

Entwicklung eines Pulverförderers für den Transport von Metallpulver in der Schwerelosigkeit

Development of a powder feeder for transporting metal powder in zero gravity

Matthias Pusch¹
Niklas Hoffmann¹
Marvin Raupert²
Christoph Lotz²
Ludger Overmeyer²
André Katterfeld¹

¹ Lehrstuhl für Förder- und Materialflusstechnik, Institut für Logistik und Materialflusstechnik, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg

² Institut für Transport- und Automatisierungstechnik, Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover

Im vorliegenden Paper wird für den LP-DED Prozess die Entwicklung eines Pulverförderers für den Einsatz in Mikrogravitation vorgestellt. Die Anforderungen ergeben sich aus dem vorgestellten Experimentaufbau, der Versuchsdurchführung im Einstein-Elevator sowie aus der Analyse eines klassischen Pulverförderers. Darauf aufbauend sind mögliche Förderprinzipien mit Hilfe der Diskrete Elemente Methode untersucht und mögliche Konstruktionen abgeleitet. Abschließend wird eine prototypische Umsetzung vorgestellt.

[Schlüsselwörter: Metallpulver, Pulverförderer, Mikrogravitation, Einstein-Elevator, Laserbasierte Fertigung]

This paper presents the development of a powder feeder for use in microgravity for the LP-DED process. The requirements result from the presented experimental setup, the experiment execution at the Einstein-Elevator as well as from the analysis of a classical powder feeder. Based on this, possible conveying principles are examined using the Discrete Element Method and possible designs are derived. Finally, a prototype implementation is presented.

[Keywords: Metal powder, powder feeder, zero gravity, Einstein-Elevator, laser-based manufacturing]

1 PROJEKTVORSTELLUNG

Die Entwicklung eines Pulverförderers für den Einsatz in Mikrogravitation ist für das Laser Powder-based Directed Energy Deposition Verfahren (LP-DED) zwingend notwendig, um einen geregelten und konstanten Pulvermassenstrom für den Fertigungsprozess aufzubauen. In Industrie und Forschung werden Pulverförderer genutzt,

die nicht in Mikrogravitation funktionieren würden. Allerdings ist die Handhabung von Metallpulver in Mikrogravitation eine Voraussetzung für die erfolgreiche Anwendung im Weltraum. Dieses Vorhaben ist ein Teil des Forschungsprojektes zwischen der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg und der Leibniz Universität Hannover. Ein weiteres Forschungsziel des Projektes umfasst die stabile und reproduzierbare Fertigung von zylindrischen Proben mit 3 mm Durchmesser, den sogenannten Seed Sticks, durch das LP-DED Verfahren in Mikrogravitation. Die Mikrogravitation wird mithilfe des Einstein-Elevators simuliert, einem Fallturm der neuesten Generation. Die Proben werden mit der in der Raumfahrt häufig verwendeten Titanlegierung Ti-6Al-4V und der Nickellegierung Inconel 625 hergestellt [1].

1.1 EINSTEIN-ELEVATOR

Beim Einstein-Elevator der Leibniz Universität Hannover (LUH) handelt es sich um einen Fallturm, mit dem Experimente unter verschiedenen Schwerkraftbedingungen durchgeführt werden können. Genauer gesagt, kann die Anlage, die im Hannover Institute of Technology (HITec) steht, alles im Bereich zwischen der Mikrogravitation bis hin zur Hypergravitation (bis zu 5 g) simulieren. Ein besonderes Merkmal des Einstein-Elevators ist die hohe Wiederholungsrate: Innerhalb einer achtstündigen Arbeitsschicht können bis zu 100 Experimente durchgeführt werden, was durch die spezielle Konstruktion der Anlage ermöglicht wird und die Erhebung statistischer Daten erleichtert. Die Gondel bietet Platz für Experimente mit einer Höhe von bis zu 2 m und einem Durchmesser von 1,7 m. Insgesamt kann die Anlage eine Nutzlast von bis zu 1000 kg aufnehmen. [2, 3]

Der 40 m hohe Fallturm besteht aus drei Hauptkomponenten: der Gondel, dem Antrieb und dem Führungssystem (siehe Abbildung 1). Innerhalb der Gondel befindet sich der Experimentträger, auf dem der Versuchsaufbau fixiert wird. Bei einem Mikrogravitationsversuch führt die Gondel einen vertikalen Parabelflug aus, indem sie mithilfe der Linear-Synchronmotoren des Antriebssystems von der Startposition am unteren Ende des Fallturms mit 5 g beschleunigt wird (siehe Abbildung 2). Nach einer halben Sekunde ist eine Geschwindigkeit von 20 m/s erreicht und die Beschleunigung endet. Durch die damit verbundene Entspannung sowie einer kurzen Bremsphase entkoppelt sich der Experimentträger um einige Millimeter vom Boden der Gondel, sodass die Mikrogravitationsphase von insgesamt 4 s beginnt. [2, 4, 5]

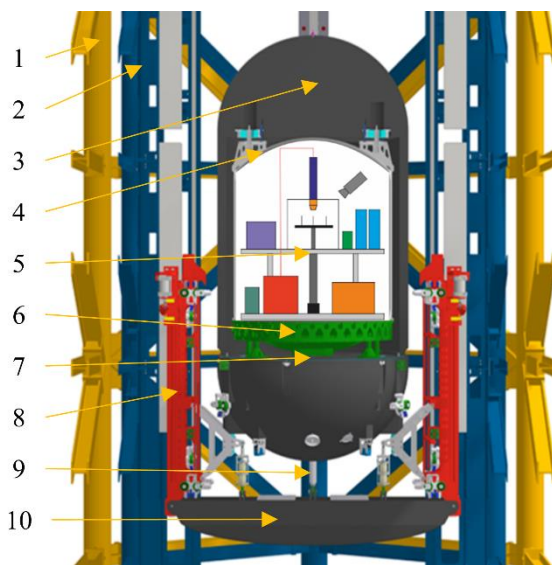


Abbildung 1. Aufbau Einstein-Elevator; 1: Führungsstruktur, 2: Antriebsstruktur, 3: Gondel, 4: Druckhülle, 5: Versuchsaufbau, 6: Experimentträger, 7: Plattenwärmetauscher, 8: Antriebsschlitten, 9: Koppelstange, 10: Traverse, Bild: Leibniz Universität Hannover/Marvin Raupert [6], lizenziert unter CC BY 4.0, bearbeitet von Marvin Raupert

Der Abstand zwischen Experimentträgerboden und Gondelboden kann mithilfe von Abstandssensoren und der Antriebsregelung über die gesamte Dauer konstant gehalten werden. Damit gleicht der Antrieb die auftretenden Luft- und Rollwiderstände aus. Kurz bevor die Abbremsphase mit 5 g startet, wird der Abstand zwischen Experimentträger und Gondelboden wieder reduziert, bis beide Anlagen einen Kontakt aufbauen. Für den Abbremsvorgang wird ebenfalls das Antriebssystem als Wirbelstrombremse genutzt. [4]

Nach ungefähr 4 min ist der Einstein-Elevator wieder betriebsbereit. Die Stillstandszeit wird genutzt, um kritische Komponenten des Antriebs und der Führung abzukühlen und, um die Superkondensatoren des Fallturms wieder aufzuladen. Das Antriebs- und Führungssystem ist das zentrale Element des Einstein-Elevators und beruht auf einer „Turm-in-Turm“-Konstruktion. Hierbei haben Antrieb

und Gondelführung jeweils eigene Trägerstrukturen, die auf getrennten Fundamenten stehen, sodass Schwingungen vom Antriebssystem nicht auf das Führungssystem der Gondel übertragen werden. Die einzige Verbindung zwischen den Antriebs- und Führungsteilen und der Gondel ist eine Koppelstange (siehe Abbildung 1). Um die Mikrogravitationsqualität zu erhöhen, kann zwischen der Gondel und der Druckhülle ein Vakuum von bis zu 10^{-2} mbar zur akustischen Entkopplung erzeugt werden [4]. Dadurch kann eine Restbeschleunigung von weniger als 10^{-6} g während des Experiments erreicht werden. [3]

