

Diese Arbeit zeigt den Versuch auf, die Hyperfusion-Methode technologisch einzuordnen, gegen bestehende Verfahren abzugrenzen, die Nachteile des Standes der Technik aufzuzeigen und die Hyperfusion als Lösung darzustellen.

**Inhaltsverzeichnis**

- 1. Einführung..... 1
- 2. Diskussion der grundsätzlichen Stärken und Schwächen des PBF-Prozesses ..... 3
- 3. Technische Probleme bei den SLM/EBM-Verfahren ..... 6
- 4. Diskussion der grundsätzlichen Stärken und Schwächen des Binder-Prozesses ..... 10
- 5. Einstieg in das Hyperfusion-Verfahren ..... 13
- 6. Das Hyperfusion-Verfahren im Detail ..... 19
  - \_\_\_\_\_ Binder-los, OHNE Betaufheizung und OHNE (dem Druckkopf allfällig nachfahrende) Wellenemitter ..... 28
  - \_\_\_\_\_ Das Prinzip ..... 32
  - \_\_\_\_\_ Diskussion der Verdampfungsenergie ..... 34
  - \_\_\_\_\_ Matrixerstellung für Metalle und Kunststoffe: Schmelzen oder Kleben?..... 39
  - \_\_\_\_\_ Design ..... 41
- 7. Ausblick..... 47

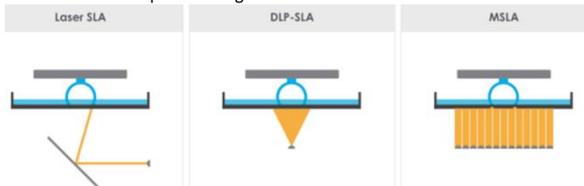
Beginnen wir mit einer grundsätzlichen Einführung in den 3D Druck mittels eines Artikels, den ich unlängst für ein US-Magazin geschrieben habe, und arbeiten uns dann in den PBF, also den Powder Bed Fusion-Prozess, ein, vom SLS/SLM/EBM über HP's Jet Fusion/Metal Jet zur Erklärung meiner neusten Patentschrift.

**1. Einführung**

**3D-Printing: Which way should it go?**

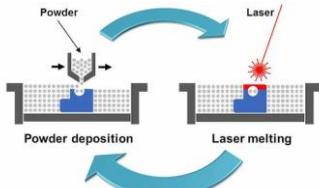
A few decades ago, 3d printing was quite easily comprehensible, its three major technologies quickly distinguishable:

1.: Chuck Hull polymerized resin by laser on a top down machine –invented SLA and founded 3D Systems in 1986. Today resin is polymerized by a Laser, by a thumbnail-sized chip containing



1-2mio switching mirrors, or by displays like your mobile or TV.

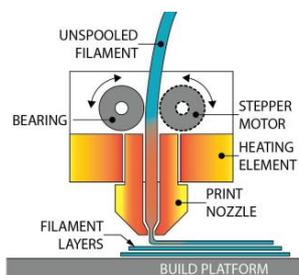
2.: At about the same time Carl Deckard lasered plastic powder -invented SLS and founded DTM, later bought by Chuck Hull's 3D Systems. Arguably the **most promising technology?** To be discussed in this essay in the later section.



melted a extruded nozzle beam on like a

3.: Scott Crump plastic filament by a heated that laid one top of the other Canadian blockhouse – FDM and Stratasy in 1989; no big evolution can be found here, today's precision allows for 20 micron layers on good machines, and material diversity grew, like bronze, wood, various plastics, etc.

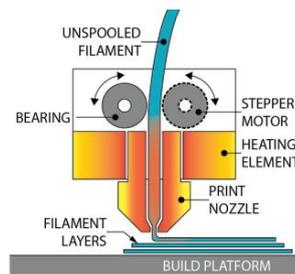
What followed was Polyjetting, where resin is pressed out of a printhead like the one in your ink jet printer at home, and binder jetting, where a liquid is jetted onto a the print bed neighboring "glued" barely outsiders cutting copy-page onto However,



