



Entwicklung einer lokalen Pulverauftragung für das Mehrkomponenten-SLS

Bachelor-Thesis

von

Ulf Schmerbeck

Matrikelnummer: 007200802

vorgelegt am

13. August 2010

Betreuer im Unternehmen:

Dr.-Ing. Jan Blömer

Betreuer an der Hochschule:

Prof. Peter Neumann

Institut für mechanische Antriebstechnik

Fachbereich Mechatronik und Maschinenbau

Hochschule Bochum

Eidesstattliche Versicherung

Ich versichere an Eides statt durch meine Unterschrift, dass ich die vorstehende Arbeit zum Thema »Entwicklung einer lokalen Pulverauftragung für das Mehrkomponenten-SLS« selbständig und ohne fremde Hilfe angefertigt und alle Stellen, die ich wörtlich oder annähernd wörtlich aus Veröffentlichungen entnommen habe, als solche kenntlich gemacht habe, sowie mich keiner anderen als der angegebenen Literatur oder sonstiger Hilfsmittel bedient habe. Die Arbeit hat in dieser oder ähnlicher Form noch keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegen.

Bochum, 12. August 2010

Ulf Schmerbeck

Danksagung

Hiermit möchte ich mich bei all denen bedanken, die mich während meiner Praxisphase und Bachelorarbeit unterstützt haben.

Mein herzlichster Dank gilt Herrn Neumann, der mir als betreuender Professor bei der Lösung auftretender Probleme geholfen hat und auch in seiner Freizeit auf viele E-Mails antwortete.

Des Weiteren möchte ich Rasit Özgüc und meinem Betreuer Jan Blömer meinen Dank ausdrücken, die mir immer mit Rat und Tat beim Schreiben der Bachelorarbeit und bei der Bearbeitung praktischer Problemstellungen geholfen haben.

Auch den anderen Mitarbeitern und Abschlussarbeitern der Fraunhofer UMSICHT möchte ich für das angenehme Betriebsklima und ihre Hilfsbereitschaft danken.

Zu guter Letzt bedanke ich mich noch bei meiner Familie, insbesondere bei meinen Eltern und meiner Freundin, die mir den Rücken während dieser Zeit freigehalten haben und jede neue Version der Bachelorarbeit ohne Murren probegelesen haben.

Kurzfassung

Gegenstand der hier vorgestellten Arbeit ist zum einen der Bau und die Inbetriebnahme einer Versuchsanlage zum Selektiven Lasersintern (SLS) und zum anderen die Entwicklung eines geeigneten Mechanismus zur differenzierten Aufbringung verschiedener Werkstoffe auf ein Pulverbett. Die erbrachten Tätigkeiten beim Bau der Anlage und deren Inbetriebnahme bauten auf der Vorarbeit eines anderen Diplomarbeiters auf und umfassten den Anbau fehlender Komponenten und Anpassungsarbeiten bis hin zur Konstruktion wichtiger Bauteile und die Auftragsvergabe an Fremdfirmen und die hauseigene Werkstatt. Nach erfolgter Inbetriebnahme der Versuchsanlage zum Sintern von Kunststoffen wurden Möglichkeiten untersucht, verschiedene Pulvermaterialien selektiv und klar voneinander abgegrenzt aufzutragen. Ziel der Untersuchung ist die Weiterentwicklung der Technik des Lasersinterns durch die Konstruktion einer solchen Pulverauftragung und deren Automatisierung. Dazu wurden nach ausgiebiger Literaturrecherche die ausgewählten Dosierverfahren (elektrostatische und vibrationsangeregte Pulverdosierung) getestet. Es wurde eine erfolgreiche Vibrationsdosierung von Pulvern durch eine Pasteurpipette erreicht und das Konzept eines auf einem Pipettenarray basierenden Dosierapparates vorgestellt. Dieses Konzept könnte einen weiteren Schritt hin zu einer industriellen Nutzung dieses Verfahrens darstellen.

Schlagwörter: Rapid Technology, Rapid Prototyping, Rapid Manufacturing, Selektives Lasersintern, SLS, Pulveraufbringung, Mehrkomponenten

Abstract

In this thesis the construction of a device for selective lasers intering (SLS) and its bringing into service, as well as the development of a multi-material powder deposition mechanism are described. The construction tasks performed at the experimental lasers intering machine are based on the work of a former student worker. They consist of component installations and adjustments as well as the design of important parts and the placement of orders. After bringing the sintering station for synthetics into service, an investigation of mechanisms of powder deposition is carried out. Possibilities to deposit powders selectively and clearly seperated are being analysed. The goal of this analysis is the further development of the lasers intering technology through the design of such a powder deposition method and its automation. For this purpose an extensive literature search is done, followed by experiments concerning the preselected methods of powder deposition (electrostatic and vibratory dispensing). By using a pasteur-pipette, a successful powder deposition by means of vibration is realized. Finally, the concept of a dispensing apparatus based on a pipette array is presented. This concept could be another step towards an additional industrial application of lasers intering.

Keywords: Rapid Technology, Rapid Prototyping, Rapid Manufacturing, Lasersintering, SLS, Powder deposition, Multi-material

Inhaltsverzeichnis

1	Ein	${f leitung}$	1
2	Gru	ındlagen	3
	2.1	Rapid Prototyping - Überblick	3
	2.2	Das Selektive Lasersintern	6
	2.3	Das Projekt »Bionic Manufacturing«	9
3	Die	SLS-Versuchsanlage	13
	3.1	Überblick	13
	3.2	Baugruppe Laser	15
	3.3	Baugruppe Bauraum	17
	3.4	Baugruppe Heizung	19
	3.5	Baugruppe Rakel	20
	3.6	Baugruppe Tür	21
	3.7	Baugruppe Elektrik	22
4	Ent	wicklung einer Multimaterialauftragung	24
	4.1	Allgemeines	24
		4.1.1 Funktionsanalyse	24
		4.1.2 Schüttguttechnik	24
		4.1.3 Verfahrensprinzipien	27
	4.2	Stand der Wissenschaft und Technik	29
		4.2.1 Pneumatische Verfahren	29
		4.2.2 Volumetrische Verfahren	30
		4.2.3 Verfahren der Schneckenförderung	32

IIIHA.	LISAFL	RZEICHNIS	V 11
	4.2.4 I	Elektrostatische Verfahren	. 34
	4.2.5	Vibrationsverfahren	. 40
4.3	Vorausv	vahl der geeignetsten Verfahren	. 45
4.4	Versuch	e zum elektrostatischen Einzelschichtauftrag	. 48
4.5	Versuch	e zur Vibrationsdosierung	. 54
	4.5.1 I	Konstruktionsversuche	. 56
	452	Materialversuche	. 67

76

5 Fazit

Abkürzungsverzeichnis

BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung	1
$CaCo_3$	Calciumcarbonat	7
$CaTiO_3$	Calciumtitanoxid(Perowskit)	6
dpi	dots per inch	8
EPDM	Ethylen-Propylen-Dien-Kautschuk	7
Fe_3O_4	Eisenoxid(Zunder)6	7
FPM	Freeform Powder Molding	7
NR	Naturkautschuk (Natural Rubber)	7
PA 12	Polyamid 124	9
PE	Polyethylen	9
RP	Rapid Prototyping	3
SiC	Siliciumcarbid6	7
SiO_2	Siliziumdioxid	6
SLS	Selektives Lasersintern	5
TiO_0	Titandiovid 66	7

Abbildungsverzeichnis

2.1	Vorgehensweise beim Rapid Prototyping [Geb04]	4
2.2	Übersicht der Rapid Prototyping-Verfahren nach [Jan09]	5
2.3	Prinzip des SLS [Geb04]	7
2.4	Beispiele für biologische Konstruktionen	10
2.5	Freischwingerentwurf nach C. Mattheck [BBJ ⁺ 10]	11
2.6	Zelluläre Struktur [BBJ+10]	12
3.1	Die SLS-Anlage	14
3.2	Baugruppe Laser	16
3.3	Kolben	17
3.4	Baugruppe Bauraum	18
3.5	Baugruppe Rakel	21
4.1	Haftkräfte in Pulvern [Sti04]	26
4.2	Fließarten in Silos [Sch06]	27
4.3	Fließstörungen in Silos [Sch06]	28
4.4	Arten pneumatischer Schüttgutförderung	29
4.5	Pneumatische Dosiergeräte	30
4.6	Kontinuierliche volumetrische Verfahren	31
4.7	Intermittierende volumetrische Verfahren mit Arrayanordnung der Zylinder	31
4.8	Schneckenförderer mit verbesserten Fließeigenschaften	32
4.9	Kammerfüllung in Schneckendosierern	33
4.10	Schneckendosierer	33
4.11	Elektrostatische Ventile mit externen Elektroden	34

4.12	Elektrostatisches Ventil mit internen Elektroden [YE07]	35
4.13	Elektrostatische Punktdosierer	36
4.14	Funktionsweise Xerographiegerät [KZ99]	37
4.15	Bauteil in Pulver bei Kumar [Kum00]	37
4.16	Prinzip eines Laserdruckers [LLCD02]	39
4.17	Versuch mit Plattenelektrode nach Liew [LLCD02]	40
4.18	Horizontaler Pulvertransport nach Mracek [MW05] $\ \ldots \ \ldots \ \ldots \ \ldots$	40
4.19	Pulverbetrachtung in Kapillarrohren	41
4.20	Versuche von Matsusaka	42
4.21	Versuche von Li und Yang	43
4.22	Druckbeispiel nach Yang [YE04d]	43
4.23	Kapillarrohrbauarten nach Yang [LYE09]	44
4.24	Versuchsaufbau Elektrostatik	48
4.25	Auftragungshilfe	50
4.26	Versuchsfotos (chronologisch von links nach rechts)	51
4.27	Streuung bei Übertragung auf den Transporter	51
4.28	Pulververhalten bei Übertragung auf den Transporter (Punkte 14.) $\ \ldots$.	52
4.29	Streuung bei Übertragung auf das ungeladene Blech	52
4.30	Pulveranordnung unter dem Transporter	53
4.31	Versuchsgrundaufbau mit beispielhafter Anordnung von Piezoaktor und Pi-	
	pettenhalter	55
4.32	Mikroskopaufnahmen (200-fache Vergrößerung) der verwendeten Konstruk-	
4.00	tionsversuchspulver	56
	Aufbau des Pipettenhalters Nummer 1 mit Piezoaktor und Pipette	57
	Lagerung und resultierendes Schwingungsverhalten des Piezoaktors [EPZ10]	58
	Aufbau des Pipettenhalters Nummer 2 mit Piezoaktor und Pipette	58
	Durch Pendelbewegung hervorgerufener Verlauf einer dosierten Linie	59
	Verhalten der Glaskugeln bei einem Signalpuls	60
	Dosierte Punkte und Linien bei unterschiedlichen Signaldauern	61
	Aufbau des Pipettenhalters Nummer 3 mit Piezoaktor und Pipette	61
4.40	Rutschkegel	62

4.41	Aufgebohrter Trichter mit Zulaufrohr über Pipette	63
4.42	Aufbau des Pipettenhalters Nummer 3 mit Piezoaktor und Pasteurpipette $% \left(1\right) =\left(1\right) +\left(1$	64
4.43	Aufbau und dosierte Punkte	65
4.44	Verhalten der Duraform-Pulvers bei einem Signalpuls	66
4.45	Muster aus Duraform	66
4.46	Dosierte Punkte der verschiedenen Materialien (Gruppe 1)	70
4.47	Dosierte Punkte der verschiedenen Materialien (Gruppe 2)	71
4.48	Pipettenspitzen und zu füllendes Quadrat	73
4.49	Konzept des Auftragungsgerätes	74
4 50	Konzent der Pulverdosierung	75

Kapitel 1

Einleitung

Die vorliegende Arbeit ist in das Verbundprojekt »Bionic Manufacturing« des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF), das sich mit der Herstellung von Bauteilen, die auf bionischen Gestaltungsrichtlinien basieren, beschäftigt, eingebettet. Das Ziel des Projektes ist die Verwendung verschiedener Materialien in einem Bauteil zur örtlichen Beeinflussung der Bauteileigenschaften wie zum Beispiel Festigkeit und Elastizität.

Im Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik UMSICHT werden Sinterfähigkeit und Verbindungsneigung unterschiedlicher Thermoplasten im Lasersinterprozess untersucht und eine experimentelle Lasersinteranlage gebaut. In dieser soll das Mehrkomponenten-SLS erfolgen, bei dem Bauteile mit freier Formgebung (wie beim herkömmlichen Lasersintern bereits möglich) und neuartiger freier Materialverteilung hergestellt werden können. Hierzu wird allerdings eine Dosiertechnik benötigt, die in der Lage ist, verschiedene pulverförmige Werkstoffe selektiv und klar voneinander abgegrenzt auf ein Pulverbett aufzutragen. Die Aufgabenstellung für diese Bachelorarbeit ist es, eine solche Dosiertechnik zu finden.

Zunächst wird dem Leser im ersten Schritt ein Überblick über das Feld des Rapid Prototyping gegeben, woraufhin das Thema des Selektiven Lasersinterns als Rapid Prototyping-Verfahren in den Fokus gerückt wird. Am Ende der Grundlagen wird das Projekt des »Bionic Manufacturing« beschrieben und die hier geplante Anwendung des Selektiven Lasersinterns dargestellt.

Im darauffolgenden Kapitel 3 wird die SLS-Versuchsanlage beschrieben, deren Bau einen Teil der praktischen Tätigkeiten während der Bachelorarbeitsphase am Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik UMSICHT darstellte.

Der Hauptteil der vorliegenden Arbeit befasst sich mit der Entwicklung einer Multimaterialauftragung. Zu diesem Zweck wird, nachdem Grundlagen der Schüttguttechnik vermittelt worden sind, zunächst eine umfangreiche Literaturrecherche zu den im Vorhinein genannten verschiedenen Verfahrensprinzipien der Pulverdosierung durchgeführt. Nach der

Vorstellung der verschiedenen in der Literatur vermerkten Ansätze werden diese bewertet und eine Vorauswahl getroffen. Die vorausgewählten Verfahren werden durch Versuche geprüft. Aus den Ergebnissen der Versuche wird daraufhin auf das bestgeeignete Verfahren geschlossen.

Sollte eines der Verfahren in den Versuchen erfolgreich sein, soll ein Ausblick in Form einer Festlegung der weiteren Vorgehensweise für eine erfolgreiche Umsetzung des Prinzips in der Versuchsanlage gegeben werden.

Kapitel 2

Grundlagen

2.1 Rapid Prototyping - Überblick

Unter den in DIN 8580 aufgeführten Fertigungsverfahren

- Urformen
- Umformen
- Trennen
- Fügen
- Beschichten und
- Stoffeigenschaften ändern

lassen sich die Verfahren des Rapid Prototyping (RP) am ehesten dem Oberbegriff des Urformens zuordnen [Geb07].

Erste Verfahren des Rapid Prototyping wurden in den 1980er Jahren entwickelt und haben mittlerweile den Schritt hin zum Rapid Manufacturing (schnelle und flexible Herstellung von Fertigteilen, meist bei kleinen Stückzahlen) und Rapid Tooling (schnelle Herstellung von Werkzeugen) vollbracht. ¹

Aufgrund der Möglichkeit, nahezu jegliche Bauteilform darzustellen, ordnet man die Rapid Prototyping-Verfahren den sogenannten generativen Fertigungsverfahren zu. Als solche werden alle Verfahren bezeichnet, die Bauteile durch Auf- und Aneinanderfügen von Volumenelementen, vorzugsweise schichtweise, herstellen [Geb07]. Sie umfassen folglich sowohl

¹Der Begriff "Rapid" bzw. schnell ist jedoch nur dann zutreffend, wenn es um die Erzeugung komplexer geometrischer Figuren geht. Die Herstellung einfacher Bauteile ist durch konventionelle Fertigungsverfahren sehr viel schneller möglich.

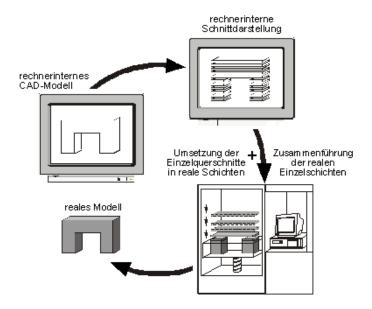


Abbildung 2.1: Vorgehensweise beim Rapid Prototyping [Geb04]

das Rapid Prototyping als auch Rapid Tooling und Rapid Manufacturing.

Generative Fertigungsverfahren erlauben Geometrien, Hinterschneidungen und innere Strukturen, die mit konventionellen Fertigungsverfahren nicht herstellbar sind.

Da fast alle generativen Fertigungsverfahren historisch gesehen aus dem Rapid Prototyping entstanden und danach nur noch für weitere Verwendungszwecke modifiziert wurden, wird im Folgenden Rapid Prototyping-Verfahren als Synonym für alle generativen Fertigungsverfahren verwendet.

Anwendung im Rapid Manufacturing finden die generativen Fertigungsverfahren vor allem bei der Herstellung individueller Teile (z.B. Prothesen) in Einzel- oder Kleinserienfertigung und bei der Fertigung sehr kleiner Teile (im μ m-Bereich) bei großer Stückzahl. Die Wirtschaftlichkeit generativer Fertigungsverfahren steigt mit der Komplexität der herzustellenden Bauteile [Geb07].

Im Gegensatz dazu werden die generativen Fertigungsverfahren als Rapid Prototyping bei nahezu allen Arten von Bauteilen eingesetzt.

Ein großer Vorteil der Rapid Prototyping-Verfahren, der zu ihrer breiten Anwendung geführt hat, ist neben der freien Formgebung die schnelle Umsetzung von CAD-Geometrien in dreidimensionale Bauteile ohne zusätzliche Verwendung von Formen oder Werkzeugen. Dabei wird das CAD-Volumenmodell zunächst digital in horizontale Schichten geschnitten (das sogenannte Slicen), die Schichtdaten auf den Prototyper (Rapid Prototyping-Anlage) übertragen und das Bauteil danach Ebene für Ebene dem ausgewählten Verfahren gemäß aufgebaut (Abb. 2.1).

Lasergestützte	Verarbeitbare	Nicht lasergestützte
Verfahren	$\mathbf{Werkstoffe}$	Verfahren
Stereolithographie	Photopolymer	Solid Ground Curing
	Thermoplast	Extrusionsverfahren
Selektives Lasersintern	Wachs	
	Metall	
	Sand	
Schicht-Laminat-		
Verfahren	Papier	
	Keramik	3D-Printing

Abbildung 2.2: Übersicht der Rapid Prototyping-Verfahren nach [Jan09]

Diese Vorgehensweise ist bei allen RP-Verfahren identisch. Der Hauptunterschied besteht in der Art und Weise, wie oben genannte Schichten erzeugt werden. Dazu hat jede Verfahrensgruppe ihr eigenes Prinzip. Grundsätzlich kann das Material entweder direkt in Strangoder Bahnenform aufgebracht oder die Eigenschaften eines bereits vorhandenen Materials beeinflusst werden (z.B. partielles Aufschmelzen oder Erstarren).

Eine gute Gliederung der Verfahren ermöglicht die Unterscheidung zwischen lasergestützten und nicht-lasergestützten Verfahren und nach verwendbaren Materialien (Abb. 2.2).

Lasergestützte Verfahren haben den Nachteil, dass die Anlagenkosten durch die teuren Laserkomponenten in die Höhe schnellen, arbeiten jedoch meist genauer als nicht lasergestützte Verfahren. Die weitere Unterscheidung nach den verwendbaren Materialien ist nötig, um die Eignung zum Rapid Manufacturing darzustellen (Mit welchem Verfahren ist die Verarbeitung des gewünschten Endwerkstoffes möglich?) und um einen Überblick über die Haltbarkeit des Prototypen zu geben.

Nicht eingegangen wird bei dieser Unterteilung hingegen darauf, ob eine manuelle Nachbearbeitung wie z.B. das Entfernen von Stützkonstruktionen erforderlich ist und welche Genauigkeit die jeweiligen Verfahren erreichen.

Zu den fünf Verfahren, die besondere Aufmerksamkeit von Seiten der Industrie geweckt haben, gehören Stereolithographie (SL), Selektives Lasersintern (SLS), Schicht-Laminat-Verfahren (LLM), Extrusionsverfahren (FLM) und 3D-Printing (3DP) [Geb04]. Diese Verfahren zeichnen sich insbesondere durch ihren hohen Bekanntheits- und Entwicklungsgrad aus und werden bereits vielfältig eingesetzt.

Das Gebiet der generativen Fertigungsverfahren befindet sich nach wie vor in der Entwicklung. In kurzen Abständen werden neue Verfahren und Anlagenkonzepte vorgestellt, weswegen eine abschließende Übersicht über die Verfahren nicht möglich ist.

2.2 Das Selektive Lasersintern

Im Folgenden soll das Verfahren des Selektiven Lasersinterns genauer analysiert werden. Es wurde für das Projekt »Bionic Manufacturing« ausgewählt, da es eines der am weitesten verbreiteten und erforschten Verfahren des Rapid Prototyping ist. Zudem bietet es die Möglichkeit der punktgenauen Materialverteilung, welche zum Beispiel beim Extrusionsverfahren durch Strangauftrag nicht gegeben ist, und ermöglicht die Verarbeitung verschiedenster Werkstoffe.

Das SLS ist ein lasergestütztes Verfahren zur Herstellung von Bauteilen aus pulverförmigen Werkstoffen wie Kunststoffen, Metallen, Keramiken, Sanden, etc.. Es ist von anderen Verfahren des Strahlschmelzens wie Schmelzen mittels Elektronen- oder Infrarotstrahlen abzugrenzen, die von einigen Herstellern entwickelt wurden.

Im Gegensatz zum üblichen Sintern wird hierbei auf hohen Druck und lange Reaktionszeiten verzichtet. Dennoch kommt die Namensentlehnung nicht von ungefähr, da beide Verfahren pulverförmige Werkstoffe teilweise oder ganz aufschmelzen und dadurch mehr oder weniger poröse Bauteile erzeugt werden.

Zum Selektiven Lasersintern werden Pulver aus verschiedenen Werkstoffen mit Partikelgrößen üblicherweise zwischen 20 und 50 μ m verwendet [Geb07]. Im Folgenden wird, wenn nicht anders erwähnt, vom Lasersintern von Kunststoffen gesprochen, welches im Vergleich zum Lasersintern von Metallen andere Prozessparameter aufweist.

Eine Lasersinteranlage besteht üblicherweise² aus folgenden Teilen:

- Laser: Dient zum lokalen Aufschmelzen des Pulvers.
- Scanner: Steuert den Laserstrahl.
- Vorratsbehälter mit Kolben: Ist mit Vorratspulver gefüllt.
- Baubehälter mit Kolben: Enthält nicht geschmolzenes Pulver und das eingeschlossene Bauteil.
- Überschussbehälter: Überschüssiges Material wird hier abgeladen.
- Rakel oder Walze: Trägt schichtweise Pulver vom Vorrats- auf den Baubehälter auf und schiebt überschüssiges Pulver in den Überschussbehälter.
- Heizelemente: Heizen die Pulveroberflächen bis kurz unter die Schmelztemperatur auf.