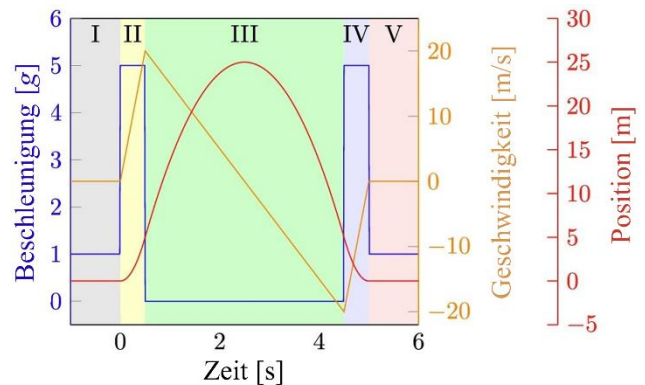


Abbildung 2. Ablauf eines μg -Experiments; I: Vorbereitungsphase, II: Beschleunigungsphase, III: Freier Fall, IV: Abbremsphase, V: Nachbereitungsphase, Bild: Leibniz Universität Hannover/Richard Sperling [4], lizenziert unter CC BY 4.0, bearbeitet von Marvin Raupert

Bei Hypogravitation (μg bis 1 g) und Hypergravitation (1 g bis 5 g) bleibt der Träger an der Gondel befestigt, wobei die erforderliche Beschleunigung durch den Aufwärts- oder Abwärtsschub der Gondel erzeugt wird. Schnelle Beschleunigungsänderungen können in weniger als 50 ms erreicht werden, wobei die Versuchsdauer von der gewünschten Beschleunigung abhängt. [7]

1.2 VERSUCHSAUFBAU

Für die Untersuchung des Pulverförderers für den Einsatz in Mikrogravitation ist für das LP-DED Verfahren im Rahmen des hier beschriebenen Forschungsvorhabens ein geeigneter Versuchsaufbau zu entwickeln. Dieser Versuchsaufbau ist so ausgelegt, dass Experimente sowohl im Labor als auch unter verschiedenen Gravitationsbedingungen im Einstein-Elevator durchgeführt werden können. Die Komponenten sind auf zwei Ebenen mit einem Durchmesser von jeweils $1,7\text{ m}$ angeordnet (siehe Abbildung 3). Der Aufbau beinhaltet eine Prozesskammer, die für die Materialherstellung unter Schutzgasatmosphäre ausgelegt ist. Ein Manipulator, bestehend aus einem Probenkarussell und einem Linearantrieb, innerhalb der Prozesskammer ermöglicht die Herstellung vieler Proben, ohne dass die Kammer zwischen den Versuchen geöffnet werden muss. Die erforderliche Wärmeenergie wird von einem 2 kW Diodenlaser

(960 und 1020 nm) geliefert. Aufgrund des hohen Energiebedarfs ist für den Diodenlaser ein eigener Energiespeicher mit einer Leistung von 6 kW eingebaut.

Ein Pneumatiksystem steuert die Materialzufuhr des unten beschriebenen Pulverförderers bei der Fertigung, während mehrere Kühlkreisläufe für stabile Temperaturen bei kritischen Komponenten sorgen. Die Steuerung des Gesamtsystems erfolgt über einen Industriecomputer mit einer Schnittstelle zu digitalen und analogen Ein- und Ausgängen zum Anschluss der Sensoren und Aktoren.

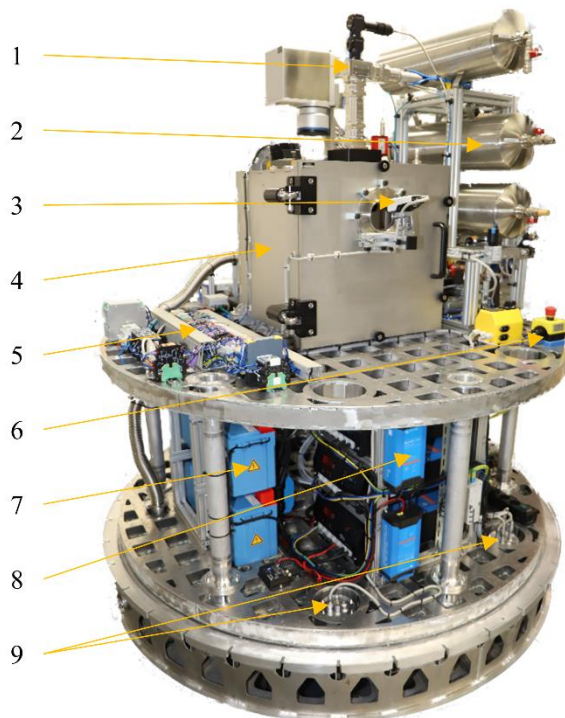


Abbildung 3. Versuchsaufbau; 1: Bearbeitungsoptik, 2: Pneumatiksystem, 3: Kamera, 4: Prozesskammer, 5: Steuerung, 6: Notausschalter, 7: Energiespeicher, 8: Wechselrichter, 9: Schnittstellen zum unteren Träger; Bild: Leibniz Universität Hannover/Marvin Raupert

Die Prozessüberwachung wird durch eine Wärmebild- und Hochgeschwindigkeitskamera sowie einem Quotienten-Pyrometer durchgeführt. Die gesamte Struktur ist so konzipiert, dass Vibrationen während der Fertigung in Mikrogravitation auf ein Minimum reduziert werden.

1.3 LP-DED-PROZESS

Beim LP-DED wird Metallpulver mithilfe eines Lasers aufgeschmolzen und schichtweise auf einem Substrat aufgetragen. Mögliche Anwendungen sind die Herstellung von endkonturnahen Teilen, Beschichten, Fügen, Hinzufügen von Merkmalen und, im Gegensatz zu vielen anderen additiven Fertigungsverfahren können Bauteile auch repariert werden. Diese Eigenschaft des Herstellungsverfahrens

birgt zudem ein enormes Potenzial für den Einsatz im Weltraum [6]. [8]

Zu Beginn des Prozesses erwärmt der Laserstrahl eine dünne Schicht des Substrats um ein Schmelzbad zu erzeugen. Dadurch wird sichergestellt, dass eine metallurgische Verbindung zwischen dem Auftragsmaterial und dem Grundwerkstoff aufgebaut werden kann. In diesem Projekt wird das Metallpulver durch eine Mehrstrahldüse mithilfe von Argon als Trägergas geleitet und auf das Schmelzbad ausgerichtet. Durch die Wärmeenergie im Schmelzbad werden die Partikel aufgeschmolzen und gehen eine feste Verbindung mit dem Werkstück ein. Um Linien, Flächen oder Formen aufzutragen, kann entweder die Pulverdüse zusammen mit der Bearbeitungsoptik oder die Substratplatte bewegt werden. [8]

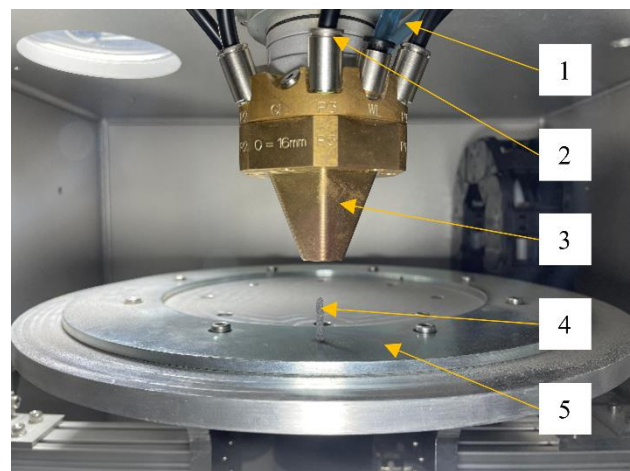


Abbildung 4. LP-DED Prozess bei der Fertigung eines Seed Sticks; 1: Leitung Kühlsystem, 2: Leitung Pulver-Argon-Gemisch, 3: Pulverdüse, 4: Seed Stick, 5: Probenkarussell; Bild: Leibniz Universität Hannover/Marvin Raupert

In Abbildung 4 ist die Pulverdüse und der Manipulator innerhalb der Prozesskammer zu erkennen. Die an der Kammerdecke fixierte Pulverdüse ist in allen drei Raumrichtungen so ausgerichtet, dass der Laser zentrisch durch die Düse verläuft und der Arbeitsabstand der Bearbeitungsoptik zum Substrat bzw. zur Probe eingehalten wird. Insgesamt verfügt die Pulverdüse über sechs Eingänge für das Pulver-Argon-Gemisch sowie einen Ein- und Auslass zur Kühlung. Durch den Vorschub des Linearantriebs und die Rotation des Probenkarussells sind alle Freiheitsgrade vorhanden, um die Seed Sticks herzustellen.

