

Untersuchung des Einflusses von Sprungzeiten in der Energiemodellierung von LPBF-Prozessen mit Metallpulver

Brinkmann, Joachim; Dörr, Christoph; te Heesen, Henrik

Hochschule Trier, Umwelt-Campus Birkenfeld

Institut für Betriebs- und Technologiemanagement, Birkenfeld, Deutschland

https://doi.org/10.58134/fh-aachen-rte_2023_005

Zusammenfassung Mit stetig steigender Nachfrage nach umwelt- und ressourcenschonenden Produkten, gewinnt auch die energetische Betrachtung von Produktionsprozessen an Bedeutung. Die additive Fertigung von Metallbauteilen bietet ein hohes Potenzial an Einsparmöglichkeiten, die zunächst identifiziert werden müssen. Mithilfe von Energiemodellen, die aus den Energiebedarfen von SLM-Prozessen ermittelt wurden, können Einsparpotenziale bewertet werden. Die schwankende Genauigkeit ist bedingt durch die Qualität der Zeitmodelle, die zwar die Laserleistung detailliert analysieren, jedoch mit spezifischen Energiefaktoren berechnen. Die Analyse des Einflusses der bisher unberücksichtigten Sprungzeiten, in denen der Laser neu positioniert wird und keine Fertigung stattfindet, führt zu einer Verbesserung der Simulationsgenauigkeit. Die im Verhältnis zur Gesamtfertigungszeit geringen Sprungzeiten erklären auch die großen Schwankungen bei der hochauflösenden Abtastung der Laserleistung. Zur Implementierung in bestehende Energiemodelle müssen die Sprungzeiten aus den Fertigungsdateien des Slicers extrahiert werden.

Abstract *With the steadily increasing demand for environmentally friendly and resource-saving products, the energy perspective of production processes is also gaining significance. Metal additive manufacturing offers a high potential for savings, which need to be initially identified. Saving potentials can be evaluated using energy models, which were determined from the energy requirements of Selective Laser Melting (SLM) processes. The varying accuracy is due to the quality of the time models, which analyze the laser power in detail, but calculate with specific energy factors. The analysis of the influence of the so far disregarded jump times, during which the laser is repositioned, and no manufacturing takes place, leads to an improvement of the simulation accuracy. The jump times, which are small compared to the total manufacturing time, also explain the large fluctuations in the high-resolution scanning of the laser power. For implementation into existing energy models, the jump times must be extracted from the manufacturing files of the slicer.*

1. Einleitung

Die additive Fertigung ist ein zentrales und innovatives Werkzeug in modernen Produktionsprozessen, das längst über den reinen Prototypeneinsatz hinaus genutzt wird. Der Einsatz von additiven Fertigungen reicht von einfachsten 3D-Druckern bei Privatpersonen bis hin zur Serienfertigung in industriellen Produktionsprozessen und bietet nach te Heesen et al. [1] für nahezu alle Industriezweige große Potenziale. Während der weltweit pandemischen Lage konnten durch den gezielten Einsatz von additiven Fertigungstechnologien unterbrochene Lieferketten teilweise ersetzt und somit vielerorts die Produktion aufrecht erhalten werden [2].

Dennoch stehen moderne Produktionsprozesse vor zahlreichen Herausforderungen. Neben den nun neu aufzubauenden Lieferketten, dem stetigen Prozess der Digitalisierung und dem Fachkräftemangel nimmt die Relevanz im Bereich der Ressourcen- und Energieeffizienz bedeutend zu. Dies wird beschleunigt durch stärkere Umweltschutz- und Emissionsvorgaben, hohe und volatilere Energiepreise sowie einer stetig steigenden Nachfrage der Kunden nach umweltfreundlichen und ressourcensparenden Produkten. Dieser Paradigmenwechsel stellt Unternehmen hinsichtlich des eingesetzten Energieträgers und der Frage der Energiesicherheit vor kostenintensive Herausforderungen [3].

Trotz dieser Vorgaben und Herausforderungen wird die Ressourceneffizienz in der Fertigung nur am Rande betrachtet. Dabei bietet die additive Fertigung auf unterschiedlichen Ebenen große Potenziale. Einige, insbesondere die Leichtbaupotenziale, lassen sich bereits in der Konstruktion von Bauteilen einbauen. Hoffmann et al. [4] zeigen, dass eine angepasste Konstruktionsmethodik zu einer erheblichen Erweiterung der Freiheitsgrade führt, die von den Konstrukteuren umgesetzt werden müssen. Nach Brinkmann et al. [3] können somit Funktionen, Kraftflussoptimierungen, Bauteilreduktionen und Leichtbau zu einer hohen Ressourceneinsparung führen. Doch auch der eigentliche Fertigungsprozess lässt sich hinsichtlich der Energieeffizienz optimieren. Dies zeigt die Untersuchung der Packungsdichtung und Orientierung im Bauraum von Normzugproben [5].

Die Untersuchung der Energie- und Ressourceneffizienz an Normzugproben [5], [6] wird auch bei der Energiemodellierung zur Sicherung der Druckqualität weitergeführt.

Untersuchungen bezüglich der Energiebedarfe von SLM-Prozessen wurden bereits von Kellens et al. [7] und Baumers et al. [8] publiziert. Daraus entstanden verschiedene Energiemodelle, unter anderem von Paul und Anand [9], Yi, Krenkel und Aurich [10], Lv u. a. [11] und Hui u. a. [12]. Die bisherigen Energiemodelle sind entweder spezifisch, teilprozess- oder teilsystemorientiert. Dies führt zu Einschränkungen in der Nutzbarkeit oder Ungenauigkeiten in der Vorhersage. Nahezu alle untersuchten Modelle benötigen eine Information über die Prozesszeit, weshalb die Simulationsgenauigkeit maßgeblich von der Qualität des Zeitmodells abhängt. Die Entwicklung eines eigenen Energiemodells und die Untersuchung der Lastkurve zeigt eine stetige Schwankung der Laserleistung über den Belichtungsprozess sowie eine zeitliche Abweichung der simulierten Ergebnisse. Zur Verbesserung des Zeitmodells und somit des Energiemodells werden die Sprungzeiten bei der Belichtung eines Layers gemessen und berechnet, um deren Einfluss auf die Qualität des Energiemodells zu beurteilen.

2. Methoden

Die additive Fertigung umfasst eine Vielzahl verschiedener Fertigungsarten und Materialien. In der vorliegenden Arbeit werden metallische Werkstoffe der Gruppen Edelstahl und Aluminium aufgrund der guten Vergleichbarkeit der Zugfestigkeit mit anderen Untersuchungen und Fertigungsmaschinen ausgewählt. Eine Erweiterung ist mit dem Material 1.2709 geplant. Die Materialien werden mittels SLM-Verfahren (*selective laser melting*), auch LPBF-Verfahren (*laser powder bed fusion*) genannt, verarbeitet. Dieses Verfahren ermöglicht die Herstellung von komplexen dreidimensionalen Strukturen durch einen schichtweisen Aufbau aus Metallpulvermaterial. Die Schichten, auch als Layer bezeichnet, werden durch einen computergesteuerten Laser selektiv aufgeschweißt. Im Gegensatz zum verwandten selektiven Lasersintern wird das Pulver beim SLM-Verfahren lokal vollständig verschmolzen und eine relative Dichte von über 99 Prozent erreicht [13]. Dies sorgt dafür, dass die Eigenschaften des fertigen Werkstücks vergleichbar mit denen aus konventioneller Fertigung sind [5].

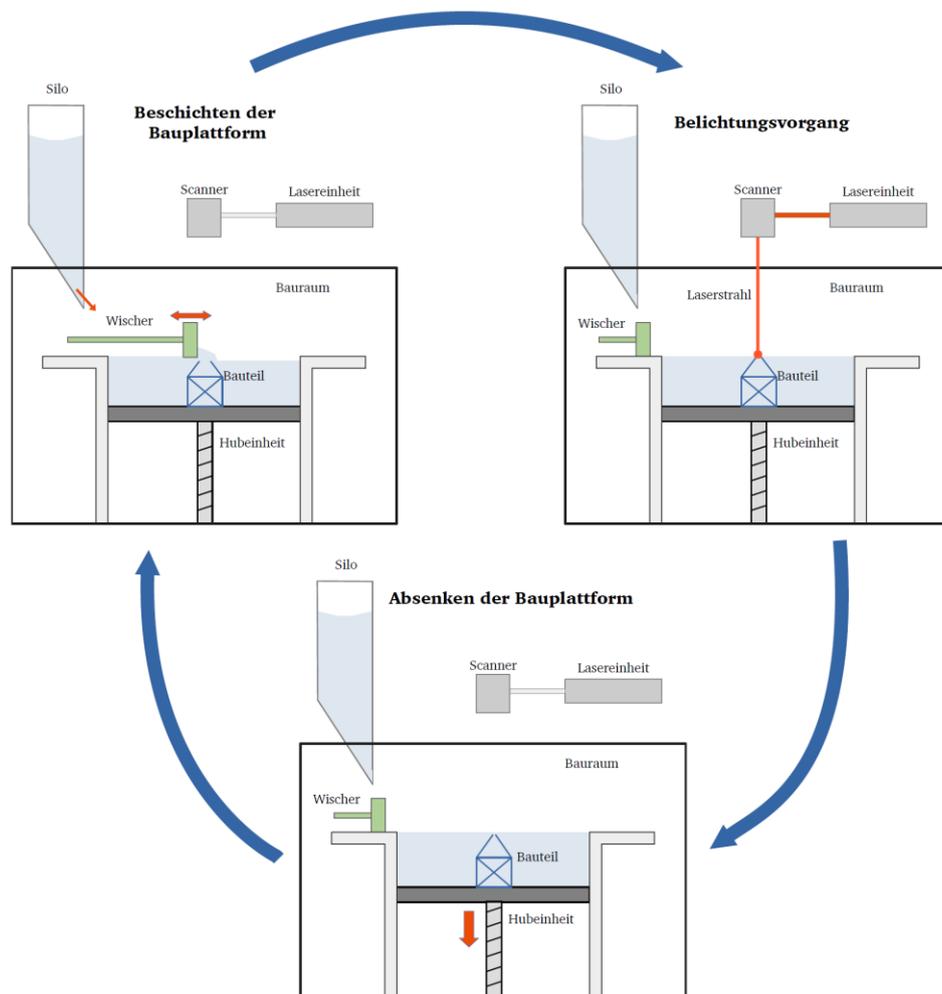


Abbildung 2-1: Schematische Darstellung des Grundprinzips des SLM-Verfahrens. Der zyklische Aufbauprozess wiederholt sich bei jeder weiteren Schicht.

