischen Zwängungsspannungen, die infolge behinderter Ausdehnung und Schrumpfung eines Werkstoffbereichs entstehen, und Reaktionsspannungen, die durch eine äußere Einspannung hervorgerufen werden und mit den äußeren Kräften dieser Einspannung im Gleichgewicht stehen [45]. Die verbleibenden Eigenspannungen bedeuten für das Bauteil eine zusätzliche und ruhende Belastung, die sich in Abhängigkeit der Größe, der Verteilung sowie des geplanten Einsatzes des Bauteils positiv oder negativ auswirken kann [118].

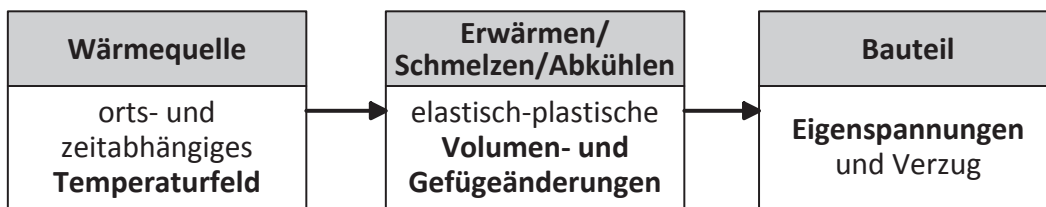


Abbildung 2.1: Schema zur Entstehung von Eigenspannungen beim Schweißen [46]

## 2.3 Eigenspannungsbedingter Verzug

Die Struktur eines Bauteils bietet in Abhängigkeit der Geometrie und Wandstärke einen Widerstand gegenüber eigenspannungsbedingter Verformung. Während bei einer großen Materialstärke sich ebenfalls große Eigenspannungen einstellen können, überschreiten die Spannungen bei geringen Materialdicken die Streckgrenze und werden durch plastisches Fließen abgebaut [116]. Diese Verformung wird als Verzug bezeichnet. Die Ausprägung steht dabei in Abhängigkeit des Freiheitsgrads während der Abkühlung, vgl. Abbildung 2.2. Eine zunehmende Behinderung des Schrumpfens des Körpers führt zu erhöhter Ausbildung von Eigenspannungen und resultierendem Verzug [41].

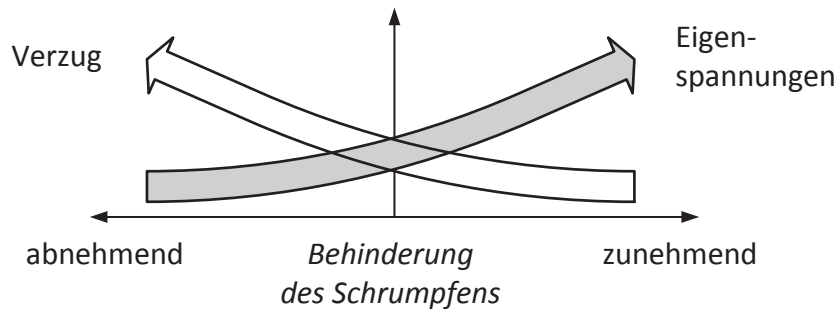


Abbildung 2.2: Einfluss der Einspannung auf die Eigenspannungen und Verzug [41]

Steigt prozessbedingt die anliegende Temperatur, so sinken die Streckgrenze und das Elastizitätsmodul erheblich. Infolgedessen reduziert sich die Widerstandsfähigkeit des Werkstoffes und der Verzug wird begünstigt. [116]

## 2.4 Eigenspannungen beim Schweißprozess

Jeder Schweißprozess setzt sich aus einer Erwärmungs- und Abkühlphase mit hohen Temperaturgradienten zusammen, die unter inneren und äußeren Zwängen erfolgen und zwangsläufig Eigenspannungen zur Folge haben. Eine Vielzahl von Einflussfaktoren ist im konventionellen Schweißprozess bekannt und diese werden im Folgenden dargestellt. Ebenso existieren Strategien, die eine gezielte Verminderung von Eigenspannungen erlauben.