²Häufig werden auch andere Bauarten zur Erklärung benutzt, die hier verwendete liefert jedoch die übersichtlichste Darstellung des Arbeitsprinzips des SLS.

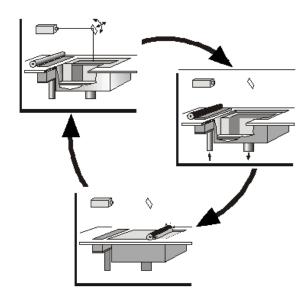


Abbildung 2.3: Prinzip des SLS [Geb04]

Abb. 2.3 zeigt beispielhaft die Vorgehensweise beim Selektiven Lasersintern³.

Zunächst wird der Kolben des Vorratsbehälters eine Stufe ausgefahren und der Kolben des Baubehälters um eine Schichtdicke (üblicherweise zwischen 0,1 und 0,3 mm [Jan09]) abgesenkt. Dadurch entsteht über dem Vorratsbehälter eine Pulvererhöhung und über dem Bauzylinder eine Vertiefung, in der das teilweise fertiggestellte Bauteil liegt.

Daraufhin wird das Pulver von einem Rakel oder einer Auftragungswalze über den Bauzylinder geschoben und erzeugt dort eine neue Schicht. Um eine vollständige Füllung des Bauraums zu gewährleisten, wird die Oberfläche oder der Hub pro Schritt des Vorratskolbens größer gewählt als die entsprechenden Parameter des Baubehälters. Überschüssiges Pulver wird von der Transportvorrichtung in den Überschussbehälter geschoben und kann zu einem gewissen Teil (z.B. bis zu 100 % bei Polyamidpulvern) für weitere Bauprozesse wiederverwendet werden. Zur Wiederverwendung wird neues Pulver mit 30 bis 50 % Altpulver vermischt [Geb07].

Während des gesamten Bauprozesses sind Heizstrahler auf Bau- und Vorratsbehälter gerichtet, um die für den nächsten Schritt wichtigen obersten Pulverschichten bis kurz unter die Schmelztemperatur zu erhitzen. Nach der Aufwärmphase wird versucht, die Temperatur im gesamten Bauraum konstant zu halten. Eine exakte Temperaturregelung ist gerade bei der Kunststoffverarbeitung von äußerster Wichtigkeit, um Verzug (teilweise auch Verfärbung) bei zu hohen Temperaturen oder durch zu niedrige Temperatur schlecht versinterten Teilen vorzubeugen. Des Weiteren wird durch das Vorheizen die vom Laser aufzubringende Energie zum Aufschmelzen des Materials verringert und somit die Prozessgeschwindigkeit

 $^{^3 \}ddot{\text{U}}$ berschussbehälter hier leider nicht abgebildet.

erhöht.

Nach erfolgter Pulverauftragung wird eine Schicht durch den Laser örtlich aufgeschmolzen, wobei sie sich mit der darunterliegenden Schicht verbindet. Stützmaterial bei etwaigen Überhängen wird nicht benötigt, da das restliche Pulver als Stütze fungiert.

Nach erfolgter Generierung einer Schicht beginnt der Prozess von Neuem und wird so lange wiederholt, bis das komplette Bauteil hergestellt ist.

Um eine gleichmäßige Schrumpfung zu gewährleisten, werden auf das fertige Bauteil noch mehrere Schichten Pulver aufgetragen. Danach wird es langsam im Pulverbett abgekühlt und schlussendlich entnommen.

Bei diesem Verfahren ist eine mechanische Nachbearbeitung nur erforderlich, wenn Wert auf eine gute Oberflächenbeschaffenheit gelegt wird, da das Werkstück zum "Wachsen" neigt, das heißt Anbacken teilgeschmolzener Pulverkörner an das Äußere des Werkstücks (auch als Pelz bezeichnet) [Geb07].

Zur Vermeidung einer Oxidation des Pulvers findet der SLS-Prozess normalerweise unter Inertgas-Atmosphäre (meist Stickstoff) statt.

Ein entscheidender Schritt für die Zukunft des Selektiven Lasersinterns ist die Möglichkeit der Herstellung von Bauteilen aus mehreren unterschiedlichen Materialien. Grundsätzlich ist das SLS, wie bereits oben erwähnt, fähig, verschiedenste Materialien zu verarbeiten. Daher ist es für diese Multimaterialanwendung geeignet. Es ist eine nicht nur mögliche, sondern für die weitere Wettbewerbsfähigkeit notwendige Verbesserung, belastungsgerechte Materialien lokal im Werkstück einzubringen. Dies erweitert die Vorteile generativer Fertigungsverfahren hinsichtlich beliebiger geometrischer Form um die gestalterische Freiheit der Materialauswahl. Beispielhafte potenzielle Hauptanwendungsgebiete sind Konstruktion und Design. Mögliche konstruktive Anwendungen sind zum Beispiel Kühlkanäle aus Kupfer in Stahlgussformen, belastungsgerechte Materialverwendung bei Bauteilen mit stark unterschiedlichen Belastungen und Gebrauchsgüter mit lokal unterschiedlichen haptischen und optischen Eigenschaften. Beispielhaft für Letzteres kann ein Motorradintegralhelm genannt werden, dessen Inneres elastisch sein muss, wohingegen der Rest des Helmes möglichst schlagfest und stabil auszuführen ist. Ein solcher Helm wäre mit Hilfe des Selektiven Lasersinterns in einem Stück herstellbar.

2.3 Das Projekt »Bionic Manufacturing«

Diese Arbeit ist Teil des Projektes »Bionic Manufacturing«, das unter Leitung des Fraunhofer-Instituts für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik UMSICHT in Kooperation mit folgenden Unternehmen durchgeführt wird:

Fraunhofer IWM: Fraunhofer-Institut für Werkstoffmechanik, beschäftigt sich mit der Zuverlässigkeit und dem Einsatzverhalten von Werkstoffen und Bauteilen

Folkwang Universität: Studiengang Industrial Design der Folkwang Universität

rpm GmbH: rapid product manufacturing GmbH, Dienstleistungsunternehmen für die Fertigung von Prototypen aus Kunststoff und Metall im Rahmen der Produktentwicklung

Authentics GmbH: Produktion und Vertrieb einfacher, funktionaler und industriell gefertigter Designprodukte für den täglichen Gebrauch

LSS GmbH: Laser-Sinter-Service GmbH, Maschinenservice im Bereich des Lasersinterns und der Stereolithographie⁴

Sintermask GmbH: Hersteller von Systemen zum Selektiven Masken Sintern (SMS)⁴

Ziel dieses Projektes ist gemäß dem Projektantrag [BBJ⁺09] die Entwicklung einer biologisch inspirierten Fertigungstechnik sowie die Darstellung ihrer Leistungsfähigkeit an einem exemplarischen bionischen Bauteil.

In der Bionik⁵ geht es um die Übertragung biologischer Vorbilder auf technische Problemstellungen. Es gibt zwar bereits zahlreiche Anwendungen der Bionik wie etwa Winglets an Flugzeugflügeln, Klettverschluss etc., dennoch ist das Potenzial der Bionik bei Weitem noch nicht vollständig erschlossen.

Grundlage und Ansatzpunkt des Projektes ist die erstaunliche Leistungsfähigkeit biologischer Organismen trotz eingeschränkter Materialvielfalt. Bei vielen Tieren und Pflanzen kann man eine lokale Festigkeit bzw. Flexibilität (je nachdem was an dieser Stelle benötigt wird) beobachten, die gleichartige technisch erzeugte Produkte nicht leisten können.

Häufig ist eine technische Eigenschaftsanpassung nur global (am ganzen Bauteil) möglich, was eine Erhöhung des Preises oder Gewichtes nach sich zieht. Lokal können Bauteile meist nur durch eingesetzte Teile angepasst werden, wodurch es an den Verbindungsstellen zu Problemen und nachteiligem Verhalten kommen kann.

⁴Einstieg in das Projekt zum 01.05.2010

⁵Kofferwort zusammengesetzt aus Biologie und Technik

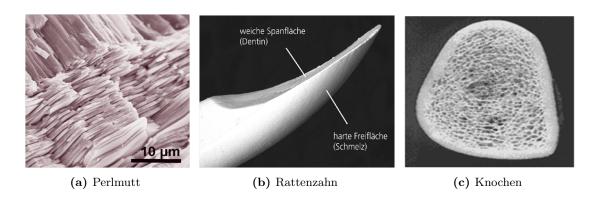


Abbildung 2.4: Beispiele für biologische Konstruktionen

In der Natur hingegen sind Multimaterialanwendungen nicht nur möglich, sondern üblich und werden nahtlos und ohne Verbindungsprobleme generiert. Als Beispiele sind Perlmutt, das aus harten, spröden Plättchen mit einem flexiblen Verbundwerkstoff besteht (Abb. 2.4(a)) und der Rattenzahn, der sich durch die Kombination eines weichen und eines harten Werkstoffes ständig selbst schärft, zu nennen (Abb. 2.4(b)).

Eine weitere Technik der Natur ist die Verwendung spezieller Strukturen. Hierdurch kann zum Beispiel das Gewicht und der Materialaufwand minimiert werden bei gleichzeitiger Maximierung der Tragfähigkeit. Beispiele dafür sind Bienenwaben oder der menschliche Knochen mit seinem porösen Innenleben (Abb. 2.4(c)).

Hier findet sich auch der bionische Ansatz des Projektes wieder. Es soll die Möglichkeit untersucht werden, mit Hilfe des Selektiven Lasersinterns als generatives Fertigungsverfahren solche bionischen Materialverbunde und Strukturen technisch herzustellen.

Das Projekt gliedert sich in zwei Entwicklungslinien:

In der makroskopischen Entwicklungslinie sollen die bionischen Konstruktions- und Optimierungsprinzipien untersucht und umgesetzt werden. Aus ihr werden die Vorgaben für die Maschinen- und Pulverentwicklung abgeleitet. Es soll ein Freischwinger als Demonstrationsobjekt gestaltet werden, der hohen dynamischen Belastungen standhalten kann und ästhetischen Ansprüchen gerecht wird.

Die mikroskopische Entwicklungslinie umfasst die Weiterentwicklung des SLS hin zu einer Mehrkomponentenanwendung. Es sollen Bauteile mit lokal veränderlichen oder gradierten Werkstoffeigenschaften hergestellt werden können. Zu diesem Zweck soll eine Mehrkomponenten-Dosiertechnik entwickelt und in die Versuchsanlage integriert werden. Des Weiteren wird die Kompatibilität der verschiedenen Werkstoffe und deren mikromechanische Eigenschaften untersucht, um entweder makroskopische (lokale Materialeinbringung im Bauteil) oder mikroskopische (Mehrkomponenten-Pulver, sogenannte Dry-Blends) Verbundwerkstoffe herzustellen.

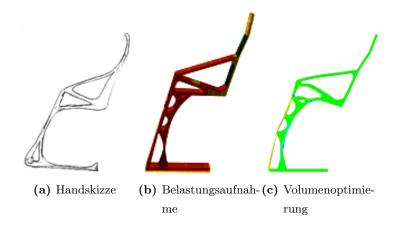


Abbildung 2.5: Freischwingerentwurf nach C. Mattheck [BBJ+10]

Zum Ende des Projektes werden makroskopische und mikroskopische Entwicklungslinie zusammengeführt.

Das Projekt »Bionic Manufacturing« wurde im Juni 2009 genehmigt und hat eine Laufzeit von drei Jahren.

Im Laufe des ersten Jahres wurde von der Authentics GmbH eine Umfrage nach der Bekanntheit des Begriffes Bionik durchgeführt. Diese ergab, dass den meisten Deutschen der Begriff Bionik gänzlich unbekannt ist. Dies legt nahe, dass hinsichtlich der Vermarktung bionischer Produkte ein erhebliches Potenzial vorhanden ist, da der Markt noch vorwiegend unerschlossen ist. Außerdem zeigte sich, das die Kaufbereitschaft für bionische Produkte zu einem entsprechend höheren Preis stark einkommensabhängig ist.

Des Weiteren ist ein erster Designentwurf für den als Demonstrationsobjekt geplanten Freischwinger erstellt, digital belastet und volumenoptimiert worden (Abb. 2.5).

Außerdem wurden vom Fraunhofer IWM bionische zelluläre Strukturen entworfen und untersucht (Abb. 2.6). Sie sind angelehnt an die schwammartige Strukur der Spongiosa im Inneren des Knochens, die aus feinen Knochenbälkchen (Trabekeln) besteht.

Bei der Fraunhofer UMSICHT wurde eine Versuchsanlage zum Selektiven Lasersintern geplant und gebaut, auf die im Zuge dieser Arbeit genauer eingegangen wird.

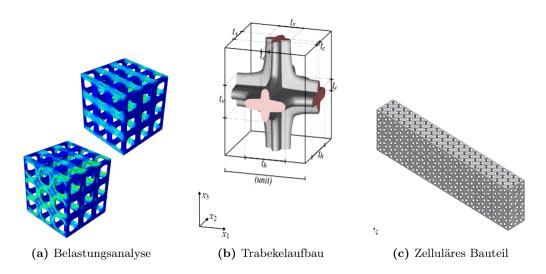


Abbildung 2.6: Zelluläre Struktur $[BBJ^+10]$

Kapitel 3

Die SLS-Versuchsanlage

3.1 Überblick

Die gebaute Lasersinteranlage wurde so konstruiert, dass die Erprobung neuentwickelter Materialien sinnvoll erfolgen kann. Dazu ist sie als Eigenbau konzipiert worden. Dafür sprachen folgende Gründe:

Geringer Mindestpulvereinsatz: Durch eine freie Bauzylinderoberfläche von nur ca. 110 cm² können im Gegensatz zu industriellen Maschinen (z.B. ca. 3025 cm² Bauraumoberfläche bei der Pro 140¹ von 3D-Systems [Geb07]) auch kleine Pulvermengen verarbeitet werden. Insbesondere bei neuentwickelten Pulvern und Pulvermischungen ist es sinnvoll, zum Testen nur geringe Mengen zu erzeugen und zu verwenden. Des Weiteren erlaubt die geringe Gesamtgröße der Versuchsanlage einen einfachen Transport, was die Vorstellung auf Messen und Ähnlichem vereinfacht.

Anpassungsfähigkeit: Der Anlageneigenbau ist sehr viel einfacher zu verändern als eine zugekaufte Anlage. Diese Flexibilität besteht vor allem in der Möglichkeit, nachträglich weitere Komponenten wie zum Beispiel eine Apparatur zum verbesserten Materialauftrag anzubauen. Es ist für ein Forschungsunternehmen wie Fraunhofer UMSICHT ein großer Vorteil, alle Daten der einzelnen Komponenten und deren Zusammenspiel zu kennen, um dynamisch auf veränderte Prozessparameter eingehen zu können.

Preis: Der Preis für neue SLS-Maschinen erreicht häufig 6-stellige Euro-Beträge, wohingegen der Eigenbau bei geplanten Kosten für die Versuchsanlage mit gleichen Funktionen bei unter 50.000 € liegt.

Unabhängigkeit der Software: Ein sehr wichtiger Punkt bei Rapid Prototyping-Maschinen ist die mitunter sehr teure Software. Durch den Eigenbau war man in der

 $^{^{1}\}mathrm{Die}$ Zahl 140 gibt das Fassungsvermögen in Liter
n an.

3.1 Überblick





(a) CAD-Rendering

(b) Foto

Abbildung 3.1: Die SLS-Anlage

Lage eine Software nutzen zu können, die auch beim Fraunhofer-Institut für Lasertechnik ILT verwendet wird. Diese ist nicht nur preiswerter, sondern erlaubt auch Erweiterungen wie z.B. eine integrierte Steuerung für eventuelle Anbauteile und Ähnliches. Dadurch ist die Software wie auch die Hardware flexibel und für zukünftige Änderungen offen.

Die Anlage besteht grundsätzlich aus der SLS-Anlage selbst und einem räumlich getrennten, beweglichen Schaltschrank mit Bedienpultfunktion. Die Rapid Prototyping-Maschine ist 1780 mm hoch und hat eine Grundfläche von 880x880 mm. Der Rahmen besteht aus 40x40L-Profilen von Bosch Rexroth, die Verkleidung aus PVC-Platten mit einer Dicke von 6 mm, die neben optischen Zwecken auch dem Schutz vor eventuell austretender Laserstrahlung dienen. Zum Bau der Komponenten wurde größtenteils Aluminium verwendet, um eine gleiche Wärmeausdehnung aller Teile sicherzustellen. Zur näheren Erläuterung der Komponenten sind diese in folgende Baugruppen gegliedert:

- Laser
- Bauraum
- Heizung
- Rakel
- Tür
- Elektrik

3.2 Baugruppe Laser

Die Laser-Baugruppe besteht aus dem Laser selbst, Strahlführungsrohren, zwei Umlenkspiegeln, einem Shutter, dem Scankopf und einem Laserschutzglas. Die justierbaren Umlenkspiegel erlauben eine genaue Strahlausrichtung und die geringe Größe der U-förmig angeordneten Baugruppe. Alle Optikkomponenten sind auf einer Aluminiumplatte mit 10 mm Dicke montiert, welche mittels Zug- und Druckschrauben höhenverstellbar ausgeführt ist, um eine exakte Fokussierung zu ermöglichen.

Laser: Beim Laser handelt es sich um den Firestar v30 von Synrad, einen 30 W-CO₂-Laser mit einer Wellenlänge von 10,6 μ m.

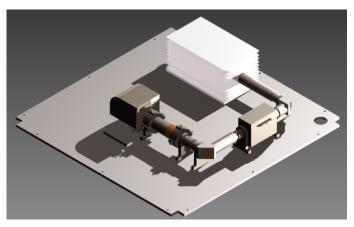
Shutter: Der Shutter ist ein zusätzlicher Sicherungsmechanismus in Form einer mechanischen Unterbrechung des Laserstrahls. Der Strahl wird von einem Spiegel auf der Rückseite des Verschlussmechanismus in die sogenannte Strahlfalle (Beam Dump) geleitet, wo er absorbiert wird. Die Strahlfalle kann wasser- oder luftgekühlt betrieben werden. Bei einem 30 W-Laser kann meist ohne Wasserkühlung gearbeitet werden. Dennoch ist beim Bau der Anlage ein Wasserkühlkreislauf eingerichtet worden, um auch bei großen Verschlusszeiten und dementsprechend hoher Wärmeentwicklung in der Strahlfalle die Betriebssicherheit gewährleisten zu können. Der eingebaute Shutter verfügt des Weiteren über einen integrierten Laser-Pointer zur gefahrlosen Ausrichtung der Optik ohne Verwendung des CO₂-Lasers.

Strahlaufweitung: Um den Laserstrahl exakt fokussieren zu können, wird dieser zunächst aufgeweitet (hier auf ca. 14 mm). Dadurch kann der Fokusdurchmesser erheblich reduziert und somit die Energiedichte entscheidend erhöht werden. Außerdem kann mit Hilfe der Strahlaufweitung die Divergenz des Laserstrahles (d.h. die Strahlverbreiterung mit steigendem Abstand von der Lichtquelle) justiert werden.

Scanner: Der hier verwendete 2D-Galvanometerscankopf dient der Steuerung des Laserstrahles. Er besteht aus zwei Umlenkspiegeln und einem Objektiv. Die Umlenkspiegel sind an Galvanometerantrieben befestigt, die so angeordnet sind, dass ihre Drehachsen senkrecht zueinander stehen. Dies ermöglicht eine Strahllenkung auf jeden Punkt in der Bauebene.

Als Objektiv wird hier eine F-Theta-Linse verwendet. Diese hat die Besonderheit, dass sie im Gegensatz zu Standardlinsen den Fokuspunkt nicht nur an einer bestimmten Stelle, sondern an beliebigen Orten einer Arbeitsebene abbilden kann.

Schutzglas: Laserschutzgläser dienen der Abschirmung des Lasers und der Laserkomponenten vor den Bauraumbedingungen wie Staub und hohen Temperaturen. Außerdem verhindern sie ein Entweichen des Schutzgases. Hier wurde ein ZnSe-Glas verwendet,



(a) CAD-Rendering

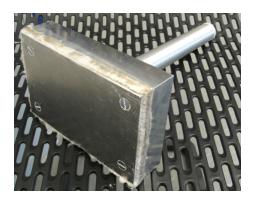


(b) Foto

Abbildung 3.2: Baugruppe Laser

das speziell für den Einsatz bei 10,6 μ m-Strahlung beschichtet wurde und mit den in der Optik üblichen geringen Toleranzen gefertigt wurde. Es ist in ein Adapterstück eingelassen, um den Einbau der Scheibe mit dem Durchmesser 50 mm in die 85x105 mm Öffnung zu ermöglichen. Durch den hohen Materialpreis für Zinkselenidglas ist diese Lösung praktikabler, als eine Scheibe zu kaufen, die die gesamte Öffnung abdeckt.





(a) Baukolben

(b) Vorratskolben

Abbildung 3.3: Kolben

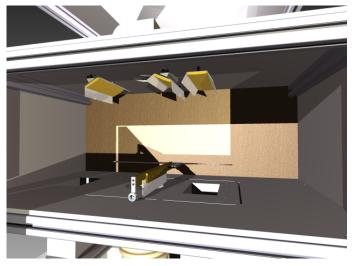
3.3 Baugruppe Bauraum

Der Bauraum umfasst den gesamten Prozessraum, in dem Pulver verarbeitet wird. Er besteht aus drei Zylindern (Bau-, Vorrats- und Überschusszylinder) und den zugehörigen Kolben sowie aus seinen Außenwänden. Der gesamte Bauraum ist mit Vermiculit-Platten bzw. Glaswolle zur Wärmedämmung ausgekleidet. Die Zylinder schließen eben mit der Arbeitsfläche ab, um einen guten Pulvertransport durch den Rakel (Abschnitt 3.5) zu gewährleisten. An der Decke des Bauraumes sind Heizstrahler angebracht (Abschnitt 3.4).

Vorratszylinder und -Kolben: Der Vorratszylinder hat eine rechteckige freie Innenfläche von 140x90 mm und dient der Aufnahme des für den Prozess benötigten Pulvers. Er ist nicht zusätzlich beheizt. Als Hubeinheit verfügt er über einen Spindelmotor mit externer Mutter, über den der Kolben (Abb. 3.3(b)) angetrieben wird. Dieser Motor ist als Linearschrittmotor ausgeführt und besitzt eine Steigung pro Schritt von 3 μ m.

Durch den Linearantrieb wird der Vorratskolben bewegt. Dieser besteht aus einem Verlängerungsstück, in das die Spindel beim Absenken des Kolbens eintauchen kann, dem eigentlichen Kolben, einer Dichtung und einer Deckplatte. Die Dichtung ist aus temperaturbeständigem Filz und dient der Abschirmung des Motors und der Spindel gegen Staub.