Der SLM-Fertigungsprozess kann nach Kellens [7] in vier Phasen untergliedert werden:

1. Vorbereitung: Start der Maschine, Vorwärmen, Inertisierung
2. Belichten: Selektives Aufschmelzen des Pulvers
3. Beschichten: Beschichten mit neuem Pulver
4. Nachbearbeitung: Auspacken des Werkstücks, Trennen von der Bauplattform, Reinigung und Wiederherstellung der Maschine

Der zyklische Ablauf von Beschichtung und Belichtung ist in Abbildung 2-1 dargestellt und kann nachfolgend als Bauphase zusammengefasst werden.

Das Aufschmelzen durch den Laser erfolgt hierbei jedoch nicht als Strahl und Spur, sondern die Energie wird punktuell und pulsend eingebracht. Hierbei sind mehrere Parameter für die Druckgeschwindigkeit und auch für die Druckqualität entscheidend: Spot-Durchmesser, der Punktabstand (*spot distance*), der Abstand der Hatches (*Hatch-Distance*), die Laserleistung und die Belichtungsdauer. Weiterhin können verschiedene Belichtungsstrategien, auch Scanstrategien, eingesetzt werden. Durch die unterschiedlichen Strategien, Stripe, Chess und Meander, die in Abbildung 2-2 dargestellt sind, kann der Wärmeeintrag und somit die inneren Spannungen und die Mikrostruktur beeinflusst werden [14]. Innerhalb eines Layers existieren drei unterschiedliche Strukturen, die Füll-, Kontur- und Stützstrukturen, deren Belichtungsparameter und Reihenfolge innerhalb der Strategien variiert werden können.

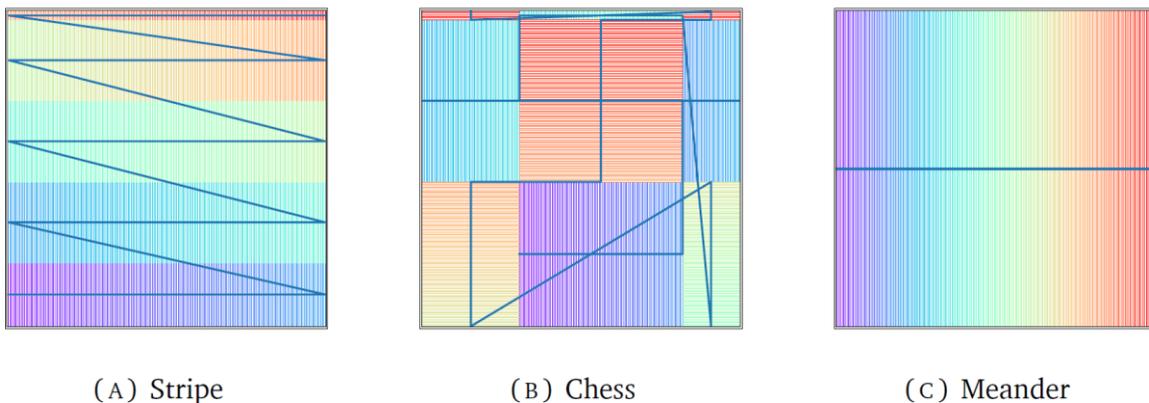


Abbildung 2-2: Drei verschiedene Belichtungsstrategien des SLM-Verfahrens. Der Weg des Laserstrahls ist durch die blauen Linien gekennzeichnet. Die farbliche Hervorhebung dient zur Unterscheidung der belichteten Geometrien.

Die Belichtungsstrategien sind mit aneinandergereihte Belichtungsstreifen aufgebaut, die sogenannten Hatches. Die Abstände der Hatches werden Hatchdistance genannt und wirken sich, ebenso wie der Punktabstand, auf die Druckgeschwindigkeit [15] aus. Das punktuelle Abtasten des Lasers während der Belichtung kann in zwei Phasen unterteilt werden [12]. Ist der Laser aktiv und die Scannereinheit, die optische Komponente zur Positionierung des Lasersfokuses, inaktiv, wird von der Belichtungszeit gesprochen. Im umgekehrten Fall, die Scannereinheit positioniert den nächsten Belichtungspunkt, erzeugt der Laser keinen Energieeintrag in das Pulverbett. Dieser Zustand wird Sprungzustand und die Zeit zwischen zwei Belichtungspunkten wird Punkt-zu-Punkt Sprungzeit (*P2P*

Jumps) genannt. Der Bauvorgang und somit auch der Energiebedarf ist von den summierten Sprungzeiten und Belichtungszeiten abhängig.

Für die Untersuchung wird SLM-Fertigungsmaschine vom Typ AM400 des Herstellers Renishaw eingesetzt. Diese additive Fertigungsmaschine verfügt über einen Bauraum von 250 mm x 250 mm x 300 mm und ermöglicht mit einer 400-W-Lasereinheit die Fertigung von Bauteilen aus verschiedensten Metallen.

Energiemodellierung

Das Aufzeichnen der Energiebedarfe erfolgt mittels Energiedatenlogger des Typs Fluke 1730 und Emonio P3 in einer zeitlichen Auflösung von 1 Sekunde.

Der Energiebedarf des SLM-Druckvorgangs setzt sich aus dem Bedarf der verschiedenen Teilsysteme und -phasen zusammen. Nach Lv et al. [11] können die bisherigen Energiemodelle für die additive Fertigung in drei Gruppen unterteilt werden:

- spezifische,
- phasenbasierte und
- teilsystembasierte Modelle.

Spezifische SEC-Modelle (*specific energy consumption*) basieren auf einem für die Maschine und den Werkstoff spezifischen Energiebedarf. Meist wird als Kennzahl die zu verschmelzende Masse inklusive der notwendigen Stützstrukturen genutzt. Alternativ kann auch die zu belichtende Fläche als Kennzahl genutzt werden, wodurch die Werkstücksgeometrie, Schichtdicke und Ausrichtung berücksichtigt werden können. Neben dem reinen Strombedarf der SLM-Maschine können auch Peripheriegeräte, wie den bei der Renishaw AM400 vorhandenen Kühl- und Trockengeräten, einfließen [8]. Das SEC-Modell eignet sich zur schnellen Abschätzung des Energiebedarfs.

Im Teilphasenmodell wird der Fertigungsprozess in die einzelnen Prozessschritte unterteilt. Yi et al. [10] unterteilt den Fertigungsprozess in Vorbereitungs-, Bau- und Nachbereitungsphase, wobei für jede Phase ein eigenes Zeit- und Leistungsmodell erstellt wird. Diese zusätzlichen Informationen ermöglichen nicht nur den Gesamtenergiebedarf, sondern auch den Bedarf einzelner Fertigungsschritte genau zu bestimmen.

Das Teilsystemmodell unterteilt das Fertigungssystem in einzelne energetisch relevante Teilsysteme. Häufig werden, wie auch hier bei der AM400, die Steuerung, der Laser, die Kühleinheit und andere Peripheriegeräte getrennt voneinander betrachtet. Die Simulationsgenauigkeit ist abhängig vom Detailgrad der betrachteten Komponenten und kann durch die Erhöhung der Komplexität gesteigert werden.

Trotz stetiger Verbesserung der Energiemodelle, sind in den betrachteten Publikationen einige Einschränkungen erkennbar.

- Bis auf das Modell von Yi [10], sind viele Energiemodelle nicht automatisiert und können daher nur eingeschränkt auf Anwendungsfälle übertragen werden.
- Viele Modelle basieren auf der Losgröße eins und sind nicht verifiziert.

- Die Werkstückgeometrie wird nicht berücksichtigt. Baumers [8] geht zudem davon aus, dass die Geometrie keine Auswirkung auf den Energiebedarf hat.
- Yi [10] verwendet Zufallsfaktoren, um die Schwankungen der Leistungsaufnahme während der Bauphase darzustellen. Die Untersuchung von Hui [12] weist jedoch darauf hin, dass diese Schwankungen durch Prozessparameter und Sprungzeiten hervorgerufen werden.

Einige Modelle verwenden stark vereinfachte Zeitmodelle, obwohl alle untersuchten Energiemodelle Informationen zur Prozesszeit benötigen. Dies lässt darauf schließen, dass die Simulationsgenauigkeit maßgeblich von der Qualität der Zeitprognose abhängig ist.

Die Auswertung der Aufzeichnungen erfolgt zunächst händisch mit einem eigens entwickelten Excelmodell. Dieses basiert auf einem gemischten Ansatz aus spezifischem und einem Teilprozessmodell. Zum Vergleich der simulierten Energiedaten werden verschiedene Ansätze stetig miteinander und dem entwickelten Pythonmodell verglichen.