### 2.4.1 Einflussfaktoren auf die Eigenspannungen

Zahlreiche Untersuchungen belegen die Wirkung verschiedener Stell- und Störgrößen auf die Ausbildung von thermisch-induzierten Eigenspannungen beim Schweißen [28, 41, 46, 69, 115, 118, 159, 169]. Die Einflussfaktoren stehen zum Teil in hochkomplexen Wechselbeziehungen zueinander [117, 159]. Ein Extrakt dieser Untersuchungen ist als Ursache-Wirkungs-Diagramm gegliedert in Werkstoff, Fertigung und Konstruktion in einem redundanzfreien Überblick in Abbildung 2.3 dargestellt.

### 2.4.2 Strategien zur Vermeidung von Eigenspannungen beim Schweißen

Aufgrund der großen Bedeutung der Schweißtechnologie in der Fertigungstechnik existieren vielfältige Lösungen zur effektiven Reduktion von resultierenden Eigenspannungen [3, 26, 28, 46, 69, 101, 102, 115]. Die Untersuchungen besitzen aufgrund unterschiedlicher Rahmenbedingungen (Werkstoff, verwendete Zusatzstoffe, Probengeometrie, Nahtform, etc.) generell nur eine qualitative Vergleichbarkeit untereinander und erlauben nur eine Ableitung von Tendenzen. Eine Übersicht zentraler Untersuchungen zu Optimierungsstrategien ist in Tabelle 2.2 dargestellt. Mit dem Ziel der Applikation der aus der Schweißtheorie bekannten Lösungen auf die laseradditive Fertigung erfolgt eine Eingrenzung auf relevante und übertragbare Stellgrößen.







**Tabelle 2.2: Extrakt zu Untersuchungen über Einflussfaktoren auf die Eigenspannungen beim Schweißen**

	Einflussfaktor	Bemerkung	Auswirkung	Quelle
Parameter	Schweißgeschwindigkeit	Geschwindigkeit ↑	↓	[69, 115]
	Schweißstromstärke	Stromstärke ↑	↑	[102]
	Streckenenergie	Energie ↑	↑	[102]
Schweißfolge	symmetrisches Schweißen		↓	[69, 115]
	symm. paralleles Schweißen		↓	[69]
	abschnittsweises Schweißen	Unterbrechungsdauer ↑	↓	[69]
	Pilgerschrittschweißen		$\sigma_L \downarrow, \sigma_Q \downarrow$	[69, 115]
	wechselseitiges Pilgerschritts.		$\sigma_L \downarrow, \sigma_Q \downarrow$	[46]
	mehrlagiges Schweißen		$\sigma_L \downarrow, \sigma_Q \uparrow$	[69]
	mehrlagig wechselseitig Schw.		$\sigma_L \downarrow, \sigma_Q \uparrow$	[46]
	Vorverformen	Formerhalt nach Schw.	keine Änderung	[46, 69, 101, 102]
Wärmebehandlung	Vorwärmen	global	↓	[28, 69, 115]
	Vorwärmen	lokal	↓, auch ↑	[115]
	paralleles Wärmen		↓	[3, 26]

Legende:  $\sigma_L$ – Längsspannung,  $\sigma_Q$ – Querspannung, ↑ – steigt, ↓ – sinkt

## 2.5 Messtechnische Verfahren zur Qualifizierung und Quantifizierung

Eigenspannungen liegen ohne die Einwirkung äußerer Kräfte vor und können nicht durch eine Kraftaufbringung ermittelt werden [107]. Nichtsdestoweniger sind zahlreiche Methoden zur Qualifizierung und Quantifizierung der Spannungen bekannt. Es wird zwischen mechanischen Messverfahren, die eine zerstörende Prüfung der Probe darstellen, und physikalischen Messverfahren, die zerstörungsfrei erfolgen, unterschieden. In Tabelle 2.3, mechanische Verfahren, und Tabelle 2.4, physikalische Verfahren, ist jeweils eine Übersicht zu verschiedenen Methoden, dem Vorgehen und der Eindringtiefe gegeben. Für alle Methoden ist eine konstante Temperatur unabdingbar [115], die typischerweise im Bereich der Raumtemperatur liegt.

