



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg
Hamburg University of Applied Sciences

Bachelorarbeit

Henrik Zimmermann

Konzeption eines prototypischen Messsystems zur Überwachung des Pulvermassenstroms beim Laser- Pulver-Auftragschweißen

Henrik Zimmermann

**Konzeption eines prototypischen Messsystems
zur Überwachung des Pulvermassenstroms
beim Laser-Pulver-Auftragschweißen**

Bachelorarbeit eingereicht im Rahmen der Bachelorprüfung

im Studiengang Maschinenbau: Entwicklung und Konstruktion
am Department Maschinenbau und Produktion
der Fakultät Technik und Informatik
der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg

in Zusammenarbeit mit:

Fraunhofer-Einrichtung für Additive Produktionstechnologien IAPT
Am Schleusengraben 14
21029 Hamburg

Erstprüfer/in: Prof. Dr. -Ing. Wolfgang Schulz
Zweitprüfer/in: Dr. -Ing. Dirk Herzog

Abgabedatum: 30.11.2021

Zusammenfassung

Henrik Zimmermann

Thema der Bachelorthesis

Konzeption eines prototypischen Messsystems zur Überwachung des Pulvermassenstroms beim Laser-Pulver-Auftragschweißen

Stichworte

Laser-Pulver-Auftragsschweißen, Messsystem, Pulvermassenstrom, Konzept, videometrisches Messverfahren

Kurzzusammenfassung

Diese Arbeit umfasst die Konzeption eines Messsystems, das den Pulvermassenstrom bei dem Laser-Pulver-Auftragschweißen überwacht. Zu Beginn werden verschiedene Messverfahren zur Bestimmung von Pulvermassenströmen vorgestellt. Aus diesen wird mit Bewertungskriterien ein Messverfahren für das Messsystem ausgewählt. Das Messsystem wird in kleine Teilaufgaben zerlegt. Für die Teilaufgaben werden Teillösungen gefunden, welchen dann zu verschiedenen prinzipielle Gesamtlösungen kombiniert werden. Die prinzipiellen Gesamtlösungen werden verglichen und eine als das Konzept des Messsystems gewählt. Es wurde ein Konzept mit einem videometrischen Messverfahren entwickelt.

Henrik Zimmermann

Title of the paper

Conception of a prototypical measuring system for monitoring the powder mass flow during laser powder deposition

Keywords

Laser powder deposition, measuring system, powder mass flow, concept, videometric measuring method

Abstract

This work covers the conception of a measuring system that monitors the powder mass flow during laser powder deposition. At the beginning, different measuring methods for the determination of powder mass flow are presented. From these measuring methods, a measurement method for the measurement system is selected according to evaluation criteria. The measurement system is broken down into small subtasks. Partial solutions are found for the subtasks, which are then combined to form various principal total solutions. The principle overall solutions are compared and one is chosen as the concept of the measuring system. A concept with a videometric measurement method was developed.

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich kurz bei allen bedanken, die mich während der Anfertigung meiner Bachelorarbeit motiviert und unterstützt haben.

Ein besonderer Dank geht an Julian Weber, der mich umfangreich während meiner Bachelorarbeit betreut hat und viel konstruktive Kritik gegeben hat.

Ebenso möchte ich mich bei den Mitarbeitern und Studierenden des Fraunhofer IAPTs bedanken, die hilfsbereit waren und meine Versuche unterstützt haben.

Ich bedanke mich bei meinen Freunden und meiner Familie, dafür das sie immer hinter mir Standen und mir Mut zugesprochen haben. Besonders meinen Bruder möchte ich danken, da er mich, auch wenn ich keine Motivation hatte, animiert hat weiterzuschreiben und an mich selbst zu glauben.

Vielen Dank!

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis.....	V
Tabellenverzeichnis.....	V
Abkürzungsverzeichnis.....	VI
Formelzeichen.....	VI
1 Einleitung und Motivation	1
2 Stand der Wissenschaft und Technik	2
2.1 Additive Fertigungsverfahren	2
2.2 Laser-Pulver-Auftragschweißen.....	4
2.3 Pulverfördersysteme	5
2.4 Mess- und Überwachungssysteme in der Pulverfördertechnik	7
2.4.1 Massenstrom messen.....	7
2.4.2 Gravimetrische Messverfahren	8
2.4.3 Akustische Messverfahren.....	9
2.4.4 Optische Messverfahren	10
2.4.5 Radiometrische Messverfahren	12
2.4.6 Mikrowellen Messverfahren	12
2.4.7 Elektrische Messverfahren.....	13
2.4.8 Thermische Messverfahren	14
2.5 Methodische Produktentwicklung	14
3 Vorversuche	18
3.1 Verwendete Materialien und Geräte	18
3.2 Versuchsdurchführung.....	18
3.3 Versuchsauswertung	20
3.4 Versuchsergebnis	21
3.5 Diskussion der Ergebnisse	25
4 Bewertung von Messverfahren.....	27
4.1 Klären und präzisieren der Aufgabenstellung	27
4.2 Bewertungskriterien für Messverfahren	30
4.3 Auswahl des Messverfahrens	31
5 Konzipieren des Messsystems	33
5.1 Funktionsstruktur	33
5.2 Lösungsfindung	33
5.3 Lösungsfindung und Konkretisierung.....	38
5.4 Wahl der Lösungsvariante	39
6 Validierung des Konzeptes	42
7 Zusammenfassung und Ausblick.....	45
Anhang.....	47
Literaturverzeichnis.....	49

Abbildungsverzeichnis

ABBILDUNG 1: EINTEILUNG FERTIGUNGSVERFAHREN NACH VGL. [5] UND [3]	2
ABBILDUNG 2: ÜBERSICHT ADDITIVE FERTIGUNGSVERFAHREN ABB. 2.7 IN [3]	3
ABBILDUNG 3: SCHEMATISCHE DARSTELLUNG DES KOAXIALEN LASER-PULVER-AUFTRAGSCHWEIßENS [10] ABBILDUNG 2.3	4
ABBILDUNG 4: SCHEMATISCHE DARSTELLUNG EINES PNEUMATISCHEN SCHNECKENFÖRDERERS VGL. [19] FIGURE 2.6 RIGHT	6
ABBILDUNG 5: TELLERFÖRDERPRINZIP NACH [10] ABBILDUNG 4.2	7
ABBILDUNG 6: GRAVIMETRISCHE KONTROLLE DER PULVERFÖRDERRATE [17] FIGURE 4	9
ABBILDUNG 7: SCHEMATISCHER AUFBAU EINES OPTISCHEN SENSORS MIT MEHREREN DIODEN UM DIE GESCHWINDIGKEIT ÜBER DEN ABSTAND L_0 ZU BESTIMMEN [23] FIGURE 26	10
ABBILDUNG 8: SCHEMATISCHE DARSTELLUNG DES MESSSYSTEMS MIT DEM OPTOELEKTRONISCHEN SENSOR [26] FIGURE 4 A)	10
ABBILDUNG 9: SCHEMATISCHER AUFBAU DES OPTISCHEN BILDGEBENDEN MESSSYSTEMS MIT CCD KAMERA [32] FIGURE 1	11
ABBILDUNG 10: BILD DER PULVERPARTIKEL MIT SEHR KURZER BELICHTUNGSZEIT (50 μ s) [32] FIGURE 3	11
ABBILDUNG 11: BILD DER PULVERPARTIKEL MIT LÄNGERER BELICHTUNGSZEIT (1 MS). MAN ERKENNT DIE STREIFEN DER BEWEGUNGSUNSCHÄRFE (MOTION BLUR) [32] FIGURE 4	11
ABBILDUNG 12: MESSPRINZIP MIT RÖNTGENSTRAHLEN [36]	12
ABBILDUNG 13: MESSSYSTEM MIT EINEM SENDEEMPFÄNGER [37] FIGURE 2	13
ABBILDUNG 14: SCHEMATISCHE ÜBERSICHT AKTIVES ELEKTRISCHES LADEVERFAHREN [23] FIGURE 4	14
ABBILDUNG 15: SCHEMATISCHE ÜBERSICHT THERMISCHER SENSOR [23] FIGURE 3	14
ABBILDUNG 16: ARBEITSSCHRITTE IM ENTWICKELN UND KONSTRUIEREN NACH VDI 2221 ABB. 24 IN [45], [46]	15
ABBILDUNG 17: BEISPIEL FÜR EINE CHECKLISTE ZUR ERMITTLUNG DER ANFORDERUNGEN [44] ABB. 3.21	16
ABBILDUNG 18: HAUPTMERKMALE FÜR DIE BEWERTUNG IN DER KONZEPTIONSPHASE, ÄHNLICH ZUR LEITLINIE MIT HAUPTMERKMALEN FÜR DIE ANFORDERUNGSLISTE [47] ABB. 6.22	17
ABBILDUNG 19: VERSUCHSAUSBAU, LINKS: SKIZZE, RECHTS BILD DES TATSÄCHLICHEN AUFBAUS	18
ABBILDUNG 20: GRAPHISCHE DARSTELLUNG DER AUFGENOMMENEN GEWICHTSWERTE ÜBER DIE ZEIT DER MESSUNG	20
ABBILDUNG 21: AUS ABBILDUNG 20 HERAUSGESCHNITTENER BEREICH	20
ABBILDUNG 22: DARSTELLUNG DES MASENSTROMS ÜBER VERSCHIEDENE DREHZAHLEN, IN NAHER UND FERNER MESSUNG.	22
ABBILDUNG 23: MASENSTROM ÜBER VOLUMENSTROM BEI EINER DREHZAHL VON 1 RPM	22
ABBILDUNG 24: MASENSTROM AN VERSCHIEDENEN TAGEN GEMESSEN	23
ABBILDUNG 25: MASENSTROM ÜBER VERSCHIEDENE SCHLAUHLÄNGEN	24
ABBILDUNG 26: DURCHSCHNITTLICHER MASENSTROM ÜBER DIE ZEIT DER MESSUNG	24
ABBILDUNG 28: FUNKTIONSSTRUKTUR FÜR DAS MESSSYSTEM	33
ABBILDUNG 29: MORPHOLOGISCHER KASTEN MIT LÖSUNGSWEGEN 1 IN GELB UND 2 IN LILA	37
ABBILDUNG 30: SKIZZE LÖSUNGSVARIANTE 1	38
ABBILDUNG 31: SKIZZE LÖSUNGSVARIANTE 2	39
ABBILDUNG 32: AUFNAHMEBEREICH DER KAMERA	42
ABBILDUNG 33: LINKS: WAHL DER REFERENZLÄNGE, RECHTS: GESCHWINDIGKEITSVEKTOREN MIT MASKE	43
ABBILDUNG 34: LINKS: GEFILTERTES BILD, RECHTS MITTLERE GESCHWINDIGKEIT	43

Tabellenverzeichnis

TABELLE 1: ERGEBNISTABELLE DER MASENSTRÖME (PARAMETERANGABEN ERGÄNZEND IM ANHANG).....	21
TABELLE 2: ANFORDERUNGSLISTE FÜR DAS MESSSYSTEM	30
TABELLE 3: URTEILSSHEMA ZUR BEWERTUNG.....	31
TABELLE 4: BEWERTUNGSTABELLE MESSVERFAHREN	32

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Bedeutung
DED	Directed-energy deposition
DIN	Deutsches Institut für Normung
FPS	Frames per second (Bilder pro Sekunde)
GUI	Graphical use interface
LDV	Laser Doppler velocimetry
LPA	Laser-Pulver-Auftragschweißen
PIV	Particle image velocimetry
rpm	Revolutions per minute (Umdrehungen pro Sekunde)
VDI	Verein Deutscher Ingenieure

Formelzeichen

Zeichen	Einheit	Bedeutung
A	m ²	Fläche
$\beta_s(t)$	-	Volumenkonzentration des Pulvers
ρ	kg/m ³	Dichte
ρ_s	kg/m ³	Dichte des Pulverwerkstoffes
m	kg	Masse
\dot{m}	kg/s	Massenstrom
n	rpm	Drehzahl
Q	m ³ /s	Volumenstrom
v	m/s	Geschwindigkeit
$v(t)$	m/s	mittlere Geschwindigkeit der Pulverpartikel

1 Einleitung und Motivation

In den letzten Jahrzehnten hat die additive Fertigung in den Medien und in der Technik zunehmend an Bekanntheit gewonnen. Dem Umgangssprachlich als 3D-Druck bezeichneten Begriff ordnen sich mehrere Fertigungsverfahren unter. Diese Verfahren bieten viele Vorteile gegenüber den herkömmlichen Fertigungsverfahren.

Einer der größten Vorteile der additiven Fertigung ist die Herstellung von komplexen Geometrien. Während für einfache Geometrien die Herstellzeiten meist länger sind als mit den herkömmlichen Verfahren, können mit 3D-Druck kleinere komplexe Geometrien, unter optimierten Materialeinsatz und besserer Herstellzeit/aufwand durch das Einsparen von zusätzlichen Prozessschritten, produziert werden. Diese und weitere Vorteile machen die additive Fertigung zu einer attraktiven Lösungsalternative für viele Branchen der Industrie. So hat zum Beispiel das in der Luftfahrt bekannte Unternehmen Airbus sich im Jahre 2016 dazu geäußert, zukünftig 50% seiner Flugzeugkomponenten über 3D-Druck herzustellen [1].

In der Forschung sind die Weiterentwicklung und die Optimierung dieser Verfahren daher ein wichtiges und aktuelles Thema. Die Fraunhofer Einrichtung für additive Produktionstechnologien beschäftigt sich unter anderem mit der Prozessoptimierung des Laser-Pulver-Auftragsschweißen. Essenziell für eine gute Prozessqualität ist es, alle Prozessparameter möglichst genau einstellen und überwachen zu können. Ein grundlegender Prozessparameter ist der Pulvermassenstrom, er gibt an wie viel Masse an Pulver pro Zeiteinheit gefördert wird. Der Pulvermassenstrom ist bei den gängigen Pulverförderern nicht als eigener Parameter einstellbar, sondern wird durch andere Parameter festgelegt und berechnet. Gemessen wird dieser häufig nach dem Prozess durch Auswiegen, was keinen direkten Rückschluss auf Schwankungen und Störungen gibt, die während des Prozesses auftreten.

Ziel dieser Arbeit ist es ein prototypisches Messsystem zu entwickeln, welches den Pulvermassenstrom während des Prozesses überwachen kann, das heißt durch direktes Messen Schwankungen detektiert und ausgibt.

2 Stand der Wissenschaft und Technik

In diesem Abschnitt wird zu Beginn die additive Fertigung und deren Bedeutung in der Fertigungstechnik erklärt. Da sich diese schriftliche Ausarbeitung auf die Überwachung des Pulvermassenstroms beim Laser-Pulver-Auftragschweißen fokussiert, wird das Laser-Pulver-Auftragschweißen hinsichtlich der Funktion und Technik genauer betrachtet. Des Weiteren wird ein Überblick über aktuelle Pulverfördersysteme in der Industrie und Forschung, sowie deren Mess- und Überwachungssysteme. Abschließend werden die Methoden der Produktentwicklung im Zusammenhang zur Konzeptionierung von Produkten vorgestellt.

2.1 Additive Fertigungsverfahren

Die additiven Fertigungsverfahren zählen in Deutschland zum Urformen, dem ersten der in sechs Hauptgruppen unterteilten Fertigungsverfahren nach DIN 8580. Bei urformenden Fertigungsverfahren oder auch Zusammenhalt schaffenden Fertigungsverfahren werden aus formlosen Stoffen, wie zum Beispiel Pulver oder Flüssigkeiten, ein fester definierter Körper hergestellt. Das Urformen selbst wird in weitere Untergruppen eingeteilt (siehe Abbildung 1). Seit 2020 wird die additive Fertigung als zehnte Untergruppe, des Urformens in der DIN 8580 eingeteilt [2]–[5].

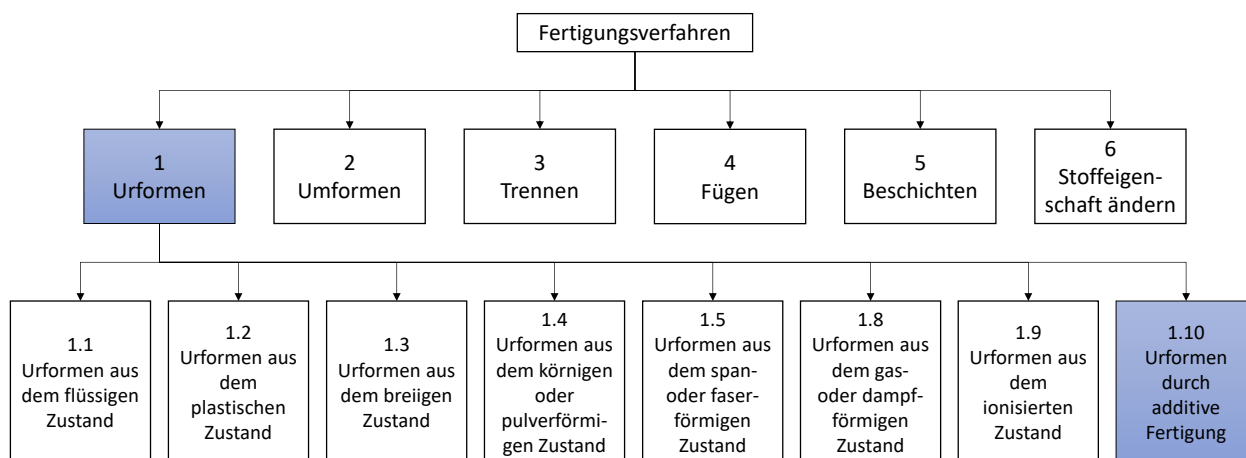


Abbildung 1: Einteilung Fertigungsverfahren nach vgl. [5] und [3]

Bei den additiven Fertigungsverfahren wird das Bauteil durch Auf- oder Aneinanderfügen von Volumenelementen automatisch hergestellt, hauptsächlich findet dieser Prozess in Schichtbauweise statt. Das heißt, sobald eine Schicht fertig aufgetragen wurde, wird die nächste Schicht darüber aufgetragen. Dieser Prozess erfolgt computergesteuert aus 3D-CAD-Datei, die über in Schichtmodelle überführt werden. Mit der schichtbauartigen Herstellung können komplexe Bauteile in jeder beliebigen Orientierung gebaut werden, die mit anderen Fertigungsverfahren schwer oder gar nicht realisierbar sind. So können zum einen die Anzahl an notwendigen Fertigungsschritten reduziert werden und man spart sich teure und aufwendige Werkzeuge [2].

Als Material können verschiedenste Werkstoff, wie Metalle, Kunststoffe, Keramiken und Legierungen, in fester, flüssiger, plastischer oder teigiger Form verwendet werden, häufig auch in Kombination miteinander. Durch die hohe Anzahl an variablen Ausgangswerkstoffen, sowie deren Verarbeitung, haben sich über die Jahre eine Vielzahl an verschiedenen Fertigungsverfahren entwickelt. In der unteren Abbildung 2 sieht man eine mögliche Art der Einordnung, um eine Übersicht zu geben, wobei die Abbildung nur einen geringen Teil der existierenden Verfahren zeigt. Das Laser-Pulver-Auftragschweißen würde hier der Gruppe der Ein- oder Mehrkomponentenpulver zugeordnet werden [2], [6].

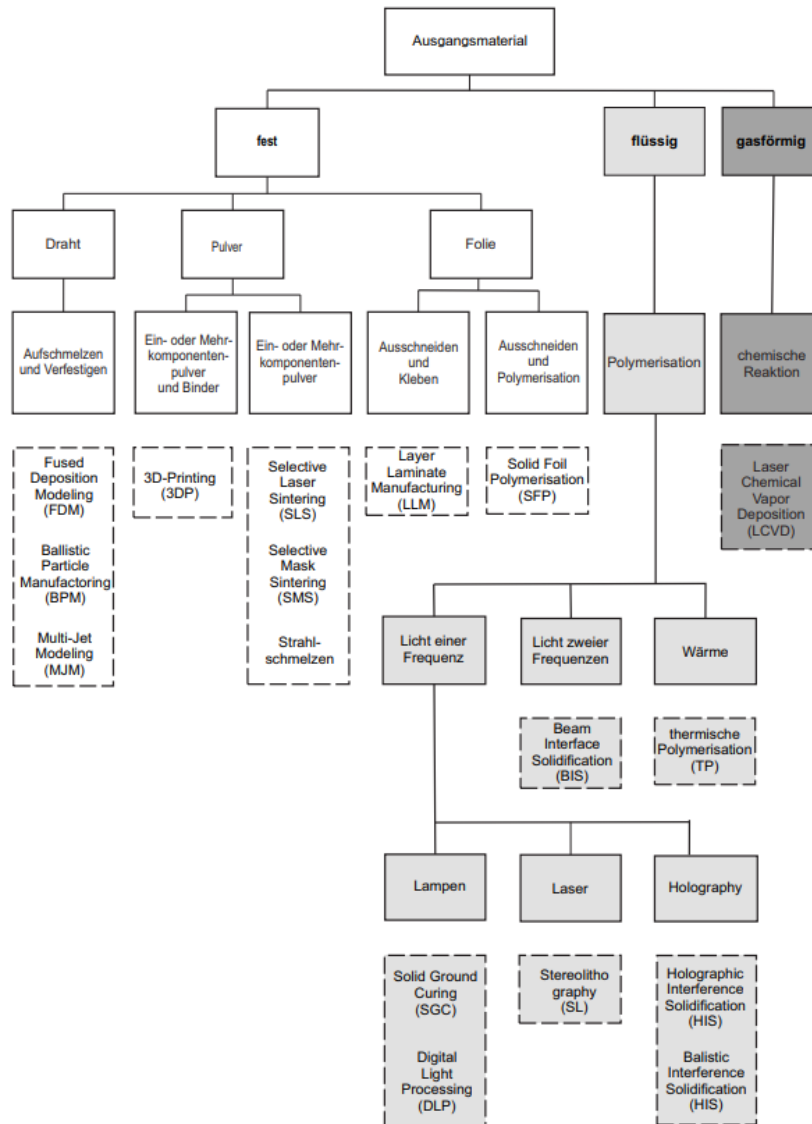


Abbildung 2: Übersicht additive Fertigungsverfahren Abb. 2.7 in [3]

2.2 Laser-Pulver-Auftragschweißen

Das Laser-Pulver-Auftragschweißen (auf engl. *Laser Powder Deposition*, LPA) zählt zu den *Directed-Energy Deposition* (DED) Verfahren. DED Verfahren kennzeichnen sich dadurch, dass das Material lokal aufgebracht und gleichzeitig durch eine Hitzequelle aufgeschmolzen wird. Da das Pulver meistens aus Metall besteht, ist auch der Name *Laser Metall Deposition* (LMD) gängig, welcher neben Pulver auch Drähte aus Metall beinhaltet. Beim LPA ist das Material, wie der Name schon sagt, in Pulverform und die Hitzequelle ein Laser. Übliche Pulverpartikel sind sphärischer geformt und im Bereich von wenigen Mikrometern bis zu mehreren hundert Mikrometern im Durchmesser [7]–[9].

