Rechnerintegrierte Fertigung SoSe24

Aufbau einer sicheren Infrastruktur im interplanetaren Raum durch selektives Laserschmelzen

Gabriel Dörffler

Technische Universität Clausthal, E-Mail: gabriel.heilo.nicolas.doerffler@tu-clausthal.de

Abstract

Additive Fertigungsverfahren wie das Selektive Laserschmelzen (eng. selective laser melting, SLM) gelten als richtungsweisend sowie innovativ und sind so verstärkt im Fokus der Industrie. Die Möglichkeit der Herstellung von hochkomplexen Bauteilen im Schichtverfahren, die gleichermaßen hochfest, filigran und steif sind, ermöglicht es in der Produktion, diese Fertigungsverfahren in Einzel- und Kleinserienfertigung einzusetzen, nahezu ohne Limitierung der Gestaltungsfreiheit. Der Nachhaltigkeitsaspekt wird dadurch erfüllt, dass im Gegensatz zur zerspanenden Fertigung werkzeuglos und mit maximaler Materialeffizienz gearbeitet wird, was die Abfallmenge erheblich reduziert. Auch die maßgeschneiderte Fertigung von variablen Losgrößen sowie die Anpassung der Bauteile via CAD unterstützen den Nachhaltigkeitsaspekt. Ein Anwendungsfeld neben der Automobilindustrie oder dem Werkzeug- und Maschinenbau präsentiert sich mit der Luft- und Raumfahrt. Im Zuge der interstellaren Expansion, geplanten Mondbasen und Vor-Ort Fertigung wird die Frage nach geeignetem Baumaterial für die Infrastruktur aufgeworfen. Hier kommt SLM eine besondere Bedeutung zu, so soll es diese Technik ermöglichen, Mondstaub, auch Regolith genannt, zu komplexen Strukturen zu schmelzen, die für Landeplätze von Mondsonden oder Straßen Verwendung finden. Mit kurzen Pulsen soll in diesem Zuge ein Laser den Gesteinsstaub schmelzen, um eine 3D-gedruckte Infrastruktur aufzubauen.

Motivation

Die langersehnte Rückkehr der Menschen zum Mond, welche passend mit dem Namen “Artemis”-Programm versehen wurde, wird durch den Erfolg der ersten Schritte dieses Programmes greifbar. Neben der Landung von Menschen auf dem Mond wird Artemis auch ein Gateway (LOP-G) zum Mars erproben und einen weiteren Grundstein für eine intrastellare Expansion bilden. Neben ihrem schier unschätzbaren Wert für die Forschung birgt eine Expansion auch zahlreiche Vorteile für den Bereich der nachhaltigen Entwicklung, so könnten die scheinbar unbegrenzten Ressourcen des interplanetaren Raums den Raubbau auf unserem Heimatplaneten reduzieren. Eine der größten Herausforderungen ist die Bereitstellung von sicherer Infrastruktur auf unseren natürlichen Satelliten. Der Transport von 1 Kilogramm Material zum Mond kostet im Raumfahrtsektor ca. 1 Million €. So ist es sinnvoll, die Transportkosten gering zu halten und die Ressourcen vor Ort zu verwenden, wie den reichhaltig vorhandenen Mondregolith. Dieser stellt eine immense Gefahr für die Infrastruktur wie auch für das Personal dar. Regolith wird aufgewirbelt, wenn sich Rover über den Mondboden bewegen und sinkt, aufgrund der geringen Schwerkraft, nur langsam wieder ab und gelangt so in Kontakt mit sensiblem Equipment.

Es gibt bereits mehrere Ansätze, Mondregolith als Baumaterial zu verwenden, um die Infrastruktur sowie teures und sensibles Equipment zu schützen. Ein Anwendungsfeld ist der Einsatz von Mobilem Selektivem Laserschmelzen (M-SLM), um Pflastersteine für Landeplätze und mögliche Transportwege herzustellen.