2 STAND DER TECHNIK

2.1 KLASSISCHE PULVERFÖRDERER

Zur Erzeugung eines Trägergas-Pulver-Gemisches werden Pulverförderer genutzt. Diese Geräte werden sowohl als eigenständige Geräte angeboten als auch als Bestandteil größerer Anlagen verbaut. Allen gemein ist meist

eine Regelung des Volumenstroms des inerten Trägergases, abgestimmt auf die Dichte der üblichen Trägergase wie Argon, Helium oder Stickstoff. Der zweite wichtige Bestandteil ist die Pulverhandhabung, bestehend aus einem Vorratsbehälter und einer Dosiereinheit.

Bei einem klassischen Pulverförderer wird der Massenstrom mithilfe einer rotierenden Scheibe (Abbildung 5 rechts), in der sich eine Ringnut mit rechteckigem Querschnitt befindet, aufgebaut. Dabei fällt das Pulver durch eine Matrize nach unten in die Ringnut und füllt diese komplett aus. Ein Abstreifer stellt eine konstante Füllung der Ringnut sicher. Durch das Rotieren der Scheibe wird das Pulver in der Nut zur einzigen Austrittsöffnung für den Trägergasstrom gefördert. Der Trägergasstrom wird durch eine düsenförmige Geometrie beschleunigt und reißt somit das Pulver aus der Ringnut heraus. Die vollständige Entleerung der Ringnut wird durch eine formschlüssige Geometrie der Absaugeinrichtung in der Ringnut gewährleistet. Das nun entstandene Trägergas-Pulver-Gemisch wird durch antistatische Schläuche zur Pulverdüse des LP-DED-Prozesses geleitet.

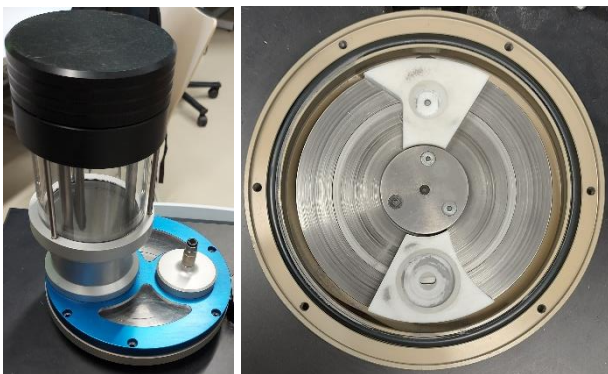


Abbildung 5. Standardpulverförderer von GTV, links in Zusammenbau mit Vorratsbehälter, rechts demontiert mit Blick auf die Nutscheibe mit Pulverablagebereich (unten) und Pulverabsaugbereich (oben)

Um unterschiedliche Pulvermassenströme erreichen zu können, werden unterschiedliche Scheiben mit sich unterscheidenden Nutquerschnittsflächen genutzt, die so auch von den Herstellern der Pulverförderer angeboten werden [9]. Zusätzlich kann mit der Drehgeschwindigkeit der Scheibe der Pulvermassenstrom feiner eingestellt werden. Der Pulvermassenstrom ist auch abhängig von der Schüttdichte des verwendeten Pulvers. Der Trägergasstrom muss dabei so gewählt werden, dass er den gewünschten Pulvermassenstrom sicher fördern kann.

Frei fließende Pulver schaffen es selbstständig die Nut zu füllen. Für kohäsive Pulver gibt es zusätzliche Austragshilfen im Vorratsbehälter. Rührer mit unterschiedlichsten Formen sollen dabei das Pulver aktivieren, also in Bewegung halten, und somit das sichere Fließen in die Nut gewährleisten. [10]

Das Füllen der Ringnut in klassischen Pulverförderern beruht auf der Wirkung der Schwerkraft und funktioniert nicht in Mikrogravitation. Die verwendeten Austragshilfen sorgen nicht für den Transport, sondern für die Erhaltung der Fließfähigkeit des Pulvers. Sie können aber nicht das Ansammeln des Pulvers vor der Auslassöffnung und das Einfüllen in die Ringnut garantieren. Weiterhin würde bei einem Betrieb in Mikrogravitation die Gefahr bestehen, dass sich das Pulver aus der Nut löst und nicht von der rotierenden Scheibe zur Austrittsöffnung transportiert wird. Daher besteht die Notwendigkeit der Entwicklung eines neuen Pulverförderers für den Betrieb unter Mikrogravitation.

2.2 ZU VERWENDENDE PULVER

Im Projekt sollen Versuche mit zwei unterschiedlichen Pulvern durchgeführt werden. Die äußerlich zunächst recht ähnlich erscheinenden Pulver wurden einer Schüttgutuntersuchung zur Ermittlung ihrer Eigenschaften unterzogen.

Inconel 625 ist eine Legierung auf Nickelbasis, die zu etwa 22 % aus Chrom, 9 % aus Molybdän, etwa 4 % aus Niob und Tantal sowie weiteren Legierungselementen mit einem Massenanteil kleiner als 0,5 % besteht. Inconel 625 ist durch seine Korrosionsbeständigkeit und Warmfestigkeit für Hochtemperaturanwendungen und Anwendungen in extremen Medien geeignet.

Ti64-G23-E (kurz Ti64) ist auch unter der Bezeichnung Ti-6Al-4V bekannt. Hauptbestandteil ist mit 89 % Titan, gefolgt von etwa 6 % Aluminium und etwa 4 % Vanadium. Weitere Elemente sind in Spuren enthalten. Ti64 ist die am häufigsten verwendete Titanlegierung. Durch ihre hohe Korrosionsbeständigkeit und Festigkeit sowie vor allem ihre niedrige Dichte eignet sich Ti64 unter anderem für den Triebwerksbau.

Tabelle 1. Wichtige Eigenschaften der verwendeten Pulver

Eigenschaft	Ti64	Inconel 625
Schüttdichte	2,38 kg/l	4,16 kg/l
Korngröße d_{50}	70 μm	36 μm
Böschungswinkel	29,5°	27,1°
Effektiver Reibwinkel (Ringscherversuch)	32°	33°
Wandreibwert gegen X5CrNi18-10	0,39	0,45
Wandreibwert gegen Polyethylen (PE)	0,32	0,33

Beide Legierungen liegen als graues Pulver mit den in Tabelle 1 dargestellten Schüttguteigenschaften vor. Auffällig ist vor allem der starke Dichteunterschied. Das gleiche Volumen Ti64 ist deutlich leichter als Inconel 625. Auch

bei der mittleren Korngröße d_{50} ist ein deutlicher Unterschied zu erkennen. Beide Pulver sind sehr fein, wobei Ti64 einer mittleren Korngröße von $70\ \mu\text{m}$ etwa doppelt so große Pulverpartikel besitzt wie Inconel 625. Kaum Unterschiede zeigen sich bei den Reibwerten und Böschungswinkeln der Pulver. Während der Schüttgutuntersuchungen konnte aber ein Unterschied in der Fließfähigkeit der Pulver beobachtet werden. Ti64 zeigt hier durchgehend frei fließende Eigenschaften, während Inconel 625 leicht kohäsives Verhalten aufweist. Detailaufnahmen im Rasterelektronenmikroskop (REM) konnten diesen ersten Eindruck bestätigen. In Abbildung 6 ist die Detailaufnahme von Ti64 zu sehen. Hier zeigt sich eine nahezu kugelförmige Partikelform. Im Gegensatz dazu lässt sich in der Aufnahme von Inconel 625 (Abbildung 7) eine etwas höhere Abweichung von der Kugelform, vor allem aber deutliche Anhaftungen vormals flüssiger Bestandteile des Pulvers erkennen. Durch diese unregelmäßigere Oberflächenstruktur kann es durch stärkeres Verhaken der Partikel untereinander zu dem beobachteten kohäsiven Verhalten kommen.