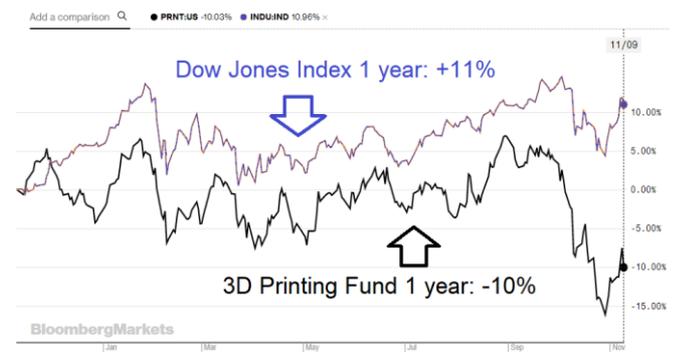
invented founded adopted like printing and paper, gluing page. even taking into consideration annoying post has neighboring

that processing conveyed to

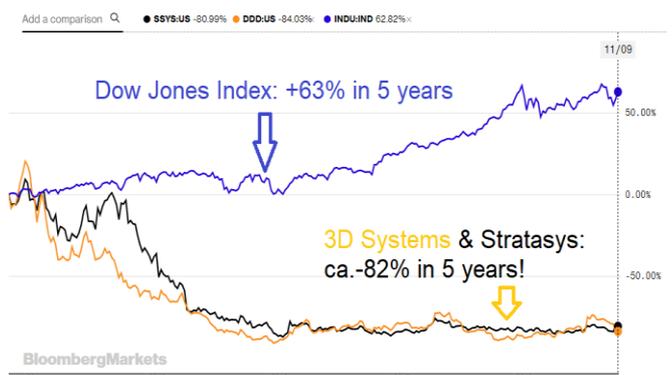
machines –now we are talking systems, space for machine parks, and cost- the 3D printing hype came to an end, as reflected by the stock market's 3d printing



index PRNT, which is so recent (you guess why?) that I have to show you its heavy weight's former chart development in a second graphic in order to let you esteem the gravity of hurricane that burned previous 3DP-ETFs to ashes:



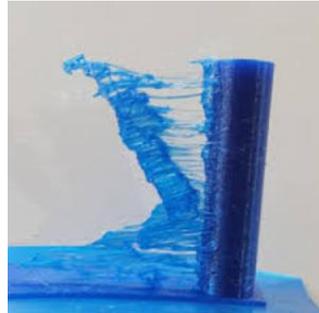
The technologies are quite easy to differentiate by use: FDM= consumer market, the rest is for the industry, as the other processes are dangerous (high laser power, carcinogenic resins, nano-particles in powder, needing mask-protection, evacuation systems, inert gas chambers, etc). However it is fair to say that even FDM printers ship to the industry in order to support show cases by providing prototypes. Remember how hard it was to



understand the 2D drawing showing three sides and a lot of cross sections? Now the architect can show the palace to the sheik in 1:1000 scale –well 1:100 would be sufficient for my house, and it still fits my wife’s palm.



All three major patents expired long ago, yet today we have to learn over 20 new technology-names –mainly because of ego trips and the need to avoid costly patent wars, so every “inventor” slightly modifying a melting (FDM/SLS) or polymerizing (SLA/Jetting) process finds another abbreviation for his “paradigm shifting” methodology, enabling him to found a company and trying to enter the hall of fame.



Yet: 3D printing at home gets boring after a while, you cannot make all sizes in full color at a reasonable price, the stuff cracks – if the print succeeds at all...

Worse: The industry is unhappy, having hoped that the transition from prototype to mass production was just a decade to go; 20 years later it is still waiting. Which printer can replace cheaply ABS-granulate injection-molding machines producing by the millions, especially when the

powder is at least ten times the granulate’s price? Post processing is another nightmare, besides dim surface finish, part accuracy, strength, porosity, repeatability, etc.

We can quickly exclude FDM from the mass producer’s wish list, as the quality, especially in Z, will usually be too bad to ever receive functional parts. The FDM process is well understood and might need color, so we built a 6 filament printhead prototype with load control and 2µm filament movement detection.