Hauptteil

Klassisches selektives Laserschmelzen (SLM) ist ein Prinzip der Additiven Fertigung und kann in vier Schritten beschrieben werden (s. Abb. 1). Zunächst wird der zu verarbeitende Werkstoff in Pulverform gleichmäßig und dünn auf der Werkplatte verteilt. Mithilfe eines Lasers wird das Pulver an den Koordinaten auf der Werkplatte aufgeschmolzen, an welchen sich das Massiv-Teil befinden soll. Das Pulver wird vollständig geschmolzen und bildet nach Erstarrung eine feste Materialschicht. Die Werkplatte wird daraufhin eine Schichtdicke nach unten gefahren und erneut mit einer weiteren Schicht des Pulvers bestückt. Folgend wiederholt sich der Zyklus, bis das 3D-Modell gedruckt ist. So wird das Modell Schicht für Schicht aufgetragen. Am Ende des Prozesses muss das Bauteil noch von überschüssigem Pulver gereinigt und eventuell nachbearbeitet werden. Um Kontaminierung mit Sauerstoff zu vermeiden, kann dieser Vorgang unter Schutzgasatmosphäre mit Stickstoff oder Argon durchgeführt werden.

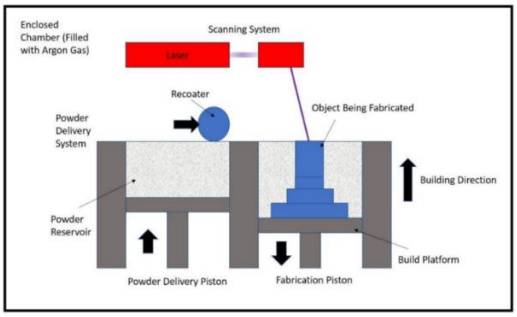

Abbildung 1: Funktionsweise SLM [1].

Vorteile dieses Verfahrens sind die große spezifische Dichte (>99%) des Werkstoffes, dies führt dazu, dass die

Eigenschaften des Bauteils zu einem großen Teil beibehalten werden. SLM hebt sich vor allem durch eine hohe Geometriefreiheit und geringe Komplexität von anderen Verfahren ab. Im Kontrast dazu stehen die, im Verhältnis zu anderen additiven Verfahren, hohen Investitionskosten für die SLM-Anlage, die Metall-Pulver und Schutzgase. Auch ist die Herstellungsgeschwindigkeit geringer als bei herkömmlichem Herstellungsverfahren. So empfiehlt sich nur Kleinserien-Herstellung und die Herstellung von komplexen Teilen. [2]

Mobile Selektive Laser Melting (M-SLM) unterscheidet sich durch einen auf einer mobilen Plattform befestigten Laser vom klassischen SLM [3]. Die Herausforderung ergibt sich aus der Problemstellung der In-Situ-Ressourcen-Nutzung auf dem Mond. So soll der auf den Mond reichlich vorhandene Mondregolith, welcher zu großen Teilen aus Silizium, Eisen, Calcium, Titan, Aluminium und Magnesium Oxiden besteht [4], an seiner Position geschmolzen werden. Der Laser selbst soll an einem Rover montiert werden, welcher diesen dann zu den gewünschten Koordinaten transportiert und diesen dort bewegt.

Konträr zum klassischen SLM wird keine weitere Pulverschicht über die bereits geschmolzene Schicht aufgebracht. Daher muss der Laser längere Zeit auf der zweidimensionalen Struktur verweilen, um eine ausreichende Schmelztiefe zu erreichen. Die Bestrahlungsdauer variiert abhängig von der Intensität des Lasers. So benutzten Ginés-Palomares et al. einen 10kW CO_2-Laser, um fokussiertes Sonnenlicht zu simulieren und Mondregolith-Simulant EAC-1A, welcher eine große Dichte und Festigkeit aufweist. Diese Eigenschaft macht das Simulant zu einem geeigneten Muster für die additive Fertigung [5].