Bauzylinder: Die freie Grundfläche des Bauzylinder hat einen Durchmesser von 120 mm. Der Zylinder wird durch eine Heizschnur beheizt, die an der Außenwand spiralförmig eingelassen ist und durch eine Manschette gegen die Umgebung isoliert ist. Die Temperaturerfassung erfolgt über ein Thermoelement, das die Heizschnurtemperatur unter der Isolationsmanschette misst. Unterhalb der Heizung ist der Zylinder mit Bohrungen über den gesamten Umfang versehen, um die Wärmeleitung des Aluminiummantels zu minimieren. Zur Bewegung des Kolbens wird der gleiche Linearschritt-



(a) CAD-Rendering mit zunächst geplanter IR-Strahleranordnung

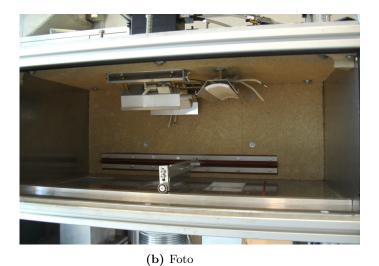


Abbildung 3.4: Baugruppe Bauraum

motor wie im Vorratszylinder verwendet.

Baukolben: Der Baukolben (Abb. 3.3(a)) besteht aus einem Verlängerungsstück, einer Kolbenplatte, einer Vermiculit-Isolierung, einer Heizplatte mit eingelassener Spiralheizung, einem Teflonabstreifer und einer Abdeckplatte. Die Spiralheizung verfügt über ein Thermoelement zur Messung der Kolbentemperatur. Der Teflonabstreifer ist um die Abdeckplatte gebogen und schließt dicht mit der Zylinderwand ab, wodurch übermäßige Wärmeentwicklung und Staub im Bereich des Motors vermieden werden.

Abfallbehälter: Der Abfallbehälter ist von gleicher Form und Größe wie der Vorratszylinder, verfügt aber über keinen Kolben, da er lediglich der Aufnahme überschüssigen Pulvers dient.

Arbeitsfläche: Die Arbeitsfläche besteht aus einer Aluminiumplatte von 800x800x10 mm. Rechteckig um den Bereich des Vorrats- und Bauzylinders wurde eine Nut eingefräst und mit Silikon Rot gefüllt, um die Wärmeübertragung in die nicht beheizten Bereiche zu verringern.

Dichtlippen: Zur Abschirmung des Linearantriebes des Rakels (Abschnitt 3.5) wurden Dichtlippen aus hitzebeständigem Silikon Rot zugeschnitten und durch Blechstreifen an der Bauraumrückwand fixiert. Sie sind zum Bauraum hin aufgestülpt, um Dichtheit insbesondere an den Seiten des Rakelflansches zu gewährleisten.

3.4 Baugruppe Heizung

Heizstrahler: An der Decke des Bauraumes sind drei Infrarot-Heizstrahler angebracht, um die obersten Pulverschichten bis kurz unter die Schmelztemperatur vorzuwärmen. Ein großer Strahler (400 W) steht senkrecht über dem Vorratsbehälter und zwei kleinere (200 W) über dem Bauzylinder. Durch den Lasereinlass, welcher sich genau über dem Baubehälter befindet, mussten letztere drehbar gelagert neben der Öffnung angebaut werden. Problematisch ist die möglichst gleichmäßige Ausleuchtung der Bauzylinderoberfläche, die über die Justierung und Ausrichtung der Strahler erfolgen muss. Ein Strahler über dem Bauzylinder und der Strahler des Vorratsbehälters verfügen über ein Thermoelement zur Bestimmung der Strahlertemperatur.

Heizschnüre: Innerhalb der Anlage befinden sich zwei Arten von Heizschnüren, eine in der Heizplatte des Baukolbens und eine um dessen Zylinder. Erstere besitzt ein integriertes Thermoelement und ist starr und exakt in die Nut auf der Heizplattenoberseite eingelassen, die andere ist flexibel und wurde in eine ausdrehte Spiralnut auf der Bauzylinderaußenwand gewickelt und mit der Isolationsmanschette fixiert. Ihre Temperatur muss über ein separates Thermoelement gemessen werden.

Thermoelemente: Wie bereits beschrieben, sind Thermoelemente in Baukolben, Bauzylinder und den Infrarotstrahlern integriert. Um eine für den SLS-Prozeß unbedingt
erforderliche genaue Temperaturregelung möglich zu machen, wurde ein weiteres
Thermoelement zur Messung der Temperatur der obersten Pulverschicht auf dem
Vorratsbehälter verwendet. Es ist auf Höhe der Arbeitsfläche am Rand des Vorratszylinders angebracht. Bei Bedarf, das heißt falls die Temperaturregelung ungenau
arbeitet, ist es durch die modulare Bauweise der Anlage möglich, weitere Thermoelemente anzubringen.

3.5 Baugruppe Rakel

Die Baugruppe Rakel umfasst alle beweglichen Teile zur Pulverauftragung sowie deren Auflager und Führungen. Sie besteht aus dem Rakel und dem zugehörigen Querträger, dem Linearantrieb, dem Stabilisator und der Laufschiene.

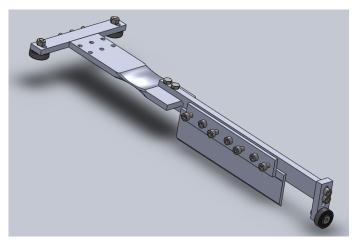
Rakel: Der Rakel dient zur Verteilung des Pulvers über den Baukolben. Einige Anbieter von Lasersinter-Anlagen bieten auch eine Walzenauftragung an, der Rakel aber stellt die einfachste Möglichkeit dar, einen gleichmäßigen Pulverauftrag zu gewährleisten. Er ist eine Klinge, die aus 4 mm starkem Blech mittels einer 45 °-Fase hergestellt wurde. Um eine Höhenverstellung und -ausrichtung zu ermöglichen, wurde er mittels einer Kombination von Zug- und Druckschrauben am Rakelträger durch Klemmung fixiert.

Rakelträger: Der Rakelträger besteht aus Aluminiumflachmaterial von 310 x 25 x 10 mm und ist mit einer Fest-Loslager-Kombination gestützt. Das Loslager ist ein höhenverstellbares Adapterstück, das den Querträger und ein auf einer Laufschiene rollendes Rillenkugellager verbindet. Dieses Widerlager ist notwendig, da der Schlitten des Linearantriebes ein unbrauchbar großes Spiel aufwies. Auf der anderen Seite der Traverse wird diese vom Rakelflansch gestützt, der als Festlager fungiert. Der Rakelflansch ist ebenfalls aus Aluminium, ist aber, um gute Gleit- und Dichteigenschaften in den Dichtlippen zu ermöglichen, an den Berührungsstellen oval eingeformt und poliert. Er ist auf der dem Bauraum abgewandten Seite auf dem Schlitten des Linearantriebes montiert.

Linearantrieb: Der Linearantrieb der Firma A-Drive GmbH dient der Bewegung des Rakels. Da hier geringere Anforderungen an Bewegungsgenauigkeit und höhere an Leistung herrschen, ist er entsprechend größer gewählt als die Kolbenantriebe. Durch die große Länge des Rakelträgers zeigte sich, dass das Schlittenspiel des Antriebs zu groß war (ca. ±15 mm seitliches Spiel am anderen Ende des Trägers). Dem wurde mit dem Bau eines zusätzlichen Stabilisators begegnet.

Stabilisator: Der Stabilisator besteht aus einem 150 mm langen Stück Aluminiumflachmaterial, das quer an den Rakelflansch angeschraubt ist. An dieses ist an jeder Seite ein Kugellager angebracht, welches dank entsprechender Langlöcher im Stabilisator an das Spindelgehäuse gedrückt werden kann. Mit Hilfe dieser Konstruktion konnte das Trägerspiel nahezu komplett beseitigt werden.

Laufschiene: Die Laufschiene dient lediglich der ebenen Führung des Loslagers des Rakelträgers und verhindert, dass das Spindelspiel in der Vertikalen zu Problemen führt.



(a) CAD-Rendering



(b) Foto

Abbildung 3.5: Baugruppe Rakel

3.6 Baugruppe Tür

Die insgesamt ca. 5 kg schwere Tür des Bauraumes besteht, von innen nach außen, aus einer Vermiculit-Platte, einer in diese eingesetzten Glaskeramikscheibe, einer weiteren Vermiculit-Platte, in die wiederum eine Plexiglasscheibe eingesetzt wurde, und einer PVC-Platte zur Verkleidung. Die verschiedenen Platten sind mit Durchgangsschrauben aneinander und an vertikalen Streben montiert, die selbst an der Türeinfassung befestigt sind. Die Einfassung besteht aus 40x40L Aluminiumprofilen und ist an drei Seiten mit einer Dichtung versehen (die obere Dichtung ist am Türrahmen montiert). Aufgrund des hohen Gewichtes der Tür wurden drei Scharniere verwendet.

Vermiculit-Platte: Vermiculit ist ein mineralischer Schall- und Wärmedämmstoff, der häufig im Brandschutz verwendet wird. Die eingesetzte Platte isoliert den Bauraum.

Keramikglas: Das 5 mm starke Keramikglas von 140x190 mm dient als innere Wärmedämmung des Sichtfensters, ist hochtemperaturbeständig und für den Laserstrahl undurchlässig. Diese Glasart wird auch für Kaminscheiben verwendet.

Plexiglas: Das Plexiglas stellt den äußeren Teil des Sichtfensters dar und ist für 10,6 μ m-Strahlung undurchlässig.

3.7 Baugruppe Elektrik

Motoren: Für die Kolbenantriebe wurden Hybrid² Aktuatoren der Firma A-Drive mit einer maximalen Schubkraft von 520 N verwendet. Durch diese Schubkraft ist der Motor in der Lage, den Kolben trotz der durch die starken Dichtungen hervorgerufenen Reibung zuverlässig zu bewegen. Dank einem sehr kleinen Schrittwinkel von 1,8° kann pro Schritt eine Linearbewegung von ca. 3 μ m realisiert werden. Dadurch kann eine exakte Bewegung der Kolben gewährleistet werden.

Der Rakelantrieb ist auch von A-Drive und hat eine maximale Schubkraft von nur 225 N, da er geringere Gegenkräfte in Axialrichtung zu überwinden hat als die Kolbenantriebe. Durch die im Vergleich zu den Kolbenantrieben größere Spindelsteigung hat er bei gleichem Schrittwinkel lediglich eine Positioniergenauigkeit von 25 μ m pro Schritt. Dies ist für die reine Rakelbewegung sehr exakt, wird aber beim vorgesehenen Einbau einer Mehrkomponentendosierung benötigt.

Steuerung: Zur Steuerung der Komponenten, die nicht in das Temperaturmanagement eingegliedert sind, dient ein modular aufgebautes Steuerungssystem der Firma Beckhoff. Es kann bei Bedarf um zusätzliche Steuerungskomponenten erweitert werden.

Regler: Zum Temperaturmanagement wird hier ein 8-Zonen Temperaturregler der Firma Elotech eingesetzt. Er erlaubt sowohl die direkte Temperatursteuerung als auch die Regelung über verschiedenste Parameter. Auch verschiedene Anfahrverhalten (Rampen) sind einstellbar.

PC und Software: Verwendet wurde ein handelsüblicher PC (3 GHz; 3,5 GB RAM; Windows XP). Die darauf installierte Software SLM_Control ist für dieses Projekt geschrieben worden. Sie basiert auf der Software, die das Fraunhofer Institut für Lasertechnik ILT bei den dortigen SLS-Maschinen verwendet. Mitgeliefert wurde außerdem ein Programm zur Lasergravur (Scan2D).

Sonstiges: Die wichtigsten Bestandteile der Elektrik sind die Sicherheitseinrichtungen:

Notausschalter Im Notfall können die Spannungsversorgungen aller Antriebsaggregate sowie des Lasers und Galvoscanners durch Betätigen eines der beiden funktionsgleichen Notausschalter abgeschaltet werden.

²Rotative Bewegung des Schrittmotors wird über die Spindelmutter in eine lineare Bewewgung umgesetzt.

Türschalter Bei Öffnung der Tür sorgt der Türschalter für das Schließen des Shutters und das Ausschalten des »Laser Enable«-Signals, wodurch der Laser keine Strahlung emittieren kann. Dadurch sind beide Sicherheitssysteme redundant ausgeführt.

Signalampel Die Signalampel gibt den Status des Lasers wieder. Das grüne Licht zeigt an, dass die Spannungsversorgung des Lasers eingeschaltet ist. Leuchtet das gelbe Licht, ist der Laser in Bereitschaft, bei ankommendem Signal mit dem Lasern zu beginnen. Leuchtet die rote Lampe, arbeitet der Laser in diesem Moment.

Kapitel 4

Entwicklung einer Multimaterialauftragung

4.1 Allgemeines

4.1.1 Funktionsanalyse

Grundsätzlich lässt sich der Vorgang des Multimaterialauftrags [YE07] in die folgenden vier Unterfunktionen aufteilen:

- Pulveraufnahme aus der Pulverquelle
- Pulvertransport zum Baubereich
- Pulverabgabe/-auftrag
- Messen der Pulvermenge

Häufig werden mehrere Funktionen in einem Bauteil vereint (z.B. Pulvertransport und -aufnahme per Luftströmung). Bei den Funktionen zur Pulverbewegung (Pulveraufnahme, -transport und -abgabe) geht es darum, die Haftkräfte zwischen den einzelnen Pulverpartikeln zu überwinden oder zur Förderung zu nutzen.

4.1.2 Schüttguttechnik

Als Schüttgut bezeichnet man alle aus einzelnen Partikeln bestehenden Materialien, von feinen Pulvern bis hin zu grobstückigen Schüttgütern [Sch06]. Zwischen den einzelnen Partikeln herrschen dabei Haftkräfte, die das Verhalten von Schüttgütern und Pulvern maßgeblich beeinflussen. Sie sorgen für eine starke Abweichung des Verhaltens von Schüttgütern gegenüber dem von Flüssigkeiten und sind äußerst komplex zu berechnen, weswegen meist

4.1 Allgemeines 25

experimentelle Befunde zur Beurteilung des Schüttgutverhaltens herangezogen werden. Die wichtigsten Haftkräfte zwischen Pulverpartikeln sind (Abb. 4.1):

- Van-der-Waals-Kräfte: Zwischenmolekulare Kräfte durch Dipolwechselwirkungen bei elektrisch neutralen Stoffen.
- Elektrostatische Kräfte: Abstoßung gleicher und Anziehung gegensätzlicher Ladungsträger.
- Festkörperbrücken: Brücken zwischen Pulverpartikeln, die durch Anschmelzen der Partikel (Sinterbrücken) oder dazwischen auskristallisierte Fremdstoffe oder Bindemittel (z.B. Salz aus verdampftem Salzwasser) entstehen.
- Flüssigkeitsbrücken: Adsorptionsschichten aus Flüssigkeiten, die die Oberflächen der Partikel bedecken und Flüssigkeitsbrücken zwischen Partikeln, die durch kapillaren Unterdruck und Oberflächenspannung Haftung auslösen.
- Formschlüssige Bindungen: Je nach Form der einzelnen Partikel können unterschiedlich starke formschlüssige Bindungen auftreten.

Besonders problematisch ist beim Umgang mit Schüttgütern vor allem das unterschiedliche Fließverhalten in Trichtern, Silos und Ähnlichem. Im Folgenden wird allgemein der Begriff Silo zur Erklärung des Schüttgutverhaltens verwendet, da die Fließcharakteristika identisch mit denen feiner Pulver in Pipetten und kleinen Trichtern sind.

Eine gute Übersicht über das Fließverhalten von Schüttgütern liefert Schulze [Sch06]. Grundsätzlich kann zwischen zwei Arten von Fließverhalten im Silo unterschieden werden:

- Kernfluss: Durch zu große Wandreibung oder zu schnelle Querschnittsänderung entstehen am Silorand sogenannte "Tote Zonen", in denen kein Pulverfluss stattfindet (Abb. 4.2(a)). Kernfluss ist aufgrund der großen Fließgeschwindigkeit und ungleichen Verweilzeiten der verschiedenen Zonen nicht erwünscht.
- Massenfluss: Ist ein Silo günstig konstruiert (flache Verengung, geringe Wandreibung, Anpassung an verwendete Pulver) tritt sogenannter Massenfluss auf, bei dem der gesamte Siloinhalt gleichmäßig ausfließt und keine toten Zonen entstehen (Abb. 4.2(b)).

In einzelnen Bereichen des Silos können weitere Fließstörungen auftreten:

- Brückenbildung: Bei Pulvern mit großen Haftkräften oder grobkörnigen Schüttgütern entsteht durch Verkeilen der Partikel eine feste Kuppel (Brücke) aus Pulver, die den Pulverfluss zum Erliegen bringt (Abb. 4.3(a)).

4.1 Allgemeines 26

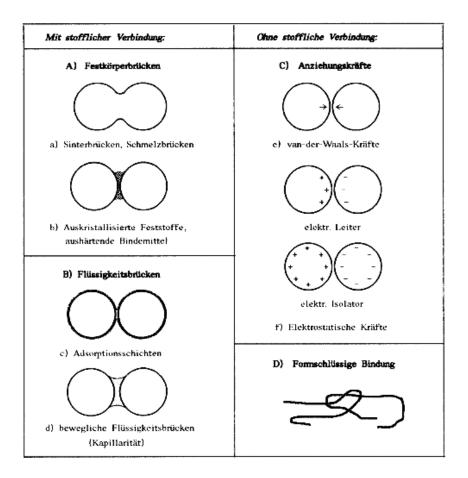


Abbildung 4.1: Haftkräfte in Pulvern [Sti04]

- Schießen: Wenn feinkörnige Pulver durch den Einsturz von Brücken oder Ähnlichem viel Luft mitreißen, können sie fluidisiert werden. Sie verhalten sich dann wie Flüssigkeiten, fließen unkontrolliert aus und sind nicht mehr dosierbar (Abb. 4.3(b)).
- Entmischung: Durch zentrische Befüllung eines Silos kann es infolge des Schüttkegels zu einer Entmischung kommen, da große Partikel über den Schüttkegel nach außen rollen. Beim Massenfluss wird dieser Zustand in der Siloverengung wieder beseitigt, bei Kernfluss hingegen fließen dadurch primär feine Partikel aus (Abb. 4.3(c)).
- Einseitiger Abzug: Bei ungeeigneter Konstruktion des Austragungsgerätes kann es passieren, dass dieses das Material nicht auf der kompletten Silofläche abzieht. Bei Schneckenförderern kann es zum Beispiel vorkommen, dass die Kammern der Schnecke sich bereits im vorderen Bereich komplett füllen, wodurch im hinteren Bereich kein Schüttgut mehr aufgenommen werden kann (Abb. 4.3(d)). Dem wird durch ein sich im Schneckenverlauf weitendes Kammervolumen begegnet.
- Silobeben/-hupen Wenn infolge mangelnder Anpassung eines Silos an die verwendeten Schüttgüter Erschütterungen auftreten, spricht man von Silobeben (Abb.4.3(e)). Wenn die Erschütterungen Frequenzen erzeugen, die im akustisch wahrnehmbaren

4.1 Allgemeines 27





(b) Massenfluss

Abbildung 4.2: Fliesarten in Silos [Sch06]

Bereich liegen spricht man von Silohupen.

Von diesen Fließstörungen ist bei einem Massenflusssilo lediglich die Brückenbildung zu berücksichtigen, wohingegen in Kernflusssilos alle genannten Probleme auftreten können.

4.1.3 Verfahrensprinzipien

Die Verfahren, um einen pulverförmigen Werkstoff punktgenau aufzutragen, lassen sich grundsätzlich in fünf Gruppen aufteilen[YE07].

Pneumatische Verfahren: Die pneumatischen Verfahren der Pulveraufbringung umfassen diejenigen Verfahren, die das Pulver mittels eines Gasstromes bewegen oder steuern. Es existieren bereits zahllose Anwendungen des pneumatischen Pulvertransports.

Volumetrische Verfahren: Allgemein handelt es sich bei den volumetrischen Verfahren um alle Verfahren, die eine Pulvermenge volumetrisch messen bzw. erfassen, wie zum Beispiel auch die pneumatischen Verfahren und die Verfahren der Schneckenförderung. Im engeren Sinne werden hier allerdings solche Verfahren als volumetrisch bezeichnet, die Pulver in einem Hohlraum aufnehmen, dessen Volumen die Größe der einzelnen Pulverdosen vorgibt wie zum Beispiel Kolben oder Becher. Sie werden vor allem in der Pharmazeutik eingesetzt, um kleine Dosen von Pulvern geringer Dichte schnell und exakt zu dosieren.

Verfahren der Schneckenförderung: Unter die Verfahren der Schneckenförderung fallen alle Verfahren, die Pulver mittels eines schraubenförmigen Elementes nach dem Prinzip der Archimedischen Schraube bewegen. Sie werden vor allem für nicht klebrige Schüttgüter aller Art verwendet.

4.1 Allgemeines 28

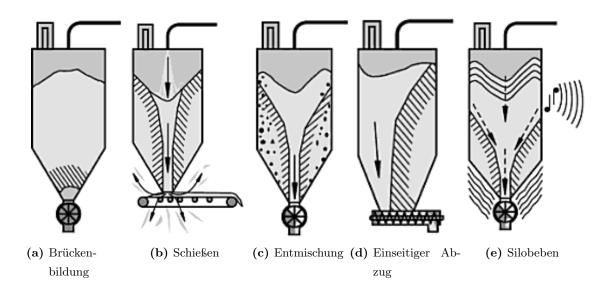


Abbildung 4.3: Fließstörungen in Silos [Sch06]

Elektrostatische Verfahren: Bei den elektrostatischen Verfahren des Pulvertransportes handelt es sich um Verfahren, die das Pulver mittels elektrischer Ladung bewegen. Sie basieren auf Anziehung beziehungsweise Abstoßung infolge der Coulomb-Kraft zwischen Ladungsträgern. Anwendung findet diese Verfahrensgruppe bei der Auftragung von Pulver auf dünne Träger wie Bleche und Papier beim Pulverbeschichten beziehungsweise beim Laserdrucken.

Vibrationsverfahren: Unter Vibrationsverfahren fallen diejenigen Verfahren, die Pulver durch Oszillation mit elliptischer Bahnkurve direkt bewegen oder die Strömung einer anderweitig mit potenzieller Energie geladenen Pulvermenge durch Vibration auslösen. Grundsätzlich ist die Wirkung vibrierender Elemente auf den Schüttguttransport bekannt und wird verschiedentlich genutzt. Sie werden zum Beispiel in Form von Schwingrinnen oder Schwingtrichtern zum Schüttgutaustrag aus Silos verwendet.

Diese Verfahren bestehen mittlerweile nicht mehr nur noch nebeneinander, sondern werden häufig in Mischformen angewandt.

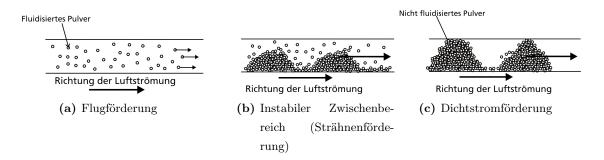


Abbildung 4.4: Arten pneumatischer Schüttgutförderung

4.2 Stand der Wissenschaft und Technik

4.2.1 Pneumatische Verfahren

Die pneumatischen Verfahren des Pulvertransportes lassen sich grob in fluidisierende Verfahren mit hohen Gasströmen und geringer Pulverkonzentration und nicht fluidisierende Verfahren, die das Pulver mit geringen Strömungsgeschwindigkeiten und hoher Konzentration bewegen, aufteilen. Erstere werden auch als Flugförderung bezeichnet (Abb. 4.4(a)) und sind für die Pulverauftragung auf ein Pulverbett uninteressant, da sie dieses beim Austragen verwirbeln und werden daher hier nicht weiter behandelt. Letztere umfassen den gesamten Bereich (Abb. 4.4(b)) zwischen Flugförderung und Dichtstromförderung (Abb. 4.4(c)) und weitere nicht fluidisierende Verfahren.