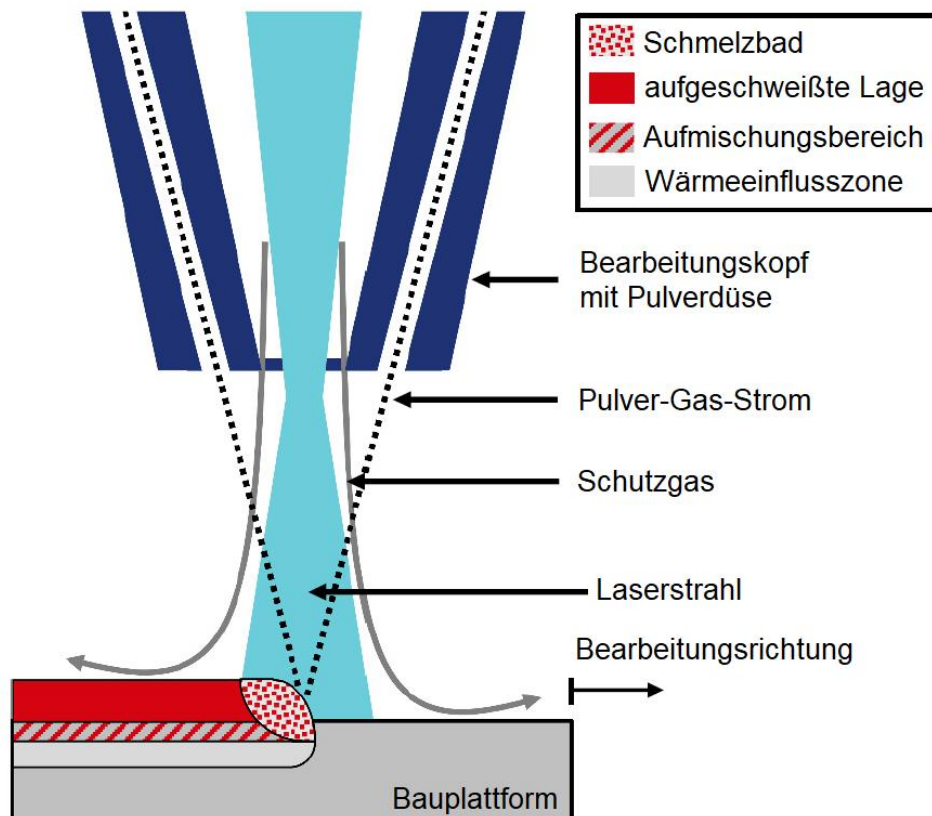


Abbildung 3: Schematische Darstellung des koaxialen Laser-Pulver-Auftragschweißens [10] Abbildung 2.3

Der grundlegende Prozessablauf beim LPA ist in Abbildung 3 dargestellt und besteht darin, dass das Pulver aus einem Reservoir mithilfe eines Pulverförderers pneumatisch in einen Inertgasstrom transportiert wird und über eine üblicherweise ringförmige Düse, die am Bearbeitungskopf sitzt, auf das Werkstück aufgebracht wird. Im Regelfall koaxial zum Pulverstrom ausgerichtet, strahlt ein Laser auf den Kontaktpunkt von Pulver und Werkstück, wodurch ein Schmelzbad entsteht. Damit keine ungewünschten chemischen Reaktionen, wie zum Beispiel Oxidation, auftreten, welche die Materialeigenschaften des Werkstückes verschlechtern, wird häufig ein zusätzlicher Schutzgasstrom über die Düse ausgegeben und/oder das Werkstück befindet sich in einer Schutzgaskammer. Der Laser und die Düse bewegen sich mit einer Vorschubgeschwindigkeit über der Oberfläche des Werkstückes weiter,

dies wird über ein CNC gesteuertes System in 3 oder 5 Achsen realisiert. Das erzeugte Schmelzbad gibt seine Wärme größtenteils auf das Werkstück ab und erstarrt. Nach demselben Prinzip kann nun auf das erstarrte Material eine neue, höherliegende Schicht aufgetragen werden. Der gesamte Prozess wird automatisch durchgeführt und wiederholt sich bis das Bauteil gefertigt wurde [2], [10]–[12],

Anwendung findet das LPA im Beschichten und Verstärken bzw. Reparieren von Werkzeugen, von stark beanspruchten Oberflächen und komplexe Freiformflächen. Es eignet sich auch für die Fertigung von Einzelstücken und Kleinserien, gerade mit komplexer Geometrie und die Verarbeitung von Sonderwerkstoffen [12].

Vorteile des LPA sind im Vergleich zu anderen Schweißverfahren die geringe und kontrollierbare Wärmeeinbringung im Werkstück, wodurch die Wärmeeinflusszonen und die durch das Erhitzen entstehende Spannungen im Material verringert werden. Die eingesetzten Pulver können aus verschiedenen Werkstoffen kombiniert werden und so die besten Eigenschaften von verschiedenen Werkstoffen in Kombination nutzen, wie zum Beispiel Hitzebeständigkeit und chemische Resistenzen. Ein weiterer Vorteil ist, dass sehr wenig Material verschwendet wird, da man beim LPA nur an den Ort Material aufbringt, wo es notwendig ist und nur geringfügige Nachbearbeitungen an der Oberfläche erforderlich sind. Der größte Nachteil von LPA ist es, dass es zu teuer für die Produktion von einfachen Werkstücken ist, was sich an den derzeit begrenzten Anwendungsbereichen zeigt [13].

Zu den wichtigsten einstellbaren Prozessparametern des LPA gehören die Laserleistung, die Vorschubgeschwindigkeit und der Pulvermassenstrom. Die Laserleistung bestimmt wie viel Wärme aufs Material gebracht wird, und somit das Verhalten und die Bildung des Schmelzbades. Die Vorschubgeschwindigkeit bestimmt, wie schnell sich der Laser und die Pulverdüse über dem Werkstück fortbewegen. Der Pulvermassenstrom ist die Masse des Metallpulvers, welche pro Zeiteinheit über die Düse mithilfe des Trägergases ausgegeben wird. Der Massenstrom wird häufig über Erfahrungswerte in Abhängigkeit zu den Parametern des Pulverförderers und des verwendeten Pulvers eingestellt [7], [10].

Mehrere wissenschaftliche Arbeiten zeigen, dass bereits kleine Abweichungen in diesen Prozessparametern zu Problemen und Unregelmäßigkeiten am Bauteil führen können, wie zum Beispiel Poren, differierende Festigkeiten und Eigenspannungen [14]–[16].

2.3 Pulverfördersysteme

Es gibt zahlreiche Pulverfördersysteme für verschiedene Förderraten, die Anwendung finden in der Industrie. Es gibt geringe Förderraten von unter einem Gramm pro Sekunde, in der Tablettenherstellung oder auch beim LPA bis hin zu Förderraten mit vielen Tonnen pro Stunde in der Schwerindustrie. Im Rahmen dieser Ausarbeitung werde ich vertieft auf volumetrische Pulverförderer eingehen. Viele Verfahren machen sich eine Kombination aus Volumenförderung und Schwerkraft zu nutzen. Die einfachste Form eines Pulverförderers ist

ein Trichter, welcher durch Schwerkraft das Pulver ausgibt, wie bei einer Sanduhr. Allein auf Schwerkraft basierende Systeme haben den Nachteil, dass sie das Pulver nicht gleichmäßig ausgeben, aufgrund von Einflüssen wie der Füllstandhöhe oder Reibung. Der Großteil der angewandten Systeme arbeiten deshalb nach dem volumetrischen Förderprinzip und/oder mithilfe von Vibration [17].

Vibrationsförderer in der Pulverfördertechnik können durch einstellbare Frequenzen und Amplituden der Vibrationen die Förderrate kontrolliert ausgeben. Sie werden zum Beispiel zur Dosierung in der Tablettenherstellung eingesetzt und können durch zusätzliche Unterstützung von Waagen sehr präzise Mengen an Pulver ausgeben [17], [18].

Beispiele für volumetrische Förderer sind der Schneckenförderer und der Tellerförderer, dies sind gleichzeitig auch die Fördersysteme, die am meisten Anwendung beim LPA finden. Bei Schneckenförderern ist das Reservoir mit der Öffnung nach unten auf der Schnecke und wird durch Rotation der Schnecke transportiert und am Ende der Schnecke ausgegeben zum Beispiel in einen Trägergasstrom [siehe Abbildung 4]. Ausschlaggebend für die Förderrate sind die Dimensionierung der Förderschnecke und deren Rotationsgeschwindigkeit, sowie die Eigenschaften des eingesetzten Pulvers [12], [18], [19].

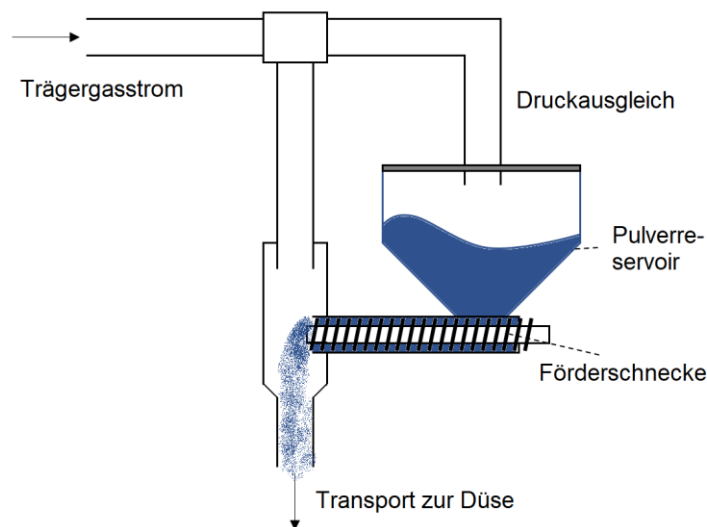


Abbildung 4: Schematische Darstellung eines pneumatischen Schneckenförderers vgl. [19] Figure 2.6 right

Beim Tellerförderer befindet sich die Öffnung des Reservoirs über einer Nut eines sich drehenden Tellers (siehe Abbildung 5). Durch die Drehbewegung gelangt gleichmäßig neues Pulver in die Nut (Pulverrinne), während das sich in der Nut befindende Pulver zum Abstreifer befördert wird und über einen Trägergasstrom in das Leitungssystem gelangt. Beim Tellerförderer sind, ähnlich wie bei dem Schneckenförderer, die Rotationsgeschwindigkeit des Tellers, die Geometrie der Pulverrinne und die Eigenschaften des verwendeten Pulvers

ausschlaggebend für die Förderrate. Tellerförderer haben eine sehr hohe Genauigkeit, was ihre Pulverförderrate betrifft. Der Nachteil ist, dass ein Volumen gefördert wird und keine Masse, weswegen für jeden Pulvertyp das System eine andere Abhängigkeit zwischen Massenstrom und Tellerdrehzahl aufweist [10], [12], [20], [21].

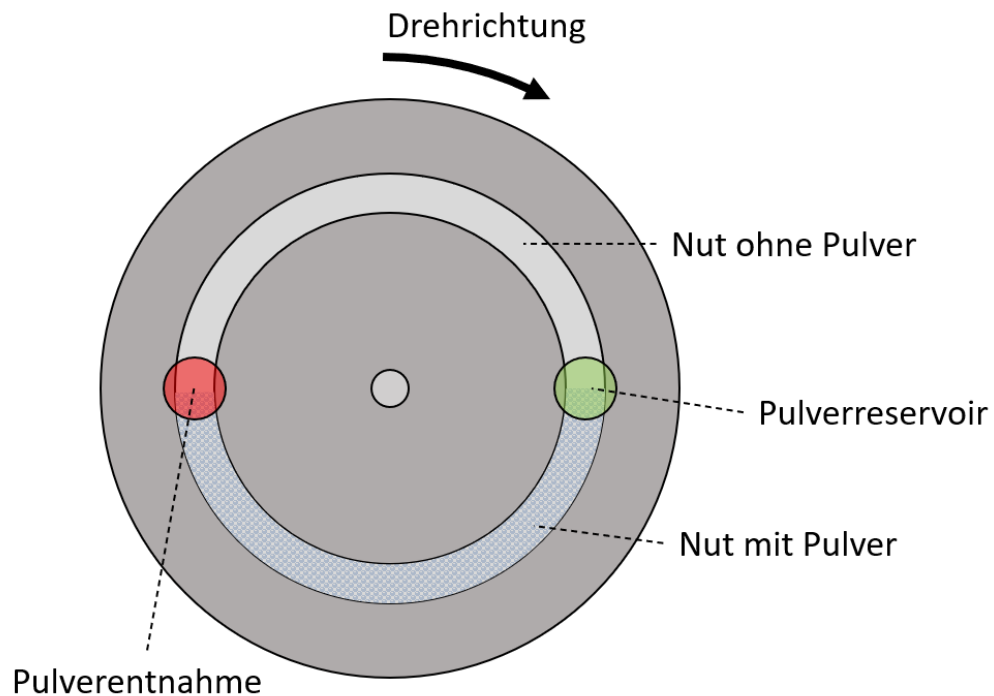


Abbildung 5: Tellerförderprinzip nach [10] Abbildung 4.2

2.4 Mess- und Überwachungssysteme in der Pulverfördertechnik

In diesem Abschnitt gebe ich eine kurze Einführung in Massenströme und gebe dann eine Übersicht über nicht-invasiven Messmethoden, um den Massenstrom von Pulverströmen zu messen. Hierbei ist anzumerken, dass die meisten Verfahren aus wissenschaftlichen Arbeiten stammen und noch nicht vollständig ausgereift sind. Häufig sind die Verfahren anwendungsspezifisch, zum Beispiel mit speziellen Förderern oder sehr hohen oder niedrigen Pulverförderraten, untersucht worden, weshalb die Aussagekraft der Ergebnisse nicht auf jedes Pulverfördersystem übertragbar ist.

2.4.1 Massenstrom messen

Der Massenstrom beschreibt die Änderung der Masse dm , pro Zeitabschnitt dt . Der Massenstrom \dot{m} wird meistens in kg/s angegeben. In der Strömungslehre wird dies mit der Gleichung (1) beschrieben:

$$\dot{m} = \frac{dm}{dt} = \rho \cdot v \cdot A \quad (1)$$

Die Dichte ρ ist hierbei die Dichte des Fluids und v die Geschwindigkeit. A ist der Querschnitt der Leitung. Anwendung findet diese Gleichung hauptsächlich für homogene einphasige Strömungen. Pneumatische Pulverförderer erzeugen eine zweiphasige Gas-Feststoff-Strömung. Auf zweiphasigen Strömungen kann diese Gleichung aufgrund der unterschiedlichen Dichten und Geschwindigkeiten der Phasen nur noch bedingt angewandt werden, weswegen man die Gleichung zu Gleichung (2) erweitert:

$$\dot{m} = \frac{dm}{dt} = \rho_s \cdot \beta_s(t) \cdot v(t) \cdot A \quad (2)$$

$v(t)$ beschreibt hier die zeitlich mittlere Geschwindigkeit der Pulverpartikel durch den Querschnitt und $\beta_s(t)$ die Volumenkonzentration des Pulvers. ρ_s ist die Materialdichte aus dem Werkstoff des Pulvers. Herkömmliche Messsysteme, die Massenströme von einphasigen Strömungen messen, greifen häufig in das System ein (invasiv) und schränken es ein; wie zum Beispiel beim Coriolis-Massendurchflussmesser. Diese Methoden eignen sich nicht für das Messen von Pulvermassenströmen aufgrund der Veränderung des Durchflusses der Pulverpartikel und der durch die Partikel verursachte Abrasion [22]–[25].

Über die letzten Jahrzehnte wurden zahlreiche nicht invasive Messtechniken entwickelt, um Massenströme von Pulvern in Gas bestimmen zu können. Das Messen und Erfassen von der Pulverlieferate des Förderers ermöglicht dessen Überwachung und gleichzeitige Steuerung bzw. Regelung, was für einen stabilen und konstanten Prozess notwendig ist. Gerade additive Fertigungsverfahren die konstante Pulverfördereraten erfordern, wie das LPA, profitieren von einer Überwachung und können so ihre Prozessqualität deutlich verbessern [15], [26], [27].

2.4.2 Gravimetrische Messverfahren

Ein angewandtes indirektes Überwachungssystem in der Industrie ist das Prinzip gravimetrische Dosieren, oder auch *loss-in-weight* Prinzip. Bei *loss-in-weight* Förderern wird nicht der Massenstrom selbst gemessen, sondern es wird das gesamte System oder Teile des Systems gewogen und anhand der Gewichtsdifferenz über die Zeit der Pulvermassenstrom berechnet. In Abbildung 6 wird gezeigt, wie eine derartige Regelung funktionieren kann. Das Reservoir des Pulverförderers sitzt hier auf zwei Wägezellen (*load cells*), welche das Gewicht des Pulvers im Reservoir misst. Die Kontrolleinheit (*continues weighing controller*) errechnet das Gewicht pro Zeit des Reservoirs und regelt bei Veränderung den Motor, der für die Pulverausgabe des Förderers sorgt. Bei sehr lang andauernden Prozessen zeigen Versuche, dass Genauigkeiten der Dosierung mit weniger als 0,2% Abweichung erreicht werden können. Dies bezieht sich allerdings nur auf die Dosierung und nicht auf den Massenstrom. Eine große Schwäche der gravimetrischen Überwachung ist die Empfindlichkeit des Systems gegenüber physikalischen Störfaktoren, wie zum Beispiel Schwingungen oder Stößen. Des Weiteren ist die Integration eines Messsystems zur Gewichtsbestimmung komplex und teuer [17], [28].

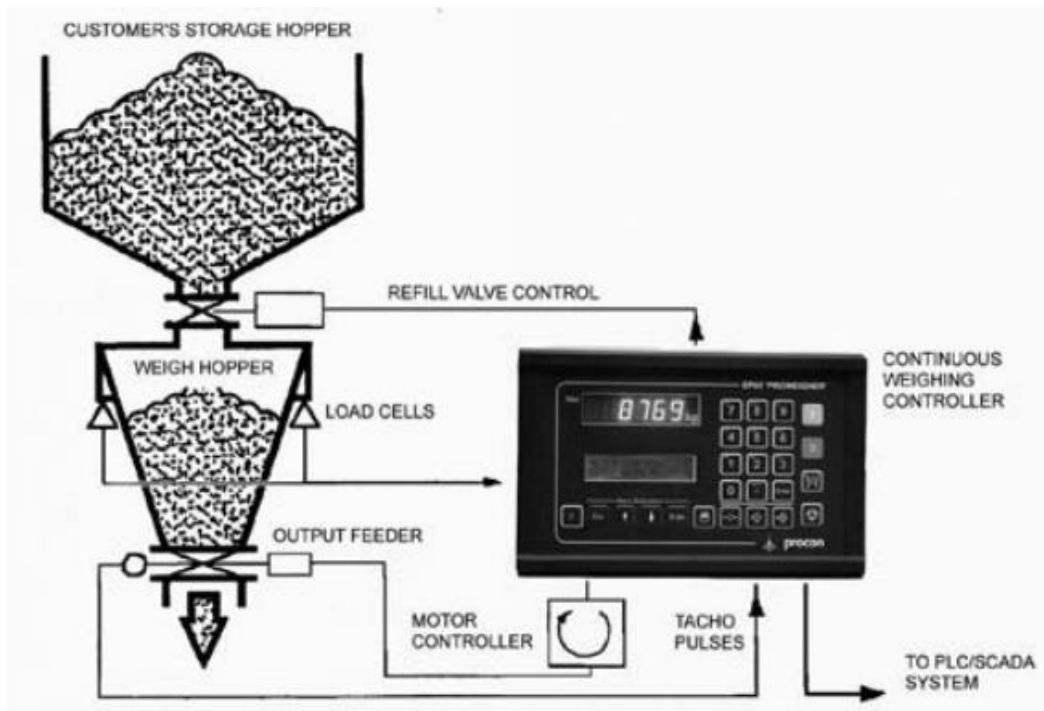


Abbildung 6: Gravimetrische Kontrolle der Pulverförrate [17] Figure 4

2.4.3 Akustische Messverfahren

Neben dem Wiegen gibt es auch Versuche den Pulvermassenstrom in Abhängigkeit zu der Geräusentwicklung, die durch die Bewegung der Pulverpartikel entsteht, zu bestimmen. Das grundlegende Prinzip besteht darin, dass akustische Emissionen mit steigendem Pulvermassenstrom mehr werden. Durch das Herausfiltern von hochfrequenten akustischen Peaks und Bursts, welche durch Kollision der Partikel entstehen, kann ein Zusammenhang mit deren Anzahl bzw. Intensität gemessen werden. Über mehrere Messreihen kann so die Abhängigkeit zum jeweiligen Massenstrom festgestellt werden. Attraktiv macht das Messverfahren, dass kein Eingriff in das Pulverförrsystem notwendig ist und theoretisch an jeder Stelle, die Pulvergeräusche durchlässt, gemessen werden kann. Problematisch ist, dass besonders feine Partikel, die kleiner als 25 μm sind, nicht oder sehr schwer von dem Hintergrundrauschen zu unterscheiden sind. Darüber hinaus ist die Anwendung bisher hauptsächlich bei hohen Förraten von über 400 kg/h getestet worden [28], [29].

Eine weitere Möglichkeit ist es mithilfe eines Transmitters und eines Empfängers den Gas-Pulverstrom zu durchschallen. Der Volumenanteil kann dann anhand der Dämpfung und Konzentration der Schallwellen am Empfänger gemessen werden. Allerdings kann die Geschwindigkeit der Partikel mit diesem Verfahren nicht bestimmt werden. Aus diesem Grund wird eine mittlere Geschwindigkeit in Abhängigkeit zum Volumenanteil und zur Geschwindigkeit des Gases berechnet, welche sich aus den Abweichungen der Ausbreitungsgeschwindigkeit im Gasstrom an zwei verschiedenen Stellen ergibt. Allerdings

macht diese Vereinfachung das Messverfahren zur Bestimmung des Massenstroms ungeeignet [25], [30].