PySML Python Bibliothek

Die Python Bibliothek PySLM des Entwicklers Parry [16] ist eine wesentliche Komponente des Pythonenergiemodells und dient zur Simulation des Zeitmodells. PySLM ermöglicht es, die durch das Slicer-Programm erstellte Druckdatei mit dem CNC-Code im proprietären Renishaw „.mtt“ Dateiformat zu öffnen und anschließend mittels Python zu analysieren. Zum Einlesen der „.mtt“ Datei, dem sogenannten „parsen“, nutzt PySLM die ebenfalls von Luke Parry entwickelte Bibliothek libSLM in der Programmiersprache C++ [16]. Neben dem Dateiformat von Renishaw können auch Dateiformate anderer Hersteller von libSLM importiert werden.

PySLM betrachtet jeden Layer als eine Sammlung aus Konturen (Contours), Schraffuren (Hatches) und Belichtungspunkten, die zu einer Geometrie zusammengefasst werden. In der Übersicht der Belichtungsstrategien sind die Geometrien farblich hervorgehoben, siehe Abbildung 2-2. Jeder Geometrie wird ein eindeutiger sogenannter „BuildStyle“ zugeordnet. Dieser dient als Sammlung der Prozessparameter des Lasersystems und enthält Parameter wie Laserleistung, Punkt-Abstand, Belichtungsdauer der einzelnen Punkte und Verfahrensgeschwindigkeiten des Laserstrahls.

PySLM verfügt über umfangreiche Analyse-Funktionen. Die zur Belichtung einer Geometrie benötigte Zeit $t_{scan,Geometrie}$ ergibt sich aus der Pfadlänge, die der Laser zur Belichtung zurücklegen muss, und der Geschwindigkeit v_{laser} .

Bei v_{laser} handelt es sich um die sogenannte „Effektive Lasergeschwindigkeit“, die mit der Gleichung 2.2 berechnet werden kann. Zur Berechnung von v_{laser} wird der Abstand zwischen den Belichtungspunkten $s_{pointDistance}$, die Belichtungsdauer der Punkte $t_{pointExposure}$ sowie die Sprungzeit zwischen den Punkten, bestehend aus der Fahrzeit $t_{p2pJumpTravel}$ und einer Verzögerungszeit $t_{p2pJumpDelay}$, benötigt. Dieses Verfahren wird auch von Gibson und Lowden [17] angewendet, die in ihrer Untersuchung ebenfalls eine Renishaw AM400 Maschine einsetzen.

$$v_{laser} = \frac{s_{pointDistance}}{t_{pointExposure} + t_{p2pJumpTravel} + t_{p2pJumpDelay}} \quad (2-1)$$

Zwischen den einzelnen Geometrien finden ebenfalls Sprungvorgänge statt. Die Dauer der

Sprungvorgänge t_{jump} hängt maßgeblich von deren Pfadlänge und der Verfahrensgeschwindigkeit des Lasers bei Sprungvorgängen ab. Zusätzlich kann eine Sprungverzögerung berücksichtigt werden

$$t_{jump} = \frac{s_{jump}}{v_{jump}} + t_{jumpDelay} \quad (2-2)$$

Experimenteller Aufbau

Untersucht wird der elektrische Energiebedarf während des gesamten Druckprozesses, einschließlich der notwendigen Hilfsprozesse vor der eigentlichen Druckphase. Dazu gehören die Vorbereitungszeit der Maschine durch den Bediener und das Inertisieren des Druckraums. Die Energieliesimulation berücksichtigt mit aktuellem Stand lediglich den elektrischen Energiebedarf der SLM-Maschine selbst.

Zusätzlich zu den im Energiemodell untersuchten Energieaufzeichnungen von sieben vollständigen Druckaufträgen wurden zeitlich hochauflösende Leistungsmessungen einzelner Druckphasen von neun vereinfachten Testobjekten durchgeführt. Diese Messungen dienen dazu, die korrekte Berechnung der Sprungvorgänge des Laserstrahls zu untersuchen und zu verifizieren.

Leistungsmessung mittels Speicheroszilloskop

Der Einfluss von Sprungzeiten auf die Druckdauer und den Lastgang der SLM-Maschine sollen nicht nur berechnet, sondern durch experimentelle Messungen überprüft werden. Mit einem Mittelungsintervall von 1 s ist die zeitliche Auflösung gängiger Energie-Logger nicht ausreichend, um aus dem Verlauf der Leistungsaufnahme Rückschlüsse auf die Sprungvorgänge der Lasereinheit zu schließen. Zur Leistungsmessung von kurzzeitigen Ereignissen wurde ein digitales Speicheroszilloskop (DSO) eingesetzt. Mit einer Speichertiefe von 10 Mpts pro Kanal und einer Abtastrate von 1 GS/s kann das hier verwendete DSO vom Typ GW Instek GDS-1104B kurzzeitige Signale erfassen und aufzeichnen. Um einen kompletten Layer des Testobjekts aufzeichnen zu können, wurde das Messintervall auf 0,5 ms eingestellt. Durch die gleichzeitige Messung von Spannung und Strom lässt sich die Wirkleistung mit dem Prinzip der Momentanleistung bestimmen.

Bei der Verwendung von aktiven Messmitteln, hier ein Differentialastkopf vom Typ Micsig DP10007 zur Spannungsmessung und eine Strommesszange vom Typ Hantek CC-65, ist jedoch darauf zu achten, dass diese eine Phasenverschiebung des Messsignals verursachen können. Eine Phasenverschiebung würde die Leistungsberechnung beeinträchtigen, kann jedoch durch eine Phasenkompensation (Deskew) ausgeglichen werden. Um eine Phasenverschiebung mit den hier eingesetzten Messmitteln ausschließen zu können, wurde diese anhand eines Ohmschen Verbrauchers überprüft und war bei 50 Hz Netzfrequenz nicht feststellbar. Eine weitere Einschränkung bei der Leistungsmessung per DSO ist die geringe vertikale Auflösung von 8 Bit des verwendeten DSOs [18].

Aus diesem Grund wurde auf die DSO-interne Mathematikfunktion zur Multiplikation von Strom und Spannung verzichtet und die Berechnungen in Excel durchgeführt. Zur quantitativen Bestimmung des Energiebedarfs ist ein Energielogger, wie der verwendete Fluke 1730, mit 16 Bit besser geeignet.

Definition der Testkörper

Als Testkörper wird ein Hohlzylinder, wie er Schematisch in Abbildung 3-3 dargestellt ist, mit

Außendurchmesser von 100 mm und einer Wandstärke von 10 mm eingesetzt, um möglichst Richtungsunabhängig und über die Layer hinweg eine konstante Sprunganzahl und Sprungzeiten zu generieren. Der Zylinder wird in drei verschiedenen Belichtungsstrategien jeweils mit unterschiedlichen Leistungs presets wie in Tabelle 2-1 dargestellt gefertigt. Die gewählten Leistungen entsprechen den Standartvorgaben des Herstellers für die unterschiedlichen Belichtungsstrategien und Schichtdicken. Weitere Messungen außerhalb der Standartvorgaben wurden nicht durchgeführt, da nicht davon auszugehen ist, dass diese in der Praxis eingesetzt werden.

Tabelle 2-1: Testkörper und Variation der Leistungs presets. Gewählt wurden die Standartvorgaben des Herstellers bezüglich Laserleistung und Schichtdicke.

Scanstrategie	Leistungs preset	Schichtdicke
Meander	200 W	25 µm
	275 W	30 µm
	400 W	40 µm
Stripe	200 W	25 µm
	275 W	30 µm
	400 W	40 µm
Chess	200 W	25 µm
	275 W	30 µm
	400 W	40 µm

3. Ergebnisse

Detailzeitmodell der Bauphase

Die Eigenschaften der Bauphase werden durch die Werkstückgeometrie und durch Prozessparameter definiert. Das entwickelte Energiemodell dieser Phase orientiert sich an dem physischen Aufbau des Werkstücks während des SLM-Prozesses. Das Werkstück wird aus Layern schichtweise aufgebaut, diese bestehen wiederum aus einzelnen Geometrien. Aus diesem Aufbau ergibt sich das Zeitmodell des Belichtungsvorgangs eines Layers in **Abbildung 3-1**.

Jede Geometrie des Werkstücks wird mit den zugehörigen Prozessparametern analysiert und die energetischen Kenndaten berechnet. Zwischen den einzelnen Geometrien findet jeweils ein Sprungvorgang statt, nachfolgend auch als „Geometry-Jump-Time“ bezeichnet. Durch die Punkt-für-Punkt Belichtung der AM400 SLM-Maschine finden auch Sprungvorgänge zwischen den einzelnen Belichtungspunkten innerhalb einer Geometrie statt. Deren Dauer wird innerhalb der Simulation als P2P-Jump-Time bezeichnet und beinhaltet die Verzögerung zwischen den einzelnen Sprüngen, den sogenannten „P2P-Jump-Travel-Delay“, und die eigentliche Verzögerung „P2P-Jump-Travel-Time“. P2P-Jump-Travel-Time wird durch den Abstand der Belichtungspunkte und der Sprunggeschwindigkeit definiert, Beschleunigungsvorgänge werden nicht berücksichtigt. Die Belichtungszeit einer Geometrie, die im Quellcode der Simulation auch als „Scan-Time“ bezeichnet wird, kann als Quotient der Pfadlänge und der effektiven Lasergeschwindigkeit abgebildet werden, siehe Gleichung (3-1).