Die nicht fluidisierenden Verfahren sind grundsätzlich von Interesse für die hier angestrebte Anwendung. Sie lassen sich in Verfahren unterteilen, die Gas zur Steuerung (Öffnen und Schließen einer Öffnung) verwenden, und solche, die das Pulver mittels Gasstrom bewegen. Ein Beispiel für steuernde Pneumatik ist die pneumatische Blende (Abb. 4.5(a)) nach Martin et al. [MM90]. Sie führt zu geplanter Brückenbildung, indem an der Verengung aus porösem Material Unterdruck erzeugt wird, der die Pulverpartikel an die Wand saugt und somit deren Wandreibung erhöht. Wird der Unterdruck entfernt beziehungsweise kurzzeitig Überdruck angelegt, verringert sich die Wandreibung so sehr, dass die Brücken einstürzen. Dadurch kann eine exakte An- und Abschaltung des Pulverstromes erfolgen.

Für die Bewegung mittels Gasstrom als zweite Variante existieren zahlreiche industrielle Anwendungen. Von besonderem Interesse für die hier angestrebte Anwendung ist hierbei die Dichtstromförderung, da sie mit den geringsten Strömungsgeschwindigkeiten arbeitet. Dadurch besteht weniger Gefahr, das Pulverbett aufzuwirbeln. Ein mögliches Gerät zur Anwendung der Dichtstromdosierunng von Pulvern zeigt Abb. 4.5(b). Hier wird ein Gas in das Pulver eingedüst, wodurch dieses zu fließen beginnt. Stellt man den Gasstrom wieder ab, versiegt auch der Pulverstrom schnell, was eine exakte Dosierung ermöglicht.

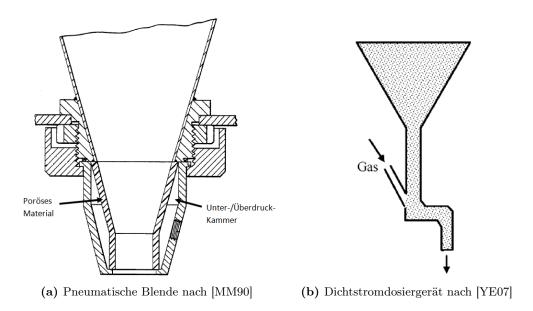


Abbildung 4.5: Pneumatische Dosiergeräte

4.2.2 Volumetrische Verfahren

Die volumetrischen Transportverfahren lassen sich in kontinuierliche und intermittierende Verfahren einteilen.

Als kontinuierliche Verfahren werden solche bezeichnet, bei denen das Pulver kontinuierlich dem Dosiergerät zugeführt wird.

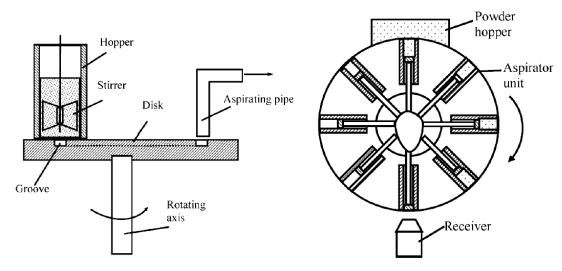
Eine Möglichkeit, dies zu realisieren, ist die Trennung von Dosierung und Auftrag wie beispielhaft in Abb. 4.6(a) dargestellt. In diesem Gerät von Douche [DCB92] wird Pulver permanent in die kreisförmige Nut einer rotierenden Scheibe gefüllt und von einer pneumatischen Fördereinrichtung weiterbewegt. Die Dosierung erfolgt über die Veränderung der Scheibendrehzahl. Der große Nachteil dieser Art der Förderung ist die zusätzliche Verwendung eines weiteren Verfahrens zum Weitertransport des Pulvers, das seine eigenen Nachteile mit sich bringt und den Aufbau unnötig kompliziert macht. Aus dem Grund werden diese Mischverfahren im Folgenden nicht mehr berücksichtigt.

Um kontinuierliches Dosieren und Auftragen in einem Gerät zu erreichen, kann man zum Beispiel auf die in Abb. 4.6(b) dargestellte Radialkolbenanordnung nach Aronson [Aro72] zurückgreifen. Hier wird Pulver gravimetrisch in den Hubraum gefüllt und durch einen Exzenter wieder ausgeschoben.

Unter intermittierenden Verfahren versteht man diejenigen, die über keine kontiniuierliche Pulverversorgung des Dosierers verfügen und somit nach erfolgtem Dosieren einer bestimmten Menge Pulver nachladen müssen.

Für die Verwendung im SLS sind von diesen Verfahren insbesondere Transportverfahren, die auf Kolben zur Pulveraufnahme und Dosierung zurückgreifen, interessant.

Ein Beispiel dafür ist der Dosierapparat nach Morris [Mor89]. Er besteht aus einem Array



(a) Kontinuierliches Nutdosiergerät nach [DCB92] (b) Kontinuierliche Radialkolbendosierung nach [Aro72]

Abbildung 4.6: Kontinuierliche volumetrische Verfahren

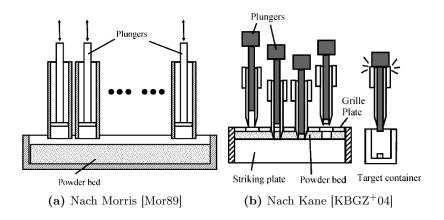
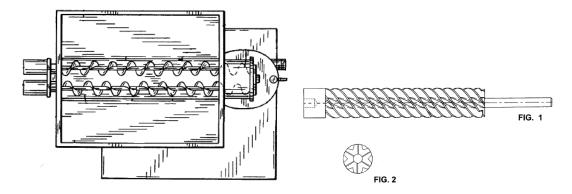


Abbildung 4.7: Intermittierende volumetrische Verfahren mit Arrayanordnung der Zylinder

von Zylindern, die Pulver aus einem Vorratsbehälter entnehmen, indem die zugehörigen Kolben einfahren und Pulver einziehen (Abb. 4.7(a)). Beim Ausfahren der Kolben über der Auftragsstelle wird das Pulver ausgestoßen. Durch Rakeln oder Walzen kann aus den entstehenden Schüttkegeln unter jedem Zylinder eine ebene Oberfläche erzeugt werden. Das Gerät wurde ursprünglich zur Pulverdosierung von Explosivstoffen in der Munitionsherstellung entwickelt.

Ein weiterer Dosierapparat, der ähnlich funktioniert, wurde von Kane et al. [KBGZ⁺04] vorgestellt (Abb. 4.7(b)). Im Gegensatz zu Morris' Dosiergerät verfügt dieses über einen Anschlag, der eine vollständige Ablösung der Ladung ermöglicht, und ein Abstreifblech, das Pulveranhaftungen an den Zylinderaußenwänden verhindert. Der Apparat soll zur Mikrodosierung von Medikamenten verwendet werden.



(a) Doppelschneckenanordnung nach Soper [SF00] (b) Mehrgangschnecke nach Ricciardi [RM98]

Abbildung 4.8: Schneckenförderer mit verbesserten Fließeigenschaften

4.2.3 Verfahren der Schneckenförderung

Die Verfahren der Schneckenförderung und -dosierung sind bereits etabliert und werden insbesondere im Bereich der Kunststoffverarbeitung vielfältig eingesetzt. Schneckenförderer können Schüttgüter horizontal, schräg und vertikal möglichst über kurze Distanzen bewegen. Sie werden zum Beispiel zum Tonertransport in Fotokopierern verwendet [YE07]. Durch zahlreiche Verbesserungen wurde versucht, die Probleme dieser Verfahren, nämlich Blockaden, Abrieb und ungleichmäßiges Förderverhalten, zu lösen.

Um den Pulverfluss in der Schnecke zu verbessern, wurde beispielsweise eine Fördereinheit, bestehend aus zwei gegenläufig rotierenden, nicht kämmenden Schnecken gleicher Bauart, entwickelt [SF00] (Abb. 4.8(a)). Es existieren auch kämmende Schneckenanordnungen, bei denen jedoch eine Zermahlung des Schüttgutes stattfindet, was beim SLS zu Problemen wie zum Beispiel Feinstaub und stark unterschiedlichen Partikelgrößen führt. Sie werden daher hier nicht behandelt.

Ein weiterer Ansatz zur Verbesserung des Pulverflusses wurde von Ricciardi et al. [RM98] verfolgt und führte zu der Verwendung einer Schnecke mit mehreren Schraubengängen (Abb. 4.8(b)).

Kleine Schneckenförderer werden unter anderem in der Dosierung von Pharmazeutika eingesetzt. Ein Beispiel dafür ist der Dosierapparat nach Rothenberg et al. [RHW00] (Abb. 4.10(a)).

Da die Kammern eines Schneckenförderers nur zu einem Teil gefüllt sind (Abb. 4.9), entsteht jedes Mal, wenn eine Kammer sich zum Dosierende hin öffnet, ein Pulverschub, was der Dosiergenauigkeit äußerst abträglich ist.

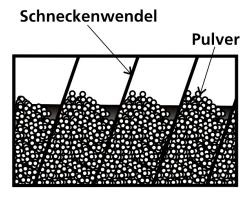
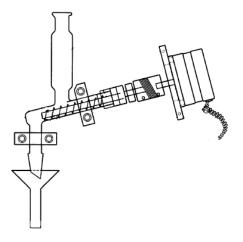
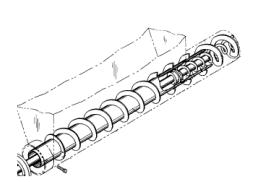


Abbildung 4.9: Kammerfüllung in Schneckendosierern



(a) Kleiner Schneckendosierer nach Rothenberg [RHW00]



(b) Konzentrischer Schneckendosierer nach Gaalswyk [GO99]

Abbildung 4.10: Schneckendosierer

Um das Problem der ungleichmäßigen Pulverförderung zu verringern, wurde ein Gerät entwickelt, das mittels zweier verschieden großer konzentrischer Schnecken eine exaktere Dosierung ermöglicht. Der von Gaalswyk et al. [GO99] konstruierte Apparat (Abb. 4.10(b)) dosiert zunächst bis kurz unter den erwünschten Wert vor, um eine hohe Dosiergeschwindigkeit zu erreichen, woraufhin die kleinere Schnecke zu dosieren beginnt, bis der Sollwert möglichst exakt erreicht wird.

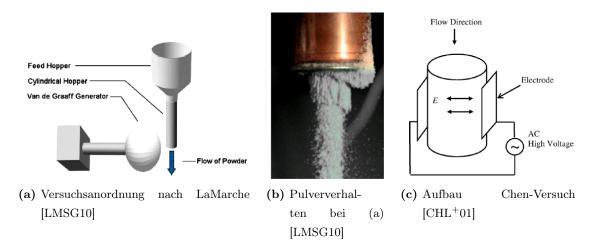


Abbildung 4.11: Elektrostatische Ventile mit externen Elektroden

4.2.4 Elektrostatische Verfahren

Die zahlreichen Verfahren, die Pulver unter Zuhilfenahme elektrostatischer Ladung aufbringen, lassen sich in vier Hauptgruppen unterteilen.

- Elektrostatische Ventile
- Elektrostatische Pulverversprühung
- Elektrostatische Punktdosierung ohne Gaströmung
- Elektrostatischer Einzelschichtauftrag

Unter die Gruppe der elektrostatischen Ventile fallen diejenigen Verfahren, die einen bestehenden Pulverfluss durch Anlegen eines elektrischen Feldes steuern. Als treibende Kraft für den Pulverstrom wird meist auf die Schwerkraft zurückgegriffen.

Beispiele für elektrostatische Ventile mit externen Elektroden wurden von LaMarche et al. [LMSG10] und Chen et al. [CHL+01] vorgestellt. LaMarche verwendet zur Kontrolle des Pulverflusses einen Van-de-Graaff-Generator, der sich durch ein umlaufendes Band lädt und dadurch elektrische Gleichspannung erzeugt. Der Versuchsaufbau ist in Abb. 4.11(a) dargestellt. Das daraus resultierende elektrische Feld verursacht Pulveragglomerate an der Auslassöffnung, die diese zum Teil verstopfen (Abb. 4.11(b)). Ein komplettes Verschließen der Öffnung ist allerdings nicht steuerbar und entsteht in unregelmäßigen Abständen. Bei der Anordnung nach Chen (Abb. 4.11(c)) wird ein elektrisches Wechselfeld erzeugt. Dadurch werden Pulverpartikel am Rand des Rohres bzw. in der Nähe der Elektroden angezogen, wodurch ihre Wandreibung erhöht wird. Dadurch kann der effektive Durchmesser des Ventils gesteuert werden.

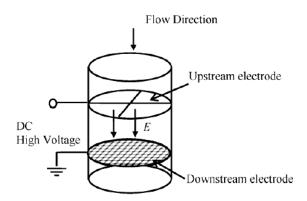


Abbildung 4.12: Elektrostatisches Ventil mit internen Elektroden [YE07]

Es wurden auch elektrostatische Ventile mit internen Elektroden entwickelt. Beipielhaft ist hier die Anordnung nach Thopson et al. [TLB95] zu nennen (Abb. 4.12). Sie besteht aus einer Hochspannungs- und einer Erdungselektrode, die in Gitterform in einem gasunterstützten Pulverfluss angebracht sind.

Die Gruppe der elektrostatischen Pulverversprühung, zu der auch das Pulverbeschichten gezählt wird, hat das Ziel, eine Oberfläche gleichmäßig mit einem breiten und diffusen Pulverstrahl zu beschichten. Da für das Mehrkomponenten-SLS aber eine ortsgenaue Dosierung verschiedener Pulver erforderlich ist, sind Sprühverfahren nicht einsetzbar.

Die dritte Gruppe der elektrostatischen Verfahren zur Pulverauftragung sind die punktdosierenden Verfahren ohne Gasströmung. Ein simples Beispiel ist die Punktdosierung, die in der Wiege- und Dosierstation von Wong et al. [WLH⁺05] verwendet wurde. Hier wird eine elektrostatisch geladene Pipettenspitze zur Anziehung der Pulverpartikel verwendet, die das Pulver dann durch Rotation in ein Gefäß auf einer Feinwaage abgibt. Ein ähnliches Prinzip wurde auch von LaMarche et al. [LMSG10] in Vorversuchen angewandt und ist in Abbildung 4.13(b) zu sehen. Ein ebenfalls simples Gerät wurde von Olansen und Dunn [ODN89] entwickelt (Abb. 4.13(a)). Dieser Dosierer basiert auf elektrostatischer Levitation. Er besteht aus einer Hochspannungselektrode, der das Pulver zugeführt wird und die von zwei Erdungselektroden umgeben ist. Dadurch entsteht ein elektrisches Feld zwischen beiden. Die aufliegenden Partikel werden durch Influenz geladen und in Richtung der Erdungselektrode angezogen. Wenn sie oben angelangt sind, laden sie sich gegensätzlich auf und fliegen zurück zur Hochspannungselektrode. Daraus folgt eine oszillierende Bewegung der Pulverpartikel zwischen beiden Elektroden. Durch die sich aufweitende Form der äußeren Elektroden bewegen sie sich dabei nach außen, bis sie den Rand der zentralen Elektrode erreichen und durch die dort angebrachten Gitter fallen. Von dort aus geht es auf die oben beschriebene Art und Weise im unteren Teil des Apparats bis zum Erreichen der Blende weiter, durch die das Pulver aufgetragen wird.

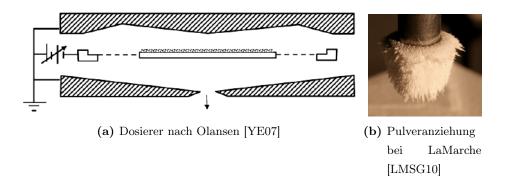


Abbildung 4.13: Elektrostatische Punktdosierer

In die vierte Gruppe elektrostatischer Pulverdosierung gehören die Verfahren des Einzelschichtauftrages. Hier wird das Muster aus den verschiedenen Pulvern nicht Punkt für Punkt generiert, sondern flächig in einem oder mehreren Arbeitsschritten aufgetragen. Die erste Aufgabe bei dieser Technik ist das Abbilden der gewünschten Form als Ladung auf einem Transportgerät. Der nächste Schritt ist das sogenannte "Entwickeln", das heißt das Aufbringen von Pulver auf den Transporter, wobei das erstellte Abbild erkennbar wird. Fudouzi et al. [KFES96] erzeugten Abbildungen auf Calciumtitanoxid (CaTiO₃) mittels eines Elektronenstrahles und mittels einer Kombination aus Elektronen- und Ionenstrahl. Zur Entwicklung wurde der Transporter mit einer Siliziumdioxid (SiO₂)-Suspension übergossen beziehungsweise in eine solche getaucht. Das Bild wurde in Form feiner Linien erkennbar. Da aber eine Suspension zur Entwicklung verwendet wurde, ist dieses Verfahren für das Mehrkomponenten-SLS von Pulver irrelevant.

Das wohl interessanteste Verfahren der vierten Gruppe ist die Xerographie (Fotokopie), deren Verfahrensprinzip auch bei Laserdruckern angewendet wird.

Abb. 4.14 zeigt beispielhaft die grundsätzlichen Baulemente dieses Verfahrens.

Hierbei wird ein mit einem Fotoleiter¹ beschichtetes Metallband oder eine Metalltrommel als Transporter verwendet. Diese wird zunächst komplett aufgeladen und anschließend von einem Laser (Laserdrucker) oder einer Lampen-Masken-Kombination² (Fotokopierer) belichtet. Dabei können die Ladungen in den belichteten Bereichen in die Metallschicht abfließen, wodurch das gewünschte Abbild entsteht.

Im Anschluss wird das Bild entwickelt, indem im Vergleich zur Aufladung des Transporters gegensätzlich oder gleichsinnig geladene Pulverpartikel aufgebracht werden. Dadurch kann entweder ein Negativ- (gegensätzlich geladenes oder ungeladenes Pulver lagert sich an unbelichteten Stellen an) oder ein Positivabbild (gleichsinnig geladenes Pulver sammelt sich an belichteten Stellen an) des vom Laser generierten Bildes erzeugt werden.

Daraufhin muss das Pulver wieder vom Transporter abgebracht beziehungsweise auf eine

¹Halbleiter, dessen Widerstand sich bei Lichteinfall stark verringert und der dadurch leitfähig wird.

²Zu kopierendes Blatt fungiert als Maske.

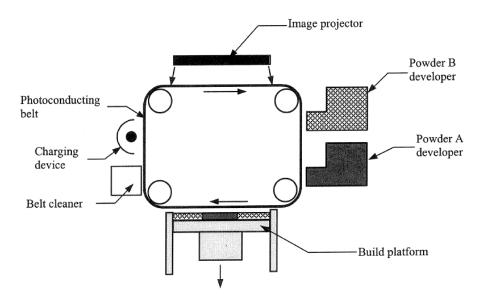


Abbildung 4.14: Funktionsweise Xerographiegerät [KZ99]

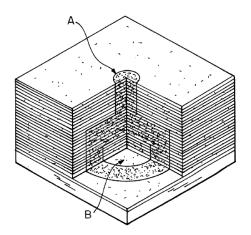


Abbildung 4.15: Bauteil in Pulver bei Kumar [Kum00]

Unterlage (hier das Pulverbett) aufgebracht werden.

Im letzten Schritt wird der Transporter gereinigt, wozu verschiedenste Hilfsmittel von Belichtern über Koronaentladung³ bis hin zu Bürsten verwendet werden.

Insbesondere Liew und Kumar haben in diesem Bereich auf sich aufmerksam gemacht. Kumar et al. beschreiben ein Auftragungsgerät mit einem umlaufenden Band [KZ99, Kum00]. Hier werden Bauteil- und Stützpulver aufgebracht und anschließend mit einer Heizwalze unter Druck und Hitze gesintert. Dieses Verfahren wurde von Rock et al. [RG95, RG96] als Freeform Powder Molding (FPM)⁴ entwickelt. Dabei wird immer eine komplette

³Ein Draht als Hochspannungselektrode ionisiert die Luft. Die Ionen lagern sich an geladenem Pulver an und neutralisieren es nach außen.

⁴Aufgrund der geringen Verbreitung nicht in Abb. 2.2 aufgeführt.

Pulverschicht gesintert, die jedoch aus dem Bauteilpulver und einem Stützpulver besteht, das meist eine höhere Schmelztemperatur hat und im Laufe des Prozesses nicht aufgeschmolzen wird. Hier entsteht das Bauteil (Abb. 4.15) also über lokale Pulveraufbringung und nicht über lokale Aufschmelzung. Das Problem bei dieser Technik liegt in der lokalen Auftragung verschiedener Pulver. Zum Zeitpunkt der Entwicklung war keine spezielle Methode zur differenzierten Pulverauftragung beim FPM bekannt. Kumar lieferte eine Möglichkeit für elektrostatische flächige Pulverauftragung mehrerer Komponenten. Der große Vorteil des FPM gegenüber dem SLS ist für die elektrostatische Pulveraufbringung, dass jede aufgebrachte Schicht aufgeschmolzen oder verdichtet und dadurch verfestigt wird. Dadurch ist die Anziehungskraft der unteren Schichten auf die oberste größer als die Kraft, die das geladene Transportband auf die Deckschicht ausübt. Für elektrisch leitende Pulver, die das elektrische Feld kaum abschwächen, ist dadurch die Pulverauftragung vergleichsweise einfach, da lediglich der Baukolben geladen werden muss, um Pulver anzuziehen. Bei nicht leitfähigen Pulvern hingegen wird die feste Deckschicht dahingehend ausgenutzt, dass sie elektrostatisch gegensätzlich zur Pulverladung (und stärker als diese) aufgeladen wird, um das Pulver vom Transporter zur Arbeitsebene zu bewegen. Um eine genaue Pulverübertragung vom Transporter auf die Deckschicht zu erreichen, wird der Abstand zwischen beiden durch Hochfahren der Bauplattform verringert, bis ein Pulverübertrag stattfindet. Es wurde ein Testgerät für feine Pulver (5 bis 20 μ m) gebaut, das eine Auflösung von ca. 600 dots per inch (dpi) erreichte.