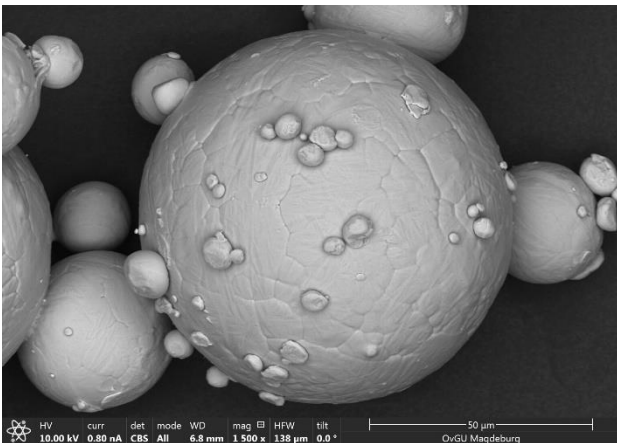


Abbildung 6. REM-Aufnahme des Ti64-Pulvers

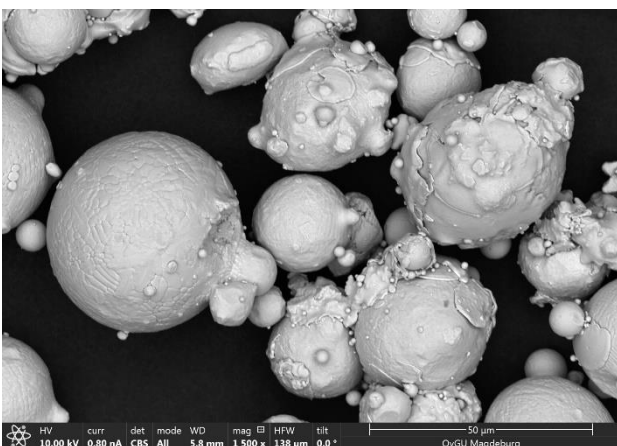


Abbildung 7. REM-Aufnahme des Inconel 625-Pulvers

3 WICHTIGE ANFORDERUNGEN

Die Anforderungen an einen Pulverförderer für den Betrieb in Mikrogravitation leiten sich aus den Flugbedingungen im Einstein-Elevator und den LP-DED-Prozessbedingungen ab. Aber auch die Pulvereigenschaften und der Funktionsumfang der klassischen Pulverförderer finden Eingang in die nachfolgend dargestellten Anforderungen. Ziel ist dabei stets einen konstanten Pulvermassenstrom zu erreichen.

Aus dem Flugablauf des Einstein-Elevators können mehrere wichtige Kennwerte abgeleitet werden. Die μg -Zeit beträgt 4 s. Damit die Proben noch ausreichend Zeit zum Abkühlen haben, muss die Fertigung der Seed Sticks mit konstantem Massenstrom direkt zum Anfang. Daher muss der Pulverförderer schon vor Eintritt in die μg -Phase arbeiten und das Trägergas-Pulver-Gemisch bereitstellen. Somit ist mindestens eine Funktionsfähigkeit in der Beschleunigungsphase notwendig. Durch Anfahrvorgänge des Pulverförderers und die Dauer des Pulvertransports vom Pulverförderer bis zur Wirkstelle des Lasers muss die Funktionsfähigkeit bereits in der Vorbereitungsphase des Einstein-Elevators unter 1 g gegeben sein. Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass sehr kleine Massenströme möglichst präzise und schnell mit dem Pulverförderer realisiert werden müssen.

Die Untersuchung des klassischen Pulverförderers hat gezeigt, dass es von Vorteil ist, Pulvermassenstrom und Trägergasvolumenstrom unabhängig voneinander wählen zu können. Somit ist man später bei der Wahl der Experimentparameter sehr frei und kann gegebenenfalls den Trägergasverbrauch senken.

In Vorversuchen beim Hersteller des Lasers wurde für die gewählte Kombination aus Bearbeitungsoptik und Laser ein Trägergasvolumenstrom von 8 l/min ermittelt. Hier wurde aber noch nicht die letztlich gewählte Pulverdüse verwendet. Deren Hersteller wiederum empfiehlt einen Trägergasvolumenstrom von etwa 15 l/min. Der im Versuchsaufbau genutzte Volumenstrom wird demnach eher im Bereich der Empfehlung des Düsenherstellers liegen. Hinter den Trägergasvolumenströmen steckt immer die Sicherstellung der Flugförderung im pneumatischen System. Bei Flugförderung wird verhindert, dass das Pulver aus dem Gemisch ausfällt und sich im System absetzt und zu unregelmäßigen Strähnen- oder Pfropfenförderung führt.

Weiterhin konnten aus den Vorversuchen beim Laserhersteller die für einen sinnvollen LP-DED-Prozess notwendigen Pulvermassenströme ermittelt werden. Dort wurden erfolgreich die Pulvermassenströme von 7,4 g/min für Ti64 und 13,3 g/min für Inconel 625 genutzt. Das Verhältnis der beiden Massenströme spiegelt in etwa das Verhältnis der Schüttdichten beider Pulver wieder. Es ist also ein etwa gleicher Pulvervolumenstrom von 3,2 ml/min verwendet wurden. Diese Werte sollen die untere Grenze der

Pulvermassenströme darstellen. Um Flüge zu sparen und deutlich mehr Aufbauraten der Seed Sticks pro Flug zu erreichen, sollen auch deutlich höhere Pulvermassenströme gefördert werden können. Ziel sollten für Ti64 etwa 25 g/min sein, analog etwa 45 g/min für Inconel 625. Um mehrere Flüge in Folge ohne Wartungs- und Nachfüllarbeiten vornehmen zu können, muss der Pulvervorrat ausreichend groß dimensioniert werden. Bei diesem Projekt soll der Pulvervorrat für ungefähr 20 Flüge ausgelegt sein.

Weitere Anforderungen beziehen sich auf die Schnittstellen zur Gesamtsteuerung des Experiments. Die Einbindung in eine übergeordnete Steuerung ist genauso möglich wie der Aufbau einer Pulvermassenstromregelung in Kombination mit einer Pulverstrommessung. Pulver leitende Komponenten müssen antistatisch ausgelegt sein, um eine statische Aufladung zu verhindern.

4 FÖRDERPRINZIPIEN

Aufgrund der Anforderungen und der fehlenden bzw. wechselnden Schwerkraft können viele klassische Stetigförderer als Pulverförderer ausgeschlossen werden. Das Pulver muss zwangsgeführt werden, da sonst ein unkontrolliertes Abheben oder Schweben des Pulvers möglich ist und es wegen fehlender Schwerkraftwirkung nicht wieder in eine Ruhelage zurückkehrt. Somit scheiden alle offenen Förderprinzipien wie Gurtförderer, aber auch Schwingförderer aus. Denn ist ein Pulverpartikel in der Mikrogravitation einmal angestoßen, braucht es eine erneute Krafteinwirkung um die in Gang gesetzte Bewegung zu stoppen oder zu ändern. Übrig bleiben nur wenige Förderprinzipien oder die Erzeugung künstlicher Schwerkraft durch Fliehkraft. Einige Beispiele wurden mit einfachen Simulationen mit Hilfe der Diskrete Elemente Methode (DEM) auf ihre Funktionsfähigkeit untersucht und werden hier vorgestellt.

Schneckenförderer bieten bei ersten Betrachtungen einige Vorteile in Bezug auf die vorliegende Problemstellung. Das Pulver wird in einer abgeschlossenen Struktur gehalten und der Massenstrom kann mit der Drehzahl der Schnecke gesteuert werden. Der Schneckenförderer ist außerdem in der Lage, das Pulver direkt gegen einen Überdruck in den Trägergasvolumenstrom der pneumatischen Förderleitung zu fördern.