Im Versuch mit einer Bestrahlungsfläche von 95 mm Durchmesser und einer Bewegungsgeschwindigkeit des Pulverbettes von 5 mm/min (entspricht einer Bestrahlungszeit von 1200 s) konnte in der Mitte der Bahn eine Tiefe von 20 mm erreicht werden. Die erstarrte Probe hatte eine Druckfestigkeit von 93,97 MPa, dies entspricht der Druckfestigkeit von Beton (20 - 120 MPa). In einem zweiten Schritt wurden zwei sich zu 15% überlappende Proben mit selben Werten gefertigt. Dies führte zum Bruch der bereits erstarrten Fläche. Um diesen thermischen Spannungen entgegenzuwirken, wurden zwei spezielle ineinandergreifende Geometrien entwickelt, die das Überlappen verhindern [6]. Dafür wurde wie in Abbildung 2 zu sehen die Bestrahlungsfläche auf 45 mm reduziert.

Fazit und Ausblick

Neben dem hier vorgestellten Versuch mit simuliertem fokussiertem Sonnenlicht wurden bereits Tests mit klassischen Lasermodulen unter Vakuum und Mondgravitation durchgeführt. Das Modul selbst wiegt nur 2,5 kg mit Potential, dieses weiter zu reduzieren [7]. Stärkere Laser beschleunigen den Schmelzprozess, erfordern allerdings angepasste Parameter.

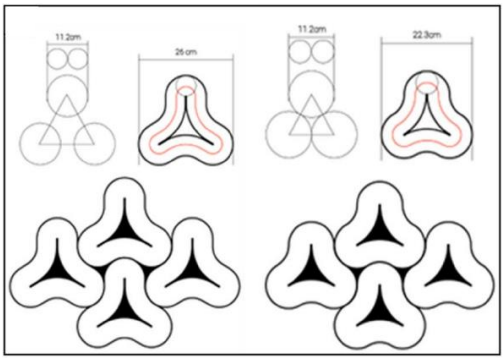

Abbildung 2: Mondpflasterstein Geometrien [6].

Neben Mond-Pflastersteinen zum Schutz vor Mondstaub kann SLM durch die Eigenschaft der In-Situ Ressourcennutzung die Errichtung permanenter Infrastruktur auf dem Mond nachhaltiger gestalten. So wurde bereits 2014 die Eignung von Mondregolith zur Erstellung komplexerer Geometrien, wie beispielsweise Schraubenmuttern nachgewiesen [4].

SLM birgt das Potenzial der Möglichkeit einer nachhaltigeren Kolonialisierung des Mondes, in dem es Transportkosten für die Errichtung einer sicheren und nachhaltigen Infrastruktur mittels In-Situ Ressourcennutzung senkt.

Literaturverzeichnis

[1] Yang, T-S. et al.: Powder based additive manufacturing for biomedical application of titanium and its alloys: a review. Biomedical Engineering Letters 10 (2020), S. 505-516.

[2] Sefene, E. M.: State-of-the-art of selective laser melting process: A comprehensive review. Journal of Manufacturing Systems 63 (8) (2022), S. 250-274.

[3] Neumann, J. et al.: The MOONRISE-payload as proof of principle for mobile selective laser melting of lunar regolith. SPIE 12777, International Conference on Space Optics (2023).

[4] Fateri, M., Gebhardt, A.: Process Parameters Development of Selective Laser Melting of Lunar Regolith for On-Site Manufacturing Applications. International Journal of Applied Ceramic Technology 12 (1) (2014), S. 46-52.

[5] Engelschion, V.S. et al.: AC-1A: A novel large-volume lunar regolith simulant. Scientific Reports 10 (1) (2020), S. 5473.

[6] Ginés-Palomari, J-C. et al.: Laser Melting Manufacturing of large elements of lunar regolith simulant for paving on the Moon. Scientific Reports 13 (2023), 15593.

[7] Neumann, J. et al.: The MOONRISE: payload for mobile selective laser melting of lunar regolith. Proceedings Volume 11852 (2021), S. 8-16.