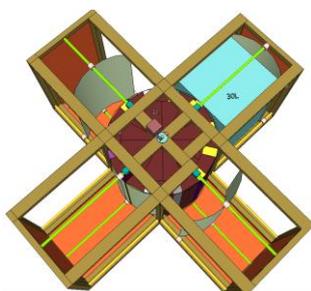
You may have heard of the many breakthrough technology providers like electron-beaming Arcam, Fusion Jetting HP, powder-reusing Aerosint SLS (yes, plastic powder 10-100 times more expensive than the injection molded granulate regularly cannot be reused and has to be wasted!), and we see the advantages of these tech-modifications, but mass production? No way! Arcam’s technology serves the military, aeronautical and medical industry, it’s for the Formula 1 race car, not for your Toyota. It prints the rocket, not the sprocket, to give you a picture.

So instead of bothering you with detailed tech-discussions of “sideways” technologies –those that remain but wont give new hope, possibly leading to no-where- I chose to analyze in a moment those methods that have a chance to tempt serving as alternatives, eventually even as replacements, for the mass production systems like injection molding.

Still let me quickly give you an overview of the technologies that I don’t think will change the world: All resin-based inventions can only emulate functional materials. Those products being “born” in a vat of homogenous resin can be used for Adidas shoe soles and show multiple functional properties at the same time and SLA printers make precise individualized objects for good prototypes. This is where injection moulding machines cannot work, like expensive stuff “wrought” for humans. LOM/SDL done paper-works should be replaced by colored FDM objects. Here Geniusthinks offers a filament printhead, giving millions of colors or material mixes.

Polyjetters using resin are precise, colorful and of better quality than SLA. Here we still have a speed problem, so at geniusthinks, we invented a vertical drum with printheads installed at the inside, jetting to the outside. Unidirectional rotations are much faster, and this principle applies to many of our inventions as we will see in further discussions. An automatic 24/7 industrial MJP 4-table printer version is shown here.

All that needs to be discussed is: **Fusing Powder**. Binding/SLS/SLM/DMLS/EBM: Metal or plastic? Sintering or melting? What “adhesion” quality?



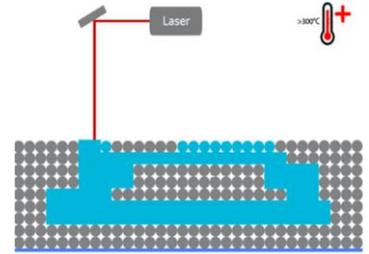
You already learned that EBM makes that NASA stuff, an electron beam melts powder on a preheated layer, the part’s surface is rougher compared to SLM machined parts, and the support-points are harder to remove, but the part’s strength is usually better. Hot isostatic pressing helps to come even

closer to wrought parts quality. No cheap stuff, but the best we have got so far for “freestyle” designs.

The SLS/DMLS process in contrast doesn’t melt the powder but just sinters it by staying below the material’s melting point. The part’s strength is worse, internal porosity of 30% cannot match molten part’s strength. Why is that?

Well, look at this picture, what is wrong here?

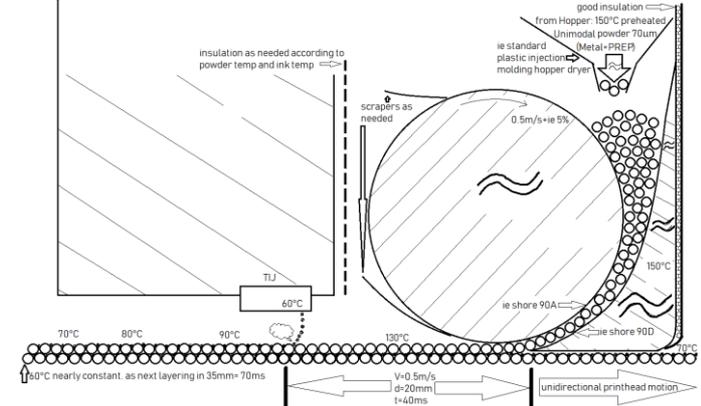
The circle can neither transform into a rectangle of the same layer height, nor could the sphere turn into that cube! Powder printing works best with stacked spheres. 1-P



$i/(3x\sqrt{2})$  gives you the minimal empty volume, ca. 26%, so 30% is no modest estimate.

In order to revolutionize the 3D printing world by replacing injection molding machines, the task would be to: produce a (drum) printer that is at least 200 times faster than HP’s current Jet Fusion system (another powder sintering process) AND to eliminate the empty-volume-weak-part-problematic AND to overturn the poor surface finish restrictions, AND to work for ceramic, metal and plastics.