2.4.4 Optische Messverfahren

Zur Bestimmung von Massenströmen bieten optische Verfahren direkt messbare Lösungen. Die Prinzipien basieren alle auf dem Messen mit Licht bzw. Strahlung, welche auf den Pulverstrom gerichtet wird und so für Reflektionen oder Schatten sorgt und mithilfe von Photodetektoren oder Kameras gemessen werden kann. In der Arbeit von Yaoyu Ding et al. [7] wird dieses Verfahren mit einem optoelektronischen Sensor bzw. Detektor und einer Laserdiode realisiert. Die Laserdiode erzeugt durch Linsen ein Lichtfeld, welches auf ein Fenster (Glaskammer) in der Leitung gerichtet ist, in dem das Pulver transportiert wird (siehe Abbildung 8). Der Detektor erzeugt nun eine Spannung. Je mehr Pulver durch die Leitung fließt, desto mehr Licht wird blockiert. Wenn weniger Licht den Detektor erreicht, fällt die Spannung, welche gemessen wird und dann durch Versuche in Abhängigkeit zum Pulvermassenstrom gebracht wird. Durch das Verwenden von zwei oder mehreren optischen Sensoren, kann über Kreuzkorrelation aus dem Abstand der Sensoren und des berechneten Zeitintervalls die Geschwindigkeit der Partikel bestimmt werden [23], [26], [31].

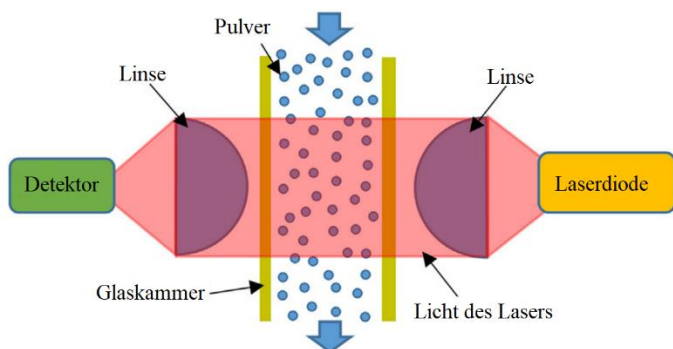


Abbildung 8: Schematische Darstellung des Messsystems mit dem optoelektronischen Sensor [26] Figure 4 a)

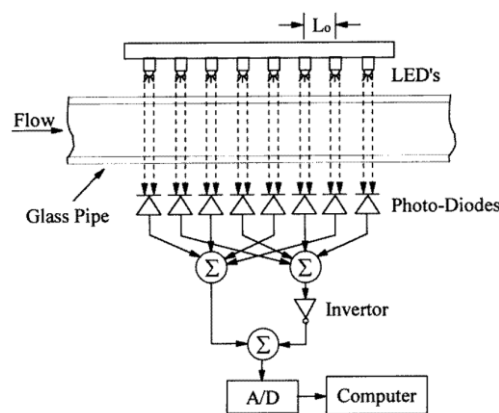


Abbildung 7: Schematischer Aufbau eines optischen Sensors mit mehreren Dioden um die Geschwindigkeit über den Abstand L_o zu bestimmen [23] Figure 26

Ein anderes optisches Messverfahren ist ein bildgebendes Verfahren, bei dem mithilfe einer Kamera die Pulverpartikel durch ein Glasfenster abgebildet werden. Die Kamera hat kurze Belichtungszeiten, damit sie die schnell bewegten Partikel scharf abbilden kann. Dafür muss eine ausreichend starke Belichtung bereitgestellt werden, welche hier über einen Laser geschieht (siehe Abbildung 9). Über Bilder mit extrem kurzer Belichtungszeit, kann das Verhältnis zwischen dem Volumenanteil des Pulvers zum Gesamtvolumen im Massenstrom berechnet werden (siehe Abbildung 10) und aus Bildern mit etwas längerer Belichtungszeit, die

Geschwindigkeit der Partikel (siehe Abbildung 11). Die Bildverarbeitung wird über ein an der CCD Kamera angeschlossenen Computer ausgeführt. Durch Anwendung der Gleichung (2) wird anschließend der Massenstrom berechnet [32].

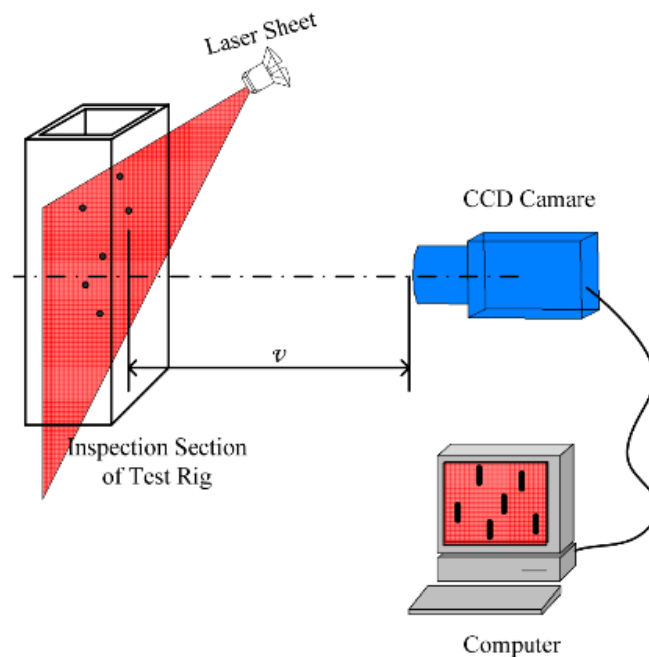


Abbildung 9: Schematischer Aufbau des optischen bildgebenden Messsystems mit CCD Kamera [32] Figure 1

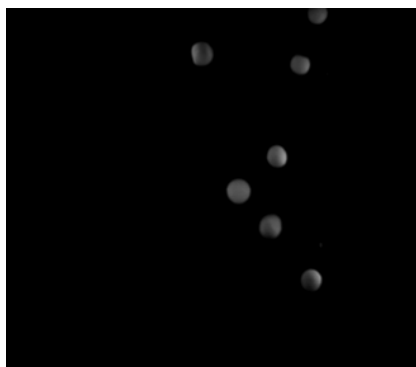


Abbildung 10: Bild der Pulverpartikel mit sehr kurzer Belichtungszeit ($50 \mu\text{s}$) [32] Figure 3

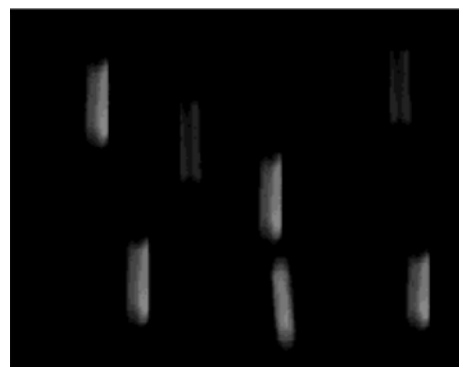


Abbildung 11: Bild der Pulverpartikel mit längerer Belichtungszeit (1 ms). Man erkennt die Streifen der Bewegungsunschärfe (Motion Blur) [32] Figure 4

Nach dem gleichen Prinzip kann auch videometrisch mit einer Hochgeschwindigkeitskamera der Massenstrom gemessen werden. Anstatt die Geschwindigkeit über die Längen der Streifen der Bewegungsunschärfe zu bestimmen, wird hier der Weg von Partikeln gemessen, der zwischen zwei oder mehreren Bildern (*Frames*) zurückgelegt wird. Mithilfe von Bildverarbeitungssoftware und speziell für die Analyse von Strömungen entwickelter Software, die mit Kreuzkorrelation funktioniert, wie PIV (*Particle Image Velocimetry*) oder CFD (*Computational Fluid Dynamics*), kann diese Auswertung fast zeitgleich zur Aufnahme

entstehen. Wie die meisten optischen Verfahren hat die videometrische Auswertung die Schwäche, dass bei hohen Förderraten mit kleinen Leitungsdurchmesser, bzw. hohen Volumenanteil des Pulvers im Pulverstrom, Pulverpartikel anfangen sich zu verdecken oder zu überlappen, wodurch manche Partikel nicht mehr gemessen werden und der gemessene Massenstrom niedriger ausfällt, als er tatsächlich ist [33]–[35].

2.4.5 Radiometrische Messverfahren

Ähnlich, wie die optischen Messverfahren, funktionieren radiometrische Messverfahren, bei denen Gamma- oder Röntgenstrahlen verwendet werden. In Abbildung 12 wird das Prinzip gezeigt. Aus einer Strahlenquelle (*X-Ray source*) treten Strahlen in Richtung des Pulverstroms aus und durchstrahlen diesen. Die Strahlen werden durch die Pulverpartikel abgeschwächt. Auf der anderen Seite der Pulverleitung werden die austretenden Strahlen mit mehreren Detektoren (*Array detectors*) gemessen. Über Signalverarbeitung und Kreuzkorrelation kann wiederum die Geschwindigkeit der Partikel bestimmt und somit nach Gleichung (2) der Pulvermassenstrom berechnet werden. Es wurden experimentelle Standardabweichungen von 3 bis 7% gemessen, bei einem Messfehler von ungefähr 5%. Problematisch ist der zusätzliche Bauraum, der für den Strahlenschutz notwendig ist. Zwar ist es deutlich teurer als rein auf Licht basierende Messverfahren, doch kann je nach Strahlenintensität selbst bei hohen Pulverförderraten den Volumenanteil genau bestimmt werden, da Pulverpartikel durchstrahlt werden und sich dadurch nicht gegenseitig verdecken [23], [36].

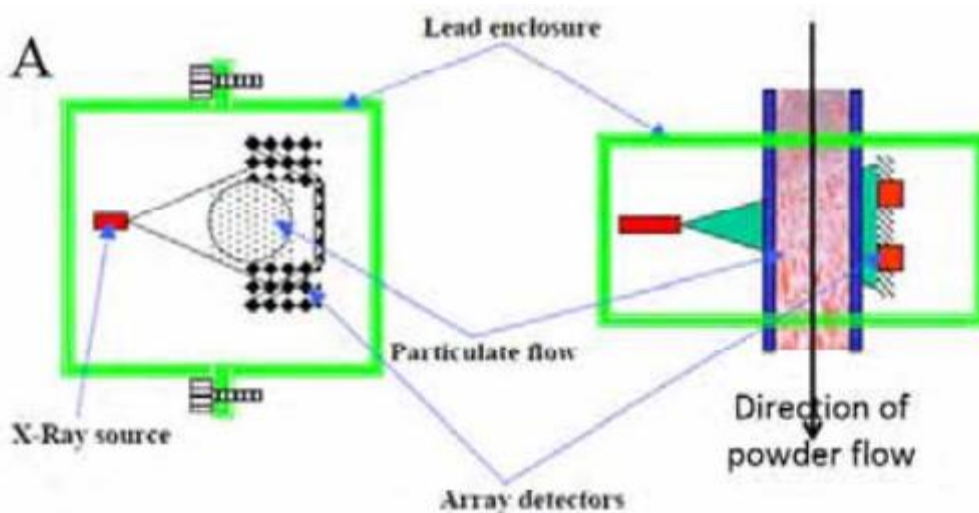


Abbildung 12: Messprinzip mit Röntgenstrahlen [36]

2.4.6 Mikrowellen Messverfahren

Das Messen mit Mikrowellen ist eine weitere Methode, mit der die Geschwindigkeit und der Volumenanteil der Partikel bestimmt werden kann. Ähnlich zu den anderen Verfahren kann man anhand der Dämpfung bzw. Abschwächung der Mikrowellen, auf den Volumenanteil des

Pulvers rückschließen. Das Messen der Geschwindigkeit kann hier im Unterschied zu den anderen Methoden über das Prinzip des Dopplereffekts realisiert werden. Die relative Bewegung der Teile zum Sensor erzeugt bei Reflektion eine Veränderung der Frequenz (siehe Abbildung 13). Die reflektierte Frequenz wird gemessen und mit der gesendeten verglichen. Aus der Differenz lässt sich dann die mittlere Geschwindigkeit der Partikel berechnen. Mit der Gleichung (2) lässt sich anschließend der Massenstrom berechnen. Das gleiche auf den Dopplereffekt beruhende Prinzip funktioniert auch mit Lasern. Dabei handelt es sich um sogenannte *Laser Doppler Velocimetry (LDV) Systems*. LDV haben den Vorteil sehr gut räumlich zu messen und dies mit hoher Genauigkeit. Sie benötigen allerdings ein Fenster, und bei zu hohen Volumenanteilen des Pulvers in der Strömung, nimmt die Genauigkeit der Messung sehr schnell ab. [23], [25], [37], [38].

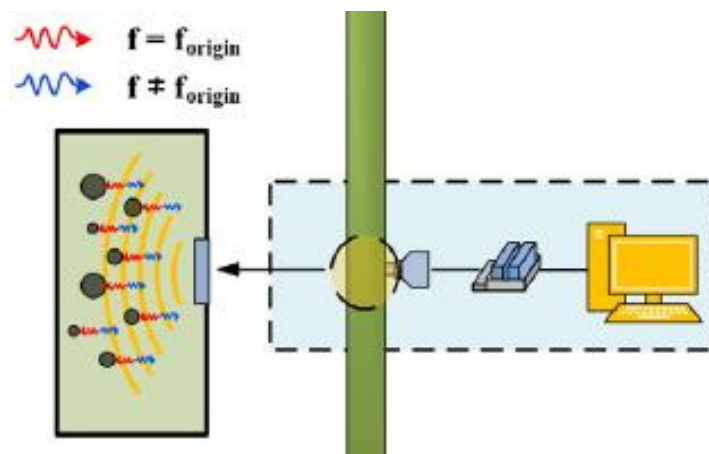


Abbildung 13: Messsystem mit einem Sendeempfänger [37] Figure 2

2.4.7 Elektrische Messverfahren

Elektrische Messverfahren bieten gute Lösungen, um den Pulvermassenstrom zu messen. Bei dem aktiven elektrischen Ladeverfahren (siehe Abbildung 14) werden die Pulverpartikel in einer in der Pulverleitung integrierten Ladekammer elektrisch geladen. An einer anschließenden Messkammer wird dann ihre Ladung bestimmt. Diese ist laut Versuchen [39] direkt proportional zum Massenstrom des Pulvers. In passiven Messverfahren können kapazitive Sensoren den Volumenanteil bestimmen, indem die Veränderung der Kapazität gemessen wird, welche sich aufgrund der Pulverpartikel im Dielektrikum vergrößert oder verkleinert. Ähnlich kann auch mit einem elektrostatischen Sensor, die durch den Fließprozess entstehende Ladung im Pulver, gemessen werden. Diese Ladungen hängen komplex mit dem Massenstrom und den Eigenschaften der Pulverpartikel zusammen, weswegen die Signalauswertung über komplexe *Backpropagations*-Netzwerke gemacht werden. Vorteile dieser Methode sind die sehr geringen Kosten und die nicht invasive Anwendung. Allerdings zeigt die Arbeit von Yan et al. [40] Messfehler von $\pm 15\%$ und Standardabweichungen von bis zu 8% [23], [25], [40], [41].

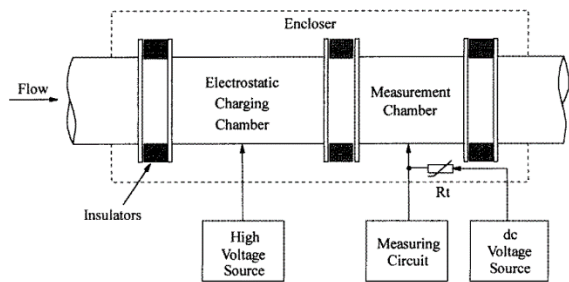


Abbildung 14: Schematische Übersicht aktives elektrisches Ladeverfahren [23] Figure 4

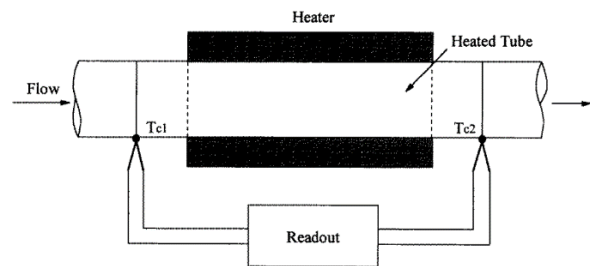


Abbildung 15: Schematische Übersicht thermischer Sensor [23] Figure 3

2.4.8 Thermische Messverfahren

Das grundlegende Prinzip bei den thermischen Messverfahren ist es die Hitzaufnahme bzw. Hitzeabgabe in Verbindung mit dem Massenstrom der zweiphasigen Strömung zu bringen, indem an zwei oder mehr Punkten die Temperatur gemessen wird (siehe Abbildung 15). Es wird versucht den mittleren Wärmeleitkoeffizienten zwischen der erhitzten Wand und dem Gas-Feststoffstrom zu bestimmen. In Zheng et al. [42] wird dieser Zusammenhang untersucht und als linear approximiert festgestellt. In Experimenten von Moriyama et al. [43] zeigten sich allerdings Messfehler von fast $\pm 14\%$. Des Weiteren wurde eine Zeitkonstante von 1.5 Minuten für das eingesetzte Massenflussmeter festgestellt [25], [43].

2.5 Methodische Produktentwicklung

Die methodische Produktentwicklung bietet verschiedene Methoden und Werkzeuge an, um zielorientiert und strukturiert ein Produkt zu entwickeln. Bei der Entwicklung des Messsystems werde ich weitestgehend im Rahmen der methodischen Produktentwicklung, wie sie in den Richtlinien VDI 2220 bis VDI 2225 beschrieben wird, vorgehen. Da die VDI Richtlinien eine grundlegende Empfehlung gibt, aber keinen festen Lösungsweg beschreibt, ist es möglich Methoden sinnvoll anzupassen oder abzuwandeln [44].

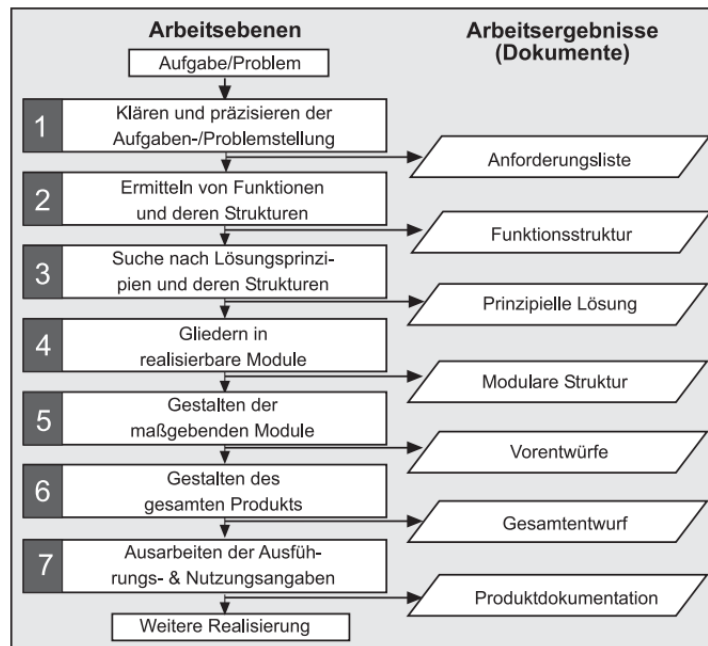


Abbildung 16: Arbeitsschritte im Entwickeln und Konstruieren nach VDI 2221 Abb. 24 in [45], [46]

In der oberen Abbildung 16 werden die grundlegenden Arbeitsschritte/ebenen nach VDI 2221 gezeigt, sowie deren Arbeitsergebnisse. Der erste Arbeitsschritt „Klären und präzisieren der Aufgabenstellung“, ordnet sich in die Definitionsphase ein. Thema dieser der Arbeit ist das Erstellen eines Konzeptes, weswegen hauptsächlich auf die Konzeptionsphase eingegangen wird, welche aus dem zweiten und dritten Arbeitsschritt besteht und auf dem Ergebnis der Definitionsphase aufbaut.

Das Ziel der Definitionsphase ist das Erstellen einer Anforderungsliste, welche alle Faktoren der Produktidee und der Spezifikation der Aufgabenstellung in sich vereint, und diese dabei so präzise wie möglich ausformuliert. Das Ziel der Konzeptionsphase ist es mögliche Lösungskonzepte zu erarbeiten und das am besten geeignete Lösungskonzept auszuwählen [44].

Für die Definitionsphase ist es wichtig zuerst die Aufgabenstellung zu klären. In der Entwicklung kann bei jedem Arbeitsschritt durch gewinnen neuer Erkenntnisse oder erkennen von Fehlern eine Iteration bzw. das Vor- oder Rückspringen zu einem anderen Arbeitsschritt notwendig werden. Um die Anzahl der Iterationen gering zu halten, ist eine ausreichend geklärte Aufgabenstellung entscheidend. Hierbei kann es hilfreich sein die Produktidee in eine Produktbeschreibung mit einer präzisen und verständlichen Beschreibung der zu erfüllenden Aufgabe/n zu übersetzen [44].

Nach der Klärung der Aufgabenstellung wird eine Anforderungsliste erstellt. Die Anforderungsliste, dient als zentrales strukturiertes Dokument in der alle für den Entwicklungsprozess notwendigen Informationen in präziser und logisch strukturierter Form aufgeführt sind. Zur Erstellung der Anforderungslist gibt es Leitlinien (siehe Abbildung 18) und Checklisten (siehe Abbildung 17), welche als Hilfestellung und Orientierung dienen, also keine Zwangsvorgabe sind. Die Anforderungen sollten so formuliert werden, dass sie anspruchsvoll, aber dennoch realisierbar sind. Sie sollten außerdem nicht auf eine feste Lösung

deuten, sondern lösungsneutral formuliert werden. Es wird bevorzugt quantifizierbare Anforderungen zu verwenden, da die Anforderungsliste als Basis für die Bewertungskriterien der späteren Lösungskonzepte dient [44], [45], [47].