Tabelle 2.3: Übersicht zu mechanischen (zerstörenden) Messverfahren

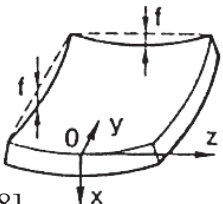
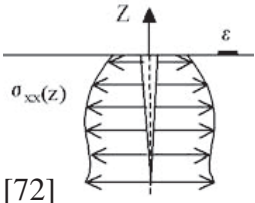
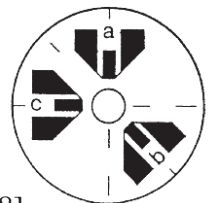
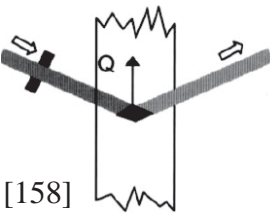
Methoden	Vorgehen	Eindringtiefe	Anmerkungen
<b>Zerlege-, Abtragverfahren</b>  [28]	<ul style="list-style-type: none"> <li>Zerlegen der Probe in Stäbe (zur Messung einachsiger Spannungszustände) oder Quader (zweiachsige Spannungszustände), bzw. schichtweiser spannender Materialabtrag [117]</li> <li>Ermittlung des Verzugs der zerlegten/abgetragenen Probekörper mittels Dehnungsmessstreifen (DMS)</li> </ul>	gesamte Probenhöhe	
<b>Crack Compliance Methode</b>  [72]	<ul style="list-style-type: none"> <li>Einbringung eines linienförmigen Schnitts und schrittweise Vertiefung desselben [17, 18]</li> <li>Messung der Probendehnung infolge der Umlagerung der Eigenspannungen nach jedem Schnitt mittels DMS in der Nähe des Schnitts und auf der Rückseite des Bauteils</li> <li>rechnerische Ermittlung der Eigenspannungen</li> </ul>	Eigenspannungsverlauf über gesamte Probenhöhe [112, 158]	Spannungszustand an der Oberfläche nur rechnerisch durch Extrapolation bestimmbar [72]
<b>Bohrlochverfahren, Ringfugeverfahren</b>  [28]	<ul style="list-style-type: none"> <li>Störung des statischen Gleichgewichts durch Materialabtrag in Form einer Bohrung bzw. einer Ringfuge [158]</li> <li>Messung der resultierenden Verformung mittels drei DMS, die in verschiedenen Ausrichtungen um das Bohrloch/die Ringfuge appliziert werden</li> <li>rechnerische Ermittlung der Eigenspannungen</li> </ul>	Zuverlässigkeit nur für Bohrtiefen im Bereich des Bohrdurchmessers gegeben [158]	mit senkrecht zueinander stehenden Bohrungen Aussagen über die Orientierung der Eigenspannungen möglich [28]

Tabelle 2.4: Übersicht zu physikalischen (zerstörungsfreien) Messverfahren

Methoden	Vorgehen	Eindringtiefe	Anmerkungen
<b>Diffraktometrie-methoden</b>  [158]	<ul style="list-style-type: none"> <li>Messung der durch Eigenspannungen verursachten Verzerrung der Kristallstruktur</li> <li>Ermittlung der Atomabstände durch Beugung von Strahlung an Atomen des Kristallgitters und Vergleich mit Atomabstand im spannungsfreien Zustand [158]</li> </ul>		



(Fortsetzung) Tabelle 2.4: Übersicht zu physikalischen (zerstörungsfreien) Messverfahren

Methode	Vorgehen	Eindringtiefe	Anmerkungen
	<b>Röntgendiffraktometrie</b> Messung mit Röntgenstrahlung	nur oberflächennahe Spannungen [106, 112]	unzuverlässig bei mittleren Rautiefen [72]
	<b>Elektronendiffraktometrie</b> Messung mit Elektronenstrahlung	sehr gering, Probenhöhe <100 nm [158]	hohe räumliche Auflösung [54]
	<b>Neutronendiffraktometrie</b> Messung mit Neutronenstrahlung	mehrere Zentimeter [158]	Messunsicherheit, vgl. [10]
<b>Ultraschall</b> 	Messung der Änderung der Ausbreitungsgeschwindigkeit von Ultraschallwellen infolge der spannungsabhängiger, elastischer Materialeigenschaften [117]	sehr groß, >10 cm [158]	großes Messvolumen für hohe Genauigkeit [117]
<b>magnetostruktive Verfahren</b> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>Erfassung der Drehung eines induzierten Magnetfeldes infolge von spannungsinduzierter magnetischer Anisotropie [158]</li> <li>alternativ Aufnahme der magnetoakustischen Emission infolge magnetostruktiver Dehnung [158]</li> </ul>	<10 mm [158]	nur bei ferromagnetischen Materialien anwendbar
<b>Piezospektroskopie</b> 	Bestimmung der linearen Verschiebung charakteristischer Raman-, Piezofluoreszenz-, oder Piezolumineszenzlinien infolge induzierter Spannungsänderungen in der Probe [158]	<1µm [158]	nur für Werkstoffe mit ausgeprägten Spektren [158]
<b>Kugelindruckverfahren</b> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>holografische Ermittlung der Aufwölbung der Probenoberfläche nach Kugelindruck [117]</li> <li>Vermessung spannungsfreier Referenz sowie Probe mit definiertem Spannungszustand, anschließend Messung an eigenspannungsbehafteter Probe</li> </ul>	nur Messung von oberflächennahen Spannungen	
<b>Verzugsmessung beim Schweißen</b> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>Bestimmung des Bauteilverzugs während oder nach dem Schweißprozess mittels DMS, mechanischen Längen- und Winkelmessverfahren sowie optischen Verfahren [117]</li> </ul>	Messung über gesamte Probe	