**That’s exactly what we did at geniusthinks!** We are looking for an investor enabling us to exploit our patents, building the world’s first powder-based 3D printer that can print a layer of 1/4m<sup>2</sup> within 100 milliseconds.



We call this technology Hyperfusion. It is faster than HP s and Desktop Metal’s inventions.

We are keen to bring to live all of our patents, like gel-printing robots allowing for objects of unmatched volumes of 10-100m<sup>3</sup> (ie refugee-shelters), and house printing robots, etc.

Markus Ulrich is the founder and CEO of **geniusthinks**, the holding of geniusthinks. His think-tank offers unconventional solutions for tough nuts to crack. Markus studied mechanical engineering, founded and led an IT-database company for 13 years and built machines for all his life.

## 2. Diskussion der grundsätzlichen Stärken und Schwächen des PBF-Prozesses

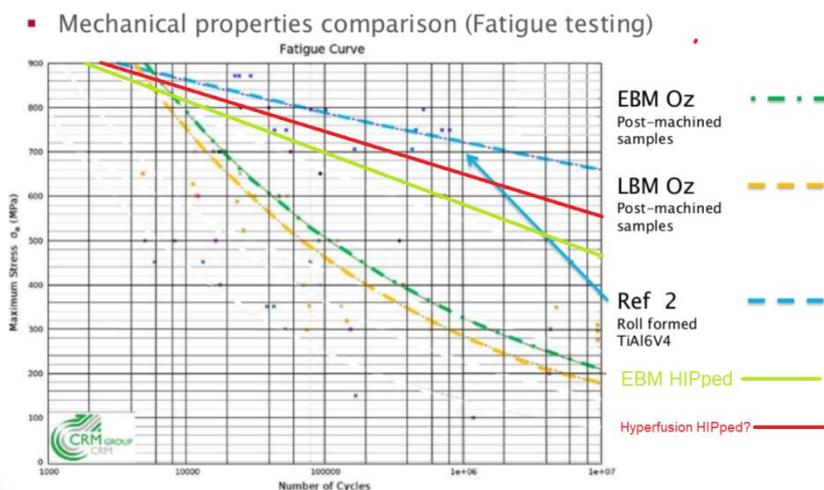
Die Entstehung der 3D Druck Theorie liegt in der Idee begründet, Produkte ohne Einschränkungen verglichen mit herkömmlichen Bearbeitungsmaschinen erstellen zu können. Diese haben stets zu eingeschränkter Funktion (zB Überhitzung) oder aufwendiger Montage geführt.

Wollte man bspw. komplexe Wärmeabführkanäle und Funktionsgruppen integrieren, wären Teil-in-Teil-Lösungen erforderlich, also ein Ölfluss-Rohr um interne Heisszonen herum gewunden, eine sehr viel kompliziertere Funktion als bspw. Hinterschneidungen.

Die freie Formbarkeit durch Schichtbau lässt diesbezüglich kaum mehr Wünsche offen, auch die Bauteilkomplexität nimmt zu –wenn zB. Lager später integrierbar sind und keine Materialvielfalt erforderlich ist, schliesslich kann das Korn seine physikalischen Eigenschaften nicht ändern (wobei HP im Kunststoffbereich das Gegenteil noch beweisen will).

Allerdings ist der Drucker auch nicht preiswerter als die Spritzgussmaschine, die Materialien jedoch wesentlich teurer, und der Herstellungsprozess kann in punkto Oberflächenoptik und Haptik ebenso wenig mithalten wie die physikalischen Eigenschaften in Bezug auf Volumendichte und Zugfestigkeit, Dehngrenze, Bruchdehnung, Härte, Dauerfestigkeit, Kerbschlagzähigkeit, Duktilität, Schwingfestigkeit, Rissausbreitung, etc.

Hierzu schauen wir uns folgenden Chart an:



Wir müssen anerkennen, dass selbst eine Arcam A2 (EBM=“Röhrenfernseher-Prinzip,“) mit HIP-Post-Processing noch nicht an gewalzte Eigenschaften rankommt, insbesondere, wenn es um die meist benötigten Wiederholbarkeiten geht, schliesslich wollen wir ja funktionell einsetzen und keine Prototypen mehr für die Vitrine herstellen, und nicht

jeder Betrieb kann wie die Formel1 für eine Saison bauen, oder wie das Militär allfällig nur für einen Abschuss. Beständigkeit ist also so wichtig wie schwierig –und drückt den 3D Druck zu Recht aus dem Hype-Fenster, denn man sucht seriöse Alternativen zum subtraktiven Verfahren.