6.a Nutzung – Betrieb
<ul style="list-style-type: none"> • Funktion, Hauptfunktion, Nebenfunktion (z.B. Kühlung, Schmierung), Störfunktion (z.B. Reibung, Schwingung, Geräusch) • Kinematik (Wege, Geschwindigkeiten, Beschleunigungen) • Kräfte, Gewichte, Steifigkeit, Stabilität • Stoff (z.B. Art, Durchsatz, Restriktionen) • Energie (z.B. Leistung, Wirkungsgrad, Umformung, Speicherung) • Signal (z.B. Art, Größe, Aufnehmer, Anzeige, Signalleitung, Steuerung und Regelung)
6.b Nutzung – Stillstand
<ul style="list-style-type: none"> • Benutzung (z.B. Art, Anzahl, Qualifikation der Mitarbeiter) • Ergonomie (z.B. Bedienung, Übersichtlichkeit, Formgestaltung) • Sicherheit (z.B. Betriebs-, Umweltsicherheit, Zuverlässigkeit, Lebensdauer, Arbeitsschutzgesetze) • Verhalten bei Stromausfall, Pneumatikausfall usw. • Betriebskosten (z.B. für Energie, Betriebsstoffe, Kapital, Löhne, Mieten) • Nutzungsdauer, Stillstandzeiten • Einsatzort (z.B. Verschmutzung, Klimatische Bedingungen, Korrosion)
7. Wartung und Reparatur
<ul style="list-style-type: none"> • Wartung (Anzahl, Zeitbedarf, Verschleißrate, Inspektion, Austausch, Instandsetzung) • Wartungspersonal • Zugänglichkeit • Fehlersuchpläne • Wartungsort • Schadensfrüherkennung
8. Recycling, Entsorgung
<ul style="list-style-type: none"> • Wiederverwendung, Weiterverwendung, Wiederverwertung, Weiterverwertung • Umweltbeeinträchtigungen • (Ressourcenverbrauch, Energieverbrauch, Schadstoff- und Lärmemission, Abfall, Altprodukte, Altstoffe) • Möglichkeiten zur Wieder- oder Weiterverwendung oder zur Aufbereitung • Kosten, Erlöse für Recycling und Entsorgung

Abbildung 17: Beispiel für eine Checkliste zur Ermittlung der Anforderungen [44] Abb. 3.21

Nachdem die Definitionsphase des Produktes abgeschlossen ist, wird mit der Konzeptphase fortgesetzt. In dieser Phase wird zu Beginn eine Funktionsstruktur erstellt, welche die Gesamtfunktion des Systems in Teilfunktionen gliedert. Für die einzelnen Teilfunktionen werden nun mithilfe von Lösungsfindungsverfahren, wie zum Beispiel Brainstorming, Lösungen ermittelt oder es werden schon existierende Lösungen miteinbezogen. Anschließend wird für jede Teilfunktion eine mögliche Lösung gewählt, woraus sich eine prinzipielle Gesamtlösung ergibt. Darauf folgt die Lösungsauswahl [47], [48].

Es gibt verschiedenste Bewertungsverfahren, die zur Lösungsauswahl geeignet sind. Zum Beispiel die Nutzwertanalyse und die in VDI 2225 Blatt 3, beschriebene technisch-wirtschaftliche Bewertung. Mithilfe von Bewertungskriterien kann hier eine gewichtete Rangfolge für die einzelnen Gesamtlösungen entstehen. Die Bewertungskriterien ergeben sich aus der Anforderungsliste und allgemeinen technischen und wirtschaftlichen Eigenschaften (siehe Abbildung 18). Nach Wahl dieser Kriterien können sie mithilfe von Gewichtungsmethoden gewichtet werden. Anschließend wird das Bewertungsverfahren durchgeführt werden, wobei die jeweilige Werteskala angewandt wird. Es ergibt sich eine Rangfolge für die prinzipielle Lösungen [47], [48].

Hauptmerkmal	Beispiele
Funktion	Eigenschaften erforderlicher Nebenfunktionsträger, die sich aus dem gewählten Lösungsprinzip oder aus der Konzeptvariante zwangsläufig ergeben
Wirkprinzip	Eigenschaften des oder der gewählten Prinzipien hinsichtlich einfacher und eindeutiger Funktionserfüllung, ausreichende Wirkung, geringe Störgrößen
Gestaltung	Geringe Zahl der Komponenten, wenig Komplexität, geringer Raumbedarf, keine besonderen Werkstoff- und Auslegungsprobleme
Sicherheit	Bevorzugung der unmittelbaren Sicherheitstechnik (von Natur aus sicher), keine zusätzlichen Schutzmaßnahmen nötig, Arbeits- und Umweltsicherheit gewährleistet
Ergonomie	Mensch-Maschine-Beziehung befriedigend, keine unzulässige Belastung oder Beeinträchtigung, gute Formgestaltung
Fertigung	Wenige und gebräuchliche Fertigungsverfahren, keine aufwendigen Vorrichtungen, geringe Zahl einfacher Teile
Kontrolle	Wenige Kontrollen oder Prüfungen notwendig, einfach und aussagesicher durchführbar
Montage	Leicht, bequem und schnell, keine besonderen Hilfsmittel
Transport	Normale Transportmöglichkeiten, keine Risiken
Gebrauch	Einfacher Betrieb, lange Lebensdauer, geringer Verschleiß, leichte und sinnfällige Bedienung
Instandhaltung	Geringe und einfache Wartung und Säuberung, leichte Inspektion, problemlose Instandsetzung
Recycling	Gute Verwertbarkeit, problemlose Beseitigung
Aufwand	Keine besonderen Betriebs- oder sonstige Nebenkosten, keine Terminrisiken

Abbildung 18: Hauptmerkmale für die Bewertung in der Konzeptionsphase, ähnlich zur Leitlinie mit Hauptmerkmalen für die Anforderungsliste [47] Abb. 6.22

3 Vorversuche

Vor dem Beginn der Entwicklung des Sensors werden verschiedene Vorversuche zur Pulverförderung gemacht, welche zum einem den Zweck dienen die Schwankungen im Pulvermassenstrom aufzuzeigen und somit die Notwendigkeit eines Sensors zu beweisen. Zum anderen sollen sie auf mögliche Ursachen für die Schwankungen im Pulvermassenstrom, durch Variation in den Versuchsparametern, aufmerksam machen. Die Versuche wurden am 15.07.2021, 18.08.2021 und 26.08.2021 in den Hallen des Fraunhofer IAPT in Bergedorf durchgeführt.

3.1 Verwendete Materialien und Geräte

- 1x GTV PF 2/2 Pulverförderer (2 Tellerfördereinheiten mit jeweiligem Reservoir)
- 800g Edelstahlpulver (<math><150 \mu\text{m}</math>)
- 1x Auffangbehältnis
- 1x Laborwaage KERN PCB mit Computerschnittstelle
- verschieden lange Schläuche von Festo
- 1x Computer zur automatischen Datenaufnahme der Waage über ein Python-Skript, welches von Jan Längerich (Student von der TUHH, am Fraunhofer IAPT) bereitgestellt wurde
- 1x Stoppuhr

3.2 Versuchsdurchführung

Zu Beginn des Versuches wird das Reservoir des Pulverförderers mit dem Metallpulver befüllt. Da der Pulverförderer zwei Fördereinheiten mit Reservoir hat, die aber identisch funktionieren, ist es für die Versuche ausreichend, dass nur eines der beiden Reservoirs benutzt wird.

Damit das Pulver nicht in die Umwelt gelangt, wird der Ausgang des Pulverförderers mit Pneumatik-Schläuchen an ein staubdichtes Auffangbehältnis angeschlossen. Wichtig ist es, dass das Auffangbehältnis geerdet wird, damit sich keine elektrostatischen Ladungen während des Pulverförderprozesses aufbauen.

GCV Pulverförderer PF 2/2

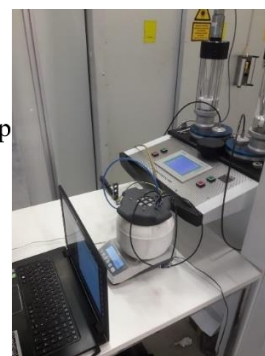
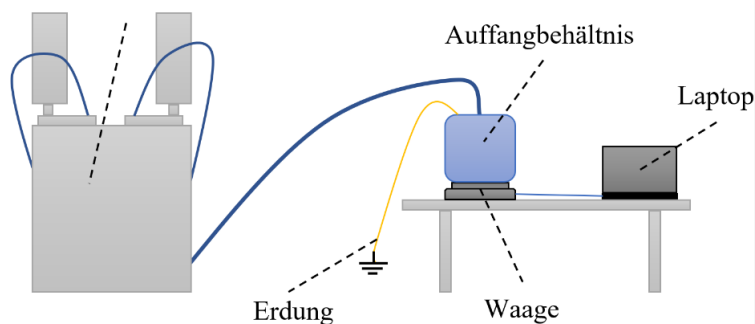


Abbildung 19: Versuchsaufbau, links: Skizze, rechts Bild des tatsächlichen Aufbaus

Als Nächstes wird das Auffangbehältnis auf die Waage gestellt, welche dann tariert wird. Die Aufnahme der Messwerte erfolgt über ein Python-Skript. Das Skript wird über *Python 3* auf einem mit der Waage verbundenen Computer ausgeführt. Bei der Ausführung des Skriptes ist die richtige Angabe des COM-Ports, sowie die wiederzuerkennende Benennung der Ausgabedatei zu beachten.

Am Display des Pulverförderers werden nun die Förderparameter eingestellt. Die Tellerdrehzahl wird im Bereich von $n = 0 \dots 10 \text{ min}^{-1}$ eingestellt und der aus Helium bestehende Trägergasstrom im Bereich von $Q = 0 \dots 20 \frac{\text{l}}{\text{min}}$.

Anschließend werden die Parameter des Pulverförderers eingestellt. Darauffolgend wird das Python-Skript am Computer ausgeführt. Zeitgleich mit einer Stoppuhr wird der Pulverförderer gestartet. Nach 2 Minuten und 30 Sekunden wird der Pulverförderer ausgestellt. 30 Sekunden später wird das Python-Skript gestoppt. Aufgrund der Trägheit des Systems, die sich in leichten Schwankungen der Waage zeigt, wird weitere 30 Sekunden gewartet und die Waage anschließend tariert. Jetzt kann eine weitere Messung durchgeführt werden.

Um mögliche Ursachen und Einflüsse für die Schwankungen im Pulvermassenstrom evaluierbar zu machen, werden folgende Parameter/Eigenschaften in den Messreihen verändert, um deren Einfluss untersucht:

Die Drehzahl des Tellers

Es werden verschiedene Drehzahlen getestet, dies in naher und in ferner Position, um den linear angenommenen Zusammenhang zwischen Tellerdrehzahl und Pulvermassenstrom zu untersuchen.

Der Trägergasstroms des Pulverförderers

Das Trägergas ist zuständig für das Absaugen und Transportieren des Pulvers, hier werden mögliche Schwankungen untersucht.

Die Position des Auffangbehältnisses

Untersuchen des Einflusses, den die Position des Auffangbehältnisses auf den Massenstrom hat, es wird variiert zwischen „nah“ und „fern“. „Nah“ ist so nah wie möglich am Ausgang des Pulverförderers. „Fern“ ist an der Düse der LPA-Anlage.

Schlauchlänge/Schlauchweg

Ähnlich zur Messposition wird untersucht, ob Schlaufen im Schlauch oder unterschiedliche Längen der Schläuche den Massenstrom beeinflussen

Tag der Messung

Das Messen zu verschiedenen Zeitpunkten dient der Untersuchung, ob der Massenstrom reproduzierbar ist, wenn dieselben Parameter eingestellt werden.

Teilweise wurden diese Variationen miteinander kombiniert, um bestimmte Verhaltensweisen und Einflüsse zu überprüfen. Der Großteil der Messungen wird dreimal wiederholt, bestimmte Messungen für direkte Vergleiche fünfmal.

3.3 Versuchsauswertung

Die am Computer aufgenommenen Werte wurden im Tabellenkalkulationsprogramm Excel eingefügt und ausgewertet. Das Auswertungsprinzip wird zum besseren Verständnis graphisch dargestellt:

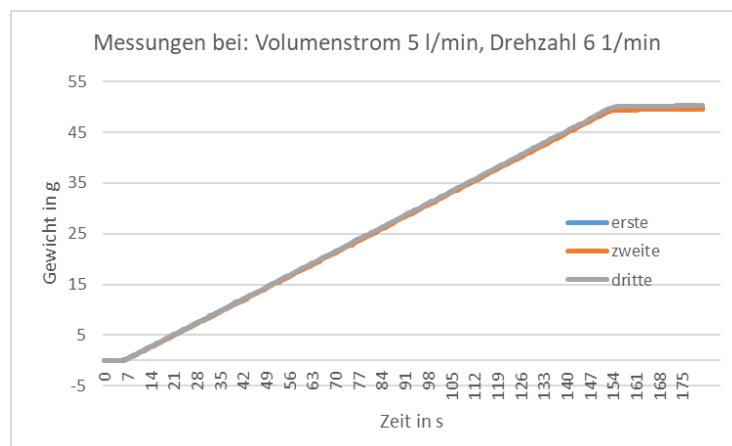


Abbildung 20: Graphische Darstellung der aufgenommenen Gewichtswerte über die Zeit der Messung

Der relevante Bereich für die Bestimmung des Massenstroms ist der mittlere Bereich der konstanten Förderung. Damit sich ein Bereich von mindestens 120 Sekunden ergibt in dem der Massenstrom konstant ist, werden hier die letzten 30 Sekunden der Messreihen entfernt und anschließend die letzten 121 Werte genommen. Daraus ergibt sich dann folgender Graph:

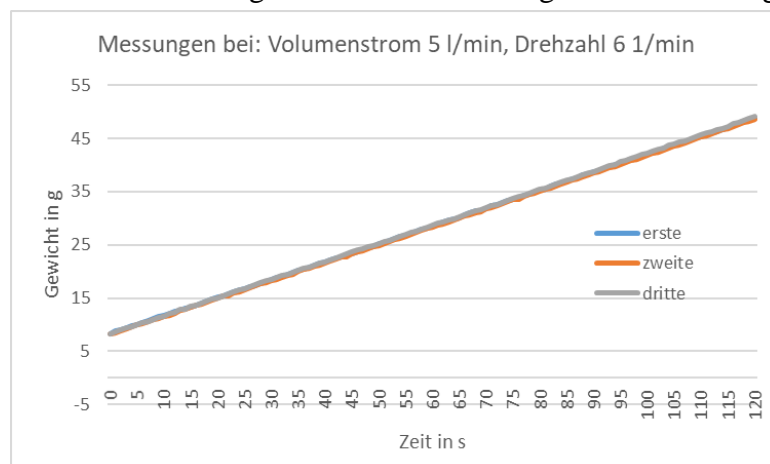


Abbildung 21: Aus Abbildung 20 herausgeschnittener Bereich

Jetzt wird mithilfe der Steigung()-Funktion von Excel die Steigung der Regressionsgraden der Messreihen bestimmt. Die Regressionsgrade gibt die mittlere Steigung über einen definierten

Bereich an und berechnet sich mit der Gleichung (3), wobei x der Zeit und y dem jeweiligen Gewicht entspricht. Hieraus ergibt sich das gemittelte Gewicht pro Zeit bzw. der Massenstrom. Anschließend werden die Mittelwerte der Massenströme, sowie die Standardabweichung bestimmt und in der Ergebnistabelle (siehe Tabelle 1) zusammengefasst.

$$b = \frac{\sum(x-\bar{x}) \cdot (y-\bar{y})}{\sum(x-\bar{x})^2} \quad (3)$$

Tabelle 1: Ergebnistabelle der Massenströme (Parameterangaben ergänzend im Anhang)

Name	Messreihe 1 [g/min]	Messreihe 2 [g/min]	Messreihe 3 [g/min]	Messreihe 4 [g/min]	Messreihe 5 [g/min]	Mittelwert [g/min]	Standard- abweichung [g/min]	relative Standard- abweichung
fv5U1	3.22	3.29	3.29			3.27	0.04	1.21%
fv5U2	6.91	6.93	6.91			6.92	0.01	0.20%
fv5U3	10.42	10.42	10.40			10.41	0.01	0.11%
fv5U4	13.68	13.73	13.71			13.71	0.03	0.19%
fv5U5	16.55	17.22	17.23	17.09	17.03	17.02	0.28	1.63%
fv5U6	20.74	20.76	20.44			20.65	0.18	0.87%
fv5U7	23.74	23.99	24.26			24.00	0.26	1.07%
fv5U8	27.53	27.58	27.91			27.67	0.21	0.75%
fv5U9	31.26	30.87	31.48			31.20	0.31	1.00%
fv5U10	35.68	35.31	35.97			35.65	0.33	0.92%
fv5U5_anderesDatum	16.44	17.17	17.20	17.00	17.20	17.00	0.32	1.90%
fmV5U5	15.62	16.17	16.54	16.43	16.44	16.24	0.37	2.29%
fmV5U5a10 (bis 70 s)	16.29	16.61	16.61			16.51	0.18	1.11%
fmV5U5a10 (ab 70 s)	35.33	35.24	35.36			35.31	0.06	0.17%
fmVxU1	2.91	3.25	3.29	3.37		3.20	0.20	6.31%
nV5U1	2.80	3.22	3.25			3.09	0.25	8.21%
nV5U2	6.72	6.71	6.71			6.72	0.00	0.06%
nV5U3	10.21	10.19	10.20			10.20	0.01	0.10%
nV5U4	13.47	13.53	13.54			13.51	0.04	0.27%
nV5U5	15.75	16.46	16.51	16.63	16.62	16.39	0.37	2.24%
nV5U6	20.21	20.15	20.33			20.23	0.09	0.47%
nV5U7	23.64	23.70	23.58			23.64	0.06	0.26%
nV5U8	27.16	26.78	26.99			26.98	0.19	0.70%
nV5U9	31.18	31.30	31.42			31.30	0.12	0.37%
nV5U10	34.48	34.39	34.78			34.55	0.20	0.58%
nV2U1	2.24	3.10	3.15			2.83	0.51	18.10%
nV10U1	3.51	3.51	3.46			3.49	0.02	0.70%
nV10U10	35.32	35.52	35.14			35.33	0.19	0.55%
nV5a10U5 (bis 70 s)	17.42	17.48	17.40			17.43	0.04	0.25%
nV5a10U5 (ab70 s)	17.57	17.62	17.33			17.50	0.16	0.89%
nV5U5a10 (bis 70 s)	18.82	18.93	18.99			18.91	0.09	0.47%
nV5U5a10 (ab 70 s)	34.83	34.96	34.89			34.89	0.06	0.17%
ks0V5U5	16.37	16.86	16.89	17.12	16.86	16.82	0.27	1.62%
ks1V5U5	14.57	15.30	15.46	15.93	15.89	15.43	0.55	3.58%
ms0V5U5	15.95	16.25	16.42	16.22	16.16	16.20	0.17	1.07%
ms1V5U5	15.74	16.29	15.39	16.13	16.04	15.92	0.36	2.24%
ls0V5U5	16.33	16.62	16.72	16.72	16.69	16.62	0.17	1.01%

3.4 Versuchsergebnis

Die einzelnen Parametervariationen werden graphisch dargestellt und beschrieben, um im anschließenden Diskussionsteil Zusammenhänge besser Interpretieren zu können.

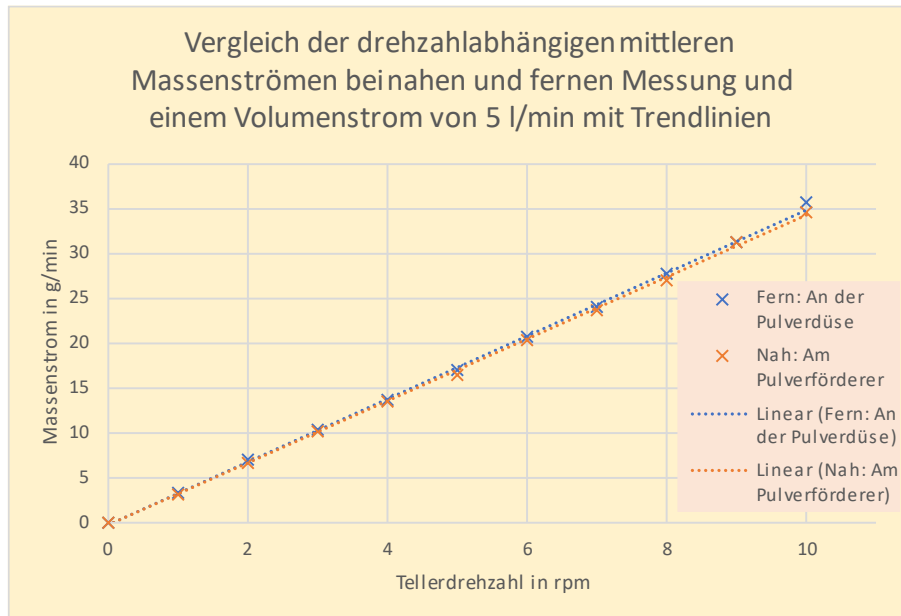


Abbildung 22: Darstellung des Massenstroms über verschiedene Drehzahlen, in naher und ferner Messung.

In Abbildung 22 wird der gemessene Massenstrom für unterschiedlichen Drehzahlen dargestellt. Es wird außerdem die Messpositionen „nah“ und „fern“ dargestellt. Der Volumenstrom ist bei allen Messreihen 5 l/min. Es wird eine lineare Regressionsgrade für die fernen Messungen und für die nahen Messungen erstellt. Es ist zu erkennen, dass der Massenstrom der Messposition „nah“ bei höheren Tellerdrehzahlen etwas niedriger ist als der Massenstrom, der Messposition „fern“. Bei beiden Messreihen liegen alle Punkte sehr nahe an der Regressionsgraden in niedrigen Drehzahlbereichen, und weichen in höheren Bereichen stärker ab.