Auch Liew et al. haben sich mit dem Thema des elektrostatischen Einzelschichtauftrages befasst. Im ersten Teil ihrer Abhandlung zum Thema des Zweikomponenten-Rapid-Prototyping zur Herstellung von Wirkstoffträgern in der Pharmazeutik [LLCD01] wurden aber zunächst Möglichkeiten untersucht, freie Räume in einer Pulverdecke zu erzeugen. Es sollten in einem Träger genau vorgegebene Hohlräume geschaffen werden, um Wirkstoffe aufzunehmen. Es wurden vier verschiedene Methoden untersucht. Im ersten Ansatz wurde das Pulver punktuell aus einer Schicht "herausgesaugt", was allerdings viele Probleme mit sich brachte. Der zweite Ansatz bestand darin, einzelne "Inseln" zu sintern, die dann mit einfachen Mitteln entfernt werden sollten. Auch dieser Versuch schlug fehl. Bei den Versuchen Nummer drei und vier wurde versucht, in die Pulveroberfläche durch längeres Einwirken des Lasers Mulden zu schmelzen, da sich das stärker aufgeschmolzene Pulver kompaktiert. Es wurden erfolgreich kleine Hohlräume erzeugt. Allerdings ist dies für die hier angestrebte Anwendung unnötig kompliziert, da diese Hohlräume in einem zusätzlichen Arbeitsschritt mit der zweiten Komponente befüllt werden müssten.

Im zweiten Teil der Abhandlung [LLCD02] geht es um die Auftragung der Zweitkomponente. Insbesondere beschäftigten sich Liew et al. mit den verschiedenen Möglichkeiten, Pulver von der Bildtrommel abzutragen. Im Versuchsaufbau wurde ein Laserdrucker dahingehend modifiziert, dass verschiedene Abtragungsgeräte unter die Fotoleitertrommel (Bildtrom-

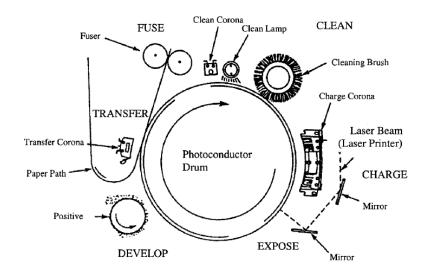


Abbildung 4.16: Prinzip eines Laserdruckers [LLCD02]

mel) gebaut werden konnten. Eine Prinzipskizze eines normalen Laserdruckers zeigt Abb. 4.16.

Zunächst wurde versucht, den Laserdrucker ohne Papier arbeiten zu lassen, wobei ein Funkenüberschlag erfolgte, der durch die entstehenden Schallwellen des "Donners" jegliche gerichtete Bewegung der Pulverpartikel zunichtemachte. Daraufhin wurde versucht, das Pulver über mechanische Schaber von der Bildtrommel abzubringen - eine Technik, die sonst in der Reinigungsstufe des Druckers angewendet wird. Zunächst wurde ein Schaber aus Polyethylen (PE) verwendet. Während dieses Versuches wurde beobachtet, dass das Pulver aufgrund der hohen Geschwindigkeit der Bildtrommel (ca. 80 $\frac{cm}{s}$) eine Wolke formte, anstatt auf den Arbeitstisch zu fallen. Außerdem bildete sich eine verbleibende Schicht Pulver an der Schaberkante. Der Versuch war nicht erfolgreich. Daraufhin wurde ein Schaber aus Teflon® verwendet, der zwar in der Lage war, die verbleibende Pulverschicht zu minimieren, nicht aber die Pulverwolke zu verringern. Es wurden noch zwei weitere Versuche durchgeführt, um das Pulver von der Bildtrommel abzubringen. Dieses wurde dabei über unterschiedliche Distanzen auf ein Blatt Papier übertragen. Es wurden ein geladener Draht und eine geladene Platte als Gegenelektroden (Abb. 4.17) hinter dem Papier verwendet. Bei der Übertragung dieser Ideen auf das SLS muss aber festgestellt werden, dass elektrisch nicht leitende Pulver das dadurch entstehende elektrische Feld schon ab einer geringen Schichtdicke stark abschwächen. Dadurch sind Techniken, die Pulver von der Rückseite des Pulverbettes aus abzutragen versuchen, lediglich für dünne Bauteile praktikabel. Dies ist jedoch nicht im Sinne der geometrischen Freiheit des SLS-Prozesses.

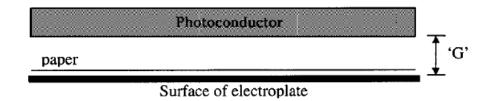


Abbildung 4.17: Versuch mit Plattenelektrode nach Liew [LLCD02]

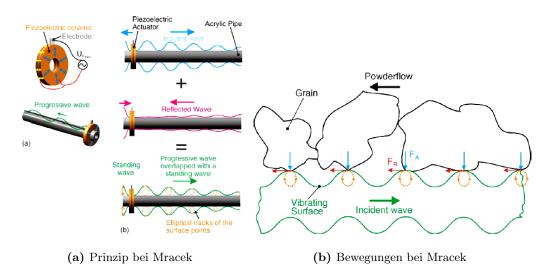


Abbildung 4.18: Horizontaler Pulvertransport nach Mracek [MW05]

4.2.5 Vibrationsverfahren

Die Vibrationsverfahren umfassen alle Methoden des Pulvertransportes, die mit Hilfe von Vibrationsanregern arbeiten. Sie werden insbesondere bei Anwendungen verbaut, die aufgrund zu großer oder zu sensibler Partikel keine Schnecken oder andere mechanische Dosierer verwenden können. Erste Vibrationsdosierer sind schon in den 1930er Jahren bekannt geworden [Har30]. Neuere Verfahren verwenden die Vibration sowohl zum Regeln als auch zum An- beziehungsweise Ausschalten des Pulverflusses. Sie lassen sich in zwei Hauptgruppen aufteilen.

Die erste Gruppe beinhaltet diejenigen Methoden, die Pulver durch oszillierende Elemente bewegen. Ein Ansatz, dies zu erreichen, ist die Verwendung gleichmäßiger Vibration mit einer zusätzlich antreibenden Kraft, wie etwa der Gravitation bei der schiefen Ebene von Schwingrinnen. Der zweite Ansatz ist eine ungleichmäßige oszillierende Bewegung, die Schüttgüter auch ohne Zusatzeinrichtungen bewegen kann. Eine neue Idee in diesem Feld wurde von Mracek [MW05] vorgestellt. Hier wird ein horizontal eingebautes Acrylrohr durch einen Piezoaktor in Schwingung versetzt. Aufgrund der im Verlauf des Rohres schwächer werdenden Welle kann Pulver in die entgegengesetzte Richtung transportiert werden (Abb. 4.18).

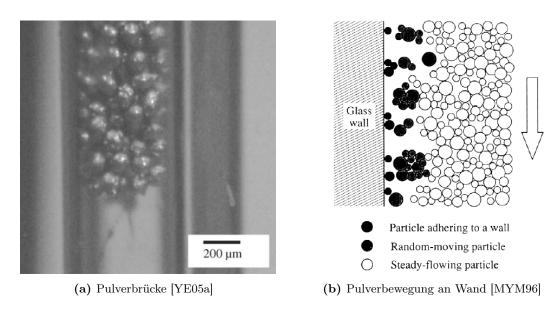


Abbildung 4.19: Pulverbetrachtung in Kapillarrohren

Bei der zweiten Gruppe der Vibrationsdosierer geht es darum, Pulverfluss durch Vibration freizugeben und zu steuern. Hier wurde eine Anzahl geringfügig unterschiedlicher Verfahren vorgestellt. Grundsätzlich wurde allerdings immer ein Gerät (z.B. eine Pipette oder eine Trichter) verwendet, dessen Innendurchmesser so gering gewählt wurde, dass das Pulver im unangeregten Zustand Brücken bildete. Wie bereits oben erwähnt (Abschnitt 4.1.2), entstehen diese Brücken (4.19(a)) durch Verkeilen mehrerer Pulverpartikel untereinander. In den Pipettenhälsen (Kapillarrohren) wird eine solche Brückenbildung durch die Wandreibung einzelner Partikel ausgelöst. Sobald eine Vibrationsanregung stattfindet, wird die Wandreibung verringert und die festen Strukturen der Brücke werden gelöst. Das vibrierende Pulver an der Wand kann als Schmiermittel für das restliche Pulver angesehen werden. Im oszillierenden Zustand findet ein Pulverfluss aufgrund der Gravitation statt. Das Pulververhalten bei Vibration ist in Abb. 4.19(b) dargestellt.

Nach Pegna [Peg97] beruhen diese Verfahren auf einer alten Technik zum Erstellen von Sandbildern der Navajo-Indianer. Er versuchte mit Hilfe dieses Verfahrens das Rapid Prototyping von Beton für die Baubranche. Es wurden Sand als Matrixwerkstoff und Portlandzement als Reaktivmaterial aufgebracht und durch Wasserdampf aktiviert (verbunden).

Matsusaka et al. regten eine Kapillarröhre (D6 mm x 200 mm) mit einem kleinen Gleichstrommotor ($f_{max} = 760 \text{ Hz}$) an [MYM96]. Sie untersuchten das Pulververhalten und erreichten mit ihrem Versuchsaufbau (Abb. 4.20(a)) einen konstanten Pulverfluss von 0,2 $\frac{mg}{s}$ bei Partikeln von ca 10 μ m Durchmesser. In einem weiteren Versuch versuchten sie, das Pulver mit Ultraschallwellen (20 kHz) anzuregen, die durch ein Wasserbad auf die darin

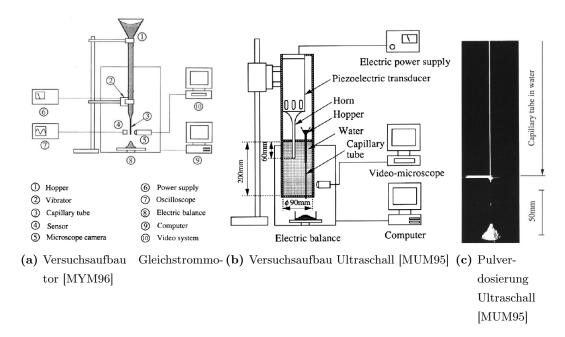


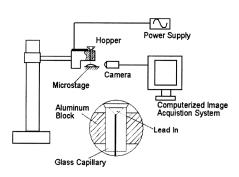
Abbildung 4.20: Versuche von Matsusaka

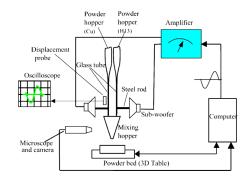
liegende Kapillarröhre übertragen wurden [MUM95]. Der Versuchsaufbau und eine beispielhafte Pulveraufbringung sind den Abb. 4.20(b) und 4.20(c) zu sehen. Ziel beider Versuche war es, das Verhalten verschiedener feiner Pulver (6-20 μ m Partikelgröße) mit verschiedenen Kornformen (kugelförmig und unregelmäßig) in den beschriebenen Kapillarrohren zu untersuchen.

Li et al. [LCY02] bauten einen piezoelektrischen Aktor auf einen Aluminiumblock, in den eine Glaskapillare eingesetzt war. Sie verwendeten Pulver mit einem Partikeldurchmesser von 3 μ m in Rohren mit 125 μ m Innendurchmesser. Der Versuchsaufbau zu dieser Feinstdosierung ist in Abbildung 4.21(a) zu sehen.

Yang et al. veröffentlichten zahlreiche Artikel zum Thema der Pulverdosierung durch Vibrationsanregung [YE07, YE05a, YE03, YE04c, YE04a, YE04b, YE04d, YE05b, LYE07, LYE09]. Sie stellten fest, dass Frequenz, Amplitude und Wellenform der Vibrationsanregung den Pulverfluss beeinflussen. Weitere Parameter sind Pulvertyp (Partikelgröße und -form), Feuchtigkeit des Pulvers und die Abmessungen des Kapillarrohres. Angeregt wurde das Kapillarrohr durch einen an einem Lautsprecher befestigten Stahlbolzen von 1 mm Durchmesser [YE03]. Des Weiteren bauten sie einen Versuchsstand, um verschiedene Pulver miteinander zu mischen und dann aufzutragen [YE04c]. Dabei wurden mehrere Kapillarrohre wieder durch Lautsprecher mit Verbindungsbolzen angeregt und dosierten Pulver in einen Mischtrichter, von dem aus die Pulverauftragung auf das Pulverbett stattfand (Abb. 4.21(b)). Die dort verwendete Technik kann natürlich auch zum direkten Pulverauftrag verwendet werden.

Außerdem stellten sie fest, dass, wenn das Verhältnis von Innendurchmesser des Rohres D





- (a) Versuchsaufbau nach Li [LCY02]
- (b) Versuchsaufbau zur Pulvermischung nach Yang [YE04c]

Abbildung 4.21: Versuche von Li und Yang



Abbildung 4.22: Druckbeispiel nach Yang [YE04d]

zu Partikeldurchmesser $d \frac{D}{d} < 5$ beträgt, kein Pulverfluss erreicht werden kann und bei einem Verhältnis von $\frac{D}{d} \approx 20$ ein gleichmäßiger Pulverfluss im angeregten Fall einsetzt [YE04a]. Mittels des oben erwähnten Mischungsgerätes (Abb. 4.21(b)) stellten sie Sammlungen von Mischungsproben her [YE04b]. Sie verwendeten auch einen Aufbau, der dem von Matsusaka (Abb. 4.20(b)) sehr ähnelt, bei dem ein Ultraschallgeber in einem Wasserbad mit einem Kapillarrohr verwendet wird. Mit Hilfe eines Kreuztisches konnte daraus ein "Drucker" entwickelt werden. Ein Druckbeispiel ist in Abb. 4.22 zu sehen. Das Verfahren wurde in weiteren Versuchen verfeinert [LYE07].

Der aktuellste Bericht [LYE09] befasste sich mit der Abhängigkeit der Fließeigenschaften von der Bauart des Kapillarrohrres und der Anbringung des Ultraschallgebers (Abb. 4.23). Es waren jedoch nur geringe Unterschiede in den Ergebnissen der verschiedenen Anordnungen zu erkennen.

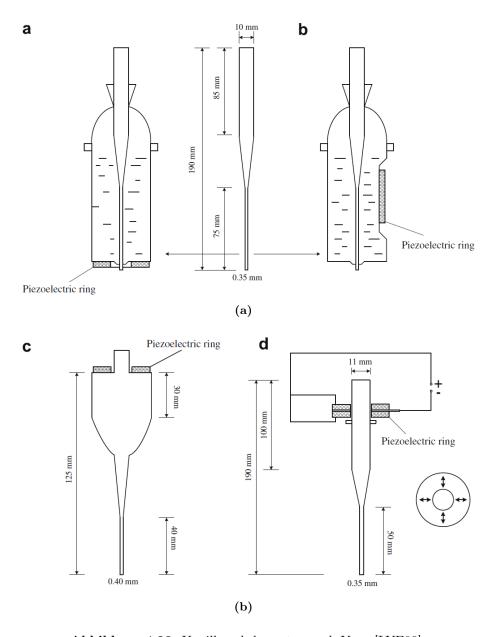


Abbildung 4.23: Kapillarrohrbauarten nach Yang [LYE09]

4.3 Vorauswahl der geeignetsten Verfahren

Im Zuge dieser Bachelorarbeit sollen die verschiedenen, in Abschnitt 4.2 aufgeführten Verfahren verglichen und bewertet werden, um die bestgeeigneten Verfahren zu ermitteln. Diese sollen anschließend experimentell untersucht werden, wonach das überzeugendste Verfahren zur weiteren Verwendung festgelegt wird.

Pneumatische Verfahren

Wie bereits oben (Abschnitt 4.2.1) erwähnt, sind die **fluidisierenden Verfahren** aufgrund des Risikos, das Pulverbett aufzuwirbeln, für das Selektive Lasersintern nicht relevant.

Die **pneumatische Blende** nach Martin et al. ist interessant, besitzt aber einen komplizierten Aufbau. Sie wird darum und wegen des vorliegenden Patentes hier nicht weiter behandelt, könnte aber in anderen Arbeiten für diese Anwendung untersucht werden.

Der größte Vorteil der **Dichtstromförderung** ist ihre einfache unkomplizierte Wirkungsweise, die zu gleichfalls einfachen Dosiergeräten führt. Allerdings ist ihre Dosierfähigkeit aufgrund des Pulvernachlaufes begrenzt. Um Verwirbelungen hier zu vermeiden, ist außerdem nur ein geringer, eventuell zur Bewegung nicht ausreichender Druckunterschied um die einzelnen Pfropfen möglich. Eine dritte Schwierigkeit liegt bei diesem Verfahren darin, dass bei einem Gerät, das dem in Abb. 4.5(b) ähnelt, wegen stabiler Brücken im unteren Bereich der Luftaustritt nach oben und nicht nach unten stattfinden könnte. Dem kann zwar durch einen Deckel begegnet werden, der allerdings eine kontinuierliche Zufuhr von Pulvernachschub erschweren würde. Auch dieses Verfahren hat das Potenzial, in weiteren Arbeiten behandelt zu werden, ist jedoch im Rahmen dieser Bachelorarbeit nicht mehr umzusetzen.

Volumetrische Verfahren

Die kontinuierlichen Volumenförderer, insbesondere der nach Aronson (Abb. 4.6(b)), sind für das SLS anwendbar. Sie sind allerdings schwer zu miniaturisieren, da sich dabei das Pulverhaltevermögen (hier die Dichtigkeit) bei nach unten geöffneter Pulverkammer verschlechtert. Dies folgt aus der relativen Verkleinerung der Öffnung im Vergleich zu den Partikeln. Außerdem besteht diese Anordnung aus sehr vielen beweglichen Teilen, was Steuerung und Miniaturisierung erschwert. Dieser volumetrische Aufbau wird darum hier nicht weiter untersucht.

Einzelkolbendosierer sind für das SLS trotz ihrer Einfachheit äußerst ungeeignet, da sie nach jedem gesetzten Punkt Pulver nachladen müssen.

Dosierer mit Kolbenarray sind grundsätzlich interessant, da über selektives Laden (Einfahren) der Zylinder bei der Vorratsaufnahme eine Art Maskenabbildung erfolgen könnte. Eine ähnliche Technik wird bereits bei Nadeldruckern eingesetzt. Leider unterliegen die Nadeln beziehungsweise Stempel einer beständigen Reibung und verschleißen somit. Au-

ßerdem wird das Pulver im Aufnahmeprozess verdichtet und erzeugt dadurch bei der Pulverauftragung selbst eine klumpige Oberfläche. Dennoch ist diese Technik ein möglicher Ansatz für weitere Arbeiten in diesem Gebiet, wird hier aber wegen der besseren Eignung von Elektrostatik- und Vibrationsverfahren nicht weiterverfolgt.

Verfahren der Schneckenförderung

Schneckenförderer sind wegen der ungleichmäßigen Pulverförderung (vgl. 4.2.3) vom Ergebnis der Pulverdosierung her schlechter geeignet als andere Verfahren. Eventuell wäre dies zwar mit dem Schneckenförderer nach Gaalswyk (Abb. 4.10(b)) möglich, allerdings würden Steuerung und Zahl der beweglichen Teile das Ganze äußerst kompliziert machen. Außerdem ist das Temperaturverhalten von Motor, Schnecke und weiteren Bauteilen problematisch, da der Bauraum auf eine Temperatur von bis zu 250 °C ausgelegt ist. Auch sind Schneckendosierer nur begrenzt miniaturisierbar (Dosierauflösung > 5 mm [YE07]), da sie dabei zum Verstopfen neigen. Aus diesen Gründen wurden auch sie nicht für diese Anwendung ausgewählt.

Elektrostatische Verfahren

Die Gruppe der **elektrostatischen Ventile** ist für das Mehrkomponenten-SLS nicht verwendbar, da diese sich nur sporadisch komplett verschließen lassen und eine punktgenaue Pulverauftragung dadurch unmöglich wird. Auch die pneumatische Unterstützung des Pulverflusses ist, wie bereits im zugehörigen Kapitel erwähnt, äußerst problematisch.

Das **elektrostatische Pulverversprühen** wurde bereits oben (4.2.4) für in diesem Fall nicht anwendbar erklärt.

Die elektrostatischen Punktdosierer ohne Gasstrom funktionieren an sich gut und sind leicht anzusteuern. Sie haben aber die gleichen Nachteile wie die Verfahren des elektrostatischen Einzelschichtauftrages, die im Gegensatz aber eine flächige Pulverauftragung ermöglichen.

Die eleganteste elektrostatische Variante ist der Einzelschichtauftrag. Leider ist er für das SLS im Gegensatz zum FPM schwer zu realisieren. Seine sehr hohe Dosiergenauigkeit und die schnelle Erstellung kompletter Pulverschichten in wenigen Arbeitsgängen lassen ihn dennoch lohnend erscheinen. Leider gibt es Probleme bei der Abbringung geladenen Pulvers vom Transporter auf ein Pulverbett. Dennoch werden im Folgenden verschiedene Versuche zur Pulverab- und aufbringung vorgenommen.

Vibrationsverfahren

Vibrationsverfahren sind ein praktikabler und einfacher Weg, Pulver zu dosieren. Die Verfahren der direkten Bewegung durch Vibration sind allerdings etwas ungenauer, da sie nicht vertikal arbeiten und dadurch einen gewissen Abstand vom Pulverbett benötigen. Daraus folgt eine stärkere Pulverstreuung bedingt durch die Fallhöhe als bei den vertikal

arbeitenden Verfahren. Daher sind sie für diese Anwendung weniger interessant und werden hier nicht weiter verfolgt.

Genau aus diesem Grund wurden die Verfahren der Vibrationssteuerung entwickelt. Sie wurden bereits vielfach getestet und erforscht und bieten daher eine große Menge an verfügbaren Informationen. Natürlich gestaltet es sich schwer, in einem in der Forschung so verbreiteten Verfahren neue Anwendungen zu verwirklichen, allerdings ist bisher weder ein Patent auf eine Vibrationsdosierung von Pulvern für das Mehrkomponenten-SLS veröffentlicht noch eine funktionierende Anwendung bekannt gemacht worden. Daher wird diese Art der Dosierung als zweites Verfahren für weitere Untersuchungen und Versuche ausgewählt.

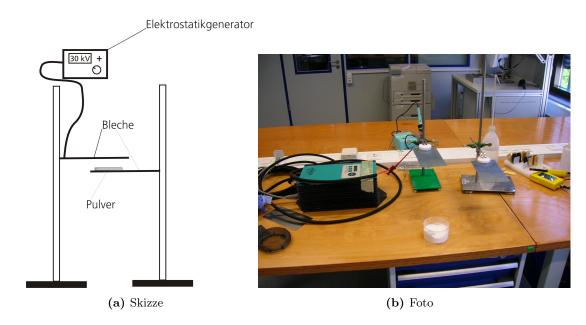


Abbildung 4.24: Versuchsaufbau Elektrostatik

4.4 Versuche zum elektrostatischen Einzelschichtauftrag

Im Zuge der Literaturrecherche stellte sich heraus, dass verschiedenste Techniken das Pulver vom Transporter auf das Pulverbett zu übertragen keinen Erfolg hatten. Auch Fachleute aus der Laserdrucktechnik und Elektrostatik standen diesen Versuchen pessimistisch gegenüber. Aufgrund der einzigartigen Möglichkeiten dieser Verfahren wurde hier dennoch versucht, verschiedene Prinzipien zu erproben.