### 3 Laseradditive Fertigung

Mit der laseradditiven Fertigung lassen sich komplexe Bauteile in einem zyklischen und pulverbettbasierten Prozess erzeugen. Serienfertigung von Losgröße eins, Einsatz konventionell schwierig zu verarbeitender technischer Metallwerkstoffe und hohe Gestaltungsfreiheit fassen die Vorteile der laseradditiven Fertigung zusammen [35]. Im Folgenden wird der Stand der Technik zur laseradditiven Fertigung mit metallischen Werkstoffen wiedergegeben, der als Basis der vorliegenden Arbeit dient. Eine allgemeine Betrachtung der Grundlagen der Lasertechnik ist nicht Gegenstand der Arbeit und es sei auf die einschlägige Fachliteratur verwiesen [30, 33, 53, 111].

#### 3.1 Definition und Abgrenzung

In dem pulverbettbasierten Verfahren wird durch schichtweisen Aufbau eines technischen Serienwerkstoffs unter Einsatz eines Laserstrahls als Energiequelle ein physisches Bauteil hergestellt. Als Ausgangswerkstoff werden einkomponentige Metallpulver verwendet. Bauteilerzeugnisse eines Werkstoffes weisen in Gegenüberstellung zu konventionellen Fertigungsverfahren, wie z. B. Gießen oder Walzen, vergleichbare mechanische Kennwerte auf und eignen sich folglich für den Endprodukteinsatz [8, 31, 43, 121, 134, 140, 147, 157, 168].

Die in der Industrie und Forschung verwendeten Bezeichnungen für das Verfahren unterliegen einer breiten Streuung. Die am Markt verfügbare Anlagentechnik wird in Kombination mit Verfahrensbezeichnungen beworben, die geschützte Markennamen der Anlagenhersteller darstellen, wie z. B. Selective Laser Melting (SLM) [94], Direct Metal Laser Sintering (DMLS) [86] oder LaserCUSING [85]. Weitere Begriffe, die Verwendung finden, sind Lasergenerieren, 3D Drucken, Laser Freeform Fabrication oder Laserformen [109, 119, 157]. Zur allgemeingültigen Beschreibung des Verfahrens wird in einer VDI-Richtlinie der Begriff Laserstrahlschmelzen vorgeschlagen [100].

#### 3.2 Technologieprinzip

Die laseradditive Fertigung erfolgt in einem zyklischen Prozess, in dem vollautomatisch ein schichtweiser Werkstoffaufbau erfolgt. Das Technologieprinzip ist in Abbildung 3.1 schematisch dargestellt.