Daher ist es ein Risiko, neues Wissen, Material und Technologie einzukaufen, wenn die Restriktionen schon bekannt sind –oder noch schlimmer- sie eben noch unbekannt sind!

Morgen wird die nächste Technologie ausgestellt, die noch mehr kann, und die kürzlich getätigte Investition beeinträchtigt nun die Firmenentwicklung, man ist nicht mehr ganz vorne mit dabei, die Amortisation ist fraglich, wenn der eigene Kunde lieber am allerneuesten Spielzeug der Konkurrenz ausprobieren lässt. Vorgestern SLS, gestern SLM, heute EBM, morgen HP Metal Jet und Desktop Metal, dann Hyperfusion? Die subtraktiven Wege sind ausgewalzt, nur verständlich, dass das additive Geschäft Verwirrung schafft.

Andererseits entsteht kein Abfall. Heisst es. Doch warum wird dann bei Kunststoff mit High Reusability des Pulvers geworben? Weil die PBF-Prozesse das Korn meist aufheizen und seine Eigenschaften dabei verändern (MFI), dh das Korn wird über Glastemp auf knapp unter Schmelztemperatur gebracht, wobei die Moleküle (bspw beim PA12) wachsen und die Viskosität damit zunimmt, weshalb das Pulverfliessverhalten abimmt, die Oberflächenrauheit zunimmt bis zum Orangenhauteffekt. So muss stets neues Pulver (manchmal gar die Hälfte) zugegeben werden –bei einem Produktvolumen/ Bauvolumen-Verhältnis von unter 10%, schliesslich soll das Produkt ja gerade wenig Material aufnehmen- kann also viel Pulver nicht wiederverwendet werden. Materialeffizienz sieht anders aus.

Ein weiterer –sehr offensichtlicher- Nachteil ist die Baugrösse. Selbst 3.5 Millionen Euro (Concept Laser 2000R) können nicht über 80x50x40cm=160L hinaus helfen. Da ist der Hyperfusion-Drucker mit 200L ja schon ein Lichtblick. Er wird 80-90% preiswerter sein.

Dann darf man auch bei der Produktivitätsanalyse nicht vergessen: PBF Maschinen sind ewig langsam! 120cm<sup>3</sup>/h baut dieser neun Tonnen schwere Koloss, 160L sind bereits in 55 Tagen fertig, 10% Bauvolumen benötigen also eine gute Arbeitswoche. Und dann muss die Maschine erst mal aussetzen und abkühlen. Arcam's A2 erzwingt hier 8 Stunden Unproduktivität, die natürlich der Druckzeit zuaddiert werden muss! In diesem Zeitraum kann eine Binder Maschine eine komplette Sinterung durchführen, wir kommen noch dazu...

Wir können uns also einerseits freuen, dass die Maschine so Gott will auch nachts durchläuft, aber genau das muss sie ob ihres Schnecken tempos ja auch tun um überhaupt Nutzen zu zeigen.

Als Verkaufsargument wird häufig genannt, die Maschine bedürfe keines Werkzeuges. Diese Meinung teile ich nicht: Werkzeug ist ein Verschleissmittel zur Produktherstellung im subtraktiven Geschäft. Die Abnutzung muss kontrolliert werden und kostet Geld. SLM/EBM Anlagen benötigen häufig mehr Strom. Die Pumpen, Filter, Gaskartuschen verschleissen, müssen kontrolliert und ersetzt werden, ggfs können Maschinen wie eine Arcam gar nicht mehr selbst gewartet werden, die Wartungsverträge sind sehr teuer.

PBF Maschinen unterliegen also sehr wohl Verschleiss während des Drucks, die Kosten liegen nicht unbedingt unter den Produktionskosten eines Fräsceters, schliesslich ist ungenutztes Pulver (Supportmaterial), das ich nicht mehr wiederbenutzen kann, wohl als verschlissen anzusehen.