Versuchsaufbau:

Der Versuchsaufbau ist in den Abbildungen 4.24 dargestellt. Er wurde für die verschiedenen Vorversuche gemäß den dortigen Angaben verändert oder verändert genutzt. Bei allen Versuchen wurde auf einen vereinfachten Aufbau des Transportsystems zurückgegriffen. Der Transporter wurde durch ein Blech simuliert, das normalerweise als Prüfblech für das Pulverbeschichten verwendet wird und somit gute elektrostatische Eigenschaften aufweist. Zusätzlich wurden folgende Gerätschaften verwendet:

- Hochspannungsgenerator KNH 124 der Firma Eltex ($U_{max} = 30 \ kV$), Vorwiderstand, Elektroden
- Messgerät für Umgebungsbedingungen (Temperatur und relative Luftfeuche)
- Stative, Greifer, Isolatoren

Der Abstand der beiden Bleche betrug ca. 10-15 mm.

Weitere Messgeräte wurden nicht verwendet, da zunächst eine optische Beurteilung der

Versuchsergebnisse ausreichte, um die Anwendbarkeit des geprüften Verfahrens für das SLS zu ermitteln.

Das **verwendete Pulver** war Polyamid 12 (PA 12) Duraform der 3D Systems GmbH mit einem mittleren Partikeldurchmesser von 50 μ m, das im Vorfeld 4 Stunden bei 105 °C getrocknet und mit einem Analysesieb der Maschenweite 250 μ m gesiebt⁵ wurde.

Vorversuche:

Es wurden mehrere Versuche durchgeführt, um eine Möglichkeit zu finden, Pulver von einem Blech auf das andere und wieder zurück zu übertragen. Die anfänglichen Versuche waren zwar Fehlschläge, trugen aber zur Findung einer funktionierenden Technik bei und werden daher hier als Vorversuche bezeichnet. Das Hauptziel dieser Vorversuche war es, mit einfachen Mitteln eine Pulverübertragung auf das geladene Blech⁶ zu erreichen, um die Abbringungsversuche durchführen zu können.

Vorversuch 1 - Fluidisieren: Im ersten Vorversuch wurde eine Laborschale als improvisierter Fluidisierbehälter⁷ verwendet. Sie wurde unter dem geladenen Blech platziert und das Pulver wurde durch Pusten fluidisiert. Die Idee hinter dieser Durchführung bestand darin, dass frei fliegendes Pulver aufgrund seiner Potentialdifferenz zum geladenen Blech von diesem angezogen würde. Leider entwickelte sich nur eine hauchdünne Schicht auf dem Blech, da die Pulverpartikel vom Aufprall auf die Blechunterseite wieder zurückgestoßen wurden. Nur ausreichend langsame Partikel konnten sich absetzen. Mit solch einer geringen Menge aufgetragenen Pulvers konnten keine Abbringungsversuche vorgenommen werden.

Vorversuch 2 - Papierübertragung: Für den zweiten Vorversuch wurde auf das ungeladene Blech ein Blatt Papier und darauf eine millimeterdicke Schicht Pulver gelegt. Wurde nun diese Anordnung unter dem geladenen Blech platziert, wurde das Papier, wie man es auch von Papier in Kunststoffmappen kennt, elektrostatisch angezogen. Leider übertrug sich das Pulver nur fleckenweise auf das geladene Blech. Dies ließ sich auch mit hohen angelegten Spannungen (30 kV) nicht verbessern. Auch dieser Versuch lieferte kein brauchbares Ergebnis.

Vorversuch 3 - Transportfolie In Zusammenarbeit mit einem Mitarbeiter der Rüdiger Schnick Industrieberatung wurde ein weiterer Versuch durchgeführt. Dabei wurde eine Kunststofffolie (Dicke ca. 50 μ m) durch Auflegen auf ein geerdetes Blech und Anlegen von 30 kV auf der Folienrückseite teilweise geladen. Danach wurde die Folie auf das vorher ausgelegte Pulver aufgelegt und danach über einem Auffangblech

⁵Durch Sieben werden Agglomerate, die beim Trocknen nicht zerstört werden konnten, beseitigt.

 $^{^6}$ Hochspannungselektrode wurde am oberen Blech befestigt.

⁷Ein Fluidisierbehälter wirbelt Pulver mittels von unten durch einen porösen Boden eintretende Luft auf. Dabei wird das Pulver fluidisiert, das heißt, es verhält sich wie eine Flüssigkeit.

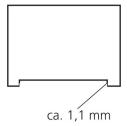


Abbildung 4.25: Auftragungshilfe

mit einer Entladeeinheit entladen. Die Entladeeinheit beschießt die Folie mit Ionen, die diese nach außen hin isolieren, indem sie sich an den geladenen Stellen anlagern. Leider konnte auch hier nur wenig Pulver auf die Folie aufgebracht und nur eine marginale Menge davon abgetragen werden. Durch Messung mit einem Feldstärkemessgerät ergab sich, dass zwischen den Pulverpartikeln keine beziehungsweise nur eine schwache Entladung stattgefunden hatte (Restladung $\approx 8~kV$), obwohl die Folienrückseite nur noch mit 0-1 kV geladen war. Außerdem war an der fleckigen Pulveraufnahme erkennbar, dass sich auf der Folie Ladungsinseln (stark geladene Flecken) gebildet hatten.

Versuchsdurchführung des Hauptversuches:

Im Hauptversuch wurde der elektrostatische Pulverübertrag mit Vibrationsunterstützung untersucht. Dazu wurden folgende Schritte durchgeführt:

- 1. Messung der Umgebungsbedingungen: Durch 10 Messungen an unterschiedlichen Orten um den Versuchsaufbau und anschließende Bildung des arithmetischen Mittelwertes wurden die Umgebungsbedingungen (Temperatur und Luftfeuchtigkeit) ermittelt. Die Raumtemperatur betrug im Schnitt 20 °C bei einer relativen Luftfeuchte von 50,9 %.
- 2. Pulverauftrag auf das ungeladene Blech: Mittels einer mechanischen Auftragungshilfe (Abb. 4.25) wurde eine Pulverschicht ca. 1,1 mm dick aufgetragen und anschließend in eine rechteckige Form gebracht. Dadurch kann im Versuchsverlauf die Abbildungsgenauigkeit der einzelnen Schritte überprüft werden.
- 3. Pulverübertragung auf das geladene Blech: Aus den Vorversuchen ergab sich, dass ohne zusätzliche Anregung kein Pulver von dem unteren ungeladenen Blech auf das obere geladene stattfand. Daher wurde hier durch Klopfen mit einem Kunststoffplättchen Pulver in Richtung des oberen Bleches beschleunigt und die Anziehungskräfte zwischen Pulver und unterer Platte überwunden. Dadurch fand ein Pulverübertrag statt.
- 4. **Pulverabgabe auf ungeladenes Blech:** Zur Pulverabgabe vom geladenen Blech als vereinfachter Transporter wurde die schon im letzten Punkt erwähnte Technik



(a) Vorbereitetes Pulver

(b) Pulver auf Transporter

(c) Pulver auf ungeladenem Blech

Abbildung 4.26: Versuchsfotos (chronologisch von links nach rechts)

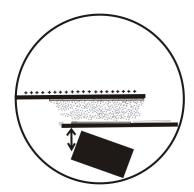


Abbildung 4.27: Streuung bei Übertragung auf den Transporter

des Klopfens verwendet. Im Laufe der Versuche ergab sich, dass die Pulverabgabe an das ungeladene Blech auch ohne Entladen des oberen Bleches erfolgreich stattfand. Infolgedessen wurde die Spannungsquelle für weitere Versuche nicht mehr vom Transporter getrennt.

Beobachtungen:

Die während des Versuches gemachten Beobachtungen sind durch die Fotos in Abb. 4.26 nachvollziehbar.

Es wurden folgende Beobachtungen in chronologischer Reihenfolge gemacht:

- Bereits bei der Übertragung vom ungeladenen Blech auf den Transporter wird das gelegte Rechteck nicht sauber übertragen und abgebildet. Das Pulver wird besonders in Richtung der Ecke des Transporters abgelenkt. Dieses Pulververhalten ist in Abb. 4.27 skizziert.
- 2. Während des Fluges von ungeladenem zu geladenem Blech bilden sich Agglomerate.
- 3. Nahezu die gesamte Pulvermenge verlässt das ungeladene Blech.
- 4. Es bilden sich stalaktitenähnliche Strukturen aus Pulver unter dem Transporter.

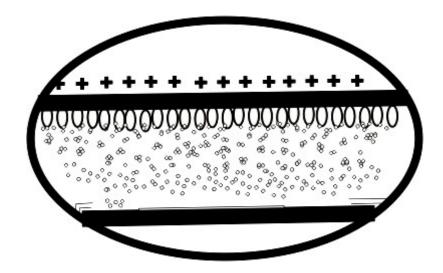


Abbildung 4.28: Pulververhalten bei Übertragung auf den Transporter (Punkte 1.-4.)

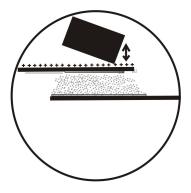


Abbildung 4.29: Streuung bei Übertragung auf das ungeladene Blech

- 5. Bei der Pulverabgabe streut das Pulver ein weiteres Mal.
- 6. Fast das gesamte Pulver kann vom Transporter abgebracht werden.
- 7. Das Pulver wird während des Fluges von Transporter zu ungeladenem Blech von jeder ungeladenen Oberfläche angezogen und streut dadurch ein weiteres Mal. Dies ist in Abb. 4.29 dargestellt.
- 8. Auf dem ungeladenen Blech bilden sich wiederum Agglomerate.

Deutung:

Im Folgenden werden die einzelnen Beobachtungen in gleicher Reihenfolge erklärt beziehungsweise gedeutet.

1. Durch die Vibration der ungeladenen Platte werden nicht kräftig genug angezogene Partikel, die auf dieser "hüpfen", nach außen getragen. Die Anziehung in Richtung der Ecke resultiert aus dem hier ungleichmäßigen elektrischen Feld.

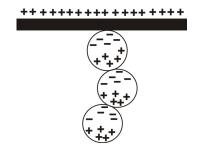


Abbildung 4.30: Pulveranordnung unter dem Transporter

- 2. Durch unterschiedlich starke Aufladung der einzelnen Partikel⁸ während des Fluges zum Transporter entsteht eine Anziehung der Partikel untereinander, woraufhin diese agglomerieren.
- 3. Durch das elektrische Feld, die Ablösung der Partikel vom Blech und die einwirkende Beschleunigung kann das Pulver auf den Transporter übertragen werden.
- 4. Die Pulverpartikel als induzierte Dipole ketten sich aneinander wie in Abb. 4.30 dargestellt, da sie dorthin einen kürzeren Weg zurückzulegen haben, als zum oberen Blech.
- 5. Für die Streuung bei der Pulverabgabe des Transporters gelten die gleichen Gründe wie für die Streuung bei der Pulveraufnahme. Das geladene Pulver springt auf der Unterseite des geladenen Bleches auf und ab, wobei es durch die Vibration nach außen treibt.
- 6. Die Vibration reicht aus, um das nun geladene Pulver von der Oberfläche des Transporters zu lösen, woraufhin es aufgrund der Potentialdifferenz von ungeladenen Oberflächen angezogen wird.
- 7. Wie zuvor erklärt, entsteht eine Potentialdifferenz zwischen geladenem Pulver und ungeladenen Oberflächen, die eine Kraft auf die Pulverpartikel ausübt.
- 8. Beim Auftreffen auf das ungeladene Blech entlädt sich ein Teil der Partikel und wird nun von den noch geladenen angezogen. Wenn die ungeladenen einen geladenen Partikel umhüllen, ist dieser nach außen hin isoliert und kann sich selbst nicht mehr entladen.

Ergebnis:

Es ist klargeworden, dass der elektrostatische Pulvertransport für das Mehrkomponenten-SLS nicht anwendbar ist, wenn nicht einige der den Verfahren des Einzelschichtauftrages

⁸Je nach Größe und Abstand zum Transporter laden sich die Partikel unterschiedlich stark auf.

inhärenten Probleme behoben werden können. Die Pulverübertragung auf den Transporter ist technisch möglich, wenn andere als die hier verwendeten Verfahren benutzt werden, wie zum Beispiel Walzen oder Bürstenauftragung. Die Pulverauftragung vom Transporter auf das Pulverbett durch Vibration hat jedoch mit bei geladenem Pulver immer auftretenden Problemen zu kämpfen wie zum Beispiel:

- Agglomeratbildung im Pulverbett
- Streuung und daraus folgende Abbildungsungenauigkeit
- Beeinflussung des Pulverbettes durch vom Transporter ausgehende Anziehung

Diese Probleme sind nur mit neuen Ansätzen der elektrostatischen Pulveraufbringung lösbar, bei denen das Pulver nicht aufgeladen würde. Diese Aufgabe kann Teil weiterer Arbeiten sein, ist jedoch für die schnelle Umsetzung in der gebauten Anlage nicht sinnvoll. Aus diesen Gründen wird sich im Folgenden auf die vibrationsangeregte Pulveraufbringung konzentriert.

4.5 Versuche zur Vibrationsdosierung

Aufgrund der verschiedenen in der Literatur erfolgreich durchgeführten Versuche und den erfolglosen Elektrostatikversuchen (Abschnitt 4.4) wurde diese Art der Dosierung als die für das Mehrkomponenten-SLS geeignetste bewertet. Der Großteil der Literaturversuche erfolgte jedoch mit Pulvern, die im Vergleich zu den geplanten Polyamidmischungen eine höhere Dichte aufweisen. Diese sorgt für eine höhere Gewichtskraft und somit für eine größere Neigung der Pulver zum gravitationsbedingten Fließen. Außerdem entstehen zwischen Partikeln von Kunststoffpulver starke Wechselwirkungen, die diese am Fließen hindern. Diese Schwierigkeiten durch unterschiedliche Auftragungskonstruktionen zu überwinden, war das Ziel der durchgeführten Versuche.

Versuchsaufbau: Der Versuchsaufbau umfasste bei allen Versuchen einige grundsätzliche Elemente (Abb. 4.31):

- Funktionsgenerator Wavetek Model 25 (Maximale Peak-to-Peak-Ausgangsspannung $^9 \approx 22~V$)
- Präzisions-Zeitschalter-(Bausatz) von Conrad (Signaldurchlass ca. 0,3-100 s)
- Piezoaktor¹⁰ Typ EPZ-35MS29
- Auffangblech mit Millimeterpapier

⁹Differenz zwischen größter und kleinster Spannung (doppelte Amplitude).

¹⁰Verwendet den umgekehrten Piezoeffekt (Bewegung bei angelegter Spannung).

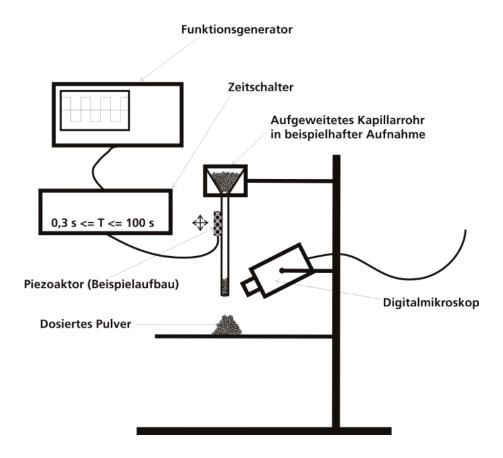


Abbildung 4.31: Versuchsgrundaufbau mit beispielhafter Anordnung von Piezoaktor und Pipettenhalter

• Digitalmikroskop Bresser MP Junior 1,3 Digital Hand Mikroskop (Vergrößerung 36fach und 200-fach)

In der Skizze sind Piezoaktor und Pipettenhalter nur beispielhaft abgebildet und werden in den Versuchen durch die jeweiligen Anordnungen ersetzt.

Der Funktionsgenerator erzeugte ein Rechtecksignal, das im Vergleich mit Sinus- und Dreiecksignal die besten Ergebnisse lieferte, mit veränderlichen Frequenzen und wurde im Bereich von 100 Hz bis 5 kHz betrieben.

Der Zeitschalter-Bausatz diente nach erfolgtem Zusammenbau zum Signaldurchlass für eine festgelegte Zeit und sorgte somit für eine vergleichbare Erfassung der ausgestoßenen Pulvermengen. Die Größe der einzelnen Pulverpunkte auf dem Aufangblech wurde durch das Millimeterpapier fotografisch dokumentierbar. Um den Pulverausfluss im verwendeten Kapillarrohr bewerten zu können, wurde dieser durch das Digitalmikroskop erfasst.

Die Konstruktionsversuche wurden mit dem bereits in den Elektrostatikversuchen verwendeten Polyamid 12 Duraform-Pulver (Abb. 4.32(a)) durchgeführt. Im Laufe der Versuche wurden auch Glashohlkugeln (Silibeads[®] Typ S der Sigmund Lindner GmbH) mit einer





(a) Polyamid 12 Duraform

(b) Mikroglashohlkugeln

Abbildung 4.32: Mikroskopaufnahmen (200-fache Vergrößerung) der verwendeten Konstruktionsversuchspulver

Partikelgröße von 40-70 μ m verwendet (Abb. 4.32(b)), was an betreffender Stelle kenntlich gemacht wird.

Die Messung des Pulverflusses erfolgte rein qualitativ. Hilfsmittel bei der Messung des Pulverausstoßes pro Signalpuls waren das Digitalmikroskop und Millimeterpapier.

4.5.1 Konstruktionsversuche

Ziel dieser Versuche war es, geeignete Apparate zu finden, die unter den gegebenen Randbedingungen (Pulverart, vorhandene Gerätschaften, etc.) eine reproduzierbare, punktuelle und gleichmäßige sowie störungsarme Pulverauftragung mit ausreichend großer Reichweite¹¹ leisten können.

Vor Beginn jedes Versuches wurde das Polyamidpulver über Nacht bei 110 °C getrocknet und anschließend im heißen Zustand mit Analysesieben der Maschenweite 250 und 160 μ m gesiebt, um beim Trocknen entstandene Agglomerate aufzubrechen.

Versuch 1 - Test der unterschiedlichen Kapillarrohre

Es wurden zunächst Kapillarröhrchen verschiedener Innendurchmesser (0,5; 1,0; 1,6) und 2 mm) erprobt, um die geeignetste Größe herauszufinden. Laut Literatur sollte das optimale Durchmesserverhältnis von Rohr- zu Partikeldurchmesser 20 betragen und ab einem Verhältnis < 5 kein Pulverfluss mehr stattfinden. Demnach war zu erwarten, dass bei einem mittleren Partikeldurchmesser von 50 μ m ein Rohrinnendurchmesser von 1 mm optimal ist und ab einem Kapillardurchmesser von 0,25 mm kein Pulverfluss mehr möglich ist. Zur Erprobung dieser Werte wurden die Kapillarrörchen (40 mm lang, Außendurchmesser 3 mm, auf den obersten 5 mm auf 6 mm Außendurchmesser trichterförmig aufgeweitet) in

¹¹Auftragbares Volumen sollte mindestens für eine halbe Pulverschicht auf dem Baukolben reichen.

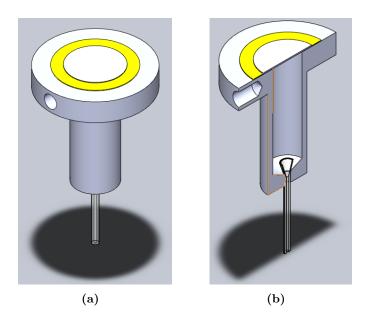


Abbildung 4.33: Aufbau des Pipettenhalters Nummer 1 mit Piezoaktor und Pipette

die Bohrung eines vorbereiteten Piezoelementes gehängt. Der Piezoaktor wurde in einen Stativgreifer geklemmt und, nachdem der obere Teil des Kapillarrohres mit Pulver gefüllt worden war, unter Spannung gesetzt.

Es zeigte sich, dass das Pulver auch bei einem Rohrdurchmeser von 0,5 mm nicht floss, was auf die im Vergleich zu den in der Literatur verwendeten Metall- oder Keramikpulvern schlechteren Fließeigenschaften von Kunststoffpulvern zurückzuführen ist. Ab einem Durchmesser von 1,6 mm begann das Pulver unkontrolliert zu fließen - es bildeten sich auch im nichtangeregten Zustand keine Brücken mehr. Ein kontrollierbarer Pulverfluss konnte hingegen mit der 1 mm-Kapillare erreicht werden, die somit für die weiteren Versuche verwendet werden konnte.

Versuch 2 - Pipettenhalter Nummer 1 mit Pipette

Der Grundgedanke dieses Versuches war es, den gesamten Halter in Vibration zu versetzen. Es stellte sich allerdings heraus, dass die Kraft des Piezoelementes dazu nicht ausreichte. Es standen zwar andere Piezoaktortypen zu Verfügung, diese benötigten jedoch eine höhere Spannung als der Funktionsgenerator leisten konnte. Zudem zeigte sich, dass es nicht sinnvoll ist, den gesamten Halter in Schwingung zu versetzen, wenn die Schwingung des Bodens für den Pulvertransport ausreichen sollte.

Versuch 3 - Pipettenhalter Nummer 2 mit Piezoelement

Als Reaktion auf den vorherigen Versuch wurden Halter hergestellt, die den Piezoaktor am äußeren Rand klemmen, um eine größere Amplitude der mechanischen Schwingung zu erreichen (Abb. 4.34).

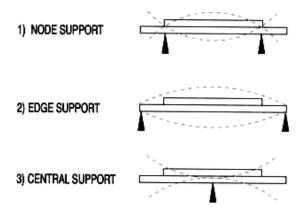


Abbildung 4.34: Lagerung und resultierendes Schwingungsverhalten des Piezoaktors [EPZ10]

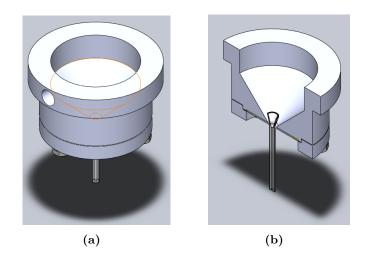


Abbildung 4.35: Aufbau des Pipettenhalters Nummer 2 mit Piezoaktor und Pipette

Zudem wurde bei diesem Versuch lediglich die leichte Pipette an Stelle des gesamten Halters in Schwingung versetzt, weswegen die vergleichsweise schwachen Piezoelemente verwendet werden konnten. Sie wurden mit einer Bohrung von 3,2 mm Durchmesser versehen, um die Pipetten aufnehmen zu können. Die mit diesem Halter (Abb. 4.35) durchgeführten Versuche werden im Folgenden geschildert.

Versuch 3.1 - Eingehängte Pipette

Bei diesem Versuch wurde die Pipette lediglich in den Piezoaktor eingehängt und der Trichter mit Pulver befüllt. Bei angelegter Rechteckspannung vibriert also nur die kleine Pipette und sollte dadurch das darüberliegende Pulver im Halter/Trichter zum Fließen anregen. Es stellte sich heraus, dass die Pipette durch ihre freie Lagerung sehr gut vibrierte, das Pulver im Trichter aber nur mäßig nachrutschte. Leider ließen sich mit dieser Methode aufgrund der Pendelbewegung der Pipettenspitze nur ungenaue Punkte und Linien (Abb. 4.36) darstellen.