Eine Reihe einfacher DEM-Simulationen hat ergeben, dass Schneckenförderer in Mikrogravitation unter einigen Bedingungen funktionieren können. Die Förderung kann z.B. durch eine hohe Schneckendrehzahl ermöglicht werden, so dass auf das Schüttgut Fliehkkräfte wirken, die die Partikel analog zu vertikalen Schneckenförderern unter klassischen Schwerkraftbedingungen an die Außenwand des Förderers drücken [11]. Die dadurch auftretenden Reibkräfte an der Rohrwand verhindern ein Mitrotieren des Schüttguts mit der Schneckenwelle und ermöglichen damit eine Förderung entlang der Schneckenachse. Nachteilig ist

dabei die hohe Schneckendrehzahl, die den recht niedrigen gewünschten Pulvermassenströmen gegenübersteht.

Die zweite Möglichkeit ist der Betrieb mit sehr hohen Füllungsgraden nahe 100 %. Somit ist immer Schüttgut mit Kontakt zur Rohrwand vorhanden und kann entlang dieser verschoben werden. So kann auch mit niedrigen Drehzahlen Schüttgut in Mikrogravitation gefördert werden.

Bei der DEM-Untersuchung der Schneckenförderer wurde ein viel schwerwiegenderes Problem offensichtlich. Die Füllung bzw. das Einziehen von Schüttgut in die Schneckenwendel funktioniert unter Mikrogravitationsbedingungen nicht mehr. Daher müsste das Schüttgut aus einem Vorratsbehälter zur Schneckenwendel gezwungen werden. Somit verlagert sich das eigentliche Problem der Schüttgutförderung weiter rückwärts im System. Durch einen Kolben, der den durch das abgeförderte Schüttgut freiwerdende Raum wieder schließt, ließe sich eine Bewegungsrichtung des Schüttgutes vorgeben. Das führt zu konstruktiven Einschränkungen, die schwer zu überwinden sind. Das Schüttgut sollte nicht in Richtung einer starken Querschnittsverengung gedrückt werden, da hier die Gefahr des Blockierens besteht. Somit kann die Kolbenquerschnittsfläche nicht viel größer als der Schneckendurchmesser multipliziert mit der Einzugslänge in den Schneckenförderer sein. Das führt einerseits zu rechteckigen Kolben und andererseits zu sehr schlanken und hohen Vorratsbehältern.

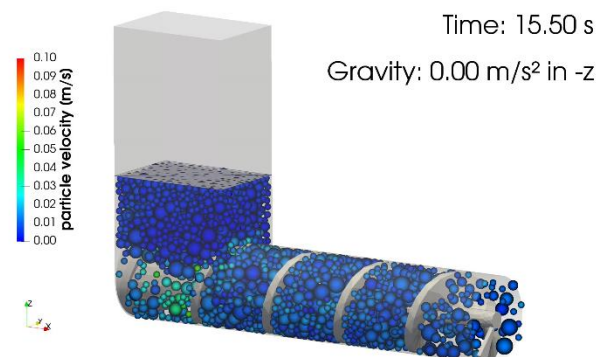


Abbildung 8. DEM-Simulation eines Schneckenförderers in Mikrogravitation mit erzwungener Füllung durch Kolben

Als Nachteil wird beim Schneckenförderer der zu erwartende hohe Verschleiß durch die starke Relativbewegung zwischen Schneckenwelle, Rohr und Gut gewertet, der durch hohe Drehzahlen und durch hohe Füllungsgrade verursacht wird. Insbesondere spielt der Spalteffekt eine entscheidende Rolle [12]. Der Verschleiß betrifft dabei die Bauteile des Förderers aber auch die mögliche Zerstörung der Partikel, die sich nachteilig auf die Fließ- und Fertigungseigenschaften für den LP-DED-Prozess auswirken kann. Daher sollen Förderprinzipien mit hohem Einfluss des Spalteffekts (z.B. Zellenradschleusenprinzip) nicht berücksichtigt werden.

Ein weiteres Förderprinzip stellt der Strömungsförderer dar. Klassische Saugeinrichtungen arbeiten mit Unterdruck und heben so das Schüttgut zum Beimischungspunkt [11]. Anwendung findet dieses System in „Sprühpistolen“ zum Beschichten von Bauteilen mit Pulver oder Flüssigkeiten. Auch hier muss in Mikrogravitation wieder dafür gesorgt werden, dass das Pulver kompakt am Saugrohreingang vorliegt. Das kann entweder durch Rotation des gesamten Systems gelingen, so dass sich das Schüttgut durch Fliehkräfte in der Nähe des Saugrohreingangs ablegt, oder aber durch Verschließen des freien Raums ähnlich zum Schneckenförderer.

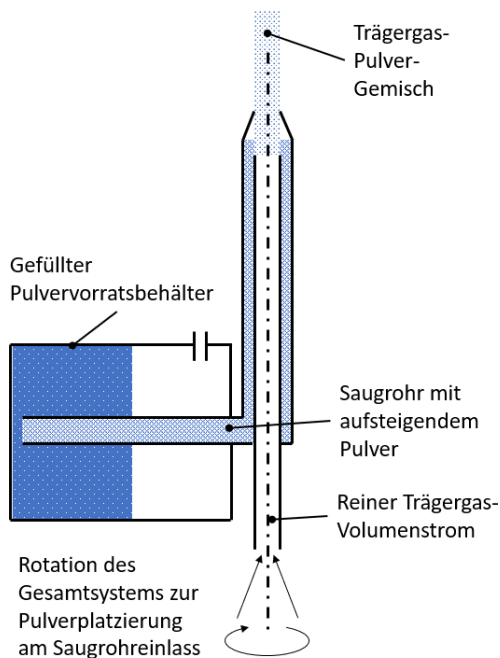


Abbildung 9. Funktionsprinzip einer möglichen Saugeinrichtung eines Strömungsförderers zur Beimischung von Pulver in einen Trägergasstrom

Zusätzlich besteht ein weiterer entscheidender Nachteil. Der Pulvermassenstrom ist ausschließlich vom Trägergasvolumenstrom abhängig, da durch ihn der Unterdruck zum Ansaugen des Pulvers erzeugt werden muss. Damit ist der Trägergasvolumenstrom nicht mehr frei wählbar. Das System verliert einen Freiheitsgrad, der Pulvermassenstrom wäre also direkt mit dem Trägergasvolumenstrom gekoppelt und kann somit nicht mehr frei eingestellt werden. Das „Sprühpistolenprinzip“ kommt aufgrund der Limitierung des einstellbaren Volumenstromes in der Pulverdüse daher ebenfalls nicht für eine Realisierung eines Pulverförderers für die Mikrogravitation in Frage.

Aus der Konzeptphase des Forschungsprojekts ergaben sich zwei vielversprechende Funktionsprinzipien für den Pulverförderer, die simuliert aber auch als Prototypen praktisch umgesetzt wurden: Das erste Konzept erzeugt künstliche Schwerkraft durch „Rotierende Vorratsflaschen“ und das zweite Konzept entspricht einem „Spiralkratzer“.

5 PULVERFÖRDERER-PROTOTYPEN

5.1 ROTIERENDE VORRATSBEHÄLTER

Dieses Funktionsprinzip nutzt das klassische Siloprinzip um mehrere kleine Vorratsbehälter unter künstlicher Schwerkraft zu entleeren. Die künstliche Schwerkraft wird dabei durch die Fliehkraft in einer rotierenden Scheibe erzeugt. Dazu sind paarweise vier siloartige Vorratsbehälter mit speziell geformter Auslaufgeometrie gegenüberliegend auf einer Scheibe angeordnet (siehe Abbildung 10). Die Auslauföffnungen der Vorratsbehälter zeigen radial nach außen und münden in einen Ringkanal auf der Scheibe. Der Ringkanal wird mit Trägergas aus einer Hohlwelle gespeist. Durch Rotation der Scheibe mit ihren darauf befestigten Vorratsbehältern wird eine künstliche Schwerkraft durch Fliehkraft in radialer Richtung erzeugt. Mithilfe der Fliehkraftwirkung wird das gespeicherte Pulver zum Ausfließen gebracht und in den vorbeistreichenden Trägergasstrom eingemischt. Die Ausleitung des Gemisches erfolgt durch eine zweite Hohlwelle und Drehverschraubung am Wellenende.