Und vergleichen wir nicht Äpfel mit Birnen: Der Werkzeugverschleiss hat mir wenigstens ein haltbares Produkt mit der gewünschten Oberflächenqualität gebracht! Beim PBF muss ich mit Rauheiten von evtl 30µm rechnen, und wer hat gesagt, die gedruckten Produkte wären ohne Nachbearbeitung masshaltig? Sind sie nämlich nicht.

Auf DED (Directed Energy Deposition) will ich hier nicht weiter eingehen, weil „near net shape“ und Detailtreue hier noch nicht gegeben sind, für Auftrag auf verschlissenes Werkzeug ist dieses zehnfach schnellere und preiswertere Verfahren jedoch meines Erachtens sehr geeignet.

Die Reproduzierbarkeit ist nicht sicher, da extrem temperaturabhängige Prozesse (unterschiedliche Laserleistung durch Systemalterung und Maschineneinstellung, Vorwärmung, Absorption des Materials, Systemwärmeabführung, Materialmorphologie, evtl. sogar unterschiedliche Materialzusammensetzung je Batch, Belichtungsstrategie wie x, y, xy oder EOS-Schachbrett). Beim Pulverbettverfahren haben wir es bei bspw 1m<sup>3</sup> mit ca.  $1.3\text{m}^3 / (50\mu\text{m Kugeldurchmesser}) = 65450\mu\text{m}^3$ , also ca 20 Billionen Kugeln zu tun, wenn wir davon ausgehen wollen, dass eine 100%ige Volumendichte erreicht wird, 95% sind da eher die Regel.

Hieraus ergibt sich auch ein enormer Qualitätssicherungsaufwand, wenn unterschiedlich gelagerte Objekte unterschiedlichen Designs unterschiedlicher Wandstärken und Materialien auf unterschiedlichen Maschinen evtl sogar unterschiedlicher Hersteller die gleichen Qualitätskriterien erfüllen sollen.

So kennen wir das aber aus den subtraktiven Technologien: Alles ist genormt, das Ergebnis viel einfacher überprüfbar. Die Harmonisierung technischer Regeln hinkt der schnellen 3D-Druck-Entwicklung hinterher, insbesondere muss die Qualitätssicherung den potentiellen Kunden erst noch überzeugen.

SLM ist auch häufig auf den Einsatz von Legierungen beschränkt, die eine geringe Energie zum Aufschmelzen des Werkstoffs benötigen. Aber wie immer versucht man: Was nicht mit wenig geht, schafft man halt mit Mehr. So werden die Laser immer stärker, die Ablenkeinheiten (bspw von Scanlab) immer schneller, und es werden multiple Einheiten in eine Maschine eingebaut. EBM kann auch Mehrfokustechnik einsetzen (mehrere Felder/Schmelzbäder werden durch Hin- und Herspringen des Strahls gleichzeitig bearbeitet).

Aufgrund der Eigenspannungsproblematik, insbesondere beim SLM, wo der Laser das Pulver schlagartig um bspw 500-1000°C aufheizt und rasch auf ca 200°C abkühlen lässt, ist PBF dem subtraktiven Verfahren unterlegen. Verzug, Warping, Delamination, Balling: Wir kommen noch darauf zurück, wie schwierig es ist, für jedes Material die richtige (Scanning)-Strategie zu finden um überhaupt ein vorzeigbares, raues, mit Stützstrukturpunkten durchsetztes, nicht masshaltiges Rohprodukt zu erhalten, das –wenn es nur irgendwie im Fräszenter hätte entstehen können- dort für einen Kostenbruchteil zu machen gewesen wäre.

Dort hätte man auch fast jedes Material verarbeiten können, EBM kann nur stromableitendes, SLM schlechter wenig absorbierendes verdrucken. Vielfalt ist (noch) etwas anderes. Die Parameter für jedes Pulver gelten nur für die jeweilige Maschine des jeweiligen Herstellers.

Im Fräszenter wäre gemäss Richtungsbelastbarkeit klar gerechnet und profiliert erstellt worden, bei PBF weiss man das noch nicht so genau, viel hängt von der Scanstrategie ab, wir werden das später betrachten.



Materialeinsparungen, wie obiges Photo zeigt.