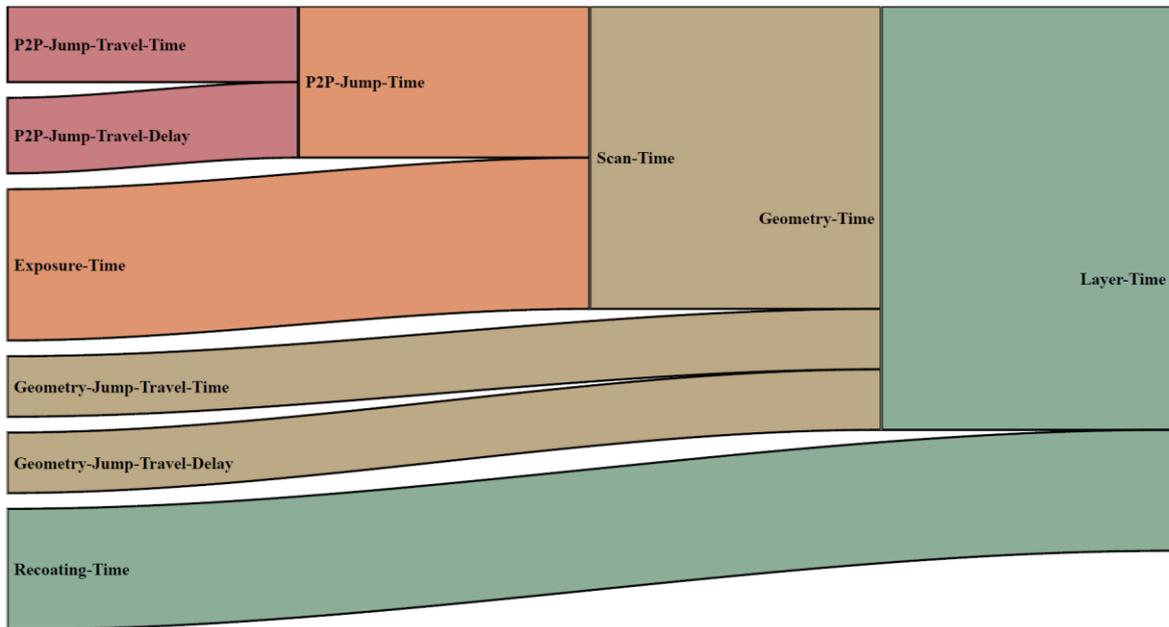


Abbildung 3-1: Diagramm des Zeitmodell für die Belichtung eines Layers. Die englischen Bezeichnungen wurden zur besseren Nachvollziehbarkeit beibehalten. Die Sprungzeiten sind ein relevanter Einflussfaktor für die Fertigungszeit eines Layers.

Scan- Time und Geometry-Jump-Time ergeben in Summe die Zeit, die zur Bearbeitung einer Geometrie („Geometry-Time“) benötigt wird. Sobald alle Geometrien eines Layers belichtet wurden, beginnt der Beschichtungsvorgang der Bauplatzform mit einer neuen Pulverschicht und der Zeit „Recoating-Time“.

Insgesamt kann die Dauer der Bauphase mit Anzahl der Geometrien n und der Anzahl der Layer m wie folgt dargestellt werden:

$$t_{built} = \sum_{i=1}^n t_{scan,i} + t_{jump,i} + \sum_{s=1}^m t_{recoat,s} \quad (3-1)$$

Leistungsaufnahme der Lasereinheit

Die Lasereinheit, bestehend aus einer Laserquelle und einer Scanner-Einheit, ist während der gesamten Bauphase aktiv. Ihre Leistungsaufnahme ist abhängig von der eingestellten Laserleistung und kann innerhalb kurzer Zeiträume stark variieren, siehe Abbildung 3-2. Da die einzelnen Geometrien eines Werkstücks mit unterschiedlichen Laserleistungen belichtet werden können, wird die Leistungsaufnahme des Systems mit einer Leistungskennlinie abgebildet.

Bei der Ermittlung der Leistungskennlinie durch Messungen der Leistungsaufnahme bei verschiedenen Laserleistungen ist das Verhältnis von Belichtungsdauer und P2P-Sprungverzögerungen zu berücksichtigen. Dieses Verhältnis wird nachfolgend auch als Tastgrad D bezeichnet. Die Auswirkungen des Tastgrads auf die Leistungsaufnahme des Systems kann anhand des gemessenen Lastgangs der Lasereinheit für einen Layer des Testkörpers aus Abbildung 3-2 verdeutlicht werden, siehe Abbildung 3.8. Die im Slicer-Programm eingestellte Laserleistung beträgt für alle in der Abbildung 3-2 dargestellten Geometrien 400 W, dennoch steigt die Leistungsaufnahme der Lasereinheit am Ende des

Layers von ca. 1100 W auf 1400 W.

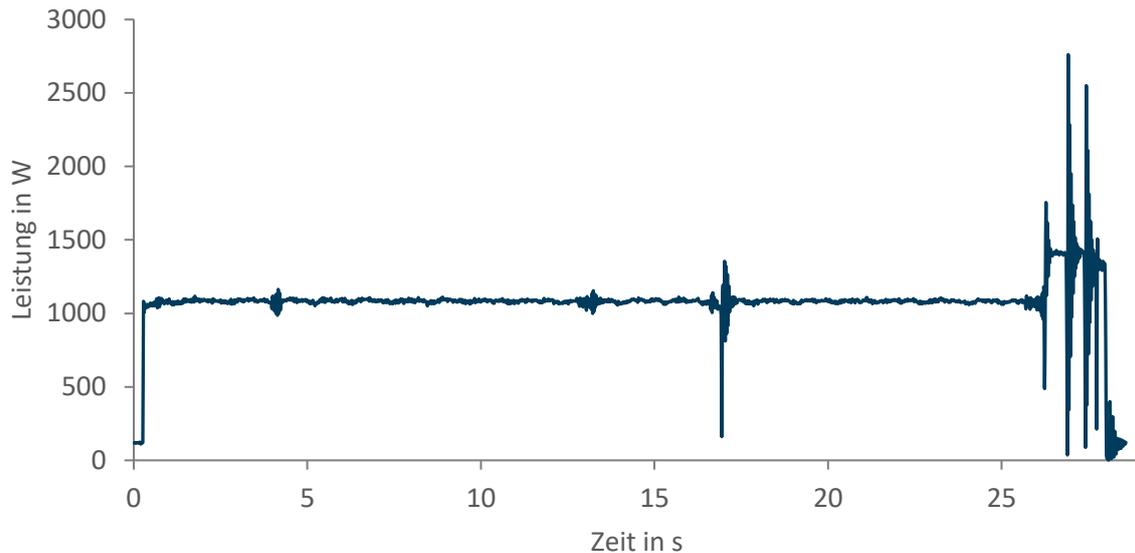


Abbildung 3-2: Leistungsaufnahme der Lasereinheit über einen kompletten Layer. Am Ende der Belichtung des Layers werden die Konturen doppelt belichtet.

Als Ursache für dieses Verhalten wurde die erhöhte Belichtungsdauer bei Belichtung der Außenkonturen identifiziert. Beide Außenkonturen werden jeweils zweimal belichtet, der Tastgrad des Lasers erhöht sich dabei von 71 % auf 90 %.

Zur Berechnung der Leistungskennlinie der Lasereinheit wurden Messungen der Leistungsaufnahme bei Laserleistungen zwischen 200 W und 400 W durchgeführt, da Laserleistungen unter 200 W auch bei den betrachteten Druckaufträgen für die Energiemodellierung (siehe Abbildung 4-1) mit den Standartvorgaben des Herstellers für 316L Edelstahl und AISi10Mg keine Anwendung findet.

Die Kennlinie kann für die betrachtete Renishaw AM400 Maschine unter Berücksichtigung der Leistungsaufnahme des Lasersystems im Leerlauf (ca. 100 W) mit einem Wirkungsgrad von 25 % beschrieben werden. Der gemessene Wirkungsgrad des Lasersystems liegt im oberen Bereich für Glasfaser-Laser. Dieser liegt je nach Art der Laserquelle zwischen 10 % und 30 % [19].

Untersuchung der Sprungzeiten anhand der Testkörper

Anhand der Testobjekte soll untersucht werden, ob die Interpretation der Python Bibliothek PySLM mit der des Slicer-Programms übereinstimmen. Dies führt zu der Kernfrage, ob die Sprungzeiten richtig berechnet werden und welchen Einfluss diese auf den Energiebedarf in der additiven Fertigung haben.

In Summe werden neun Testobjekte mit unterschiedlichen Parametern untersucht. Die Parameter unterscheiden sich bei dem Testobjekt in Form eines Rings in der Belichtungsstrategie, der Schichtdicke und der Laserleistung wie in der Tabelle 2-1 dargestellt. Im Versuchsaufbau werden die berechneten Sprungzeiten mit den gemessenen Sprungzeiten verglichen.

1. Meander-Belichtungsstrategie

Das Slicen mit der Belichtungsstrategie führt zu einer Aufteilung des Objekts in sechs Geometrien, resultierend aus den sechs Belichtungsschritten. Die ersten beiden Schritte sind die Belichtung der aufgeteilten Geometrie, farblich unterschiedlich in Abbildung 3-3 dargestellt. Die Schritte vier bis sechs sind die zweifache Belichtung der inneren und äußeren Kontur. Die Belichtung erfolgt wie in Abbildung 3-3 beginnend am linken Rand und folgt der blauen Linie nach rechts. Ebenfalls in blau dargestellt sind die Sprünge.