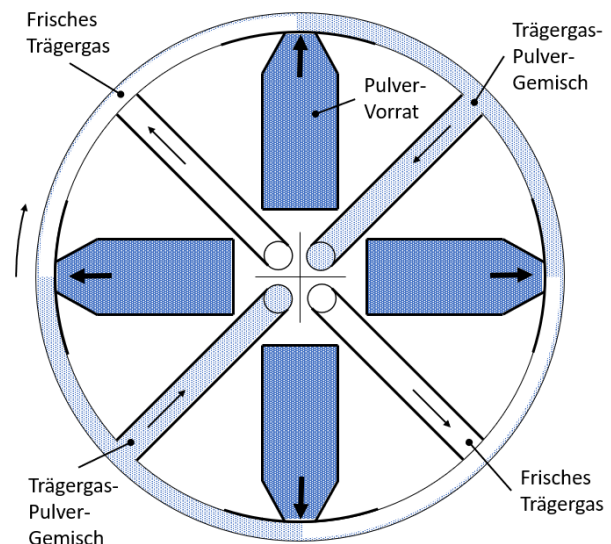


Abbildung 10. Funktionsprinzip des Pulverförderers bestehend aus einer rotierenden Scheibe mit Pulvervorratsbehältern und Strömungskanälen des Trägergases

Die Variante der rotierenden Vorratsbehälter hat mehrere Vorteile: Der Siloauslauf funktioniert unabhängig vom Gasstrom. Somit sind Trägergasstrom und Pulvermassenstrom entkoppelt wählbar. Der Pulvermassenstrom ist durch die gewählte Drehgeschwindigkeit der Scheibe einstellbar. Je höher die Drehzahl, desto höher ist auch der Massenstrom. Der vorbeiziehende Trägergasstrom muss lediglich so groß dimensioniert werden, dass er den bereitgestellten Pulvermassenstrom aufnehmen und abfordern kann. Ein weiterer Vorteil ist die leichte Austauschbarkeit der Vorratsbehälter und der geringe Verschleiß, der nur in der pneumatischen Förderleitung zu erwarten ist.

Als Nachteil des Prinzips muss die sehr kleine Auslauföffnung genannt werden, die notwendig sind, um den sehr geringen Pulvermassenstrom sicher zu realisieren. Bei freifließenden Pulvern sollte dies unproblematisch sein, solange die Auslauföffnung ca. zehnmal größer als der größte Korndurchmesser ist. Bei kohäsiven Pulververhalten z.B. infolge des Verhakens der Partikel oder bei unpräzise gefertigten Vorratsbehältern kann es jedoch zur Herabsetzung des Massenstroms oder gar zu Auslaufstörungen kommen. In ersten Tests konnte ein problemloses Ausströmen des Pulvers bei 1 und 2 mm Auslauföffnung in einer improvisierten Zentrifuge beobachtet werden. Daher wurde das Konzept prototypisch aufgebaut (siehe Abbildung 11).

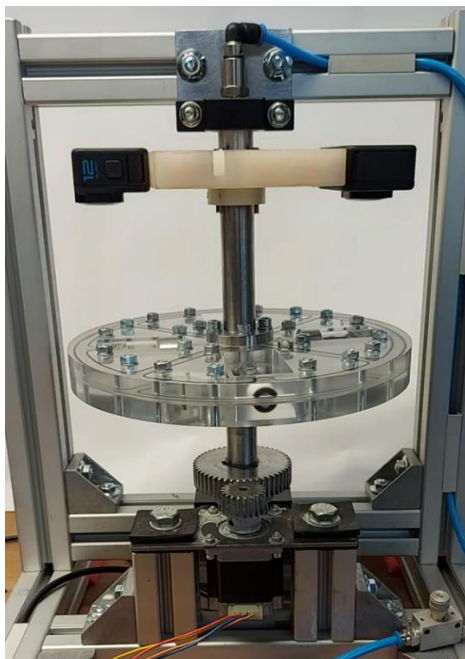


Abbildung 11. Prototypische Umsetzung des Pulverförderers nach dem Prinzip der rotierenden Vorratsflaschen

Die Herausforderungen bei der Konstruktion liegen in der Gestaltung des Behälterausbereiches und der Abdichtung zwischen Behältern und Trägergaskanälen. Experimentelle Untersuchungen unter Erdschwerkraft konnten bei unterschiedlichen Behältergeometrien und Auslauföffnungen bislang keinen sicher reproduzierbaren Pulvermassenstrom erzeugen (siehe Abbildung 12). Dies liegt an Fertigungsungenauigkeiten und zu hohen Wandrauigkeiten des Behälterauslaufes. Die Behälter wurden zur optischen Beobachtung aus Plexiglas gefertigt, was in Bezug der Fertigung der Innenkonturen mehrere Limitierungen mit sich brachte. Vorratsbehälter mit konischem Auslauf aus Glas könnten hier Abhilfe schaffen, sind jedoch schwer herstellbar.

Neben dem schwer zu reproduzierenden Pulvermassenstrom besteht in der rotierenden Scheibe des Pulverförderers außerdem die Gefahr der Störung der Mikrogravitation im Einstein-Elevator. Daher wurde parallel ein zweiter Prototyp mit dem Spiralkratzer-Förderprinzip aufgebaut.

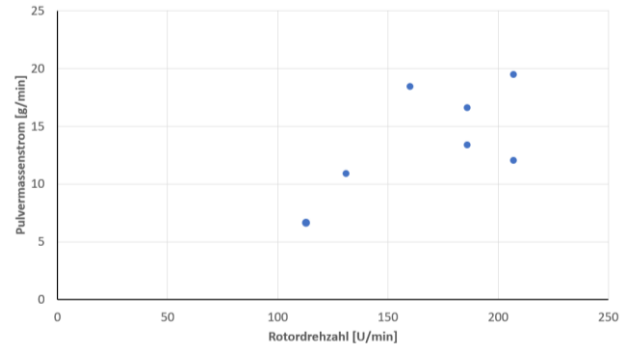


Abbildung 12. Pulvermassenstrom der rotierenden Vorratsbehälter mit konischem Behälterauslauf und 2 mm Auslaufdurchmesser bei unterschiedlichen Drehzahlen.

5.2 SPIRALKRATZER

Die Konstruktionsvariante des Spiralkratzers besteht aus einem feststehenden Teil mit Trägergaskanälen und Kratzerstruktur sowie einem beweglichen Vorratsbehälter mit Pulvervorrat. Der obere feststehende Teil beinhaltet die Trägergaskanäle und die feststehenden Schlauchkuppungsstellen. Es kann nicht zum Verdrehen und Wickeln von Schläuchen kommen. In die Trägergaskanäle mündet ein Steigrohr, das die Kratzergeometrie mit den Trägergaskanälen verbindet. Am unteren Ende des feststehenden Teils ist der Kratzer befestigt. Durch diese spezielle Geometrie greift die Komponente in das Pulver im Vorratsbehälter ein und soll dieses zum Steigrohr fördern. Dazu rotiert der Vorratsbehälter um seine Mittelachse und wird gleichzeitig langsam und stetig angehoben. Abbildung 13 stellt das Konstruktionsprinzip dar. Der Kratzer soll dabei das Pulver aktivieren und zum Steigrohr fördern. Um Stauungen oder Verdichtungen zu verhindern, folgen die Kratzer der Geometrie der archimedischen Spirale. Da die archimedische Spirale einen linearen Zusammenhang zwischen Drehwinkel und Radius aufweist, werden konstruktiv Verengungen des Pulverflusses unter dem Kratzer vermieden. Mit der richtigen Wahl des Verhältnisses von Hubgeschwindigkeit und Drehgeschwindigkeit des Vorratsbehälters können somit konstante Pulvermassenströme im Steigrohr erzeugt werden. Das grundsätzliche Funktionsprinzip des Spiralkratzers wurde mit Hilfe von DEM-Simulationen evaluiert. Diese zeigten, dass eine Pulverförderung sowohl unter Erdschwerkraft aber auch in Mikrogravitation möglich ist.