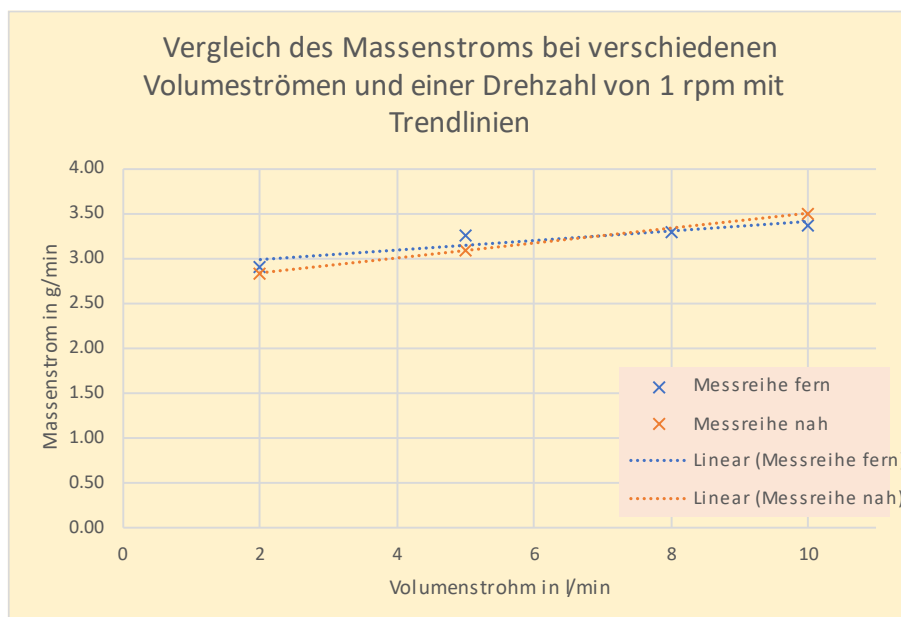


Abbildung 23: Massenstrom über Volumenstrom bei einer Drehzahl von 1 rpm

In Abbildung 23 wird der gemessene Massenstrom bei verschiedenen Volumenströmen des Trägergases für die Messreihen der Messpositionen „nah“ und „fern“ dargestellt. Die Messwerte der nahen und fernen Messung weichen nur sehr gering voneinander ab. Die Regressionsgraden zeigen einen sehr geringen Anstieg des Massenstroms mit zunehmendem Volumenstrom.

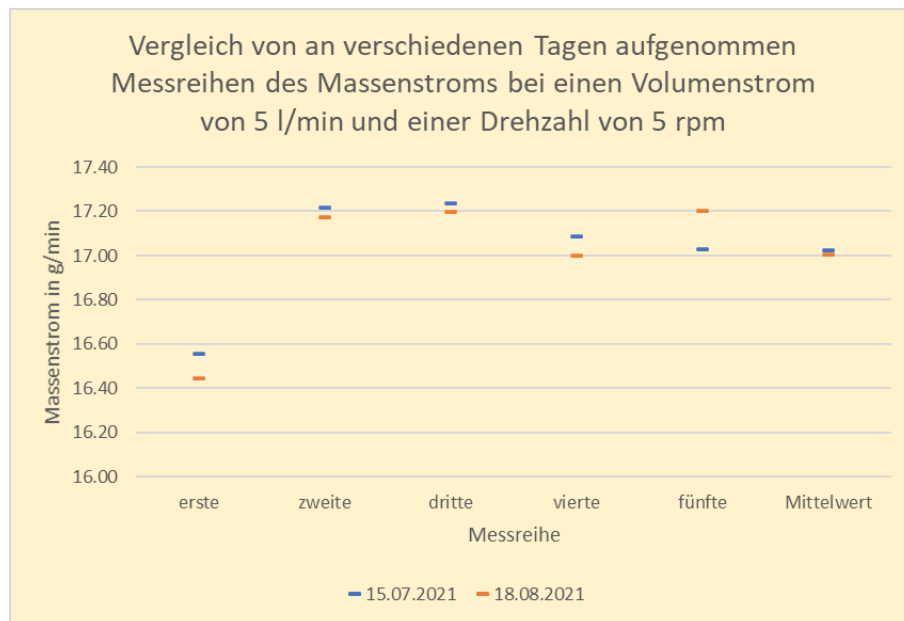


Abbildung 24: Massenstrom an verschiedenen Tagen gemessen

In der Abbildung 24 wird der gemessene Massenstrom, der an zwei unterschiedlichen Tagen mit den gleichen Parametern aufgenommen wurde, abgebildet. Die Messreihen, die an den unterschiedlichen Tagen aufgenommen wurden, weichen nur minimal voneinander ab. Auffällig ist jedoch, dass der Werte der ersten Messreihe an beiden Tagen deutlich geringer ist, als die darauffolgend aufgenommenen Messreihen.

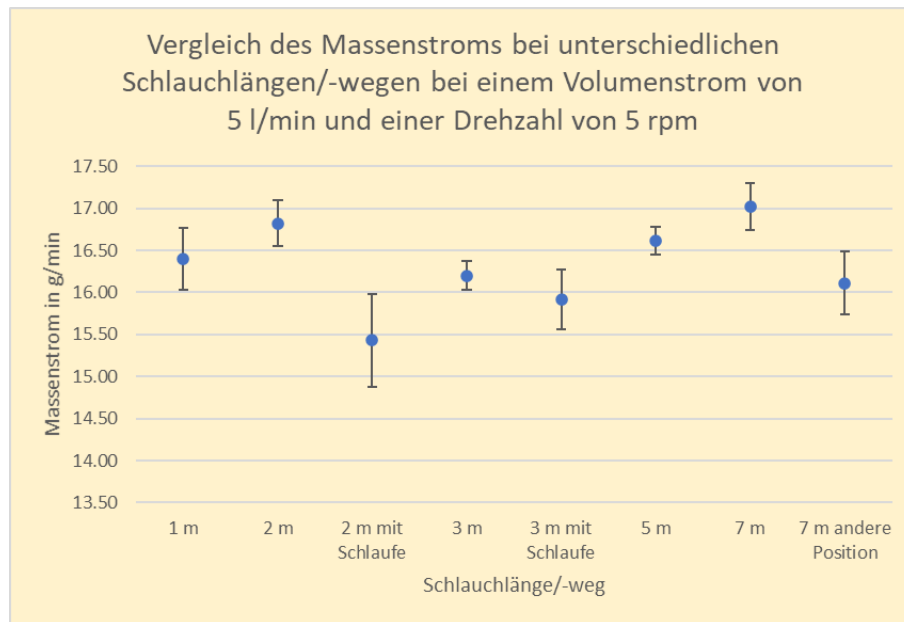


Abbildung 25: Massenstrom über verschiedene Schlauchlängen

Die Abbildung 25 zeigt den Massenstrom von Messreihen mit verschiedenen Schlauchlängen und Schlauchwegen und deren Standardabweichungen. Es ist kein direkter Zusammenhang zwischen den einzelnen Schlauchlängen und Wegen erkennbar.

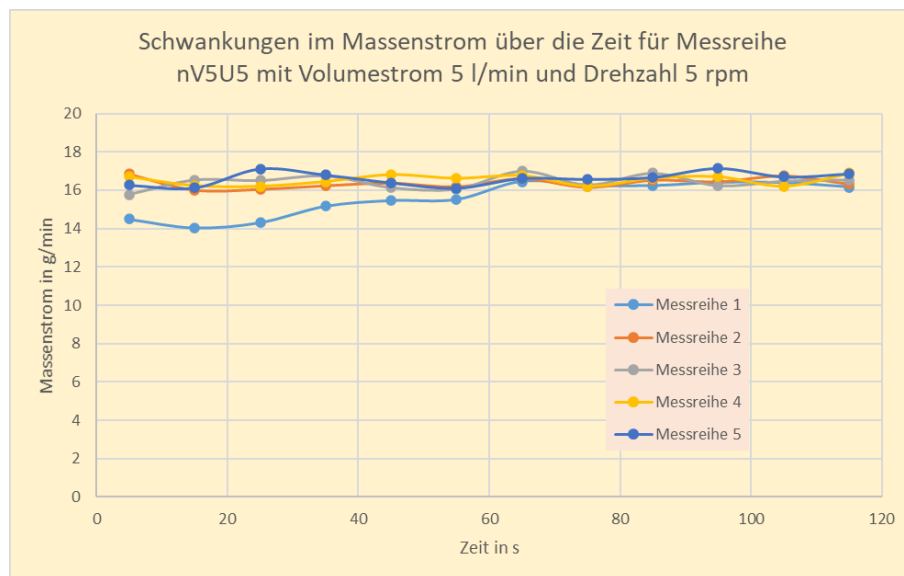


Abbildung 26: Durchschnittlicher Massenstrom über die Zeit der Messung

Abbildung 26 zeigt die Schwankungen des Massenstroms für die Messreihen nV5U5. Es wurde die durchschnittliche Steigung in 10 Sekunden Intervallen berechnet, und über die Zeit dargestellt. Man erkennt ein leichtes Pendeln der Massenströme, welches mit der Zeit geringer wird. Außerdem erkennt man, dass die Messreihe 1 zu Beginn besonders stark von den anderen Messreihen abweicht.

3.5 Diskussion der Ergebnisse

Die Messreihen in Abbildung 22 unter verschiedenen Tellerdrehzahlen bestätigen eine linear proportionale Abhängigkeit des Pulvermassenstroms zu der Drehzahl des Tellers bei Drehzahlen von 1...10 rpm. Für eine Zunahme der Drehzahl um eine Umdrehung, nimmt der Massenstrom bei den fernen Messreihen um 3,53 g/min und bei den nahen Messungen um 3,47 g/min zu. Die meisten Messreihen zu den unterschiedlichen Drehzahlen haben eine Standardabweichung von unter $\pm 1\%$, wobei es bei Messungen, bei denen Ausreißer auftreten, Standardabweichungen von bis zu $\pm 8,21\%$ gibt. Zwischen der nahen und fernen Messung lassen sich nur geringe Abweichungen im höheren Drehzahlbereich erkennen, was vermuten lässt, dass die Messposition bzw. der Weg, den das Pulver zurücklegt, keine messbare und signifikante Abhängigkeit zu dem Wert des Pulvermassenstroms hat.

Abbildung 25, wo eine hohe Abweichung zwischen den einzelnen Längen der Schläuche und deren Weg zu erkennen ist, scheint dem zu widersprechen. Allerdings zeigen sich keine Korrelation zwischen der Länge des Schlauches und dessen Weges, zum Massenstrom des Pulvers. Aus diesem Grund lässt es sich nicht ausschließen, dass es sich um Messfehler handelt, welche durch Unregelmäßigkeiten in der Benutzung der Waage oder durch den Versuchsaufbau, wie zum Beispiel Schwingungen und Stöße der Schläuche oder des Erdungskabels, hervorgerufen werden.

Die Abbildung 23 zeigt, dass der gemessene Massenstrom auch von dem Trägergasstrom abhängt. Vermutlich liegt dies daran, dass bei sehr niedrigen Trägergasströmen nicht alles Pulver aus der Nut des Tellers abtransportiert wird. Bei hohen Trägergasströmen nähert sich der Massenstrom einem Endwert an, bei dem alles Pulver aus der Nut abtransportiert wird. Wichtig ist es auch den Einfluss des Gases zu beachten, da das Trägergas Helium leichter als Luft ist, verdrängt es die Luft im Behälter und sorgt für eine geringe Gewichtsabnahme oder auch Gewichtszunahme, falls das Messbehältnis das Gas nicht schnell genug auslässt und sich verdichtet. Für einen direkten Schluss auf einen Zusammenhang zwischen Trägergasstrom und Massenstrom, ist die Anzahl der Messreihen nicht ausreichend. Vor allem im Bereich von unter 2 l/min müssen mehr Messungen durchgeführt werden und das auch bei unterschiedlichen Drehzahlen der Fördereinheit.

Aus Abbildung 24 lässt sich schließen, dass der Tag der Messungen keinen messbaren Einfluss auf den Massenstrom hat. Dies beweist die Reproduzierbarkeit des Versuches unter dem gleichen Aufbau und Parametern. Generell weichen die einzelnen Messreihen des 15.07.2021 zu ihren jeweils in der gleichen Reihenfolge wiederholten Messreihen am 18.08.2021 mit Abweichungen von unter 1%, wobei der Mittelwert der gesamten Messreihen der beiden Tage nur um 0,1% abweicht. Bei beiden Tagen der Messung hat die erste Messreihe eine hohe Abweichung von 2,8% am 15.07 und 3,3% am 18.08.2021.

In Abbildung 26 sieht man, dass der Massenstrom leichten Schwankungen von ungefähr 4% unterliegt, welche über die Zeit geringer werden zu ungefähr 0,5%. Diese Schwankungen zeigen, dass sich das System langsam einpendelt. Ob die Schwankungen durch den

Trägergasstrom oder durch den Motor, welcher den Teller zur Rotation bringt, verursacht werden, lässt sich nicht sagen. Es können auch systematische Messfehler sein, die zum Beispiel durch die Waage verursacht werden.

In allen mehrfach wiederholten Messreihen zeigen sich relative Standardabweichungen im Bereich von 0,05% bis 18,1%, wobei bei allen mehrfach wiederholten Messreihen mit Standardabweichung über 2% die erste Messreihe der Ausreißer ist. Wenn man alle ersten Messungen weglässt, liegen die Standardabweichungen bei allen Messungen unter 2%, außer bei der Messreihe ms1V5U1, wo der Ausreißer mittig lag. Dies lässt darauf schließen, dass bei der ersten Messreihe der jeweiligen Variante der Messung sich in den Systembedingungen von den anderen unterscheidet. Sowohl in der Ergebnistabelle (Tabelle 1) als auch in den Abbildungen 24 und 26 lässt sich dies erkennen. Die ersten Messreihen, bei denen große Schwankungen auftreten sind dadurch gekennzeichnet, dass sie nach kurzer oder längerer Standzeit des Pulverförderers aufgenommen wurden. Hieraus lässt sich schließen, dass das System eine etwas längere Einlaufzeit benötigt, auch nach kurzen Pausen. Nach Abbildung 26 liegt die Einlaufzeit bei ungefähr 90 Sekunden (60 Sekunden graphisch abgelesen + ungefähr 30 Sekunden Vorlauf bevor die ersten Werte des Graphen aufgenommen werden).

Zusammengefasst haben die Versuche die Notwendigkeit eines Messsystems zur Überwachung und eventuellen Regelung bestätigt. Es scheinen viele Faktoren für die Ausgabe eines konstanten Massenstromes entscheidend zu sein, nicht alle konnten in diesen Experimenten gezeigt werden. Zum Beispiel kann der Zustand des Pulvers, wie die Feuchtigkeit durch falsche Lagerung, einen Einfluss haben. Möller zeigt in seinem Buch [10], dass auch die Füllstandhöhe einen Einfluss auf den Pulvermassenstrom hat, so wird zum Beispiel bei niedrigem Füllstand weniger Pulver in die Nut des Fördertellers gedrückt als bei hohem. Da es fast unmöglich ist alle Faktoren genau zu kontrollieren während des LPA-Prozesses, ist die Überwachung des Pulvermassenstroms definitiv notwendig.

4 Bewertung von Messverfahren

Im Kapitel 2.4 wurden zahlreiche Messverfahren vorgestellt, welche den Pulvermassenstrom direkt oder auch indirekt bestimmen. Im folgenden Kapitel werden die verschiedenen Verfahren unter Verwendung von Bewertungskriterien evaluiert und miteinander verglichen, um auf das geeignete Verfahren für das Messsystem zu schließen. Vor dieser Evaluierung wird zuerst die Aufgabenstellung präzisiert und damit anschließend eine Anforderungsliste erstellt.

4.1 Klären und präzisieren der Aufgabenstellung

Bevor die Messsysteme bewertet werden, müssen zuerst die Randbedingungen zur Erstellung der Anforderungsliste erfüllt werden. Die allgemeine Aufgabenstellung ist hierbei der erste Grundbaustein, welcher mithilfe der in Kapitel 3 durchgeführten Versuche als Problemstellung präzisiert wird. Kapitel 3 dient dabei sowohl als Beweis und Verständnis für die Problemstellung, als auch zur Herleitung von grundlegenden Anforderungen ans Messsystem.

Allgemeine Aufgabenstellung:

Entwicklung eines prototypischen Messsystems, welches den Pulvermassenstrom beim Laser-Pulver-Auftragschweißen überwacht.

Präzisieren der Problemstellung:

Die Versuche in Kapitel 3 zeigen, dass Pulvermassenströme von bis zu 35 g/min bei der maximalen Drehzahl von 10 rpm ausgegeben werden. Der benutzte Pulverförderer hat zwei Fördereinheiten und kann je nach eingesetztem Pulver auch mehr als 70 g/min fördern. Das gesamte Pulverfördersystem unterliegt Einflüssen, welche Abweichungen im ausgegebenen Pulvermassenstrom verursachen. Diese Abweichungen im Pulvermassenstrom mindern die Qualität des Prozesses, weswegen eine Überwachung des Pulvermassenstroms, während des gesamten Prozesses notwendig ist. Lösungsansätze der Industrie und Forschung bieten zwar die Möglichkeit der Überwachung von Pulvermassenströmen an (siehe Kapitel 2.4). Diese sind jedoch größtenteils nicht genau genug, bzw. nicht ausgereift, um den tatsächlichen Prozess zu überwachen und finden deshalb nur bedingt Anwendung.

Aus der Problemstellung und mithilfe der Leitlinie mit Hauptmerkmalen aus [47], wurde anschließend die Anforderungsliste (Tabelle 2) erstellt. Diese einzelnen Punkte sind in F für Festanforderung und W für Wunsch gegliedert und werden im Folgendem erklärt:

Bauraum

Es gibt keine klaren Vorschriften für den Bauraum von Überwachungssystemen beim Laser-Pulver-Auftragschweißen. Es wird versucht den Bauraum auf maximale Abmessungen von 250 x 250 x 250 mm zu begrenzen, damit das System nicht zu viel Platz einnimmt und besser transportierbar ist.

Variable Messposition

Da es sich um ein prototypisches Messsystem handelt, soll das System in der Lage sein an verschiedenen Messpositionen messen zu können. Zu den gewünschten Positionen gehören der Ausgang des Pulverförderers, verschiedene Stellen in der Pulverleitung und der Ausgang der Pulverdüse.

Gewicht des Messsystems

Ähnlich zum Bauraum ist hier entscheidend, dass das System transportfähig ist und sich leicht ausrichten und positionieren lässt. Sinnvoll ist hier ein ergonomisches Gewicht von unter 5 kg.

Energieversorgung Netzstrom

Das System soll mit 230 V Netzstrom Versorgung auskommen.

Anzeigen des Massenstroms

Das Messsystem muss den ermittelten Massenstrom anzeigen können.

Eingabemöglichkeit für Messparameter

Es müssen notwendige Parameter für die Bestimmung des Massenstroms, wie zum Beispiel Materialkonstanten, Referenzlängen und Pulvereigenschaften, in das Messsystem eingegeben werden können.

Überwachung von Massenströmen

Das Messsystem muss den Massenstrom während des Prozesses messen und überwachen können. Aus Kapitel 3 ergibt sich ein minimaler und maximaler Massenstrom von 1 g/min bis 40 g/min für eine Tellerfördereinheit. Häufig reichen aber niedrigere Förderraten bis 20 g/min [10]. Der Messbereich wird zwischen 1 g/min und 20 g/min vorgeschrieben.

Messbare Partikelgrößen

Das Messsystem muss Massenströme mit Partikelgrößen im Bereich von 20 μm und 200 μm messen können [49].

Reaktionszeit

Das Messsystem soll in der Lage sein die aufgenommenen Messdaten verzögerungsarm innerhalb einer Sekunde zu verarbeiten und als Massenstrom auszugeben. Ein möglichst niedriger Wert kann für eine eventuelle Regelung des Messsystems hilfreich sein.

Keine Gefährdung während des Messens

Während des Einsatzes des Messsystem dürfen keine Personen gefährdet werden.

Keine Gefährdung bei Wartung

Die Wartung des Messsystems soll ohne Gefährdungen oder zusätzlichen Schutz möglich sein.

Einfaches Kalibrieren

Die für die Kalibrierung des Messsystems notwendigen Schritte, sollten so einfach wie möglich sein und in ihrer Anzahl so gering wie möglich.

Einfache Bedienbarkeit

Das Messsystem soll unkompliziert und übersichtlich hinsichtlich der Bedienbarkeit sein.

Transportfähig

Das Messsystem soll leicht transportierbar sein, wie zum Beispiel durch Anbringen eines Griffes.

Nicht invasives Messen

Das Messsystem darf während des Messens keinen Einfluss auf den Pulvermassenstrom haben, oder den LPA-Prozess in jeglicher Hinsicht beeinträchtigen.

Staubdicht

Da beim LPA mit sehr feinen Pulvern gearbeitet wird, sollen alle wichtigen Komponenten des Systems dicht gegen das Eindringen von Staub sein.

Wasserdicht

Zusätzlich ist das Eindringen von Wasser in das Messsystem schädigend für elektrische Komponenten und kann an anfälligen Bauteilen zu Korrosion führen, weswegen die Dichtigkeit gegen Spritzwasser vorgesehen ist.

Tabelle 2: Anforderungsliste für das Messsystem

F/W	Nr.	Anforderung	Zahlenwert
	1	Geometrie	
W	1.1	Bauraum (Länge x Breite x Höhe)	250 x 250 x 250 mm
W	1.2	Variable Messposition	-
	2	Kräfte	
W	2.1	Gewicht	< 5 kg
	3	Energie	
W	3.1	Energieversorgung Netzstrom	230 V
	4	Signal	
F	4.1	Anzeigen des Massenstroms	-
F	4.2	Eingabemöglichkeit für Messparameter	-
F	4.3	Überwachung von Massenströmen	1...20 g/min
F	4.4	Messbare Partikelgrößen	20...200 µm
W	4.5	Reaktionszeit	< 1 s
	5	Sicherheit	
	5.1	Keine Gefährdung während des Messens	-
	5.2	Keine Gefährdung bei der Wartung	-
	6	Ergonomie	
W	6.1	Einfaches Kalibrieren	-
W	6.2	Einfache Bedienbarkeit	-
W	6.3	Transportfähig	-
	7	Sonstige	
F	7.1	Nicht invasives Messen	-
W	7.2	Staubdicht	-
W	7.3	Wasserdicht	-

F=Festanforderung W=Wunsch

4.2 Bewertungskriterien für Messverfahren

Aus der Anforderungsliste lassen sich die Bewertungskriterien zur Auswahl des Messverfahrens ableiten. Als Hilfestellung kann weiterhin die Liste mit Hauptmerkmalen (siehe Abbildung 18) verwendet werden. Die Bewertungskriterien werden, wie bei der VDI 2225 mit Punkten von 0 bis 4 Punkten bewertet. Um Fehleinschätzungen beim bewertet zu vermeiden, hilft es ein Urteilsschema zu erstellen, wo alle Bewertungskriterien in verbaler oder zahlengebender Form der Punktvergabe zugeordnet werden (siehe Tabelle 3).