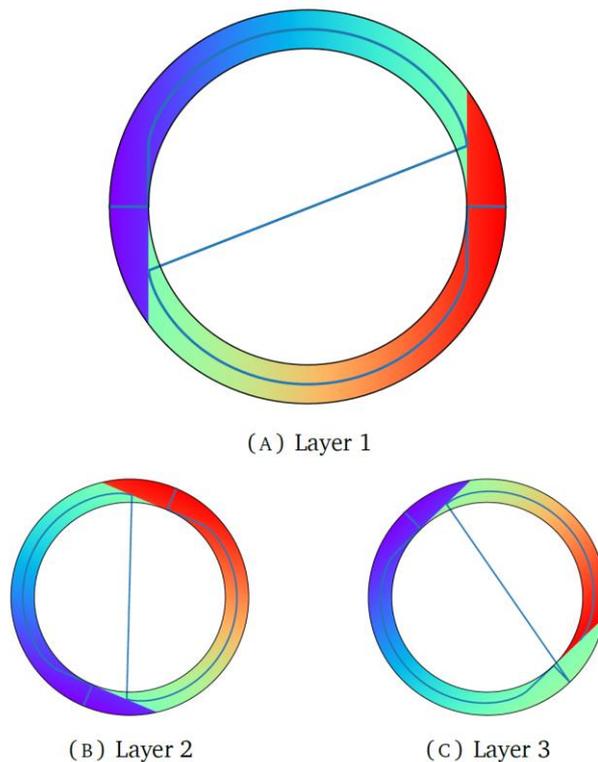


Abbildung 3-3: Geometrien der Layer eins bis drei in der Scanstrategie Meander. Die blaue Linie stellt den Verlauf der Belichtung sowie die Sprünge zwischen den Geometrien dar.

Gemäß der Belichtungsschritte werden mindestens fünf Sprungvorgänge erwartet. PySLM ermittelt insgesamt sechs Sprünge mit einer Dauer zwischen 15 ms und 30 ms. Ob der sechste Sprung ein Initialsprung vom Maschinen-Nullpunkt zur ersten Geometrie ist, oder der Sprung zum nächsten Layer, lässt sich nicht abschließend reproduzieren. Im Preset mit 400-W-Leistung entspricht die Gesamtsprungzeit von 0,12 s einem Sprunganteil von 0,4 %.

In Abbildung 3-4 ist ein Vergleich des berechneten und gemessenen Lastgangs der Maschine bei der Belichtungsstrategie Meander dargestellt. Die beiden Leistungskurven weisen die gleichen charakteristischen Merkmale auf, der Sprungvorgang in der Mitte des Graphen zeichnet sich deutlich durch ein Absinken der Leistungsaufnahme ab. Die vier Sprungvorgänge zur Belichtung der Außenkonturen am Ende des Layers sind ebenfalls zu erkennen. Insgesamt entspricht der Verlauf der berechneten Leistungskurve den gemessenen Werten, bei allen drei Leistungs-Presets tritt jedoch eine negative zeitliche Abweichung auf.

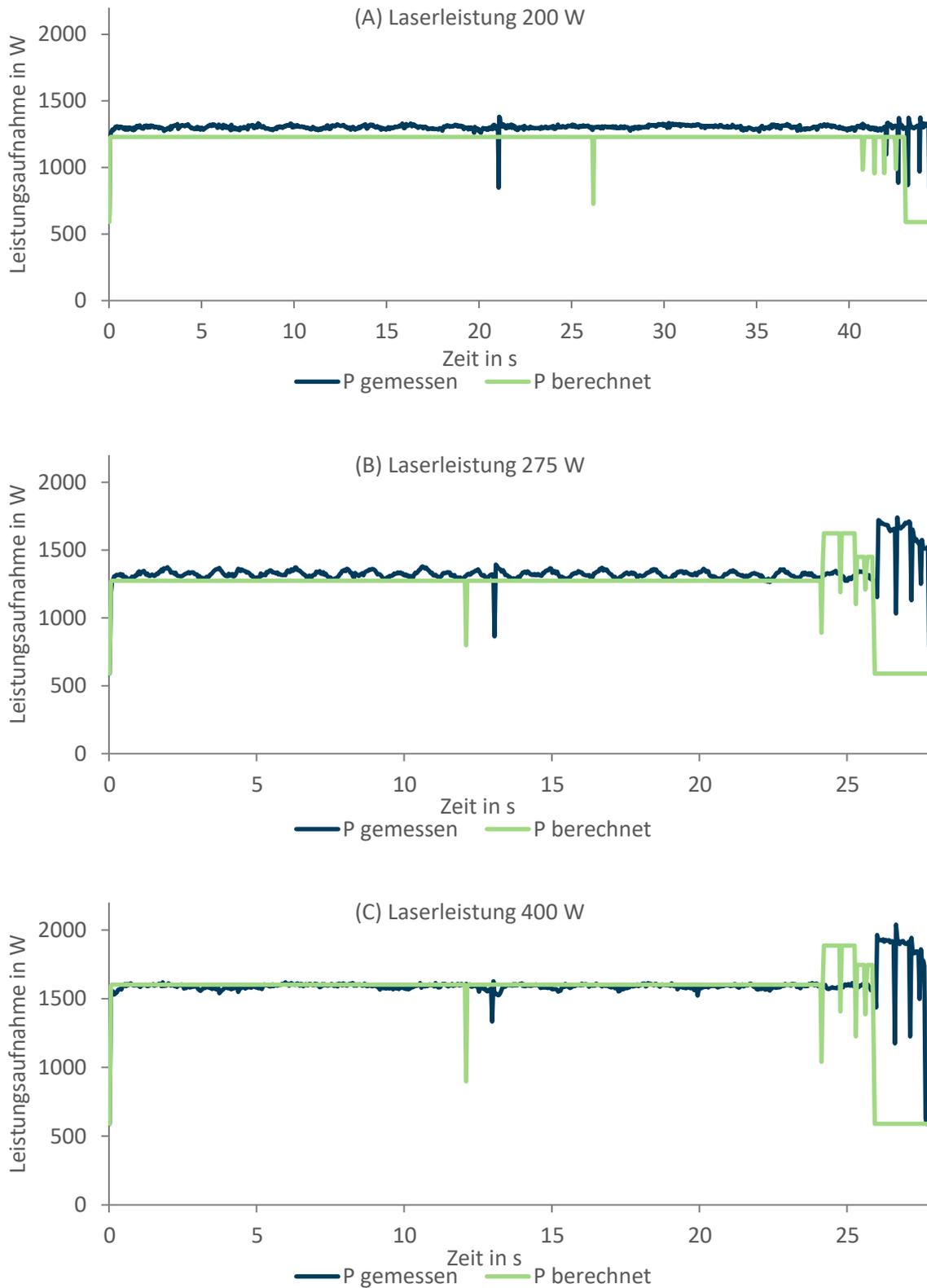
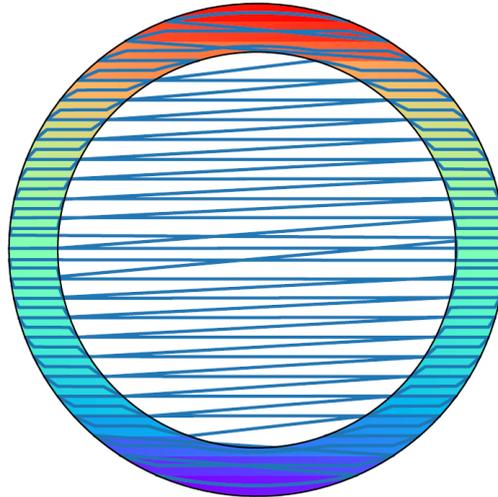


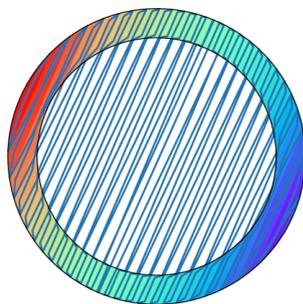
Abbildung 3-4: Gemessener und berechneter Lastgang der Maschine bei der Belichtungsstrategie Meander und drei verschiedenen Laserleistungen. Die beiden Leistungskurven weisen die gleichen charakteristischen Merkmale auf, weichen jedoch zeitlich voneinander ab.

2. Stripe-Belichtungsstrategie

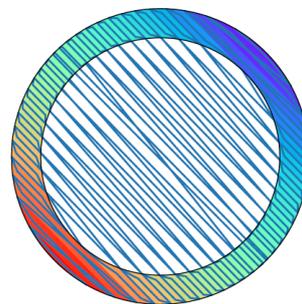
Die Belichtungsstrategie Stripe wird üblicherweise bei den Standard-Presets eingesetzt und kommt auch bei den untersuchten Druckvorgängen überwiegend zum Einsatz. In Abbildung 3-5 ist der charakteristische Streifenaufbau zu erkennen. Im Vergleich zur Meander-Belichtungsstrategie erhöht sich die Anzahl der räumlich getrennten Geometrien und somit zwangsläufig die Anzahl der Sprungvorgänge.



(A) Layer 1



(B) Layer 2



(C) Layer 3

Abbildung 3-5: Darstellung der ersten drei Layer in der Belichtungsstrategie Stripe.

Die Sprungzeiten, in Abbildung 3-6 dargestellt, nehmen mit zunehmendem Radius des Testobjektes zu und anschließend wieder ab. Am Ende ist wiederum die doppelte Belichtung der Konturen zu erkennen. In Summe sind 48 Sprungvorgänge mit einer Gesamtzeit von 0,86 s notwendig.