Vorteilhaft an dieser Variante ist wieder die Unabhängigkeit von Pulvermassenstrom zu Trägergasvolumenstrom. Hinzu kommt hier aber auch die durch die relativ große Becherquerschnittsfläche bedingte sehr langsame Geschwindigkeit für Hub und Drehung des Vorratsbehälters. Damit ist mit keiner Störung der Mikrogravitation des Einstein-Elevators zu rechnen. Nachteilig ist der auftretende Verschleiß einer Dichtung, die Kontakt mit dem Me-

tallpulver hat. Gleichzeitig müssen Vorkehrungen zur Vermeidung der elektrostatischen Aufladung des Vorratsbehälters getroffen werden.

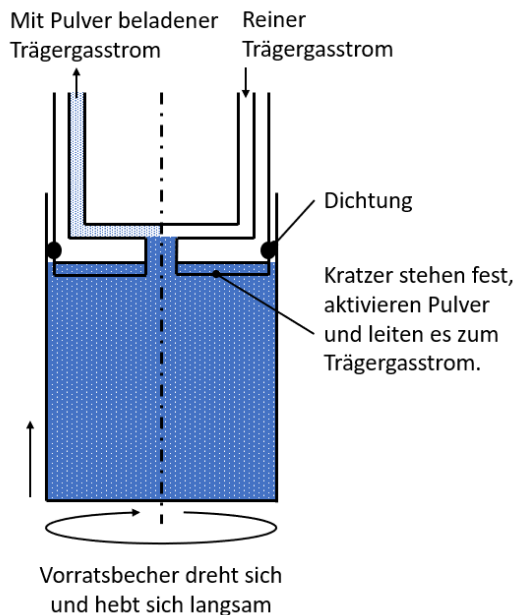


Abbildung 13. Funktionsprinzip des Spiralkratzers

Der Vorratsbehälter und die daran anschließende Pneumatik des Spiralkratzer-Prototyps wurde aus Plexiglas gefertigt, um Einblick in das Pulververhalten während der Förderung zu erhalten. Der Kratzer selbst wurde aus PLA im FDM-Druck gefertigt und kann gewechselt werden. Somit besteht die Möglichkeit des Tauschs der Kratzblätter bei erhöhtem Verschleiß. Abbildung 14 zeigt die Kratzblätter im Detail im Wartungs- bzw. Wiederbefüllungszustand des Pulverförderers.



Abbildung 14. Kratzergeometrie mit Kratzblättern, die einer archimedischen Spirale folgen

Abbildung 15 zeigt den Gesamtaufbau des Pulverförderers mit nahezu entleertem Vorratsbehälter. Der Vorratsbehälter mit seinem Drehantrieb ist auf einem Hubtisch positioniert. Hub- und Drehbewegung können unabhängig voneinander ausgeführt werden und verfügen über eigene Antriebe. Zur Ausführung der Hubbewegung ist eine Trapezgewindespindel mit direktem Schrittmotorantrieb eingebaut. Die Rotation des Vorratsbehälters wird durch einen

Schrittmotor mit Getriebe realisiert. Somit kann die Drehbewegung sichergestellt werden, da eine Berechnung des benötigten Antriebsmomentes nur schwer möglich war. Weiterhin sind durch das Getriebe die sehr niedrigen Drehzahlen des Vorratsbehälters realisierbar.

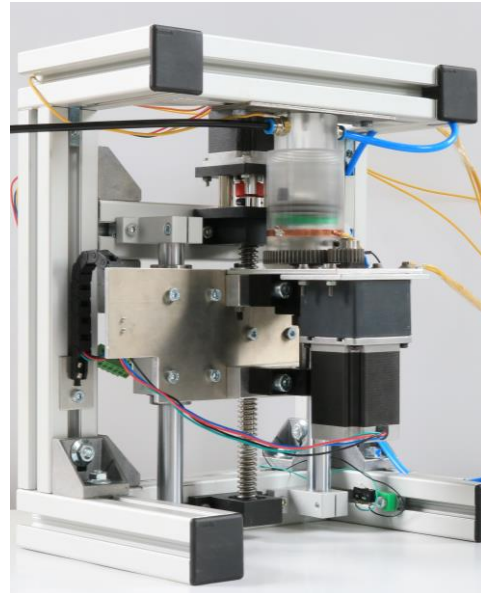


Abbildung 15. Prototypischer Aufbau des Pulverförderers nach dem Prinzip des Spiralkratzers

Die sehr niedrigen, geforderten Pulvermassenströme führen zu sehr geringen Rotationsgeschwindigkeiten bei der Motoren. Die Hubgeschwindigkeit des Vorratsbehälters beträgt maximal wenige Millimeter pro Minute. Die Drehzahl des Vorratsbehälters bewegt sich in der Größenordnung um 0,5 bis wenige Umdrehungen pro Minute. Das genaue Verhältnis von Hub- zu Drehgeschwindigkeit kann durch den gewünschten Pulvermassenstrom theoretisch bestimmt werden. Der Vorratsbehälterhub muss den durch das geförderte Pulver entstehende Leerraum wieder schließen. Die Berechnungen haben in ersten praktischen Versuchen als nichtausreichend erwiesen. Unter dem Kratzer tritt zusätzlich Schlupf im Pulver auf. Daher wurde ein optimales Hub- zu Drehgeschwindigkeitsverhältnis experimentell unter Erdschwerkraft ermittelt. Mit diesem festen Antriebsverhältnis können Hub- oder Drehgeschwindigkeit gewählt und die jeweils zugehörige Geschwindigkeit berechnet werden. Mit dem festen Antriebsverhältnis und unterschiedlichen Hubgeschwindigkeiten konnte der erreichte Pulvermassenstrom gemessen werden. In Abbildung 16 ist ein nahezu linearer Zusammenhang zwischen den gemessenen Pulvermassenströmen und der Hubgeschwindigkeit zu erkennen. Jeder Messpunkt stellt dabei einen Durchschnittswert des Pulvermassenstroms über mehrere Minuten der Förderung dar. Die Messungen wurden mit Druckluft und einem Druckluftvolumenstrom von 20 l/min durchgeführt.

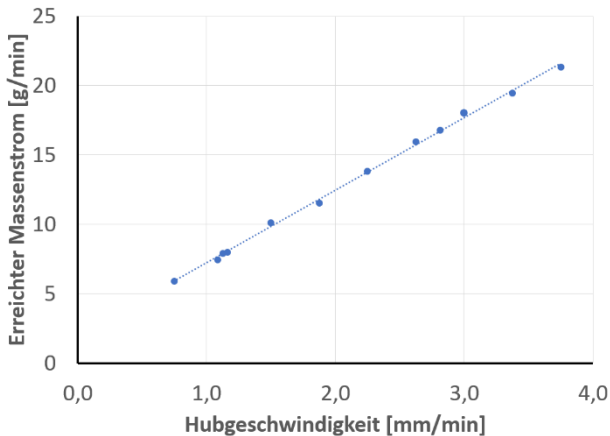


Abbildung 16. Gemessene Pulvermassenströme bei unterschiedlichen Hubgeschwindigkeiten des Vorratsbehälters

Während der Pulvermassenstrommessungen konnten elektrische Entladungen visuell, aber vor allem akustisch wahrgenommen werden. Die Reibung des Pulvers in sich selbst als auch am Förderer führt zu einer statischen Aufladung des Systems. Daher musste eine Erdung sämtlicher Anlagenteile realisiert werden. Schleifkontakte und eine elektrisch leitende Verbindung in den Vorratsbehälter mit Kontakt zum Metallpulver brachten den gewünschten Erfolg.