Tabelle 3: Urteilsschema zur Bewertung

Punkte	Bewertungskriterien					
	Bauraum: (LxBxH) in mm	Messgenauigkeit: Standardabweichung in %	Kalibrierung: bei neuen Pulvern oder Parametern	Auswertung: Aufwand zur Bestimmung des Massenstroms	Messgeschwindigkeit: Reaktionszeit des Systems in s	Sicherheit: Grad der Gefährdung
0	250x250x250	>15	sehr aufwendig	sehr hoch	>5	sehr hoch
1	200x200x200	15	aufwendig	hoch	5	hoch
2	150x150x150	10	mittel	mittel	2	mittel
3	100x100x100	5	wenig	gering	1	gering
4	50x50x50	2	sehr gering	sehr gering	0,1	sehr gering

Der Bauraum beschreibt hier, wie viel Raum das Messsystem benötigt, um den Pulvermassenstrom messen zu können. Die Messgenauigkeit bezieht sich auf die Zuverlässigkeit der Messung, wofür hier als Indikator die Standardabweichung der Messungen aus den wissenschaftlichen Arbeiten genommen wird. Der Aufwand der Kalibrierung, bezieht sich auf „wann“ und „wie häufig“ das Messsystem bei dem jeweiligen Messverfahren kalibriert werden muss. Zum Beispiel wenn ein neues Pulver eingesetzt wird, oder bei anderen Trägergasströmen. Die Messgeschwindigkeit steht für die Reaktionszeit, die das Messsystem benötigt, um von der Messung zu einem Wert für den Massenstrom zu kommen.

Zusätzlich wurden die einzelnen Bewertungskriterien gewichtet. Die Gewichtungen lassen sich zum Teil aus der Anforderungsliste erkennen (F oder W). Sie können aber auch logisch hergeleitet werden, indem die Rolle des Bewertungskriteriums für das Gesamtprodukt bewertet wird. So hat zum Beispiel der Bauraum eine geringere Gewichtung als die Messgenauigkeit, da es für das fertige Messsystem relevanter ist genau messen zu können, als wenig Bauraum einzunehmen.

4.3 Auswahl des Messverfahrens

Um das für die Aufgabenstellung bestgeeignete Messverfahren zu bestimmen, werden die in Kapitel 2.4 genannten Messverfahren in einer Bewertungstabelle gegenübergestellt.

Die folgende Bewertungstabelle (Tabelle 4) hat sich aus Informationen und Aussagen der Arbeiten [15], [17], [18], [23], [25]–[32], [34]–[38], [40]–[43] ergeben. Wichtig ist es anzumerken, dass die Bewertung für den speziellen Anwendungsfall und nicht allgemein das beste Verfahren bestimmt. Es fließen viele unsichere Faktoren in die Bewertung mit ein, da einige der Arbeiten mit anderen Pulvern und anderen Förderraten gearbeitet haben. Dies macht eine allgemein geltende Aussage über das beste Verfahren nicht möglich.

Tabelle 4: Bewertungstabelle Messverfahren

Bewertungskriterien		Bauraum	Messge- nauigkeit	Kalibrier- ung	Auswer- -tung	Messge- schwin- digkeit	Sicherheit	Ergebnis		
	Gewichtung	0.5	2	2	1	1	1	Summe	Summe Gewichtet	Rangfolge
Messverfahren	Gravimetrisch	4	1	3	2	2	4	16	18	4
	Akustisch	4	1	1	2	4	4	16	16	5
	Optoelektronisch	4	2	2	3	4	3	18	20	3
	Bildgebend	2	3	4	2	3	3	17	23	1
	Radiometrisch	1	2	1	3	3	1	11	13.5	7
	Mikrowellen	4	2	2	3	4	4	19	21	2
	Elektrisch	4	1	1	1	4	4	15	15	6
	Thermisch	3	1	1	2	0	3	10	10.5	8

Aus der Bewertungstabelle zeigen sich die beiden optischen Messverfahren, sowie das Mikrowellen-Messverfahren als geeignete Messverfahren. Das bildgebende Messverfahren ist Nummer 1 der Rangfolge und wird dementsprechend in der Konzeptphase als gewähltes Messverfahren verwendet.

5 Konzipieren des Messsystems

Ziel dieses Kapitel ist das fertige Konzept für das Messsystem zur Bestimmung des Pulvermassenstroms. Das in Kapitel 4.3 ausgewählte Messverfahren für das Messsystem ist ein bildgebendes Messverfahren. Ein bildgebendes Messsystem kann auf unterschiedliche Weise realisiert werden. Um viele variable Lösungswege mit einzubeziehen, wird eine Funktionsstruktur erstellt.

5.1 Funktionsstruktur

Wichtig für die Konzeption ist es zuerst die Gesamtfunktion des Systems in einzelne Teilaufgaben zu zerlegen. Die Gliederung in kleine Teilaufgaben wird visuell in einer Funktionsstruktur dargestellt (siehe Abbildung 28).

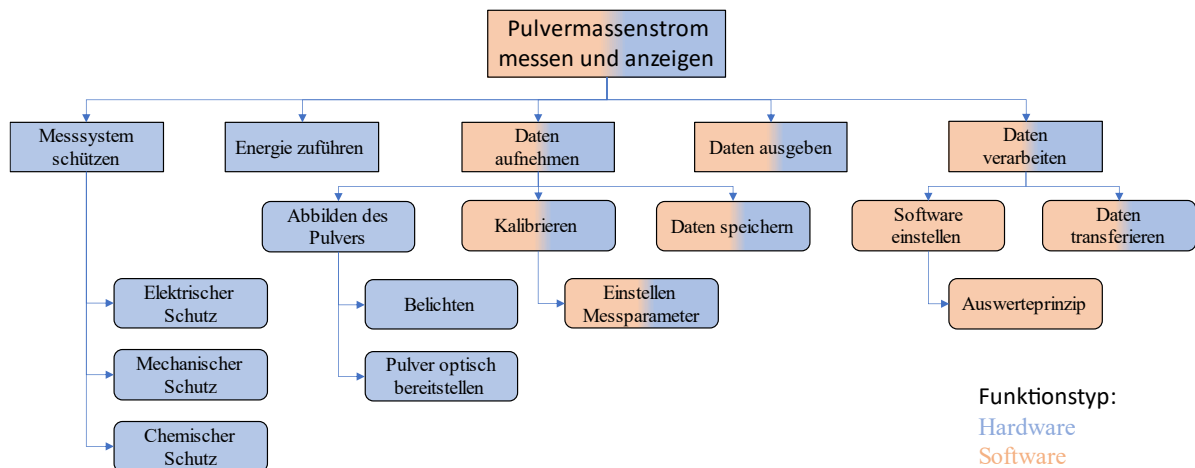


Abbildung 27: Funktionsstruktur für das Messsystem

Die Funktionen des Messsystems lassen sich in zwei Funktionsbereiche unterteilen: Hardware und Software. Beide Bereiche haben unterschiedliche Aufgaben, haben aber auch Schnittstellen zueinander, bzw. Aufgaben, die sie sich teilen. Zur Übersicht ist in der Funktionsstruktur diese Unterteilung farblich kennbar gemacht. Die Gesamtaufgabe wurde in fünf Teilaufgaben zerlegt. Diese fünf Teilaufgaben wurden, wenn möglich noch weiter zerlegt.

5.2 Lösungsfindung

Für die einzelnen Teilfunktionen, die sich in der Funktionsstruktur zeigen, werden in diesem Abschnitt mögliche Lösungsideen gesucht. Generell ist es sinnvoll bei ähnlichen oder bekannten Problemen nach bestehenden Lösungen zu suchen. Hierfür eignen sich die von mir in Kapitel 4.3 erwähnten wissenschaftlichen Arbeiten. Für bestimmte Teilfunktionen eignet sich auch die Suche in Konstruktionskatalogen oder allgemeine Lösungsfindungsmethoden wie zum Beispiel Brainstorming [45].

Für die meisten Funktionen können mehrere Lösungen gefunden werden, es gibt aber auch Beispiele, bei denen nur eine Lösung Sinn macht. Im Folgenden werden die einzelnen Teilfunktionen und deren Lösungsideen im Bereich der Hardware und *Software* beschrieben:

Energie Zuführen:

Das Messsystem braucht Energie, um Bilder aufzunehmen und zu verarbeiten. Lösungsideen sind hier der direkte Anschluss an den 230 V Netzstrom, Akkubetrieb oder eine Kombination aus beiden.

Belichten:

Das Pulver muss gut sichtbar in den Bildern der Kamera sein. Hierfür braucht man eine starke Belichtung benötigt, da die Kamera sehr kurze Belichtungszeiten zum scharfen Abbilden des Pulvers hat. Belichten über Hochdrucklampen wäre eine Lösungsidee, oder LEDs. Laser eignen sich auch aufgrund ihrer hohen Lichtintensität.

Pulver optisch bereitstellen:

Das Pulver muss sichtbar für die Kamera sein. Das heißt es muss einen lichtdurchlässigen Bereich in der Pulverleitung geben, wo das Pulver belichtet und von der Kamera erfasst werden kann. Mögliche Lösungsideen sind Leitungen aus transparenten Medien, wie Glas oder transparente Kunststoffe. Bei Glas ist diese Leitung dann als Rohr mit demselben Leitungsdurchmesser wie der Pneumatik-Schlauch realisierbar und bei Kunststoff entweder als Schlauch oder als Röhre aus Plexiglas. Ein weiterer Lösungsansatz ist die Aufnahme des Partikelstroms an der Pulverdüse.

Einstellen der Messparameter:

Zur Kalibrierung des Messsystems müssen Parameter, wie Materialkonstanten, Referenzlängen und Pulvereigenschaften, in das Messsystem eingegeben werden können. Die erste Lösungsidee ist es in ein Bedienfeld die benötigten Parameter einzugeben. Die zweite Lösung ist mithilfe eines externen Computers die Parameter einzugeben.

Für die Software kann man entweder ein GUI (GraphicUserInterface) verwenden, oder über eine jeweilige Dialogabfrage die Messparameter anfordern.

Daten aufnehmen:

Die Funktion der Datenaufnahme ist notwendig, um den Massenstrom anhand von Bildern zu bestimmen. Die erste Lösungsidee besteht darin mit einer Kamera Einzelbilder mit kurzen Belichtungszeiten aufzunehmen. Bei der zweiten Lösungsidee werden mehrere Bilder über sehr kurze Zeit mit einer Hochgeschwindigkeitskamera aufgenommen.

Daten transferieren:

Das Messsystem muss die Daten von der Kamera zur Verarbeitungseinheit (CPU) transferieren können. Lösungsideen für den Datentransfer sind über USB 3.0/3.1, Glasfaserkabel oder Wifi.

Anwendbare Software, die den Datentransfer von der Kamera zum Computer unterstützen sind USB3 Vision, GigE und GeniCam.

Daten verarbeiten:

Die aufgenommenen Bilder des Messsystems müssen zur Ermittlung des Volumenanteils des Pulvers und dessen Geschwindigkeit ausgewertet werden. Die Auswertung der Daten erfolgt bei der ersten Lösungsidee intern im Messsystem an einem Einplatinencomputer. Bei der zweiten Lösung erfolgt die Auswertung an einem externen Computer, der über eine Schnittstelle zur Kamera verbunden wird.

Für die Software zur Datenauswertung gibt es zahlreiche Bildauswertungsmodule für verschiedene Programmiersprachen. Eine Lösungsvariante ist es OpenCV und OpenPIV über Python zur Auswertung zu verwenden. Die zweite Lösungsvariante wäre sehr ähnlich zur ersten mit OpenCV und PIVlab über Matlab.

Datenspeicher:

Alle Daten die im Messsystem aufgenommen und verarbeitet werden, müssen gespeichert bzw. zwischengespeichert werden. Die beiden Lösungsideen sind die bekannten Speichermedien, Festplatten (HDDs) und Festkörperspeicher (SSDs).

Für die Software ist relevant was gespeichert wird, da bei Bildaufnahmen sehr hohe Datenmengen entstehen. Die erste Lösungsidee ist es alle aufgenommenen Bilder und Daten zu speichern. Die zweite Lösungsidee ist es alle gemessenen und berechneten Werte in Listen zu speichern, aber die Bilder zu überschreiben. Die dritte wäre es zusätzlich zur zweiten Lösungsidee, einen gewissen Anteil der Bilder zur Qualitätssicherung zu speichern.

Daten ausgeben:

Der berechnete Massenstrom muss über einen Monitor oder eine andere Art von Anzeige angezeigt werden. Hier wäre ein Display am Messsystem eine mögliche Lösung. Eine weitere mögliche Lösung ist es den Massenstrom über eine Datenschnittstelle an einen externen Computer auszugeben und dort am Monitor anzeigen zu lassen. Als dritte Lösung kann eine Kombination aus der ersten und zweiten Lösungsidee verwendet werden.

Für die Software ist die Ausgabeform entscheidend. Lösungsmöglichkeiten sind es hier die Daten visuell als Graph auszugeben oder nur als Zahlenwert. Es bietet sich an zur Kontrolle der Kamera zusätzlich Bilder ausgeben zu lassen.

Mechanischer Schutz:

Damit keine Schäden an den Komponenten des Systems entstehen, muss das System mechanisch geschützt werden. Auch Schwingungen oder Stöße könnten speziell die Messung des Systems stören. Eine mögliche Lösung ist es alle Komponenten des Messsystems in einem Gehäuse zu befestigen. Eine weitere Lösungsidee wäre nur die empfindlichen Komponenten im Gehäuse zu schützen und die anderen Komponenten außerhalb des Gehäuses zu befestigen. Je nach Kombination ist es auch möglich kein Gehäuse zu verwenden, da die meisten Komponenten wie Kamera und Belichtung schon durch ein eigenes Gehäuse geschützt sind, man könnte dann eine Art von Gerüst (Halterungen) zur Fixierung der Komponenten verwenden.

Elektrischer Schutz:

Der elektrische Schutz ist wichtig, da das System empfindliche elektrische Teile aufweist, welche durch ungewollte elektrische Ströme beschädigt oder gestört werden können. Solche Ströme können durch elektrostatische Ladungen verursacht werden, die zum Beispiel durch den Pulverfluss durch die Schläuche entstehen. Die offensichtlichste Lösungsmethode ist es ein aus Metall bestehendes Gehäuse oder Gerüst für das Messsystems zu verwenden und dieses zu Erden.

Chemischer Schutz:

Der chemische Schutz ist notwendig, damit die Komponenten des Messsystem nicht durch eindringende chemische Stoffe beschädigt werden. Dies beinhaltet vor allem Korrosion, welche durch Wasser entstehen kann. In Kombination mit einem Gehäuse bietet sich die Lösungsmöglichkeit an das Messsystem abzudichten, was zusätzlich die Elektronik vor Wasser und somit Kurzschlüssen schützt. Man könnte auch auf die ausreichende Dichtigkeit und Schutz der gewählten Komponenten setzen und keine zusätzlichen Dichtungen verwenden.

Funktionen Hardware		Lösungselemente			
		1	2	3	4
1	Energie zuführen	Netzstrom 230V	Akkubetrieb	Kombination	
2	Belichten	LED	Hochdrucklampe	Laser	
3	Pulverstrom optisch bereitstellen	Glasrohr	Plexiglasrohr	transparenter Schlauch	Düsenauslass
4	Einstellen der Messparameter	Bedienfeld	Externer Computer		
5	Daten aufnehmen	Hochgeschwindigkeitskamera	Kamera		
6	Daten transferieren	USB 3.0/3.1	Glasfaserkabel	Wifi	
7	Daten Verarbeiten Hardware	Interner Einplatinen Computer	Externer Computer		
8	Daten speichern	HDD	SSD		
9	Daten ausgeben	Display	Externer Computer		
10	Mechanischer Schutz	Gesamt-Gehäuse	Teilgehäuse für empfindliche Komponenten	Halterungen zur Fixierung	
11	Elektrischer Schutz	Erdung des Gehäuses			
12	Chemischer Schutz	Dichtungen	keine		
Funktionen Software		Lösungselemente			
		1	2	3	4
13	Einstellen Messparameter	Eingabe über GUI	Abfrage von Parametern		
14	Daten transferieren	USB3 Vision	GigE	GeniCam	
15	Daten Verarbeiten	Matlab (OpenCV, PIVlab)	Python (OpenCV, OpenPIV)		
16	Daten speichern	Alle Bilder und Werte	Alle Werte in Listen	Alle Werte in Listen und anteilig Bilder	
17	Daten Ausgeben	Graph	Zahlenwert	Graph und Kontrollbilder	Zahlenwert und Kontrollbilder

Abbildung 28: Morphologischer Kasten mit Lösungswegen 1 in Gelb und 2 in Lila

5.3 Lösungsfindung und Konkretisierung

Die einzelnen Teillösungen werden in einem „Morphologischen Kasten“ (siehe Abbildung 29) dargestellt und miteinander kombiniert. Hierbei wird zu jeder Teilfunktion jeweils eine verträgliche Teillösung gewählt, dies ergibt eine prinzipielle Gesamtlösungen. Zur Übersicht wurden die zwei ausgewählten Gesamtlösung in Gelb und Lila dargestellt. Die Gesamtlösungen wurden als jeweilige extremvarianten ausgewählt, um die Variation der Lösungsmöglichkeiten hervorzuheben [47], [50].

Lösungsvariante 1 (Gelb):

Der Pulvermassenstrom wird bei dieser Variante durch das Gehäuse geführt. Hierfür werden die Pulverschläuche außen am geerdeten Gehäuse über Verbindungsstücke an das Glasrohr angeschlossen, so dass das Pulver durch das fest im Gehäuse integrierte Glasrohr fließt. Im Gehäuse wird das Pulver dann mit einem Laser belichtet und von der Hochgeschwindigkeitskamera in regelmäßigen Intervallen aufgezeichnet (ca. 0.005 Sekunden Aufnahme pro Sekunde). Die aufgenommenen Bilder werden über USB-Verbindung mithilfe von USB3 Vision transferiert. Auf dem Einplatinencomputer werden diese Bilder auf einer SSD zwischengespeichert. Dann wird über Python aus den einzelnen Bildern mit den Methoden von *OpenCV* und der von Otsu [51] der Volumenanteil des Pulvers bestimmt und aus der Serie an Bildern mit *OpenPIV* die Geschwindigkeit der Pulverpartikel berechnet. Diese Werte können nur bestimmt werden, wenn das System über das Bedienfeld die Werte der Referenzlänge für die Bilder und die Zeit für einen Frame der Hochgeschwindigkeitskamera hat. Über der Eingabe der Werkstoffdichte des Materials des Pulvers, kann dann mit der Gleichung (2) der Massenstrom berechnet werden und am Display als Graph ausgegeben werden. Dieser ganze Prozess findet in einer Taktung von 1 s statt und wiederholt sich, so dass der Graph jede Sekunde mit einem neuen Wert aktualisiert wird. Sicherheitshalber werden alle Messwerte in Listen gespeichert und jede Sekunde wird ein Bild als Kontrollbild abgespeichert, während die restlichen Bilder überschrieben werden.

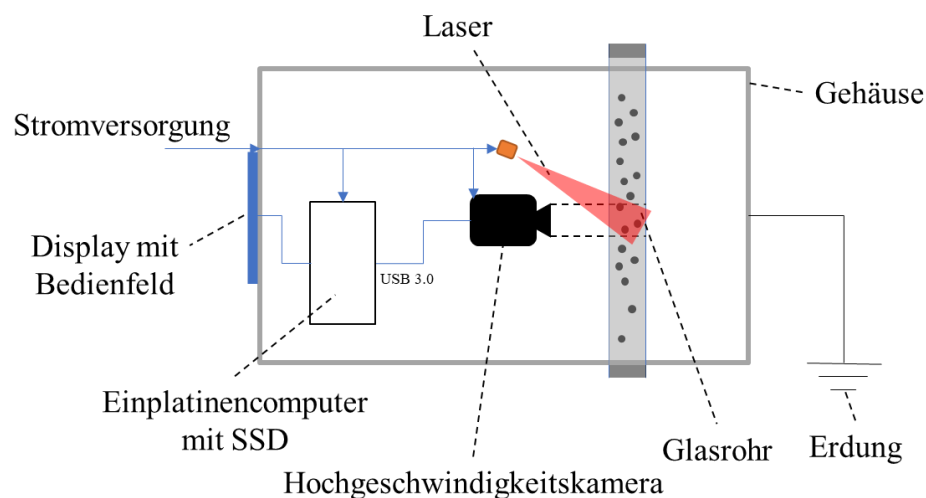


Abbildung 29: Skizze Lösungsvariante 1

Lösungsvariante 2 (Lila):

Bei Lösungsvariante 2 wird das Pulver durch einen transparenten Schlauch geführt, welcher über ein Gerüst zur Kamera und den LED-Scheinwerfern fixiert ist. Die Kamera nimmt jede Sekunde zwei Bilder von dem belichteten Pulverstrom auf, eins mit sehr kurzer und eins mit etwas längerer Belichtungszeit. Die Bilder werden über ein Ethernet-Kabel mit *GigE* zu einem externen Computer transferiert und auf einer SSD zwischengespeichert. Hier wird der Volumenanteil des Pulvers aus dem Bild mit sehr kurzer Belichtungszeit bestimmt. Aus den Bildern mit etwas längerer Belichtungszeit wird die Geschwindigkeit, anhand der Längen der Streifen der Pulverpartikel und der Belichtungsdauer. Beide Methoden werden über *OpenCV* in *Matlab* realisiert. Über einen Abfragedialog vor dem Start der Messung können die Referenzlänge und die Dichte des Pulverwerkstoffes zum Berechnen des Massenstroms an einen externen Computer eingegeben werden. Der nach Gleichung (2) berechnete Pulvermassenstrom wird direkt als Zahlenwert ausgegeben. Zusätzlich werden alle Zahlenwerte in Listen abgespeichert und die neue Messung begonnen. Die alten Bilder werden mit den neuen Bildern überschrieben.