Abbildung 4.36: Durch Pendelbewegung hervorgerufener Verlauf einer dosierten Linie

Daraus folgte als logische Konsequenz, die Pipette dauerhaft am Piezoelement zu befestigen und dabei das Pendelmoment aufzunehmen.

Versuch 3.2 - Befestigte Pipette - Heißkleber

Das Vorgehen bei diesem Versuch ist identisch mit dem des vorherigen Versuches. Vorher wurde allerdings die Pipette mit Heißkleber am Piezoelement befestigt. Hierbei stellte sich jedoch schon bei ersten Probeläufen (Piezoelement in Stativgreifer geklemmt) heraus, dass der elastische Klebstoff die Schwingung der Pipette so stark dämpft, dass kaum Pulverfluss in der Pipette, wenngleich auch kein Pendeln, stattfand. Als der hier beschriebene Aufbau in den Halter/Trichter eingebaut wurde, zeigten sich Fließstörungen im Zulauftrichter, da das über der Pipette liegende Pulver nur ungenügend bewegt wurde. Dies äußerte sich darin, dass bereits nach einem wenige Sekunden währenden schlechten Pulverfluss Brücken entstanden, die weiteres Fließen verhinderten.

Versuch 3.3 - Befestigte Pipette - Sekundenkleber

Wie bereits im vorigen Versuch wurde auch hier die Pipette am Piezoelement befestigt. Allerdings wurde hier zu diesem Zweck ein Sekundenkleber (BEST-CA 233T) verwendet. Dieser gilt zwar als ein vergleichsweise elastischer Sekundenkleber, ist jedoch im Vergleich zum Heißkleber äußerst steif. Durch diesen Klebstoff konnte eine geringere Dämpfung und somit eine stärkere Vibration erreicht werden, die allerdings immer noch schwächer ausfiel als die der lose eingehängten Pipette. Wie bereits im letzten Versuch konnte auch hier ein Pendeln der Pipette verhindert werden. Leider bildeten sich auch hier schnell Brücken, die den Pulverfluss zum Erliegen brachten.

Versuch 3.4 - Piezolement mit Loch

Da sich alle Lösungen, die auf eine Pipette zurückgriffen, als problematisch herausstellten, wurde hier ein Piezoaktor mit einem Loch von 2 mm Durchmesser im Halter montiert. Durch die geringere Länge der Engstelle von 0,6 mm im Vergleich zu 35 mm bei der Pipette sollte es zu einem leichteren Pulverfluss kommen. Es ergab sich ein zufriedenstellender Pulverfluss, der allerdings wiederum nach wenigen Pulverstößen durch die bereits oben erwähnten Brücken versiegte.

Versuch 3.5 - Glashohlkugeln

Nachdem keines der oben genannten Verfahren zu einer erfolgreichen Dosierung des Polyamid-

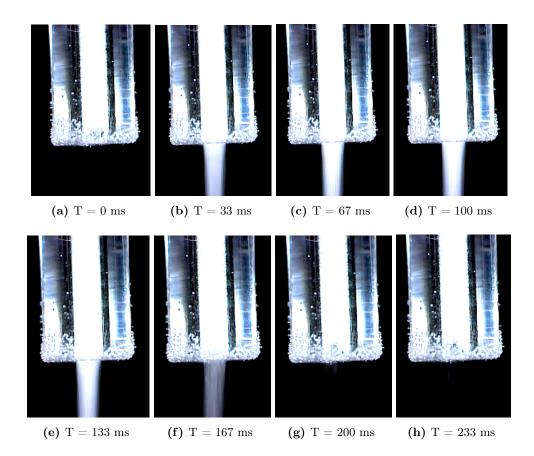


Abbildung 4.37: Verhalten der Glaskugeln bei einem Signalpuls

12-Pulvers führte, musste der zugrunde liegende Dosierapparat prinzipiell überprüft werden. Dies erfolgte durch den Einsatz von Mikrohohlkugeln aus Glas (siehe oben) als Best-Case-Versuch. Diese verfügen über hervorragende Fließeigenschaften, da sie zusätzlich zu ihrer vergleichsweise hohen Dichte sehr rund und damit fließfähig sind. Der mittlere Partikeldurchmesser der Glaskugeln entsprach ungefähr dem des Polyamidpulvers. Es stellte sich sehr schnell heraus, dass Öffnungsdurchmesser von mehr als 1 mm hierbei zu einem unkontrollierbaren Dauerfluss führten. Daher wurde auf die aus Versuch 3.3 bekannte Anordnung zurückgegriffen.

Es ergab sich, dass die Dosierfähigkeit des Aufbaus mit den Glaskugeln nahezu perfekt war. Dies äußerte sich insbesondere im sehr guten Pulverfluss, den reproduzierbaren Punkten und den geraden und gleichmäßig dicken Linien, die damit herstellbar waren. Die nachfolgende Fotostrecke (Abb. 4.37) zeigt das Pulververhalten bei einem Signalpuls mit einer Bildrate von 30 Bildern pro Sekunde, der Abstand zwischen zwei Bildern beträgt somit ca. 33 ms.

Es zeigte sich, dass dieser Aufbau grundsätzlich funktioniert und lediglich die schlechten Fließeigenschaften des Kunststoffpulvers eine Dosierung verhindern.



Abbildung 4.38: Dosierte Punkte und Linien bei unterschiedlichen Signaldauern

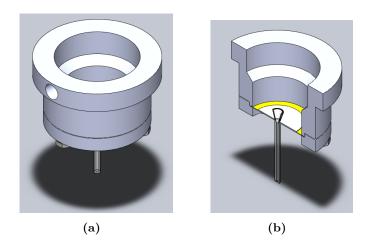


Abbildung 4.39: Aufbau des Pipettenhalters Nummer 3 mit Piezoaktor und Pipette

Versuch 4 - Pipettenhalter Nummer 3 - Aufgebohrter Trichter:

Da im hergestellten Trichter kein Fließen des Polyamidpulvers stattfand, wurde versucht, durch eine größere und steiler zulaufende Öffnung einen besseren Pulvertransport zu erreichen. Dazu wurde der bestehende Trichter auf einen Durchmesser von 32 mm aufgebohrt (Abb. 4.39). Die vergrößerte Öffnung verhindert die, bei den Versuchen mit trichterförmigem Halter festgestellte, zusätzliche Verdichtung des Pulvers durch den sich verringernden Querschnitt und sorgt dafür, dass das Piezoelement das gesamte darüberliegende Pulver in Schwingung versetzen kann.

Versuch 4.1 - Aufgebohrter Trichter mit Loch in Piezoelement

Bei diesem Versuch wurde analog zu Versuch 3.4 ein Piezoelement mit einer Bohrung versehen, durch die das Pulver ausfließen sollte. Es stellte sich heraus, dass sich später als in Versuch 3.4 die Brücken über der Öffnung bildeten, die den Pulverfluss zum Erliegen

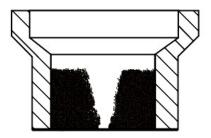


Abbildung 4.40: Rutschkegel

brachten. Die Anordnung mit dem aufgebohrten Trichter brachte also eine Verbesserung mit sich. Dennoch gab es bei diesem Versuch, bei dem nur auf das Piezoelement zurückgegriffen wurde, immer noch keinen dauerhaft reproduzierbaren Pulverfluss.

Versuch 4.2 - Aufgebohrter Trichter mit Pipette

Hier wurde in den aufgebohrten Trichter ein Piezoelement mit einer darin fixierten Pipette eingebaut. Zum Befestigen der Pipette am Piezoelement wurde wiederum der oben genannte Sekundenkleber verwendet, da dieser die besten Ergebnisse lieferte. Auch bei diesem Aufbau erfolgte nur ein mäßiger Pulvertransport, der allerdings besser war als in den Versuchen mit dem trichterförmigen Zulauf (Versuch 3.3). Es bildeten sich wieder relativ schnell Brücken über der Durchlassöffnung. Es drängte sich die Vermutung auf, dass der Grund dafür die geringe Bewegung des Piezoelementes in der Nähe der Klemmung am außen liegenden Teil des Zulaufes war (vergleiche Abb. 4.34). Des Weiteren zeigte sich, dass der sich formende Rutschkegel (Abb. 4.40) des Pulvers aufgrund der starken Kräfte zwischen den einzelnen Partikeln des Kunststoffpulvers sehr schmal und steil war.

Versuch 4.3 - Aufgebohrter Trichter mit Zulaufrohr über Pipette

Um zu verhindern, dass Pulver, das außerhalb des Rutschkegels liegt, als Aufbaupunkt für Brücken dienen kann, wurde in diesem Versuch ein Kupferrohr mit 6 mm Innendurchmesser über die Pipette gestülpt (Abb. 4.41). Es wurde so an den Stativen befestigt, dass das Piezoelement darunter frei schwingen konnte. Diese Konstruktion ergab wieder ein leicht verbessertes Fließverhalten. Dennoch stellte sich aufgrund des durch den Einlauftrichter der Pipette hervorgerufenen Absatzes eine starke Brückenbildung in diesem Bereich ein.

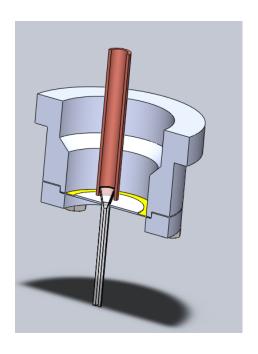


Abbildung 4.41: Aufgebohrter Trichter mit Zulaufrohr über Pipette

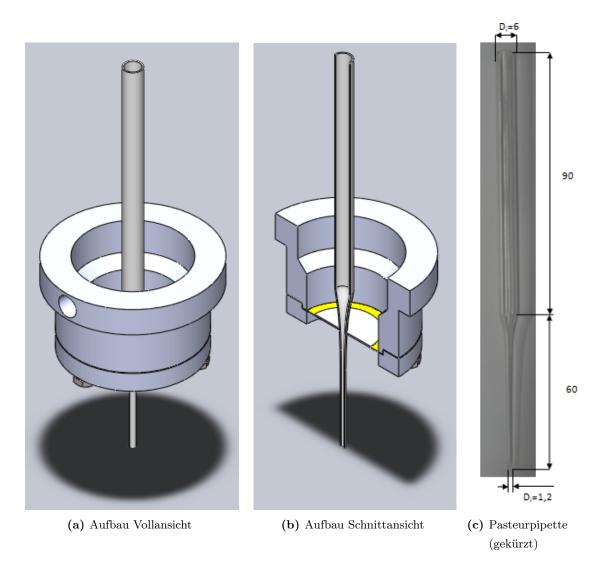


Abbildung 4.42: Aufbau des Pipettenhalters Nummer 3 mit Piezoaktor und Pasteurpipette

Versuch 5 - Pasteurpipette

Ziel dieses Versuches war es nun, die Form des Pulverdosiergerätes möglichst an das natürliche Fließverhalten des Pulvers anzupassen. Dafür muss eine möglichst steile Verengung ohne Absatz und mit guten Wandreibungseigenschaften erreicht werden. Des Weiteren sollte die gesamte Pulveraufnahme leicht sein, mitschwingen und einen kleinsten Innendurchmesser von ca. 1 mm aufweisen.

Diese Anforderungen wurden von einer sogenannten Pasteurpipette aus Glas (Abb. 4.42(c)) erfüllt.

Diese wurde, wie in den folgenden Abb. 4.42(a) und 4.42(b) in den Pipettenhalter mit aufgebohrtem Trichter eingebaut und mit dem oben erwähnten Sekundenkleber am Piezoelement befestigt. Im Vorhinein war die Pipettenspitze auf ein besser verwendbares Maß gekürzt worden.



Abbildung 4.43: Aufbau und dosierte Punkte

Nachdem die gesamte Pipette mit Polyamidpulver gefüllt war, wurde das Piezoelement unter Spannung gesetzt. Es zeigte sich, dass eine reproduzierbare und steuerbare Pulverauftragung mit diesem Gerät (Abb. 4.43) möglich ist. Lediglich die ersten 3-5 Pulverausstöße (Vorlauf) sind aufgrund des noch zu locker gepackten und somit zu fließfähigen Pulvers größer als die anderen und müssen entsorgt werden.

Die Punkte wurden unter Verwendung eines Rechtecksignals mit einer Frequenz von $1300~{\rm Hz}$ bei einer Peak-to-Peak-Spannung von $21,7~{\rm V}$ erzeugt.

Um die Dosiergenauigkeit zu prüfen, wurden Punkte mit einer Signaldauer von 0,3 s erzeugt und die Ausfluss- mit der Signaldauer verglichen. Dazu wurde wieder das Digitalmikroskop verwendet. Es zeigte sich, dass kein Nachlauf erfolgte, wie in den folgenden Bildern zu sehen ist.

Im Folgenden wurden Punkte mit 0,3 s Signaldauer (Abb. 4.45(a)), unterschiedlichen Signaldauern (Abb. 4.45(b)) und Linien (Abb. 4.45(c)) erzeugt.

Nachdem die komplette Pipette problemlos geleert werden konnte, fand ein weiterer Versuch statt, bei dem die gefüllte Pipette erst nach einer Ruhezeit von einer Stunde zur Dosierung verwendet wurde. Dadurch sollte geprüft werden, ob sich die Fließeigenschaften des Pulvers durch Kompaktierung, Einfluss der Luftfeuchtigkeit oder weitere Umwelteinflüsse verschlechterten. Auch in diesem Versuch ließ sich das Pulver gut und reproduzierbar

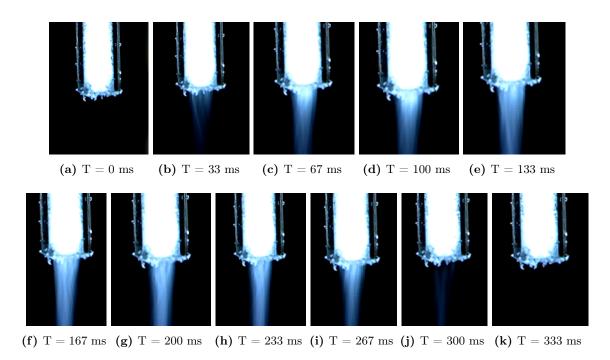


Abbildung 4.44: Verhalten der Duraform-Pulvers bei einem Signalpuls



Abbildung 4.45: Muster aus Duraform

dosieren.

Eine Volumenabschätzung des durch die Pipette dosierbaren Pulvers zeigte, dass das Pipettenvolumen (angenähert durch Zylinder mit $D_i=6$ mm und H=90 mm) von ca. 2,5 cm³ ausreicht, um eine 0,2 mm starke Pulverschicht (ca. 2,3 cm³) auf der Baukolbenoberfläche abzulegen.

4.5.2 Materialversuche

Nachdem im Zuge der Konstruktionsversuche ein Apparat entwickelt wurde, der grundsätzlich in der Lage ist, das Polyamid 12 Duraform-Pulver durch Vibrationsanregung zu dosieren, gilt es nun, das Dosierverhalten verschiedener Materialien für die Zweitkomponente zu prüfen. Dazu wird von jedem Werkstoff eine Beispieldosierung mit einer komplett gefüllten Pasteurpipette vorgenommen. Daraufhin werden die generelle Eignung des Werkstoffes für die Vibrationsdosierung mit Pasteurpipette bewertet. Die dafür verwendete Skala ist:

- ++: Sehr gut (direkt für das Mehrkomponenten SLS einsetzbar)
- +: Gut (nach Verbesserungen wie Siebhilfsmittelzugabe oder feinerer Mahlung einsetzbar)
- o: Ausreichend
- -: Schlecht
- -: Gänzlich ungeeignet

Des Weiteren werden im Folgenden die Punktgröße bei einer Signaldauer von 0,3 s, Fotos aufgetragener Muster und Bemerkungen zum Pulververhalten für jedes Pulver dokumentiert.

Materialien

Nr.	Bezeichnung
1	PA 12 Duraform
2	Gebrauchtes PA 12 Duraform
3	Orgasol
4	PA 12 Duraform + Vestamid E40S3 (50 Gew%)
5	PA 12 Duraform + Vestamid E55S3 (50 Gew%)
6	PA 12 Duraform + Vestamid E62S3 (50 Gew%)
7	PA 12 Duraform + Pebax 3533SP01 (50 Gew%) [D _{Partikel} $< 250 \mu \text{m}$]
8	PA 12 Duraform + Pebax 4033SP01 (50 Gew%)
9	PA 12 Duraform + Calciumcarbonat (CaCo ₃) (1 Vol%)
10	PA 12 Duraform + Celpure (1 Vol%)
11	PA 12 Duraform + Eisenoxid (Fe $_3$ O $_4$) (0,4 Vol%)
12	PA 12 Duraform + Siliciumcarbid (SiC) (1 Vol%)
13	PA 12 Duraform + Titandioxid (${ m TiO_2}$) (0,4 Vol%)
14	PA 12 Duraform + Ethylen-Propylen-Dien-Kautschuk (EPDM) grün (30 Vol%)
15	PA 12 Duraform + EPDM schwarz (30 Vol%)
16	PA 12 Duraform + Naturkautschuk (NR)-Ecor RNM (30 Vol%)
17	PA 12 Duraform + NR-SBR (30 Vol%)

Mat.	Punktgröße	Bemerkungen	Be-
	bei $T_S{=}0,3~\mathrm{s}$		wert-
			ung
1	1,5 - 2,5 mm	- Geringfügiges Verklumpen	++
2	2 - 3,5 mm	- Löcher im Zulauf (Pipettenspitze nicht vollständig	+
		mit Pulver gefüllt)	
		- Nachlauf und daher leicht ungleiche Mengen pro	
		Punkt	
3	2,5 - 4 mm	- Hohe Fließfähigkeit (Haufen fallen in sich zusam-	+
	(Vor Einfallen	men)	
	der Haufen)	- Leichter Nachlauf führt zu kleiner Mengenvariation	
4	1 - 2 mm (Fla-	- Schlechtes Fließverhalten bezüglich der Menge	0
	che Haufen)	- Erzeugung kleiner, aus wenigen Partikeln bestehen-	
		der Punkte	
		- Meist stetiger Pulverfluss, dennoch teilweise keine	
		Pulverabgabe bei $T_S=0.3 s$	
		- Klumpiger Auswurf	
		- Langer Vorlauf ¹² erforderlich	
5	2 - 3 mm	- Gutes Fließverhalten bezüglich der Menge	+
		- Löcher im Zulauf	
		- Unstetiger Pulverfluss	
		- Nicht gesetzte Punkte und Lücken in Linien	
		- Langer Vorlauf erforderlich	
6	2 - 3 mm	- Sehr gutes Fließverhalten	++
		- Große Dosiergeschwindigkeit möglich	
7	3 - 4 mm	- Nur ca. 10 % des Pebax-Pulvers kleiner als 250 $\mu\mathrm{m},$	++
		daher nicht feiner gesiebt	
		- Sehr gutes Fließverhalten bezüglich der Menge	
		- Löcher im Zulauf	
		- Lockere Haufen (Vermutung: Pebax als Elastomer	
		lockert das Gemisch auf)	
8	2 mm	- Schlechter Fluss, kleine Punkte und klumpiger Aus-	-
		wurf	
		- Sehr langer Vorlauf erforderlich (ca. 10 Punkte)	
		- Aussetzer bei Punkten und Linien	
		- Unsaubere Linienführung (Zick-Zack)	

 $[\]overline{\ \ \ }^{12}$ Zeit, die benötigt wird, bis sich die Punktgröße aufgrund der Verdichtung im oberen Bereich der Pipette vergleichmäßigt.

Mat.	Punktgröße	Bemerkungen	Be-
	bei $T_S{=}0,3~\mathrm{s}$		wert-
			ung
9	3 mm	- Sehr gutes Fließverhalten	++
		- Einfallen der Haufen	
		- Minimale Unstetigkeiten	
10	1,5 - 3 mm	- Nachlauf, Löcher im Zulauf	-
		- Existenz harter Bröckchen, die die Pipette verstop-	
		fen	
		- Unstetiger Pulverfluss und anhaltende Aussetzer	
		- Mittelmäßige Dosiermenge	
11	2 - 3 mm (Fla-	- Sehr gutes Fließverhalten bezüglich Menge und Ste-	++
	che Haufen)	tigkeit	
		- Einfallen der Haufen	
12	3 - 4 mm (Fla-	- Sehr gutes Fließverhalten bezüglich Menge und Ste-	++
	che Haufen)	tigkeit	
		- Dünnste Linie (aufgrund der hier sehr hohen Bewe-	
		gungsgeschwindigkeit sehr dünn) geringfügig unstetig	
		- Geringes Einfallen der Haufen	
13	3 - 4 mm (Fla-	- Gutes Fließverhalten (mäßige Menge und gute Ste-	++
	che Haufen)	tigkeit)	
		- Leicht klumpiger Auswurf	
14		- Kein Pulverfluss	
15	2 - 3 mm	- Zu Beginn kurzzeitig schlechter, unstetiger Pulver-	
	(Krümel, keine	fluss mit Löchern im Zulauf	
	Haufen)	- Dann Versiegen des Pulverflusses	
16	3 - 4 mm	- Sehr gute Pulvermenge	o
		- Häufige Aussetzer	
		- Löcher im Zulauf	
17	2 - 4 mm	- mittelmäßige Pulvermenge	-
		- Häufige Aussetzer	
		- Löcher im Zulauf	
		- sehr ungleichmäßige Pulverabgabe	

Tabelle 4.1: Ergebnisse der Materialversuche

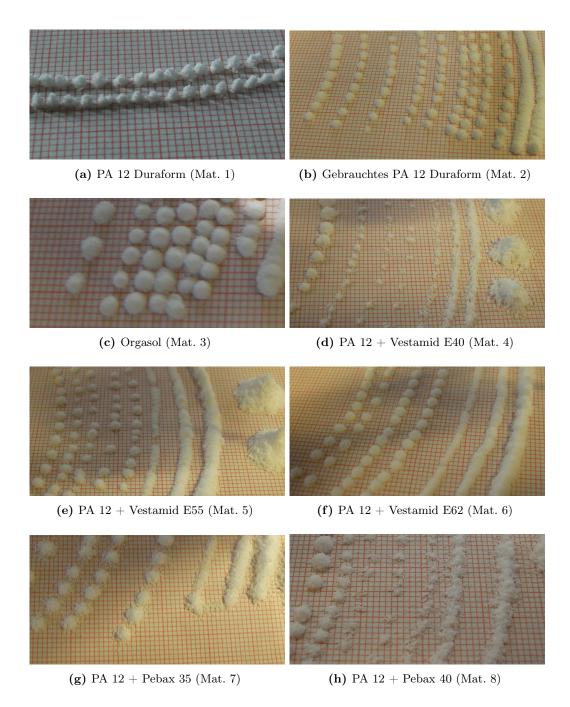


Abbildung 4.46: Dosierte Punkte der verschiedenen Materialien (Gruppe 1)

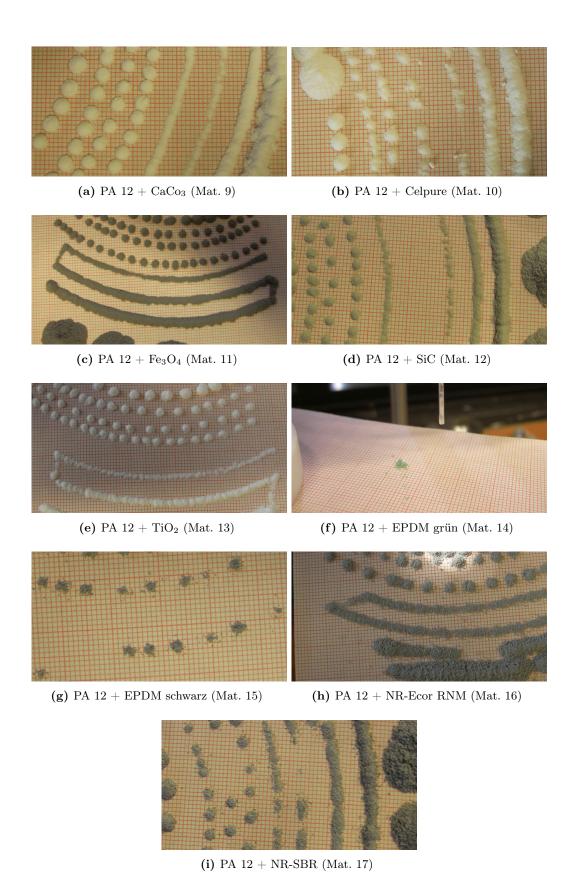


Abbildung 4.47: Dosierte Punkte der verschiedenen Materialien (Gruppe 2)

Ergebnis: Im Rahmen der Konstruktionsversuche wurde ein Auftragungsapparat für die vibrationsangeregte Dosierung feiner Pulver ermittelt. Die Materialversuche zeigten, dass manche Pulver aufgrund ihrer stofflichen Eigenschaften (zum Beispiel starke Anziehungskräfte der einzelnen Partikel) für diese Art der Dosierung generell ungeeignet sind, andere wiederum wegen ihrer Partikelgröße nicht verwendbar sind. Letztere sind allerdings nach entsprechender Vorbehandlung wie Sieben und Mahlen ein weiteres Mal auf ihre Eignung zu untersuchen.