6 ERFOLGREICHER ERSTER FLUG DES VERSUCHSAUFBAUS IM EINSTEIN-ELEVATOR

Der entwickelte Versuchsaufbau ist bereits erfolgreich im Einstein-Elevator getestet worden. Sowohl die Funktion des LP-DED-Prozesses als auch die des installierten Spiralkratzer-Pulverförderers konnten erfolgreich demonstriert werden (siehe Abbildung 17). Die Ergebnisse der Analysen des ersten unter Mikrogravitation gefertigten Seedsticks sowie aller Folgenden werden in späteren Publikationen veröffentlicht.

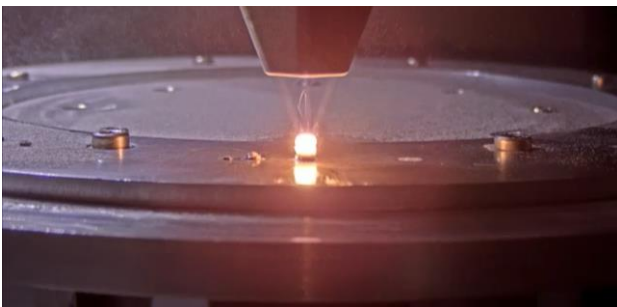


Abbildung 17. Erster Flug des Einstein-Elevators mit komplettem Versuchsaufbau. Sowohl LP-DED-Prozess als auch der Pulverförderer konnten in Mikrogravitation erfolgreich getestet werden.

7 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Es konnte gezeigt werden, dass für die laserbasierte Fertigung von Bauteilen aus Metallpulver in Mikrogravitation herkömmliche Pulverförderer nicht genutzt werden können. Aus der Analyse und aus den Versuchsrandbedingungen konnten Anforderungen für einen zu entwickelnden Pulverförderer abgeleitet werden. Die größte Herausforderung stellt dabei die reproduzierbare präzise Realisierung eines sehr kleinen Pulvermassenstroms dar. Nach der Analyse von möglichen Wirkprinzipien wurden die beiden Funktionsprinzipien „rotierende Vorratsbehälter“ und „Spiralkratzer“ prototypisch umgesetzt und bei Erdgravitation getestet. Der Spiralkratzer-Pulverförderer zeigt einen reproduzierbaren Massenstrom.

Der erste Flug des Versuchsaufbaus im Einstein-Elevator konnte die Funktion des Spiralkratzer-Pulverförderer in Mikrogravitation bestätigen. Es folgen nun weitere Versuche mit unterschiedlichen Parametereinstellungen am Pulverförderer als auch beim LP-DED-Prozess. Ein später in den Experimentaufbau integrierter Pulvermassenstromsensor ermöglicht es, bei den folgenden Versuchen in Mikrogravitation den Einfluss der Gravitation auf das Schüttgutverhalten im Pulverförderer zu untersuchen. Mit diesen Erkenntnissen kann die Pulverhandhabung in Mikrogravitation für zukünftige Weltraumanwendungen detailliert erforscht werden.

8 FÖRDERHINWEIS

Dieses Forschungsprojekt (Projektnummer: 456663377) wird von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) gefördert. Die Autoren bedanken sich bei der DFG für die finanzielle Unterstützung. Darüber hinaus danken die Autoren der DFG und der Niedersächsischen Landesregierung für die finanzielle Unterstützung beim Bau des Hannover Institute of Technology (HITec) und des Einstein-Elevators (NI1450004, INST 187/624-1 FUGB), sowie beim Institut für Satellitengeodäsie und Inertialsensorik des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR-SI) für die Entwicklung und Bereitstellung des Experimentträgersystems.

LITERATUR

- [1] M. Raupert, E. Tahtali, R. Sperling, A. Heidt, C. Lotz, L. Overmeyer, „Challenges in the development of the Laser Metal Deposition process for use in microgravity at the Einstein-Elevator“, Proceedings of Lasers in Manufacturing Conference 2023, Wissenschaftliche Gesellschaft Lasertechnik und Photonik e.V. (WLT), 2023, doi: 10.15488/15680.
- [2] C. Lotz, „Untersuchungen zu Einflussfaktoren auf die Qualität von Experimenten unter Mikrogravitation im Einstein-Elevator“, 2022, doi: 10.15488/11713.

- [3] B. Reitz, C. Lotz, N. Gerdes, S. Linke, E. Olsen, K. Pflieger, S. Sohr, M. Ernst, P. Taschner, J. Neumann, E. Stoll, L. Overmeyer, "Additive Manufacturing Under Lunar Gravity and Microgravity", *Microgravity Science and Technology*, Vol. 33, Nr. 25, 2021, doi: 10.1007/s12217-021-09878-4.
- [4] R. Sperling, M. Raupert, C. Lotz et al., „Simulative validation of a novel experiment carrier for the Einstein-Elevator“, *Sci Rep* 13, 19366, 2023, doi: 10.1038/s41598-023-46483-4.
- [5] M. Raudonis et al., „Microgravity facilities for cold atom experiments“, *Quantum Sci. Technol.* 8, 044001, 2023, doi: 10.1088/2058-9565/ace1a3.
- [6] M. Raupert, M. Pusch et al., „Laser Metal Deposition with Metal Powder in Microgravity“, *Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress 2022*, Dresden, Deutsche Gesellschaft für Luft- und Raumfahrt - Lilienthal-Oberth e.V., doi: 10.25967/570466.
- [7] C. Lotz, et al., "Einstein-Elevator: A new facility for research from μg to 5g ", *Gravitational and Space Research*, 2017, doi: 10.2478/gsr-2017-0007.
- [8] R. M. Mahamood, "Laser Metal Deposition Process of Metals, Alloys, and Composite Materials", *Engineering Materials and Processes*, Springer International Publishing, Cham, 1st edition, 2018 edition, 2018. ISBN: 9783319649856, doi: 10.1007/978-3-319-64985-6.
- [9] GTV Verschleißschutz mbH, Hg., "Pulverförderer Serie PF: Für jede Anwendung die passende Lösung" [Online]. Verfügbar unter: <https://www.gtv-mbh.de/>.
- [10] GTV Verschleißschutz mbH, Hrg., "Original Betriebsanleitung Pulverförderer" [Online]. Verfügbar unter: <https://www.gtv-mbh.de/>.
- [11] J. Pajer, H. Kuhnt und F. Kurth, *Stetigförderer*, 5. Aufl. Berlin: Verlag Technik, 1988.
- [12] J. Leitner, "Untersuchungen zum Spalteinfluß und Einlauf des Fördergutes in senkrechten und steil geneigten Schneckenförderern" *Dissertation*, Montanuniversität Leoben, Leoben, 1999.

M.Sc. Matthias Pusch, Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Förder- und Materialflusstechnik an der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg.

M.Sc. Niklas Hoffmann, hilfswissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Förder- und Materialflusstechnik an der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg.

Prof. Dr.-Ing. André Katterfeld, Lehrstuhlleiter Lehrstuhl für Förder- und Materialflusstechnik an der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg.

Adresse: Lehrstuhl für Förder- und Materialflusstechnik, Institut für Logistik und Materialflusstechnik (ILM), Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, Universitätsplatz 2, 39106 Magdeburg, Deutschland, Tel: +49 (0) 391/67-52690, E-Mail: matthias.pusch@ovgu.de

M.Sc. Marvin Raupert, Wissenschaftlicher Mitarbeiter im Forschungsbereich „Production in Space“ am Institut für Transport- und Automatisierungstechnik (ITA) an der Leibniz Universität Hannover.

Dr.-Ing. Christoph Lotz, Leiter des Forschungsbereichs „Production in Space“ am Institut für Transport- und Automatisierungstechnik (ITA) an der Leibniz Universität Hannover.

Prof. Dr.-Ing. Ludger Overmeyer, Leiter des Instituts für Transport- und Automatisierungstechnik (ITA) an der Leibniz Universität Hannover.

Adresse: Institut für Transport- und Automatisierungstechnik (ITA), c/o Hannover Institute of Technology, Leibniz Universität Hannover, Callinstraße 36, 30167 Hannover, Deutschland, Tel: +49 (0) 511/762-14823, E-Mail: marvin.raupert@ita.uni-hannover.de