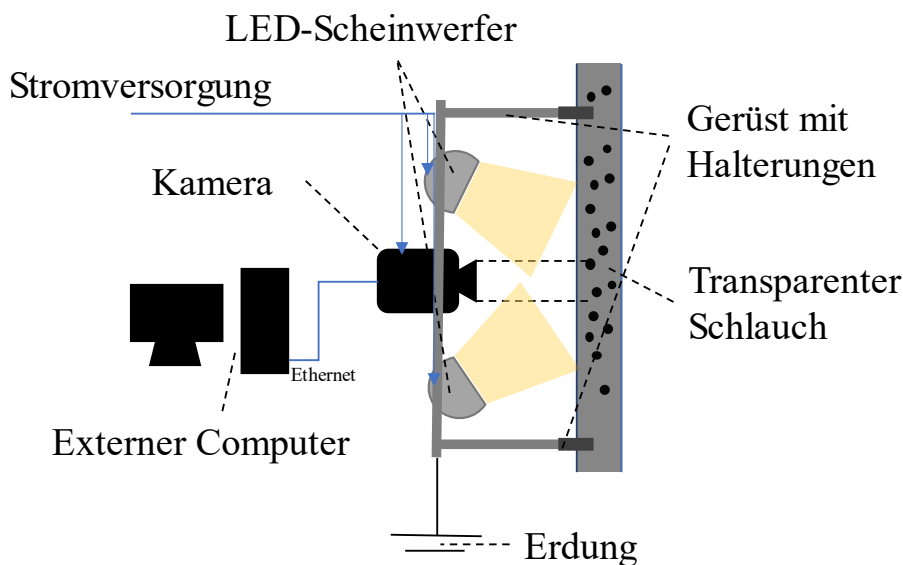


Abbildung 30: Skizze Lösungsvariante 2

5.4 Wahl der Lösungsvariante

Analog zu der Bewertung in Kapitel 4 werden beide Lösungsvarianten mithilfe neuer und alter Bewertungskriterien (siehe Tabelle 3) gegenübergestellt. Da es sich nur um ein Konzept handelt und noch keine festen Datenwerte vorliegen, werden die Verfahren nach der Qualität der Realisierung von Funktionen und Anforderungen bewertet. Die wissenschaftlichen Arbeiten [32], [34], [35] sind hilfreich für diesen Vergleich. Bei dem Folgenden Vergleich werden beide Lösungsvarianten miteinander verglichen und die nach den Bewertungskriterien geeignetere Variante ausgewählt.

Das erste Bewertungskriterium ist der Bauraum. Generell sind beide Systeme sehr platzsparend, allerdings hat das zweite System kein Gehäuse und die Recheneinheit zur Bestimmung des Massenstroms wird an einem externen Computer durchgeführt, weshalb das Messsystem etwas kleiner ausfällt.

Die Messgenauigkeit wird bei dem ersten System deutlich besser sein, das liegt zum einen daran, dass mehr Bilder ausgewertet werden und zum anderen wird bei der zweiten Lösung das Messverfahren für die Geschwindigkeit bei höheren Volumenanteilen des Pulvers sehr ungenau. Die Ursache dafür kommt dadurch, dass die Bewegungsunschärfe-Streifen sich überlappen oder große Partikel kleinere verdecken. In sehr hohen Bereichen passiert das auch für das erste Lösungsprinzip, allerdings kann das videometrische Verfahren mit der Hochgeschwindigkeitskamera noch Teile der Partikel erkennen. Des Weiteren wird bei der ersten Lösungsvariante der Pulvermassenstrom in einem staubdichten Gehäuse gefilmt, was mögliche Störquellen für die Bildaufnahme des Pulvers entfernt.

Die Kalibrierung ist bei beiden Lösungsvarianten notwendig, so muss die Kamera fokussiert werden und eine Referenzlänge bestimmt werden. Allerdings ist das zweite System etwas umständlicher, da man zur Eingabe von Parametern einen externen Rechner mit dem Messsystem verbinden muss.

Der Aufwand zur Bestimmung des Massenstroms ist bezüglich der Rechenleistung beim ersten System deutlich höher, da deutlich mehr Bilder aufgenommen werden und über *OpenPIV* verarbeitet werden.

Die Reaktionszeit der ersten Lösungsvariante ist sehr stark von der Datenverarbeitung abhängig, je nachdem wie viele Bilder mit der Hochgeschwindigkeitskamera pro Sekunde aufgenommen werden und in welchem Intervall pro Sekunde. Es wird aber wahrscheinlich langsamer reagieren als die zweite Lösungsvariante.

Die Sicherheit ist bei der ersten Lösungsvariante etwas höher. Zwar wird bei der ersten Lösungsvariante ein Laser verwendet, welcher gefährlicher einzustufen wäre als ein LED-Scheinwerfer, dieser ist allerdings verdeckt im Gehäuse und nicht offen, wie bei der zweiten Variante.

Die Lebensdauer wird durch das Gehäuse und das Verwenden eines Glasrohres zur Bereitstellung der optischen Sicht bei der Lösungsvariante 1 höher sein als bei der Lösungsvariante 2. Der transparente Schlauch wird schneller verkratzen als das Glasrohr und auch die anderen offenen Komponenten der zweiten Variante sind anfälliger für Beschädigungen.

Die Kosten werden bei beiden Systemen stark von der Qualität der Kamera abhängen. Allerdings ist eine Hochgeschwindigkeitskamera im gleichen Auflösungsbereich wie eine normale Industriekamera deutlich teurer.

Das erste System ist durch den am Gehäuse angebrachten Display mit Bedienfeld leichter zu bedienen. Auch die Ausgabe des Massenstroms als Graph bietet eine gute Ansicht zur Überwachung, da Schwankungen in der Kurve schnell erkennbar sind.

Das Gehäuse des ersten Systems macht dieses System zwar schwerer, aber auch komfortabler zu tragen. Durch einen zusätzlichen Griff am Gehäuse kann dies noch weiter verbessert werden.

Trotz der Kosten fällt die Wahl auf die erste Lösung, da sie die Geschwindigkeit selbst bei höheren Volumenanteilen des Pulvers zuverlässig(er) misst. Außerdem ist sie deutlich besser geschützt und besser transportierbar. Das Display direkt am Messsystem ermöglicht eine leichte Bedienbarkeit und eine übersichtliche Ausgabe des Pulvermassenstroms in einem Graphen. Die zweite Gesamtlösung ist zwar günstiger, findet aber nicht die gleiche Anwendungsmöglichkeit, wie die erste Gesamtlösung, aufgrund einer niedrigeren Messgenauigkeit.

6 Validierung des Konzeptes

Auch wenn es noch keinen fertigen Entwurf für das Messsystem gibt, lassen sich schon bestimmte Aspekte des Messsystems validieren, wie zum Beispiel das Messen der Geschwindigkeit.

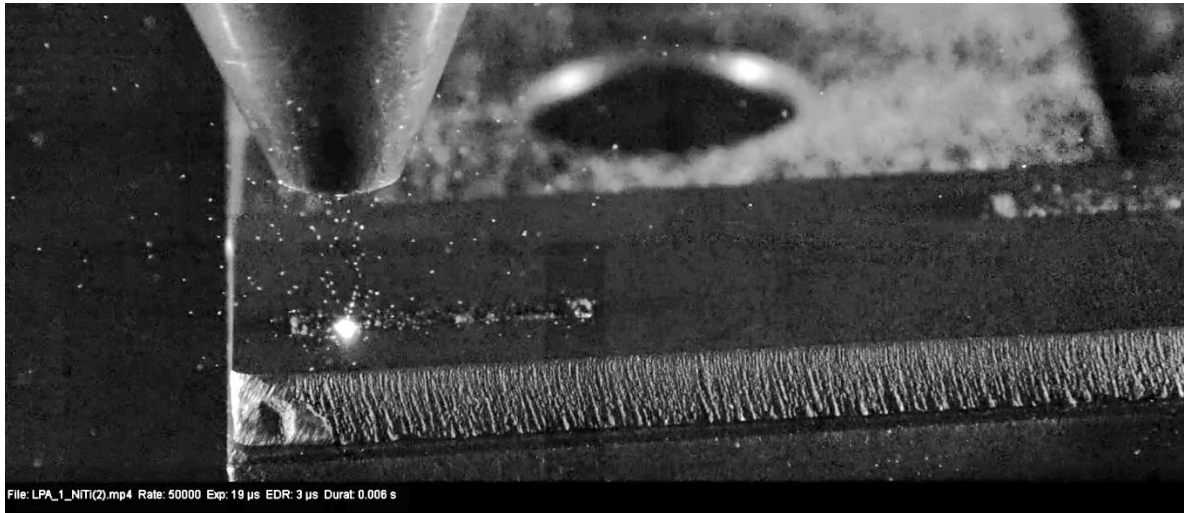


Abbildung 31: Aufnahmebereich der Kamera

Im Folgenden wurden eine Aufnahme mit einer Hochgeschwindigkeitskamera (Cube) am Düsenausgang der LPA-Anlage mit der PIV-Software analysiert. Die Aufnahme (siehe Abbildung 31) wurden am 18.08 2021 am Fraunhofer IAPT gemacht, mit einer FPS (*frames per second*) von 50000 und einer Belichtungszeit von 19 μs . Am Pulverförderer wurde eine Tellerdrehzahl von 1,5 rpm eingestellt, was mit dem verwendeten Ni-Ti-Pulver (siehe Anhang) einen Massenstrom von 2,14 g/min ergab. Es wurde *PIVlab* verwendet, welches als App für *Matlab* zur Verfügung steht. Zu Beginn wird das Video auf den auszuwertenden Bereich am Düsenausgang zugeschnitten. Dann wird es in *PIVlab* eingefügt. Für die beispielhafte Auswertung reichten 10 Bilder (*frames*).

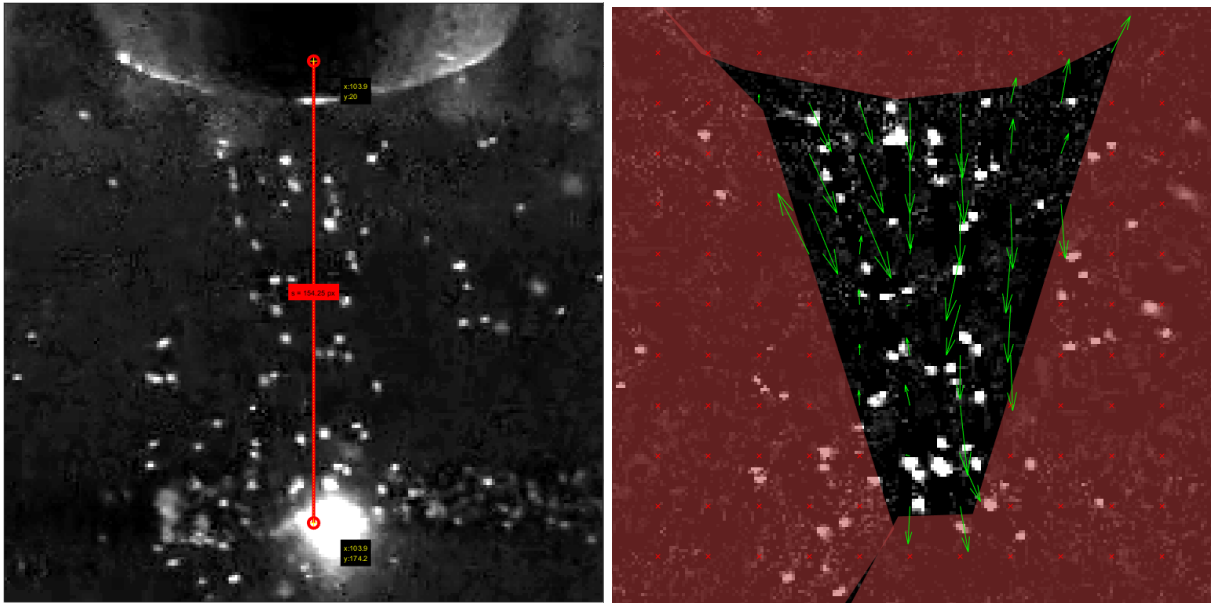


Abbildung 32: links: Wahl der Referenzlänge, rechts: Geschwindigkeitsvektoren mit Maske

Zuerst wird eine Referenzlänge festgelegt, hier der Abstand von 8 mm von Düsen Spitze bis zur Platte, welcher im Bild markiert wurde. Als nächstes die Referenzzeit, welche der Kehrwert der FPS ist also $20 \mu\text{s}$. Jetzt wird eine Maske über die Bereiche eingefügt, welche nicht analysiert werden sollen. Wie in Abbildung 32 rechts zu sehen ist, zeigen die Vektorpfeile teilweise nach oben. Das kommt daher, weil Partikel von der Platte abprallen und nach oben geschleudert werden.

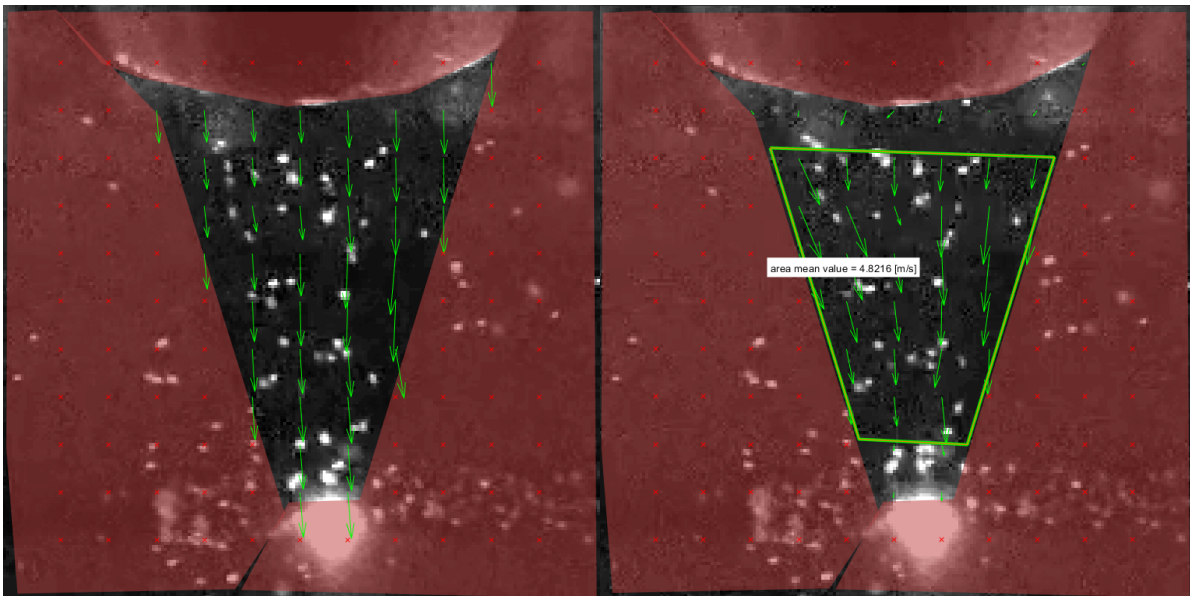


Abbildung 33: links: gefiltertes Bild, rechts mittlere Geschwindigkeit

Mit Filterfunktionen können diese Vektoren entfernt werden (siehe Abbildung 33). Nun kann die mittlere Geschwindigkeit über den Bereich ausgegeben werden. Die ermittelte mittlere Geschwindigkeit für den Bereich am Düsenaustritt betrug ungefähr 5 m/s.

Für einen Volumenstrom des Trägergases von 5 l/min und unter der Annahme, dass die Partikel ungefähr die Geschwindigkeit des Trägergas erreichen, berechnet sich nach der Gleichung (4) die Geschwindigkeit zu 6,6 m/s.

$$v = \frac{Q}{A} = \frac{Q}{\pi \cdot r^2} \quad (4)$$

Es zeigt sich eine Abweichung der PIV ermittelten Geschwindigkeit zur Berechneten von 1,6 m/s, was relativ betrachtet 24% weniger ist. Diese Abweichung könnte durch die reflektierten Pulverpartikel kommen, zwar kann man stark abweichende Vektoren im Nachhinein herausfiltern, der generelle Einfluss auf die Messergebnisse bleibt aber vorhanden.

7 Zusammenfassung und Ausblick

Für eine gute Prozessqualität bei dem Laser-Pulver-Auftragschweißen ist es wichtig alle Einflussgrößen zu kennen und überwachen zu können. Der Pulvermassenstrom ist eine dieser Einflussgrößen. Er beschreibt wie viel Masse des Pulvers aus der Düse ausgegeben wird. Schon geringe Schwankungen im Pulvermassenstrom können einen großen Einfluss auf das Endergebnis des Werkstückes haben. Ziel dieser Arbeit war es ein Messsystem zu konzipieren, welches den Pulvermassenstrom überwacht.

Zu diesem Zweck wurde im Stand der Wissenschaft und Technik die eingesetzte Technik beschrieben, besonders die der Pulverförderer. Dann wurden existierende Messverfahren zur Bestimmung von Massenströmen von Pulvern zusammengefasst und in ihrer Funktion erklärt. Als nächstes wurden die grundlegenden Abläufe der methodischen Produktentwicklung erklärt, die sich zur Entwicklung eines Konzeptes bei technischen Produkten eignet.

Um der Problem- und Aufgabenstellung näher zu kommen und als Beweis für die Notwendigkeit für ein Messsystem, wurde eine Versuchsreihe am Pulverförderer der LPA-Anlage durchgeführt. Mithilfe einer Waage, die das Gewicht eines an den Pulverförderer verbundenen Auffangbehältnisses ausgab, wurden verschiedene Messreihen durchgeführt. Diese Messreihen haben gezeigt, dass es mehrere Faktoren gibt, die für Abweichungen im Pulvermassenstrom sorgen. Die Faktoren scheinen teilweise unregelmäßig zu wirken und verhindern so ein konstanten Pulvermassenstrom. Es zeigt sich, dass ein Messsystem zur Überwachung des Prozesses dessen Qualität und Stabilität signifikant verbessert.

Aufbauend auf dieser Erkenntnis wurden Anforderungen an ein Messsystem in einer Anforderungsliste formuliert. Nach der Ableitung von Bewertungskriterien aus der Anforderungsliste, wurden die verschiedenen Arten der Messverfahren in einer Bewertungstabelle bewertet und in eine Rangfolge gebracht. Aus der Rangfolge wurden die bildgebenden Messverfahren für die Konzeptionsphase als Grundbaustein für die Funktionsstruktur gewählt.

Die Funktionsstruktur ergab sich durch das Aufteilen der Gesamtfunktion des Systems in Teilfunktionen. Für die sich ergebenden Teilfunktionen wurden anschließend verschiedene Lösungsideen zusammengetragen. Danach wurden zwei prinzipielle Gesamtlösungen ausgewählt und hinsichtlich überarbeiteter Bewertungskriterien gegenübergestellt. Aus dieser Gegenüberstellung stellte sich die Lösungsvariante 1 als geeigneteres Konzept heraus.

Das Konzept wurde als Skizze in Abbildung 30 dargestellt und beschrieben. Anschließend wurden Aufnahmen mit einer Hochgeschwindigkeitskamera am Düsenausgang der LPA-Anlage mit *PIVlab* analysiert und es konnten realistische Geschwindigkeiten für die Pulverpartikel bestimmt werden. Es hat sich gezeigt, dass die Aufnahmen aufgrund von störenden Einflüssen, wie die Reflektion der Partikel am Werkstück weitere Optimierungen benötigen, um ein aussagekräftiges Ergebnis zu liefern. Dennoch stellt die Validierung dar, wie die Bildauswertung bei zukünftigen Messungen aussehen könnte. Für zukünftige Messungen

würde es sich empfehlen diese in einem senkrechten Glasrohr durchzuführen (siehe Konzept), wo alle Partikel sich annähernd eindimensional bewegen.

Auf dem Konzept aufbauend sind noch eine Vielzahl an Entwicklungsschritten und Iterationen notwendig, bis das Messsystem für die Überwachung des Pulvermassenstroms beim Laser-Pulver-Auftragschweißen Anwendung findet. Auf der Ebene der Software ist auch noch einiges an Programmieren notwendig, bis ein fertiges Messprogramm entsteht, welches automatisiert den Pulvermassenstrom aus Videos während des Prozesses ermittelt. Allerdings bieten sich hier auch neue Lösungsansätze zum Messen des Massenstroms an, wie zum Beispiel die Integration eines Zählers, welcher die Partikel zählt und deren jeweilige über den Durchmesser bestimmten Massen über die Zeit aufaddiert. Diese zusätzliche Kontrollmöglichkeit könnte die Genauigkeit des Messsystems zusätzlich steigern. Das Konzept bietet auch das Potential für die Regelung des Pulvermassenstroms. Damit hier aber sinnvolle Zeiten für die Regelung entstehen, sollte der Pulvermassenstrom direkt am Ausgang des Pulverförderers bestimmt werden.

Für weitere Arbeiten wäre es interessant das videometrische Messverfahren in anderen Anwendungsbereichen zu prüfen.