In Abhängigkeit des verwendeten Werkstoffes wird zunächst mit einem reaktionsträgen Gas eine inerte Atmosphäre in der Baukammer erzeugt, um Prozessreaktionen mit der Umgebungsluft auszuschließen. Im ersten Fertigungsschritt erfolgt die Beschichtung einer Substratplatte mit einer Schicht des Pulverwerkstoffes unter Verwendung einer anlagenspezifischen Pulverzuführung und Nivelliereinrichtung. Dies entspricht der minimalen Fertigungsschichthöhe des Bauteils. Die Querschnittsfläche des Bauteils wird im zweiten Fertigungsschritt mit dem Laserstrahl belichtet und selektiv aufgeschmolzen. Der Laserstrahl wird über ein Spiegel-Ablenk-System positioniert und über optische Elemente entsprechend der geforderten Eigenschaften geformt und fokussiert. Anschließend wird im dritten Prozessschritt der Hubtisch um die Schichthöhe abgesenkt. Der zyklische Prozess beginnt erneut mit der Pulverzuführung und wird bis zur Fertigstellung des Bauteils fortgesetzt. Im Anschluss an die Fertigung kann das überschüssige, nicht aufgeschmolzene Pulver entfernt und wiederaufbereitet werden.

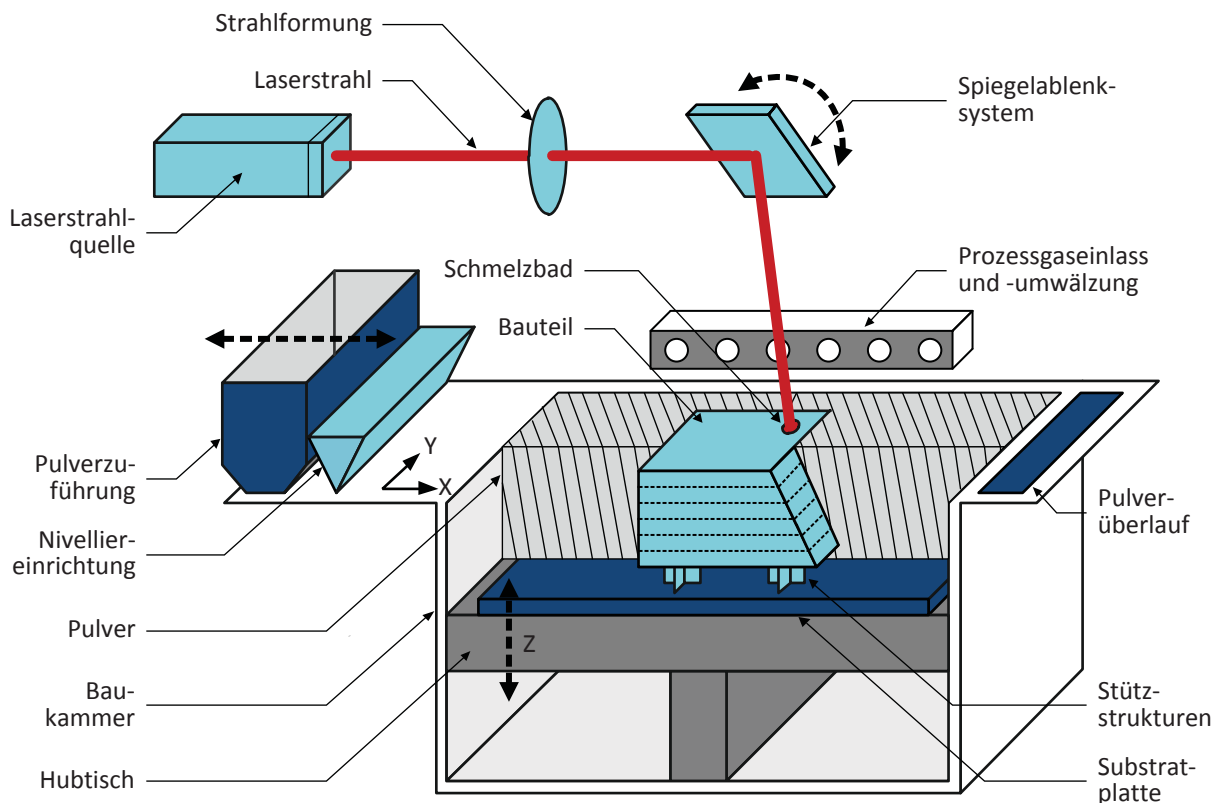


Abbildung 3.1: Technologieprinzip

### 3.3 Anlagentechnik

Zur laseradditiven Fertigung sind heute verschiedene industrielle Systeme verfügbar. Hersteller industrieller Anlagen zur laseradditiven Fertigung sind Concept Laser GmbH [85], EOS Electro Optical Systems GmbH [86], Realizer GmbH [91] und SLM Solutions GmbH [94], alle Deutschland, Phenix Systems [90], Frankreich, Renishaw PLC [92], England, sowie Matsuura Machinery Corporation [88], Japan.