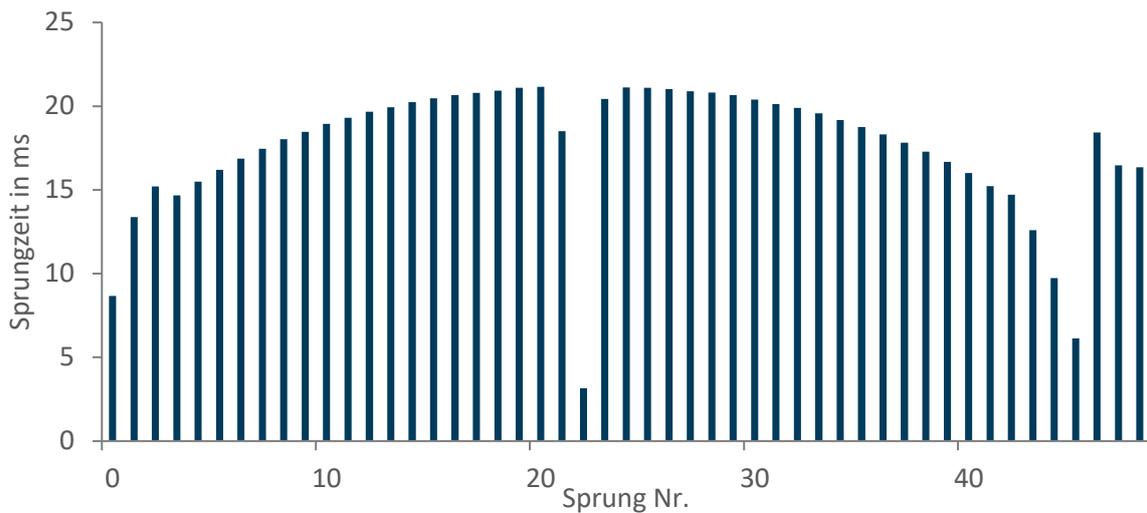


Abbildung 3-6: Sprungzeiten beim runden Testobjekt mit Stripe-Scanstrategie und 400 W Laserleistungs-Preset.

In Abbildung 3-7 ist der berechnete und gemessene Lastgang der Maschine bei der Belichtungsstrategie Stripe und 200 W Laserleistung dargestellt. Im Vergleich mit den belichteten, zusammenhängenden Geometrien aus Abbildung 3-5, die in ihrer Fläche erst ansteigen und anschließend bis zum Mittelpunkt des Körpers immer kleiner werden, ist die Charakteristik deutlich sichtbar. Die berechneten Einbrüche der Leistungsaufnahme, verursacht durch das momentane Abschalten der Laserquelle bei Sprungvorgängen, entsprechen in ihrer Größe den gemessenen Werten in hohem Maße. Die verbleibenden Abweichungen sind unter anderem dem Mittelungszeitraum der Messergebnisse von 40 ms, entsprechend zwei Netzsinus-Perioden, und der Messgenauigkeit des Aufbaus, geschuldet. Insgesamt zeigt sich eine zeitliche Abweichung der Simulation. Beim dargestellten Objekt mit 200-W-Laser-Preset beträgt diese $-2,8\%$ gegenüber den Messwerten.

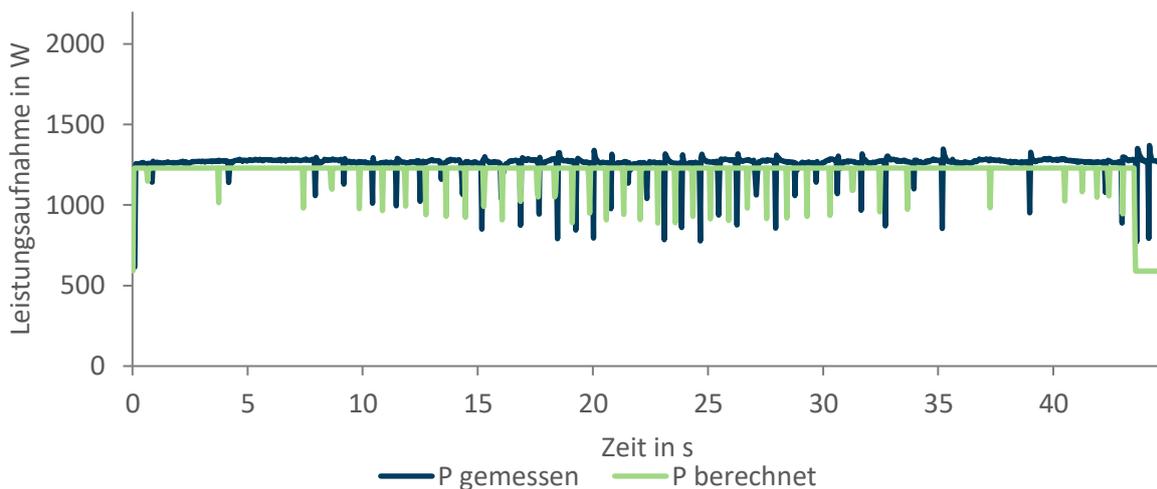


Abbildung 3-7: Gemessener und berechneter Lastgang der AM400 bei einer Laserleistung von 200 W in der Belichtungsstrategie Stripe. Zu erkennen ist ein charakteristischer Verlauf in Form des Testobjekts durch immer größer werdende Sprünge.

3. Chess-Belichtungsstrategie

Bei der Belichtungsstrategie Chess erfolgt die Belichtung des Werkstücks in einem Schachbrettmuster. Dies soll zu einer gleichmäßigeren Wärmeverteilung, geringeren internen Spannungen und damit einem verringerten Verzug des Werkstücks führen. Durch das Schachbrettmuster ist die Fläche der einzelnen, zusammenhängenden Geometrien, die vom Laser belichtet werden müssen, systematisch begrenzt. Dies resultiert in einer höheren Anzahl an Geometrien und korrespondierenden Sprungvorgängen. Die Interpretation des Maschinencodes durch PySLM in Abbildung 3-8 verdeutlicht dieses Verhalten. Anhand des Chess-Testkörpers soll überprüft werden, ob eine Änderung der Anzahl an Sprungvorgängen bei einem ansonsten identischen Testkörper zu einer Änderung der zeitlichen Simulationsabweichung führt.

Die Anzahl der Sprungvorgänge erhöht sich gegenüber den anderen beiden Strategien Meander und Stripe deutlich. In Summe sind 66 Sprungvorgänge pro Layer mit einer Gesamtzeit von 0,82 s notwendig. Der direkte Vergleich mit der Stripe-Strategie (48 Sprünge bei total 0,86 s) zeigt, dass eine Erhöhung der Sprungvorgänge nicht automatisch eine Verlängerung der Druckdauer induziert.

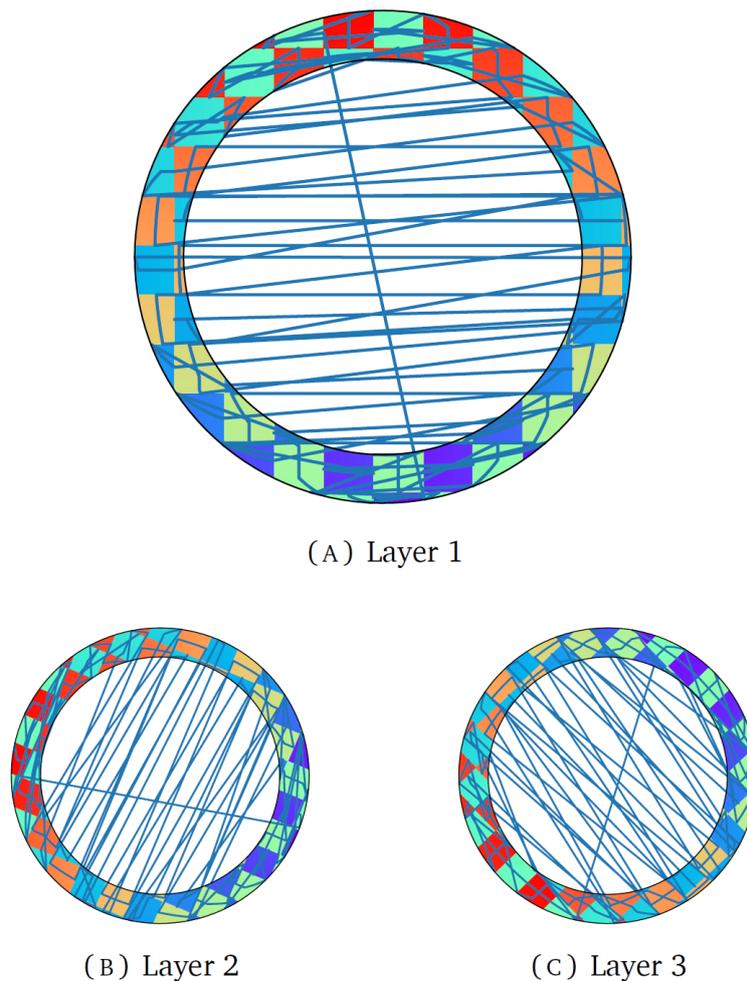


Abbildung 3-8: Geometrien der Layer eins bis drei mit der Belichtungsstrategie Chess

Im Gegensatz zum Lastgang der Stripe Scanstrategie lässt sich bei der Chess-Strategie kein konkretes Muster erkennen. Die berechnete Leistungsaufnahme liegt, wie in Abbildung 3-9 erkennbar, gegenüber den gemessenen Werten während des gesamten Layers auf einem niedrigeren Niveau. Die zeitliche Abweichung der berechneten Druckzeit des Layers mit 200-W-Laserleistungs-Preset beträgt $-3,2\%$ und liegt damit auf dem Niveau der Belichtungsstrategien Meander und Stripe.