Anhang

Name	Schlauchlänge/Weg	Position des Auffangbehältnisses	Datum	Trägergasstrom [l/min]	Drehzahl [rpm]	Messreihe 1 [µg/ml]	Messreihe 2 [µg/ml]	Messreihe 3 [µg/ml]	Messreihe 4 [µg/ml]	Messreihe 5 [µg/ml]	Mittelwert des Massenstroms [µg/min]	Standardabweichung des Massenstroms [µg/min]	relative Standardabweichung
fV5U1	7 m	fern	15.07.2021	5	1	3,22	3,29	3,29			3,27	0,04	1,21%
fV5U2	7 m	fern	15.07.2021	5	2	6,91	6,93	6,91			6,92	0,01	0,20%
fV5U3	7 m	fern	15.07.2021	5	3	10,42	10,42	10,40			10,41	0,01	0,11%
fV5U4	7 m	fern	15.07.2021	5	4	13,68	13,73	13,71			13,71	0,03	0,19%
fV5U5	7 m	fern	15.07.2021	5	5	16,55	17,22	17,23	17,09	17,03	17,02	0,28	1,63%
fV5U6	7 m	fern	18.08.2021	5	6	20,74	20,76	20,44			20,65	0,18	0,87%
fV5U7	7 m	fern	18.08.2021	5	7	23,74	23,99	24,26			24,00	0,26	1,07%
fV5U8	7 m	fern	18.08.2021	5	8	27,53	27,58	27,91			27,67	0,21	0,75%
fV5U9	7 m	fern	18.08.2021	5	9	31,26	30,87	31,48			31,20	0,31	1,00%
fV5U10	7 m	fern	18.08.2021	5	10	35,68	35,31	35,97			35,65	0,33	0,92%
fV5U10_anderesdatum	7 m	fern	18.08.2021	5	5	16,44	17,17	17,20	17,00	17,20	17,00	0,32	1,90%
fMv5U5	7 m	fern verändert	18.08.2021	5	5	15,62	16,17	16,54	16,43	16,44	16,24	0,37	2,29%
fMv5U5a10 (bis 70 s)	7 m	fern verändert	18.08.2021	5	5	16,29	16,61	16,61			16,51	0,18	1,11%
fMv5U5a10 (ab 70 s)	7 m	fern verändert	18.08.2021	5	10	35,33	35,24	35,36	3,37		35,31	0,06	0,17%
fMvXU1	7 m	fern verändert	18.08.2021	2, 5, 8, 10	1	2,91	3,25	3,29			3,20	0,20	6,31%
nV5U1	1 m	nah	15.07.2021	5	1	2,80	3,22	3,25			3,09	0,25	8,21%
nV5U2	1 m	nah	15.07.2021	5	2	6,72	6,71	6,71			6,72	0,00	0,06%
nV5U3	1 m	nah	15.07.2021	5	3	10,21	10,19	10,20			10,20	0,01	0,10%
nV5U4	1 m	nah	15.07.2021	5	4	13,47	13,53	13,54			13,51	0,04	0,27%
nV5U5	1 m	nah	15.07.2021	5	5	15,75	16,46	16,51	16,63	16,62	16,59	0,37	2,24%
nV5U6	1 m	nah	15.07.2021	5	6	20,61	20,15	20,33			20,23	0,09	0,47%
nV5U7	1 m	nah	15.07.2021	5	7	23,64	23,70	23,58			23,64	0,06	0,26%
nV5U8	1 m	nah	15.07.2021	5	8	27,16	26,78	26,99			26,98	0,19	0,70%
nV5U9	1 m	nah	15.07.2021	5	9	31,18	31,30	31,42			31,30	0,12	0,37%
nV5U10	1 m	nah	15.07.2021	5	10	34,48	34,39	34,78			34,55	0,20	0,58%
nV2U1	1 m	nah	15.07.2021	2	1	2,24	3,10	3,15			2,83	0,51	18,10%
nV10U1	1 m	nah	15.07.2021	10	1	3,51	3,46	3,46			3,49	0,02	0,70%
nV10U10	1 m	nah	15.07.2021	10	10	35,32	35,52	35,14			35,33	0,19	0,55%
nV5a10U5 (bis 70 s)	1 m	nah	15.07.2021	5	5	17,42	17,48	17,40			17,43	0,04	0,25%
nV5a10U5 (ab 70 s)	1 m	nah	15.07.2021	10	5	17,57	17,62	17,33			17,50	0,16	0,89%
nV5U5a10 (bis 70 s)	1 m	nah	15.07.2021	5	5	18,82	18,93	18,99			18,91	0,09	0,47%
nV5U5a10 (ab 70 s)	1 m	nah	15.07.2021	5	10	34,83	34,96	34,89			34,89	0,06	0,17%
k50V5U5	2 m	nah	26.08.2021	5	5	16,37	16,86	16,89	17,12	16,86	16,82	0,27	1,62%
k31V5U5	2 m mit Schlaufe	nah	26.08.2021	5	5	14,57	15,30	15,46	15,93	15,89	15,43	0,55	3,54%
m50V5U5	3 m	nah	26.08.2021	5	5	15,95	16,25	16,42	16,22	16,16	16,20	0,17	1,07%
m51V5U5	3 m mit Schlaufe	nah	26.08.2021	5	5	15,74	16,29	15,39	16,13	16,04	15,92	0,36	2,24%
l50V5U5	5 m	nah	26.08.2021	5	5	16,33	16,62	16,72	16,72	16,69	16,62	0,17	1,01%

PULVERCHARGE

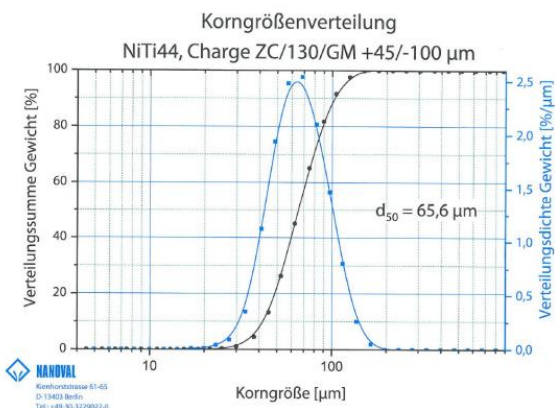
NiTi44

Zusammensetzung (theoretisch)

	at-%	at-Gew	Atommasse [U]	w-%
Ni	50,8	58,6934	4,9511E-21	55,8703931
Ti	49,2	47,867	3,91066E-21	44,1296069

Sprungtemperatur

MS	MF	AS	AF	
Cooling		Heating		
257	226	256	289	[K]
-16	-47	-17	16	[°C]

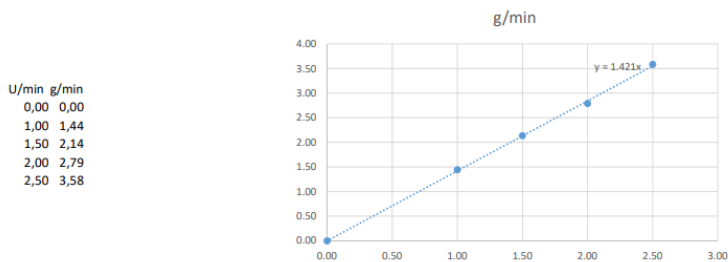


3 intern
© Fraunhofer



03.02.2021 - Pulvermassenstrom

U/min	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5																		
	1,0 sec g		1,5 sec g		2,0 sec g		2,5 sec g																
	m_abs	t_abs	m_delta	t_delta	m_delta	t_delta	m_delta	t_delta															
0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0															
30s	1,63	1,77	0,86	30	30,0	0,86	2,14	1,32	30	30,0	1,32	1,44	30	30,0	1,44	1,74	30	30,0	1,74				
60s	2,77	3,67	1,58	60	30,0	0,72	3,91	2,34	60	30,0	1,02	4,34	120	30,0	1,01	5,53	120	30,0	1,37	7,16	120	30,0	1,84
90s	4,15	5,39	2,22	90	30,0	0,64	6,68	3,33	90	30,0	0,99	8,67	180	30,0	1,08	10,79	180	30,0	1,44	12,54	210	30,0	1,75
120s	5,53	7,14	2,97	120	30,0	0,75	10,22	4,34	120	30,0	1,01	12,54	210	30,0	1,41	15,15	210	30,0	1,83	17,97	210	30,0	2,18
150s	6,68	8,27	3,64	150	30,0	0,67	15,15	5,37	150	30,0	1,03	17,97	210	30,0	1,41	20,76	210	30,0	1,83	23,60	210	30,0	2,22
180s	7,79	9,77	4,36	180	30,0	0,72	20,76	6,45	180	30,0	1,08	23,60	210	30,0	1,44	26,46	210	30,0	1,88	29,34	210	30,0	2,30
210s	8,85	11,63	5,05	210	30,0	0,69	26,46	7,48	210	30,0	1,03	29,34	210	30,0	1,41	32,25	210	30,0	1,87	35,13	210	30,0	2,38
	x	x				0,7x					1,1x				1,4x					1,8x			2,3x
						g/min	1,44				g/min	2,14			g/min	2,79				g/min	3,58		



4 intern
© Fraunhofer



Literaturverzeichnis

- [1] M. Thum, 'Alle Airbus A350 XWB-Flugzeuge erhalten Serienteile aus dem 3D-Drucker', *3D-grenzenlos Magazin – 3D-Druck-News und Shop seit 2013!*, Apr. 04, 2019. <https://www.3d-grenzenlos.de/magazin/kurznachrichten/airbus-a350-xwb-serienteile-aus-3d-drucker-27497983/> (accessed Nov. 19, 2021).
- [2] A. Gebhardt, *Additive Fertigungsverfahren Additive Manufacturing und 3D-Drucken für Prototyping - Tooling - Produktion*. 2016. doi: 10.3139/9783446445390.fm.
- [3] R. Förster and A. Förster, *Einführung in die Fertigungstechnik: Lehrbuch für Studenten ohne Vorpraktikum*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2018. doi: 10.1007/978-3-662-54702-1.
- [4] P. Bühler, P. Schlaich, D. Sinner, A. Stauss, and T. Stauss, *Produktdesign: Konzeption – Entwurf – Technologie*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2019. doi: 10.1007/978-3-662-55511-8.
- [5] 'DIN 8580:2003-09, Fertigungsverfahren_- Begriffe, Einteilung', Beuth Verlag GmbH. doi: 10.31030/9500683.
- [6] H. B. Kief, H. A. Roschiwal, and K. Schwarz, *CNC-Handbuch: CNC, DNC, CAD, CAM, FFS, SPS, RPD, LAN, CNC-Maschinen, CNC-Roboter, Antriebe, Energieeffizienz, Werkzeuge, Industrie 4.0, Fertigungstechnik, Richtlinien, Normen, Simulation, Fachwortverzeichnis*, 30., Überarbeitete Auflage. München: Hanser, 2017.
- [7] R. Lachmayer, R. bastian Lippert, and T. Fahlbusch, Eds., *3D-Druck beleuchtet: Additive Manufacturing auf dem Weg in die Anwendung*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2016. doi: 10.1007/978-3-662-49056-3.
- [8] R. Lachmayer, K. Rettschlag, and S. Kaieler, Eds., *Konstruktion für die Additive Fertigung 2020*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2021. doi: 10.1007/978-3-662-63030-3.
- [9] W. Frenz, Ed., *Handbuch Industrie 4.0: Recht, Technik, Gesellschaft*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2020. doi: 10.1007/978-3-662-58474-3.
- [10] M. L. B. Möller, *Prozessmanagement für das Laser-Pulver-Auftragschweißen*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2021. doi: 10.1007/978-3-662-62225-4.
- [11] B. Bertsche and H.-J. Bullinger, Eds., *Entwicklung und Erprobung innovativer Produkte — Rapid Prototyping*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2007. doi: 10.1007/978-3-540-69880-7.

- [12] A. J. Pinkerton, '16 - Laser direct metal deposition: theory and applications in manufacturing and maintenance', in *Advances in Laser Materials Processing*, J. Lawrence, J. Pou, D. K. Y. Low, and E. Toyserkani, Eds. Woodhead Publishing, 2010, pp. 461–491. doi: 10.1533/9781845699819.6.461.
- [13] 'Laser Metal Deposition uses, types, advantages and disadvantages | Science online', Apr. 22, 2017. <https://www.online-sciences.com/technology/laser-metal-deposition-uses-types-advantages-and-disadvantages/> (accessed Nov. 21, 2021).
- [14] S. Yang, M. Zhong, and Q. Zhang, 'New techniques to rapidly manufacture metal parts with laser', in *LASER TECHNOLOGY*, Aug. 2001, vol. 25.
- [15] F. Xing, W. Liu, and T. Wang, 'Real-time Sensing and Control of Metal Powder Laser Forming', in *2006 6th World Congress on Intelligent Control and Automation*, Jun. 2006, vol. 2, pp. 6661–6665. doi: 10.1109/WCICA.2006.1714372.
- [16] M. R. Boddu, R. G. Landers, and F. W. Liou, 'Control of Laser Cladding for Rapid Prototyping--a Review', 2001. doi: 10.26153/tsw/3340.
- [17] M. Hopkins, 'Loss in Weight Feeder Systems', *Measurement and Control*, vol. 39, no. 8, pp. 237–240, Oct. 2006, doi: 10.1177/002029400603900801.
- [18] G. I. Tardos and Q. Lu, 'Precision dosing of powders by vibratory and screw feeders: an experimental study', *Advanced Powder Technology*, vol. 7, no. 1, pp. 51–58, Jan. 1996, doi: 10.1016/S0921-8831(08)60891-2.
- [19] M. Schneider, 'Laser cladding Ph.D. Thesis University of Twente, Enschede, The Netherlands', p. 177, Mar. 1998.
- [20] P. A. Carvalho *et al.*, 'Automated workstation for variable composition laser cladding — its use for rapid alloy scanning', *Surface and Coatings Technology*, vol. 72, no. 1, pp. 62–70, May 1995, doi: 10.1016/0257-8972(94)02333-L.
- [21] J. Shen, 'Pulverfördersysteme zur Laseroberflächenbehandlung', in *Optimierung von Verfahren der Laseroberflächenbehandlung bei gleichzeitiger Pulverzufuhr*, J. Shen, Ed. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag, 1994, pp. 76–90. doi: 10.1007/978-3-322-96731-2_5.
- [22] M. Sommerfeld, 'L3.1 Bewegung fester Partikel in Gasen und Flüssigkeiten', in *VDI-Wärmeatlas: Fachlicher Träger VDI-Gesellschaft Verfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen*, P. Stephan, S. Kabelac, M. Kind, D. Mewes, K. Schaber, and T. Wetzel, Eds. Berlin, Heidelberg: Springer, 2019, pp. 1543–1559. doi: 10.1007/978-3-662-52989-8_88.

- [23] Y. Yan, ‘Mass flow measurement of bulk solids in pneumatic pipelines’, *Meas. Sci. Technol.*, vol. 7, no. 12, pp. 1687–1706, Dec. 1996, doi: 10.1088/0957-0233/7/12/002.
- [24] Y. Yan, ‘Flow Rate Measurement of Bulk Solids in Pneumatic Pipelines Problems and Solutions’, *Bulk Solids Handling*, vol. 15, Jul. 2000.
- [25] Y. Zheng and Q. Liu, ‘Review of techniques for the mass flow rate measurement of pneumatically conveyed solids’, *Measurement*, vol. 44, no. 4, pp. 589–604, May 2011, doi: 10.1016/j.measurement.2011.01.013.
- [26] Y. Ding, J. Warton, and R. Kovacevic, ‘Development of sensing and control system for robotized laser-based direct metal addition system’, *Additive Manufacturing*, vol. 10, pp. 24–35, Apr. 2016, doi: 10.1016/j.addma.2016.01.002.
- [27] L. Tang, J. Ruan, R. G. Landers, and F. Liou, ‘Variable Powder Flow Rate Control in Laser Metal Deposition Processes’, *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, vol. 130, no. 4, Jul. 2008, doi: 10.1115/1.2953074.
- [28] C. Ruiz-Carcel, A. Starr, and E. Nsugbe, ‘Estimation of powder mass flow rate in a screw feeder using acoustic emissions’, *Powder Technology*, vol. 336, pp. 122–130, Aug. 2018, doi: 10.1016/j.powtec.2018.05.029.
- [29] K. Albion, L. Briens, C. Briens, and F. Berruti, ‘Flow regime determination in horizontal hydrotransport using non-intrusive acoustic probes’, *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, vol. 86, no. 6, pp. 989–1000, 2008, doi: 10.1002/cjce.20112.
- [30] S. Tallon and C.E. Davis, ‘Use of the attenuation of acoustic pulsed waves for concentration measurement in gas–solid pipe flow. Advances in Fluidization and fluid particle systems’, vol. 317, no. 93, pp. 136–140, 1997.
- [31] F. Mesch and H. Kipphan, ‘Solids flow measurement by correlation methods’, *Opto-electronics*, vol. 4, no. 4, pp. 451–462, Nov. 1972, doi: 10.1007/BF01414148.
- [32] D. Song, L. Peng, G. Lu, S. Yang, and Y. Yan, ‘Digital image processing based mass flow rate measurement of gas/solid two-phase flow’, *J. Phys.: Conf. Ser.*, vol. 147, p. 012048, Feb. 2009, doi: 10.1088/1742-6596/147/1/012048.
- [33] M. Raffel, C. E. Willert, F. Scarano, C. J. Kähler, S. T. Wereley, and J. Kompenhans, *Particle Image Velocimetry*. Cham: Springer International Publishing, 2018. doi: 10.1007/978-3-319-68852-7.
- [34] A.-I. García-Moreno, J.-M. Alvarado-Orozco, J. Ibarra-Medina, A. López-Martínez, and E. Martínez-Franco, ‘Experimental measurement of the powder flow velocity in a three-port coaxial laser metal deposition nozzle by high-speed imaging’, *Journal of Laser Applications*, vol. 33, no. 4, p. 042021, Nov. 2021, doi: 10.2351/7.0000413.

- [35] L. Madarász *et al.*, ‘Videometric Mass Flow Control: A New Method for Real-Time Measurement and Feedback Control of Powder Micro-Feeding based on Image Analysis’, *International Journal of Pharmaceutics*, vol. 580, p. 119223, Mar. 2020, doi: 10.1016/j.ijpharm.2020.119223.
- [36] S. Ganesh, R. Troscinski, N. Schmall, J. Lim, Z. Nagy, and G. Reklaitis, ‘Application of X-Ray Sensors for In-line and Noninvasive Monitoring of Mass Flow Rate in Continuous Tablet Manufacturing’, *Journal of Pharmaceutical Sciences*, vol. 106, no. 12, pp. 3591–3603, Dec. 2017, doi: 10.1016/j.xphs.2017.08.019.
- [37] L. Pang *et al.*, ‘Measurement of solid mass flow rate by a non-intrusive microwave method’, *Powder Technology*, vol. 323, pp. 525–532, Jan. 2018, doi: 10.1016/j.powtec.2017.10.030.
- [38] S. R. Woodhead, A. N. Pittman, and S. J. Ashenden, ‘Laser Doppler velocimetry measurements of particle velocity profiles in gas-solid two-phase flows’, in *Proceedings of 1995 IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference - IMTC '95*, Apr. 1995, pp. 770-. doi: 10.1109/IMTC.1995.515420.
- [39] F. Ya. Izakov, P. A. Zubtsov, G. N. Malyshev, and L. A. Ivin, ‘Flowmeter for loose materials’, *Meas Tech*, vol. 22, no. 10, pp. 1233–1235, Oct. 1979, doi: 10.1007/BF00828107.
- [40] Y. Yan, L. Xu, and P. Lee, ‘Mass Flow Measurement of Fine Particles in a Pneumatic Suspension Using Electrostatic Sensing and Neural Network Techniques’, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 55, no. 6, pp. 2330–2334, Dec. 2006, doi: 10.1109/TIM.2006.887040.
- [41] H. L. Hu, T. M. Xu, S. E. Hui, and Q. L. Zhou, ‘A novel capacitive system for the concentration measurement of pneumatically conveyed pulverized fuel at power stations’, *Flow Measurement and Instrumentation*, vol. 17, no. 2, pp. 87–92, Apr. 2006, doi: 10.1016/j.flowmeasinst.2005.11.001.
- [42] Y. Zheng, D. McGlinchey, J. Pugh, and Y. Li, ‘Experimental investigation on heat transfer mechanisms of pneumatically conveyed solids’ plugs as a means to mass flow rate measurement’, *Flow Measurement and Instrumentation*, vol. 40, pp. 232–237, Dec. 2014, doi: 10.1016/j.flowmeasinst.2014.08.012.
- [43] T. Moriyama, S. Fujii, K. Abe, and M. Kobayashi, ‘Mass Flowmeter Using Heat Transfer for Dense Phase Solid Gas Two Phase Flow’, 1986, doi: 10.9746/SICETR1965.22.104.
- [44] E. Kirchner, *Werkzeuge und Methoden der Produktentwicklung: Von der Idee zum erfolgreichen Produkt*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2020. doi: 10.1007/978-3-662-61762-5.

- [45] U. Lindemann, *Methodische Entwicklung technischer Produkte*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2009. doi: 10.1007/978-3-642-01423-9.
- [46] *VDI 2221 Blatt 1 - Entwicklung technischer Produkte und Systeme - Modell der Produktentwicklung*. 2019.
- [47] G. Pahl *et al.*, Eds., *Konstruktionslehre: Grundlagen erfolgreicher Produktentwicklung; Methoden und Anwendung*, 7. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer, 2007.
- [48] P. Naefe, *Methodisches Konstruieren: Auf den Punkt gebracht*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2018. doi: 10.1007/978-3-658-22636-7.
- [49] W. J. Sames, F. A. List, S. Pannala, R. R. Dehoff, and S. S. Babu, ‘The metallurgy and processing science of metal additive manufacturing’, *International Materials Reviews*, vol. 61, no. 5, pp. 315–360, Jul. 2016, doi: 10.1080/09506608.2015.1116649.
- [50] F. Zwicky-Stiftung and F. Zwicky, *Entdecken, Erfinden, Forschen im morphologischen Weltbild*, 2., Edition. Glarus: Baeschlin Verlag, 1989.
- [51] N. Otsu, ‘A Threshold Selection Method from Gray-Level Histograms’, *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, vol. 9, no. 1, pp. 62–66, Jan. 1979, doi: 10.1109/TSMC.1979.4310076.



Erklärung zur selbstständigen Bearbeitung einer Abschlussarbeit

Gemäß der Allgemeinen Prüfungs- und Studienordnung ist zusammen mit der Abschlussarbeit eine schriftliche Erklärung abzugeben, in der der Studierende bestätigt, dass die Abschlussarbeit „– bei einer Gruppenarbeit die entsprechend gekennzeichneten Teile der Arbeit [(§ 18 Abs. 1 APSO-TI-BM bzw. § 21 Abs. 1 APSO-INGI)] – ohne fremde Hilfe selbstständig verfasst und nur die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt wurden. Wörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Werken entnommene Stellen sind unter Angabe der Quellen kenntlich zu machen.“

Quelle: § 16 Abs. 5 APSO-TI-BM bzw. § 15 Abs. 6 APSO-INGI

Dieses Blatt, mit der folgenden Erklärung, ist nach Fertigstellung der Abschlussarbeit durch den Studierenden auszufüllen und jeweils mit Originalunterschrift als letztes Blatt in das Prüfungsexemplar der Abschlussarbeit einzubinden.

Eine unrichtig abgegebene Erklärung kann -auch nachträglich- zur Ungültigkeit des Studienabschlusses führen.

Erklärung zur selbstständigen Bearbeitung der Arbeit

Hiermit versichere ich,

Name: Zimmermann

Vorname: Henrik

dass ich die vorliegende Bachelorarbeit bzw. bei einer Gruppenarbeit die entsprechend gekennzeichneten Teile der Arbeit – mit dem Thema:

Konzeption eines prototypischen Messsystems zur Überwachung des Pulvermassenstroms beim Laser-Pulver-Auftragschweißen

ohne fremde Hilfe selbstständig verfasst und nur die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe. Wörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Werken entnommene Stellen sind unter Angabe der Quellen kenntlich gemacht.

- die folgende Aussage ist bei Gruppenarbeiten auszufüllen und entfällt bei Einzelarbeiten -

Die Kennzeichnung der von mir erstellten und verantworteten Teile der -bitte auswählen- ist erfolgt durch:

Hamburg

Ort

30.11.2021

Datum

Unterschrift im Original