Es zeigte sich, dass mit der hier verwendeten Dosiertechnik einfach, exakt und vergleichsweise schnell dosiert werden kann.

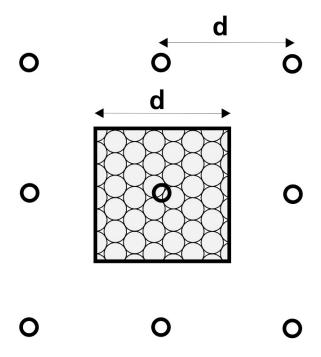


Abbildung 4.48: Pipettenspitzen und zu füllendes Quadrat

4.6 Konzeption eines Auftragungsgerätes

Nachdem im Versuch die Pulverdosierung mit einer Pipette erfolgreich war, wird im Folgenden ein Apparat konzipiert, der einen Schichtauftrag beim Mehrkomponenten-SLS ermöglicht.

Hierzu können zwei grundlegende Prinzipien verwendet werden. Zum einen kann eine Pipette mit einer XY-Verfahreinheit bewegt werden und so jeden Punkt einzeln setzen. Dabei ist eine große Zahl an Bewegungen nötig, wodurch der gesamte Bauprozess extrem verlängert wird.

Zum anderen kann eine Array-Anordnung der Pipetten eingesetzt werden, die direkt über den Bauraum platziert wird und bei der sich eine Pipette über jedem Punkt des Bauraumes befindet. Dabei kann durch selektive Ansteuerung der Pipetten der gesamte Bauraum ohne zusätzliche Bewegungen zunächst mit der Erstkomponente und danach mit der Zweitkomponente gefüllt werden. Dieses Verfahren ist mit der getesteten Anordnung nicht durchführbar, da die Pipettenspitzen aufgrund des größeren Durchmessers der Piezoelemente und des oberen Teils der Pipette nicht direkt nebeneinander platziert werden können.

Um eine möglichst hohe Baugeschwindigkeit zu erreichen, werden bei diesem Konzept beide Ansätze kombiniert. Es wird ein Array aus Pipetten gestaltet, das in der Bauebene bewegt wird, um die gesamte Baukolbenoberfläche mit Pulver bedecken zu können. Hierbei muss eine Pipette ein Quadrat füllen, das den Abstand der Pipetten untereinander als Kantenlänge besitzt. Diese Idee ist in Abb. 4.48 dargestellt.

Es wurde zunächst eine Anordnung entworfen, die in der Lage ist, mit den in den Versuchen

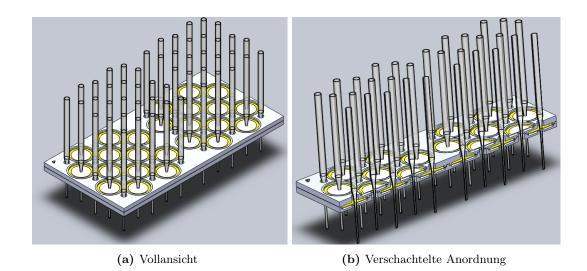


Abbildung 4.49: Konzept des Auftragungsgerätes

verwendeten Piezoelementen und Pipetten zwei Komponenten aufzubringen (Abb. 4.49(a)). Hier wurde auf eine verschachtelte Pipettenanordnung zurückgegriffen, um die Abstände zwischen den Pipettenspitzen und somit die Zahl der Bewegungsoperationen möglichst gering zu halten (Abb. 4.49(b)). Wichtig war des Weiteren, dass jedes Piezoelement auf dem gesamten Umfang außen eingespannt wurde und für die daraus folgende große mechanische Schwingungsamplitude ausreichend Freiraum vorgesehen wurde.

Anschließend wurde ein Konzept entwickelt, um den Einbau einer solchen Auftragungsapparatur in die SLS-Versuchsanlage möglich zu machen. Hierbei war es besonders wichtig, eine einfache Füllung der Pipetten zu realisieren, die die Pipetten nicht einzeln mit den verschiedenen Komponenten füllt, da dafür wiederum eine selektive Dosiertechnik benötigt würde. In Abb. 4.50 ist das entwickelte Konzept in den Bauraum integriert dargestellt.

Hierbei sind zwei Kammern in den Bauraum eingebaut, in denen Pulver durch einen Rakel über Löcher geschoben wird. Das Pulver fällt dabei in die unter den Löchern positionierten Pipetten, die dadurch zum Beispiel während des Laservorganges aufgefüllt werden können. Eine Pulverkomponente fällt hier in den vorderen Teil des Pipettenarrays, die andere in den hinteren. Daraufhin wird der Pipettenträger mit dem mit Pulver A gefüllten Bereich über den Bauzylinder gebracht. Als nächstes wird diese Komponente an den zu füllenden Stellen aufgebracht, indem die entsprechenden Piezoaktoren und Bewegungsantriebe angesteuert werden. Danach wird Komponente B ebenso an die verbleibenden Stellen dosiert. Da das so entstehende Feld durch die aufgebrachten Haufen sehr uneben ist, sollte das Pulver anschließend kompaktiert werden. Um dabei keine Vermischung der einzelnen Punkte zu erhalten, sollte dies durch eine Walze geschehen, deren angetriebene Rotation eine Drehgeschwindigkeit hat, die der einer auf dem Pulverbett rollenden Walze entspricht. Das heißt, die Tangentialgeschwindigkeit der Walzfläche muss gleich der Geschwindigkeit

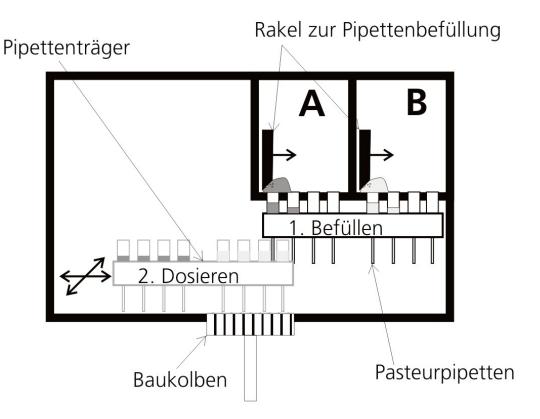


Abbildung 4.50: Konzept der Pulverdosierung

der Translationsbewegung des Drehpunktes sein. Nach dem Verdichtungs- und Planiervorgang kann der Laser zum Einsatz kommen, während die Pipetten wieder aufgefüllt werden.

Eine Überprüfung der Umsetzbarkeit dieses Konzeptes war im Rahmen dieser Bachelorarbeit nicht möglich und sollte in zukünftigen Arbeiten an diesem Thema erfolgen, was eine Ausarbeitung der konstruktiven Details einschließt.

Kapitel 5

Fazit

Der wichtigste und größte Teil dieser Arbeit besteht in der Entwicklung einer Methode zur Mehrkomponentendosierung. Hier wurde eine umfangreiche Literaturrecherche durchgeführt, bei der sich zwei Verfahren, nämlich elektrostatische und vibratiosangeregte Dosierung als besonders geeignet herauskristallisierten. Diese beiden Verfahren wurden daraufhin experimentell untersucht.

Die elektrostatische Pulverdosierung erwies sich in einem einfachen Versuchsaufbau als nicht erfolgreich. Außerdem zeigten sich Probleme wie die unkontrollierbare Wechselwirkung zwischen dem elektrostatisch aufgeladenen Pulvertransportgerät und dem Pulverbett, die ihren Einsatz beim Mehrkomponenten-SLS äußerst fraglich erscheinen ließen. Diese Technik ist dadurch für das SLS ungeeignet, was auch in der Literatur [Kum00]¹[LLCD02]² erkannt wurde.

Die Versuche zur Vibrationsdosierung zeigten, dass bei der Gestaltung eines passenden Dosiergerätes, insbesondere bei den schlecht fließenden Kunststoffpulvern, ein Zulauf mit glatten Wänden, kleinem Öffnungswinkel und geringem Eigengewicht vorzusehen ist. Es wurde mit der Pasteurpipette ein geeignetes Gerät gefunden, das aber nur für bestimmte Materialien und Partikelgrößen geeignet ist. Dadurch wird die Entwicklung neuer Pulver für das Mehrkomponenten-SLS weiter erschwert, da neben Schmelztemperatur und Sinterfenster³ nun auch noch die Fließeigenschaften beachtet werden müssen. Außerdem ist vor jedem Sintertest eine Trocknung und Siebung des Pulvers nötig. Dennoch zeigte die Pipette bei vielen Materialien eine gute Reproduzierbarkeit und exakte Positionierung der dosierten Punkte. Ein weiterer großer Vorteil ist der einfache Aufbau und die unkomplizierte Ansteuerung der einzelnen Pipettendosierer, da nur dadurch Arrays aus vielen Pipetten

¹Kumar bechreibt hier die Pulveraufbringung auf feste Schichten, da das SLS aufgrund des verwendeten Pulverbettes nicht geeignet war.

²Liew verbucht die Pulveraufbringung auf Papier hier als Erfolg, nachdem die Pulverübertragung auf ein Pulverbett nicht erfolgreich war.

³Hysterese zwischen Schmelz- und Erstarrungsvorgang.

handhabbar bleiben.

Zum Schluss dieses Teiles der Arbeit wurde das Konzept eines Dosierapparates vorgestellt, der auf Piezoelementen und Pasteurpipetten beruht. Dieser ist in die in dieser Arbeit beschriebene Versuchsanlage, die nach letzten Einstellungsarbeiten in Betrieb gehen kann, integrierbar, bedarf aber der Ausarbeitung der Details und der daraus resultierenden Anpassungsarbeiten.

Eine Hauptaufgabe sollte in Zukunft sein, kleinere Piezoaktoren bei gleichbleibender Oszillationsstärke zu finden, da diese hauptsächlich für den Abstand zwischen den Pipettenspitzen und somit die Zahl der Bewegungsschritte verantwortlich sind. Des Weiteren ist das Problem der zu geringen Temperaturbeständigkeit der bisher verwendeten Piezoelemente zu lösen, die nach dem Überschreiten der Curie-Temperatur den piezoelektrischen Effekt verlieren und bereits bei deutlich tieferen Temperaturen irreversible Schäden davontragen. Bei den hier verwendeten Piezoelementen liegt die empfohlene Betriebshöchsttemperatur bei 70 °C, weswegen hier eventuell eine Kühlung vorzusehen ist. Außerdem ist ein weiterer Antrieb für eine freie Bewegung des Auftragungsgerätes in der Bauebene einzubauen und die komplexe Gesamtsteuerung der Linearmotoren und Piezoelemente zu entwickeln. Im Falle einer erfolgreichen Umsetzung dieses Verfahrens kann bereits in kurzer Zeit die erste Mehrkomponenten-SLS-Anlage zu Versuchszwecken in Betrieb genommen werden. Dies bedeutete einen großen Fortschritt in der Herstellung komplexer Bauteile. Durch die hierdurch mögliche materialtechnische Anwendung biologischer Konstruktionsprinzipien bei gleichzeitiger freier Formgebung kann die Wissenschaft der Bionik einen großen Aufschwung und Fortschritt erfahren.

Literaturverzeichnis

- [Aro72] Schutzrecht US Patent No.: 3656518 (April 1972). ARONSON, Theodore F. (Erfinder). Method and Apparatus for Measuring and Dispensing Predetermined Equal Amounts of Powdered Material
- [BBJ⁺09] Blömer, Jan ; Bernotat, Anke ; Jäger, Raimund ; Gerken, Jörg ; Flötotto, Hendrik: Projektantrag zur Bekanntmachung »BIONA« Entwicklung einer generativen Fertigungstechnik für die Bauteilherstellung nach biologischen Konstruktions- und Strukturierungsprinzipien am Beispiel des Freischwingers

 »BIONIC MANUFACTURING« . April 2009
- [BBJ⁺10] Blömer, Jan ; Bernotat, Anke ; Jäger, Raimund ; Gerken, Jörg ; Flötotto, Hendrik: 2. Gesamtzwischenbericht Entwicklung einer generativen Fertigungstechnik für die Bauteilherstellung nach biologischen Konstruktions- und Strukturierungsprinzipien am Beispiel des Freischwingers »BIONIC MANUFACTURING« . Februar 2010
- [CHL $^+$ 01] Chen, Wei ; Hou, Meiying ; Lu, Kunquan ; Jiang, Zehui ; Lam, Lui: Granular flows through vertical pipes controlled by an electric field. In: *Physical Review E* 64 (2001), Nr. 061305
- [DCB92] Schutzrecht US Patent No.: 5104230 (April 1992). DOUCHE, Jean-Pierre; COULON, Jean-Claude; BOUTTIER, Pierre (Erfinder). Device for Metering Pulvurulent Materials
- [EPZ10] EKULIT: EPZ Piezoelectric Ceramic Element. 2010. Datenblatt
- [Geb04] Gebhardt, Andreas: Grundlagen des Rapid Prototyping Eine Kurzdarstellung der Rapid Prototyping Verfahren. In: *RTejournal* 1 (2004)
- [Geb07] Gebhardt, Andreas: Generative Fertigungsverfahren Rapid Prototyping Rapid Tooling Rapid Manufacturing. München: Carl Hanser Verlag, 2007

- [GO99] Schutzrecht US Patent No.: 5871081 (Februar 1999). GAALSWYK, Mark K.;
 OWENS, Mark A. (Erfinder). Concentric Auger Feeder
- [Har30] Schutzrecht US Patent No.: 1783423 (Dezember 1930). HARPER, Elmer E. (Erfinder). Chemical Feed Machine
- [Jan09] Janzen, Friedrich: Skriptum zur Vorlesung Fertiungsverfahren SS 2009. 2009
- [KBGZ⁺04] KANE, Nathan R.; BROCE, Brad; GONZALES-ZUGASTI, Javier; LEWIS, Wendy P.; LEQUESNE, Martin; LEMMO, Anthony V.: A System for Dispensing Sub-Milligram Doses of Active Pharmaceutical Powders for Early Stage Solubility Assays. In: JALA (2004), Nr. 9, S. 218–227
- [KFES96] KOBAYASHI, M.; FUDOUZI, H.; EGASHIRA, M.; SHINYA, N.: Arrangement of silica particles on calcium titanate substrate and its appraisal. In: SPIE Proceedings Report Smart Structures and Materials Bd. 2722, 1996, S. 205–213
- [Kum00] Schutzrecht US Patent No.: 6066285 (Mai 2000). KUMAR, Ashok V. (Erfinder). Solid Freeform Fabrication Using Powder Deposition
- [KZ99] KUMAR, Ashok V.; ZHANG, Hongxin: Electrophotographic powder deposition for freeform fabrication. In: Solid Freeform Fabrication Symposium Proceedings. Austin, Texas: The University of Texas at Austin, 1999, S. 647–653
- [LCY02] Li, Xiaochun; Choi, Hongseok; Yang, Yong: Micro rapid prototyping system for micro components. In: *Thin Solid Films* 420-421 (2002), S. 515–523
- [LLCD01] LIEW, C. L.; LEONG, K. F.; CHUA, C. K.; DU, Z.: Dual Material Rapid Prototyping Techniques for the Development of Biomedical Devices. Part 1: Space Creation. In: The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 18 (2001), S. 717–723
- [LLCD02] LIEW, C. L.; LEONG, K. F.; CHUA, C. K.; Du, Z.: Dual Material Rapid Prototyping Techniques for the Development of Biomedical Devices. Part 2: Secondary Powder Deposition. In: The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 19 (2002), S. 679–687
- [LMSG10] LAMARCHE, Keirnan R.; MUZZIO, Fernando J.; SHINBROT, Troy; GLASSER, Benjamin J.: Granular flow and dielectrophoresis: The effect of electrostatic forces on adhesion and flow of dielectric granular materials. In: Powder Technology 199 (2010), S. 180–188
- [LYE07] Lu, Xuesong; Yang, Shoufeng; Evans, Julian R.: Dose uniformity of fine powders in ultrasonic microfeeding. In: Powder Technology 175 (2007), S. 63–72

- [LYE09] Lu, Xuesong; Yang, Shoufeng; Evans, Julian R.: Microfeeding with different ultrasonic nozzle designs. In: *Ultrasonics* 49 (2009), S. 514–521
- [MM90] Schutzrecht US Patent No.: 4974646 (Dezember 1990). MARTIN, David; MAC-DONALD, Roderick (Erfinder). Powder Flow Control Valve
- [Mor89] Schutzrecht US Patent No.: 4850259 (Juli 1989). MORRIS, James P. (Erfinder). Powder Dosing Apparatus
- [MUM95] MATSUSAKA, Shuji ; URAKAWA, Motohiro ; MASUDA, Hiroaki: Micro-feeding of a fine powder using a capillary tube with ultrasonic vibration. In: Advanced Powder Technology 6 (1995), Nr. 4, S. 283–295
- [MW05] MRACEK, M.; WALLASCHEK, J.: A system for powder transport based on piezoelectrically excited ultrasonic progressive waves. In: *Materials Chemistry* and Physics 90 (2005), S. 378–380
- [MYM96] MATSUSAKA, Shuji ; YAMAMOTO, Koji ; MASUDA, Hiroaki: Micro-feeding of a fine powder using a vibrating capillary tube. In: Advanced Powder Technology 7 (1996), Nr. 2, S. 141–151
- [ODN89] Olansen, Jon B.; Dunn, Patrick F.; Novick, Vincent J.: Dispensing particles under atmospheric and vacuum conditions using an electrostatic device. In: *Journal of Applied Physics* 66 (1989), Nr. 524
- [Peg97] Pegna, Joseph: Exploratory investigation of solid freeform construction. In: Automation in Construction 5 (1997), S. 427–437
- [RG95] ROCK, Stephen J.; GILMAN, Charles R.: A New SFF Process for Functional Part Rapid Prototyping and Manufacturing: Freeform Powder Molding. In: Solid Freeform Fabrication Symposium Proceedings. Austin, Texas: The University of Texas at Austin, 1995, S. 80–87
- [RG96] Schutzrecht US Patent No.: 5555481 (September 1996). ROCK, Stephen J.; GILMAN, Charles R. (Erfinder). Method of Producing Solid Parts Using Two Distinct Classes of Materials
- [RHW00] Schutzrecht US Patent No.: 6073818 (Juni 2000). ROTHENBERG, Simon J.; HERSHMAN, Richard J.; WONG, Brian A. (Erfinder). Apparatus for Controlled Delivery of Powdered Solid Materials
- [RM98] Schutzrecht US Patent No.: 5848728 (Dezember 1998). RICCIARDI, Ronald J.; MATARAZZO, Paul (Erfinder). Multi-Flighted Notched Metering Auger

- [Sch06] Schulze, Dietmar: Pulver und Schüttgüter Fließeigenschaften und Handhabung. 2. Auflage. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2006
- [SF00] Schutzrecht US Patent No.: 6050456 (April 2000). SOPER, James L.; FREE, Dan R. (Erfinder). Screw Feeder for Proportioning Machine
- [Sti04] Stiess, Matthias: Einführung in die Verfahrenstechnik Sommersemester 2004. 2004. Qingdao University of science and technology Chinesisch-Deutsche Technische Fakultät Quingdao
- [TLB95] Thompson, S.A.; Law, S.E.; Balachandran, W.: Metering of bulk material with an electrostatic valve. In: Transactions of the ASABE 38 (1995),
 S. 1189–1194. ASABE: American Society of Agricultural and Biological Engineers
- [WLH+05] Wong, Stephen K.-F.; Lu, YiFeng; Heinemann, William; Palmer, Janice; Courtney, Carter: Fully Automated Solid Weighing Workstation. In:

 Journal of Biomolecular Screening 10 (2005)
- [YE03] Yang, Shoufeng; Evans, Julian R.: Short communication Computer control of powder flow for solid freeforming by acoustic modulation. In: *Powder Technology* 133 (2003), S. 251–254
- [YE04a] Yang, Shoufeng; Evans, Julian R.: Acoustic control of powder dispensing in open tubes. In: *Powder Technology* 139 (2004), S. 55–60
- [YE04b] Yang, Shoufeng; Evans, Julian R.: Device for Preparing Combinatorial Libraries in Powder Metallurgy. In: *Journal of Combinatorial Chemistry* 6 (2004), S. 549–555
- [YE04c] Yang, Shoufeng; Evans, Julian R.: A multi-component powder dispensing system for three dimensional functional gradients. In: *Materials Science and Engineering A* 379 (2004), S. 351–359
- [YE04d] Yang, Shoufeng; Evans, Julian R.: Short communication A dry powder jet printer for dispensing and combinatorial research. In: *Powder Technology* 142 (2004), S. 219–222
- [YE05a] Yang, Shoufeng; Evans, Julian R. G.: Acoustic initiation powder flow in capillaries. In: *Chemical Engineering Science* 60 (2005), S. 413–421
- [YE05b] Yang, Shoufeng; Evans, Julian R.: Preparing 3D Functional Gradients for SLS. In: *Materials Science Forum* 492-493 (2005), S. 749–754

[YE07] Yang, Shoufeng ; Evans, Julian R.: Review - Metering and dispensing of powder; the quest for new solid freeforming techniques. In: *Powder Technology* 178 (2007), S. 56–72