Grundlegende Bestandteile jeder Anlagentechnik sind *Laserstrahlquelle*, *Strahlformung und -führung*, *Baukammer* mit Hubtisch und Pulverzuführung, vgl. Abbildung 3.2. Die Fertigungsqualität wird mit sensorischen Elementen überwacht und gesteuert sowie durch regelungstechnische Rückführung der Informationen gesteigert. Im Folgenden wird ein kurzer Abriss über die signifikanten Systembestandteile und Ansätze zur Qualitätssicherung gegeben.

**Laserstrahlquelle:** Als Werkzeug werden in industriellen Anlagen heute fast ausschließlich single-mode Faserlaser mit einer Wellenlänge  $\lambda$  von 1070 nm bis 1080 nm und mit einer Strahlqualität  $M^2$  von ca. 1,1 verwendet [87]. Die Laserstrahlleistung der single-mode Strahlquellen reicht von 20 W [91] bis zu 500 W [90]. Die Integration einer zusätzlichen multi-mode Laserstrahlquelle mit einer Leistung von 1 kW erlaubt die Erhöhung der Produktivität [15, 94, 129].

**Strahlformung und -führung:** Mit optischen Elementen zur Kollimation und Fokussierung wird der Laserstrahl geformt. In Verbindung mit präobjektiven Spiegelablenksystemen kommen F-Theta-Objektive zum Einsatz. Der Laserstrahl wird so fokussiert und zusätzlich eine elliptische Projektion auf dem Arbeitsfeld vermieden [153]. Postobjektive Spiegelablenksys-



teme verwenden dynamische Fokussiersysteme. Als Spiegelablenksystem kommt typischerweise ein Galvanometer-Scanner mit zwei Spiegeln zum Einsatz. Die Spiegel sind jeweils auf einem Galvanometerantrieb fest gelagert und so zueinander angeordnet, dass der Laserstrahl eine Ablenkung über beide Spiegel erfährt. Durch die Rotation jeweils eines Antriebs und somit des Ablenkspiegels erfolgt die Abbildung des Laserstrahls über eine der Hauptachsen im Bearbeitungssystem. Der Laserstrahl kann im Arbeitsfeld mit einer Wiederholgenauigkeit von ca.  $\pm 50 \mu\text{m}$  positioniert werden [93]. Ein unerwünschter thermisch-induzierter Fokusschift, der aus der Bearbeitung mit Hochleistungslasern bekannt ist [123], wird durch den Einsatz von Quarzglas als Linsenmaterial signifikant reduziert [60]. Die Laserstrahlintensität wird typischerweise mit einer Gaußverteilung abgebildet. Die resultierende Intensitätsverteilung  $I(r)$  steht in Abhängigkeit des Strahlradius  $r$ .

**Baukammer:** Ein wesentliches Unterscheidungsmerkmal der Anlagen ist das maximal zur Verfügung stehende Arbeitsfeld zur Bauteilerzeugung in der Baukammer, das im Bereich von 70 mm x 70 mm bis zu 300 mm x 300 mm liegt [85, 91]. Als Nivellier Vorrichtung kommen Rollen und starre sowie flexible Beschichterklängen zum Einsatz, die je nach Anlage und zu verarbeitendem Werkstoff aus Metall, Keramik, Silikon oder Kohlenstofffasern bestehen. Der Hubtisch kann Mikrometer genau zur Erzeugung der Schichthöhen von 20  $\mu\text{m}$  bis 100  $\mu\text{m}$  verfahren werden. Die Baukammer ist nahezu gasdicht gestaltet und wird vor Prozessbeginn mit einem Inertgas, Argon, Stickstoff oder Helium, geflutet unter Beibehaltung eines Überdrucks von 10 bis 20 mbar [31]. Bedarfsgerecht können für reaktive Werkstoffe, wie z. B. Ti-6Al-4V, Sauerstoffkonzentrationen unter 0,1% eingestellt werden. Die Atmosphäre in der Baukammer wird über eine Filtereinrichtung umgewälzt, um den Prozess frei von Schmelzpartikeln und Schmauch zu halten.



Abbildung 3.2: Komponenten der industriellen Fertigungsanlage SLM 250HL