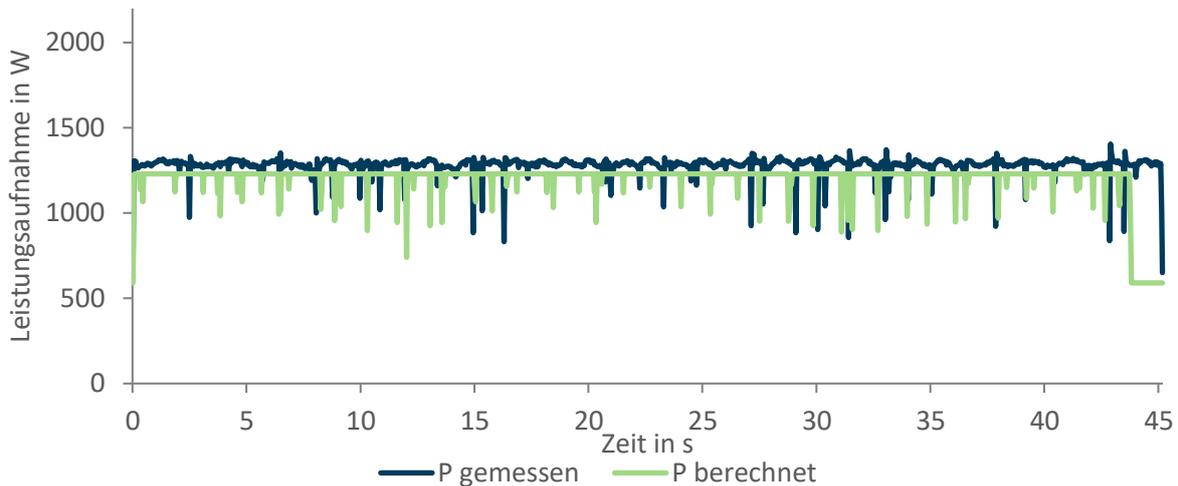


Abbildung 3-9: Gemessener und berechneter Lastgang der AM400 bei 200 W und der Belichtungsstrategie Chess. Die Chess-Strategie verursacht die höchste Anzahl an Sprungvorgängen, deren Gesamtdauer gegenüber der Stripe Strategie jedoch leicht geringer ist. Im Gegensatz zu den Strategien Meander und Stripe lässt sich kein Muster erkennen.

Gegenüberstellung der Ergebnisse

Die berechneten und gemessenen Druckzeiten eines Layers des Testkörpers, sowie die korrespondierenden zeitlichen Simulationsabweichungen bei verschiedenen Belichtungsstrategien sind in Tabelle 3-1 zusammengefasst. Bei allen drei betrachteten Leistungs-Presets erreicht die Belichtungsstrategie mit den wenigstens Sprungvorgängen, die Meander-Strategie, die kürzeste Zeit zur Belichtung der Geometrien des Testkörpers. Insgesamt zeigt sich, dass eine erhöhte Anzahl und Dauer von Sprungvorgängen sich negativ auf die zeitliche Effizienz von Belichtungsstrategien auswirkt.

Jedoch gilt, dass Belichtungsstrategien Auswirkungen auf das Materialgefüge haben. Strategien wie Stripe dienen der Reduzierung von Temperaturhotspots und Spannungen im Material, eine Auswahl rein nach zeitlicher Effizienz ist daher nicht zielführend.

Die zeitliche Abweichung liegt zwischen -5% bei der Belichtungsstrategie Stripe und $-5,8\%$ bei der Strategie Chess. Mit einer Abweichung von $-5,4\%$ liegt die Meander-Strategie trotz ihrer geringen Sprungzeiten zwischen bei anderen Strategien. Somit liegt kein Indikator vor, dass die Abweichungen auf Sprungzeiten zurückzuführen sind.

Insgesamt zeigen die Ergebnisse dieses Abschnitts, dass die Energiesimulation die Druckzeit und Leistungsaufnahme der SLM-Maschine für Druckaufträge eines vereinfachten Testkörpers mit verschiedenen Belichtungsstrategien und Laserleistungen berechnen kann.

Tabelle 3-1: Simulationsabweichung bei verschiedenen Belichtungsstrategien. Die gemessene Zeit gilt für einen Layer des Testkörpers.

Scanstrategie	Leistungs preset	Zeit berechnet (s)	Zeit gemessen (s)	Zeitabweichung (s)	Zeitabweichung (%)
Meander	200 W	43,52	44,39	-1,36	-3,1
	275 W	27,20	27,76	-1,88	-6,8
	400 W	27,20	27,64	-1,76	-6,4
	Mittel			-1,67	-5,4
Stripe	200 W	43,00	44,76	-1,24	-2,8
	275 W	25,88	28,52	-1,32	-4,6
	400 W	25,88	29,40	-2,20	-7,5
	Mittel			-1,59	-5,0
Chess	200 W	43,76	45,20	-1,44	-3,2
	275 W	26,76	28,80	-2,04	-7,1
	400 W	26,76	28,80	-2,04	-7,1
	Mittel			-1,84	-5,8

4. Diskussion und Zusammenfassung

In der ursprünglichen Python Bibliothek PySLM wurden Sprungzeiten nicht in die eigentliche Berechnung einbezogen. Die zeitliche Simulationsgenauigkeit der Bauphase lag bei durchschnittlich 85,4 % - ähnlich der aus einer Kombination eines teilphasen- und teilprozessbasierenden Excel-Modells. Die Untersuchung der Sprungzeiten und die Implementierung in die Berechnung des Pythonmodells führt zu einer Steigerung der Genauigkeit auf durchschnittlich 95 %.

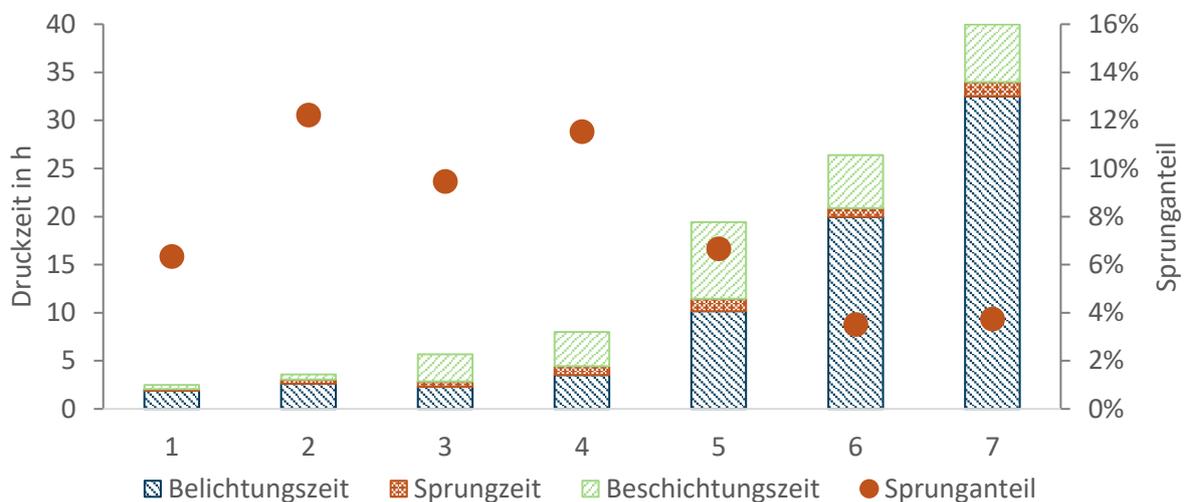


Abbildung 4-1: Zeitliche Zusammensetzung der Druckzeit und des Sprunganteils bei sieben unterschiedlichen Druckaufträgen zur Fertigung von Normzugproben. Eingesetzt wurde die Scanstrategie Stripe bei unterschiedlichen Werkstoffen, Slicern und Schichtdicken. Der Sprunganteil an der Gesamtheit ist insbesondere bei kurzen Aufträgen relevant.

Die in Abbildung 4-1 dargestellten und untersuchten Druckaufträge weisen unterschiedliche Fertigungszeiten und Belichtungszeiten auf. Der Sprunganteil ist besonders bei kurzen Aufträgen

relevant. Dies wird beim Vergleich von Auftrag eins und zwei deutlich. Der Unterschied beider Sprunganteile ist sehr deutlich und mit den unterschiedlichen Stützstrukturen und Schichtdicken zu erklären. Die Berechnung der Sprungzeiten durch PySLM erfolgt durch die Berechnung einer Sprungdistanz und einer vorgegebenen, festen Sprunggeschwindigkeit. Beschleunigungen werden nicht berücksichtigt.

Die Plausibilität der Sprungzeiten kann anhand des Versuchsaufbaus überprüft werden. Der Außendurchmesser des Testobjekts begrenzt die maximale Pfadlänge eines Sprungvorgangs s_{jump} auf 100 mm. Dabei wird davon ausgegangen, dass Sprünge auf direktem Weg erfolgen. Aus der eingestellten Sprungverzögerung $t_{jumpDelay}$ von 500 μ s und der Sprunggeschwindigkeit v_{jump} mit 5000 mm/s lässt sich eine maximale Sprungzeit $t_{s,max}$ mit Gleichung (4-1) bestimmen

$$t_{s,max} = t_{jumpDelay} + \frac{s_{jump}}{v_{jump}} \quad (4-1)$$

Diese Vereinfachung berücksichtigt analog zu PySLM keine Beschleunigungswerte. Mit Gleichung (4-1) ergibt sich eine maximale Sprungzeit von 20,5 ms. Beim Testobjekt mit der Belichtungsstrategie Meander ermittelt PySLM die in Tabelle 4-1 dargestellten Werte.

Tabelle 4-1: Berechnete Sprungzeiten bei der Belichtungsstrategie Meander. Mit der maximalen Distanz der Geometrie von 100 mm und einer Sprunggeschwindigkeit von 5000 mm/s sollte die maximale Sprungzeit bei 20,5 ms sein. Die berechneten Werte weichen von dem theoretischen Maximalwert ab.

Sprung Nr.	Sprungzeit in ms	Sprungdistanz in mm
0	27,9	136,8
1	30,1	147,9
2	14,8	71,6
3	18,4	89,7
4	16,5	79,8
5	16,4	79,3

Der von PySLM ermittelte maximale Wert von 30,1 ms überschreitet den theoretischen Maximalwert $t_{s,max}$ deutlich. Dies kann auf die von PySLM berechnete Sprungdistanz zurückgeführt werden. Mit 147,9 mm weicht diese ebenfalls wesentlich vom angenommenen Maximalwert von 100 mm ab. Ob diese Abweichungen lediglich bei der Belichtungsstrategie Meander vorliegen oder ob eine grundsätzliche Abweichung vorhanden ist, wird nachfolgend anhand der Simulationsergebnisse der Belichtungsstrategie Stripe überprüft. Abbildung 4.4 stellt die berechnete Sprungdistanz für jeden Sprungvorgang innerhalb eines Layers dar. Auch bei dieser Belichtungsstrategie überschreitet die Sprungdistanz den erwarteten Maximalwert von 100 mm, jedoch in geringerem Maße verglichen zur

Belichtungsstrategie Meander.

Insgesamt zeigen die Untersuchungen, dass die Sprungzeiten einen messbaren Einfluss auf den Lastgang und somit auch auf die energetische Simulation haben. Die Berücksichtigung führt zu einer Erhöhung der Simulationsgenauigkeit auf ca. 95 %. Dennoch zeigt der Versuchsaufbau eine Abweichung zwischen den gemessenen und berechneten Werten. Dieses Verhalten lässt sich auch bei den in Abbildung 4-1 untersuchten Druckaufträgen feststellen. Eine fehlerhafte Berechnung der Sprungzeiten sollte bei Druckaufträgen mit besonders hohem Sprunganteil zu zeitlichen Simulationsabweichungen führen. Die beiden Druckaufträge mit dem geringsten Sprunganteil weisen den geringsten Fehler auf, ein linearer Zusammenhang zwischen Sprunganteil und Simulationsfehler kann jedoch nicht bestätigt werden.

Der Einfluss von Sprungzeiten auf die Energiesimulation kann wie folgt zusammengefasst werden:

- Mit steigender Druckdauer verbessert sich das Simulationsergebnis, da der Einfluss von Abweichungen bei der Berechnung der Lasergeschwindigkeit und Sprungzeit geringer ist.
- Die Anzahl und Dauer der Sprungzeiten ist abhängig von der ausgewählten Belichtungsstrategie.
- Die Druckzeitabweichung ist unabhängig von der Anzahl und Dauer der Sprungvorgänge zwischen den Geometrien eines Layers.
- Bei der Berechnung der effektiven Lasergeschwindigkeit kommt es zu Ungenauigkeiten. Zu gering angenommene Sprungzeiten zwischen den einzelnen Belichtungspunkten führen zu einer negativen Abweichung der Gesamtberechnungszeit. Durch weitere Untersuchungen soll diese Ungenauigkeit weiter verbessert werden.
- Durch die Berücksichtigung von Sprungzeiten und energetisch relevanten Prozessparametern kann der Lastgang der SLM-Maschine mit einer Genauigkeit von bis zu 95 % simuliert werden.

Literaturverzeichnis

Bücher

- [2] Peron, M., Sgarbossa, F., Ivanov, D. und Dolgui, A., Impact of Additive Manufacturing on Supply Chain Resilience During COVID-19 Pandemic, *Supply Network Dynamics and Control. Springer Series in Supply Chain Management*, 2022, Bd. Vol. 20, Nr. 121–146, DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-09179-7_6.
- [3] Brinkmann, J., Bremer, M., Huwer, A., Hoffmann, L., Wahl, M. und te Heesen, H., Nachhaltigkeit und Digitalisierung, additive Fertigung und innovative Prozesse, in *Nachhaltigkeit in den Natur- und Sozialwissenschaften*, W. Leal Filho, Hrsg., Berlin, Peter Lang Verlag, 2022, pp. 309-336.
- [14] Seyda, V., Werkstoff- und Prozessverhalten von Metallpulvern in der laseradditiven Fertigung, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2018 DOI: <http://link.springer.com/10.1007/978-3-662-58233-6>.
- [15] Kumar, S., Selective Laser Sintering/Melting, *Comprehensive Materials Processing*, 2014, pp. 93-134, DOI: 10.1016/B978-0-08-096532-1.01003-7.

Zeitschriften

- [1] te Heesen, H., Wahl, M., Bremer, M., Huwer, A. und Messemer, Joachim, Heterogene Einsatzfelder der generativen Fertigung, *Industrie 4.0 Management*, Bd. 2020, Nr. 4, 2020, pp. 25-29, DOI: http://dx.doi.org/10.30844/I40M_20-4_S25-25.
- [4] Hoffmann, L. J., Brinkmann, J. , Huwer, A. , Wahl, M. und t. Heesen, H., Praxisorientierte Konstruktion in der additiven Fertigung, *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, Bd. 117, Nr. 1-2, 2022, pp. 30-34, DOI:10.1515/zwf-2022-1013.
- [5] Brinkmann, J. und te Heesen, H., Ressourcenbedarf von additiv gefertigten Zugproben bei Variation der Orientierung, *Proceedings of the 17th Rapid.Tech 3D Conference*, Bd. 17, 2021, pp. 103-114, DOI:10.3139/9783446471733.008.
- [6] Messemer, J., Kaufmann, T., Martin, C., Neises, M., Schmidt A. und te Heesen, H., Untersuchung der Zugfestigkeit von FLM-Zugproben aus PLA bei Variation von Schichtdicke und Füllgrad, *RTEjournal - Forum für Rapid Technologie*, Bd. 2016, Nr. 1, 2016.
- [7] Kellens K., Dewulf W., Deprez W., Yasa E. und Duflou J., Environmental analysis of SLM and SLS manufacturing processes, *Proceedings of LCE2010 Conference*, 2010, pp. 423 – 428, DOI:<https://lirias.kuleuven.be/handle/123456789/263386>.
- [8] Baumers, M., Tuck, C., Bourell, D., Sreenivasan, R. und Hague, R., Sustainability of additive manufacturing: Measuring the energy consumption of the laser sintering process, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 2011, DOI: 10.1177/0954405411406044.

- [9] Paul, R., und Anand, S., Process energy analysis and optimization in selective laser sintering, *Journal of Manufacturing Systems*, Bd. 31, Nr. 4, 2012, pp. 429-437, DOI: 10.1016/j.jmsy.2012.07.004.
- [10] Yi, Li, Nicole Krenkel und Jan C. Aurich, „An energy model of machine tools for selective laser melting,“ *Procedia CIRP*, Bd. 78, 2018. pp. 67-72, DOI: 10.1016/j.procir.2018.08.302..
- [11] Lv, Jingxiang, Peng, T., Zhang, Y. und Wang, Y., A novel method to forecast energy consumption of selective laser melting processes, *International Journal of Production Research*, Bd. 59, Nr. 8, 2021, pp. 2375-2391, DOI: 10.1080/00207543.2020.1733126.
- [12] Hui, Jizhuang, Huang, Yan Z. und Zhang H., Energy Consumption Model for pulse-laser Selective Laser Melting, *Journal of Physics: Conference Series*, Bd. 2009, Nr. 1, 2021, DOI: 10.1088/1742-6596/2009/1/012067.
- [13] Bierdel M., Köhler A. R., Ulrike Lange D.-I., Ökologische und ökonomische Bewertung des Ressourcenaufwands-Additive Fertigungsverfahren in der industriellen Produktion, Hrsg. von VDI Zentrum Ressourceneffizienz. U R L: www.ressource-deutschland.de.
- [16] Parry L., Ashcroft I., Bracket D. und Wildman R., Investigation of Residual Stresses in Selective Laser Melting, *Key Engineering Materials*, Bd. 627, 2014, pp. 129-132.
- [17] Gibson, Brian und Richard Lowden, Process development for selective laser meltin of molybdenum, *ORNL Report*, Nr. ORNL/SPR-2, 2018.
- [18] Marinov, Angel und Vencislav Valchev, Improved methodology for power loss measurements in power electronic switches using digital oscilloscope and MATLAB, *Proceedings of 14th International Power Electronics and Motion Control Conference EPE-PEMC 2010*, 9 2010, DOI: 10.1109/EPEPEMC.2010.5606862.
- [19] Lee H., Lim C. H. J., Low M. J., Tham N., Murukeshan V. M. und Kim Y.-J., Lasers in additive manufacturing: A review, *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, Bd. 4, Nr. 3, 2017, pp. 307-322, DOI: 10.1007/s40684-017-0037-7.

Kontaktangaben

Joachim Brinkmann
Hochschule Trier – Umwelt-Campus Birkenfeld
Postfach 1380
55761 Birkenfeld
E-Mail: j.brinkmann@umwelt-campus.de
WEB: www.umwelt-campus.de