Anisotropie ist also schwieriger zu detektieren, und der Designer muss erst einmal umlernen um die Stärken des 3D Drucker umzusetzen. Den letzten Design-Schritt kann sowieso nur noch die Software übernehmen: Komplizierte Rechenverfahren wandeln die „primitive“ Dreiachsstruktur in generatives Design um, wie die Natur das Produkt hätte wachsen lassen. Dadurch ergeben sich die ersehnten

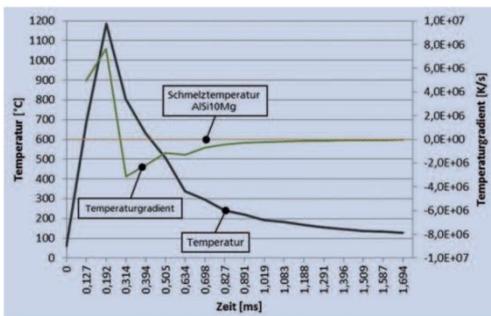
Fazit: Der 3D Druck ist interessant aber teuer, die üblichen Verdächtigen aus der Grossindustrie probieren aus (Militär/Aerospace, aber auch Formel1 und Medizin), die Massenhersteller wollen jetzt einsteigen, die Zeiten sind also günstig für HP und ähnliche weniger gefährliche Produktionsmethoden als die obig erwähnten. HP rechnet übrigens für 2020 mit einem Einsatz zu 65% für Prototypenbau und nur 35% für die Funktionsprodukte, was evtl. dem jungen Zweig seines erst kürzlich erschienenen Metall Binder-Jetters geschuldet ist.



In Punkto Prototypenbau, Leichtbau, Funktionsintegration (Einsparung von Fertigungs/Montageschritten) und Individualisierung -gerade wenn sie etwas kosten darf- ist der 3D Drucker natürlich unschlagbar, Print-on-Demand-Firmen spriessen aus dem Boden, auch Kleinserien sind mittlerweile machbar, wir kommen auf die Massenproduktions-

Einsatzfähigkeit bei der Hyperfusion-Darstellung noch zurück. Um diese jedoch besser gegenüberstellen zu können müssen wir im nächsten Kapitel noch tiefer in die technischen Feinheiten der bekannten SLM/EBM Methoden eintauchen.

### 3. Technische Probleme bei den SLM/EBM-Verfahren



Die Beherrschung des Laser-Schmelzprozesses (SLM) wird bei Nicht-Eisen- und Edelmetallen, die sowohl eine sehr hohe Reflektivität als auch eine sehr gute Wärmeleitfähigkeit aufweisen, erschwert.

Manche Metalle absorbieren nicht mehr als 30% der Strahlleistung.

Thermisch induzierte Eigenspannungen entstehen hier durch hohe

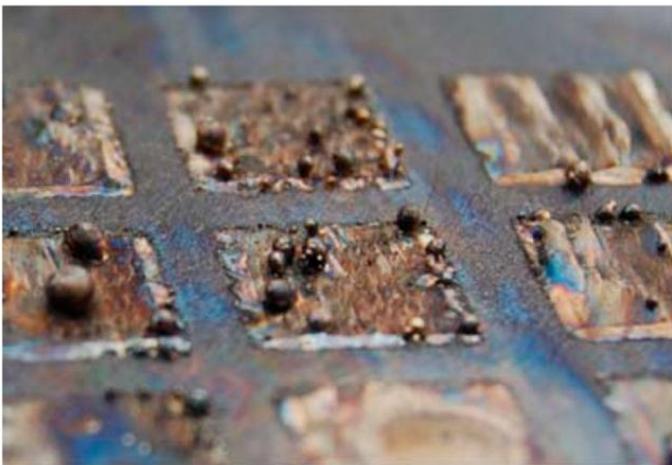
Temperaturwechsel in zu kurzen Zeiträumen, wie die Graphik zeigt.

Zudem erzeugt eine Laserquelle einen gefährlichen Strahl, vor dem der Benutzer geschützt werden muss.

Ein Laser ist ein Energieverschwender, die Stromaufnahme liegt häufig zehnfach über der Strahlleistung (Firma SLM: 4kW=400 Laserwatt, 10kW für 4x400W).

Überschneidet die schmelzbadbreite Raupenform die zuvor gelegte Raupe (Standardprozedur), wird die Struktur sehr anisotrop, siehe HP's White Paper.

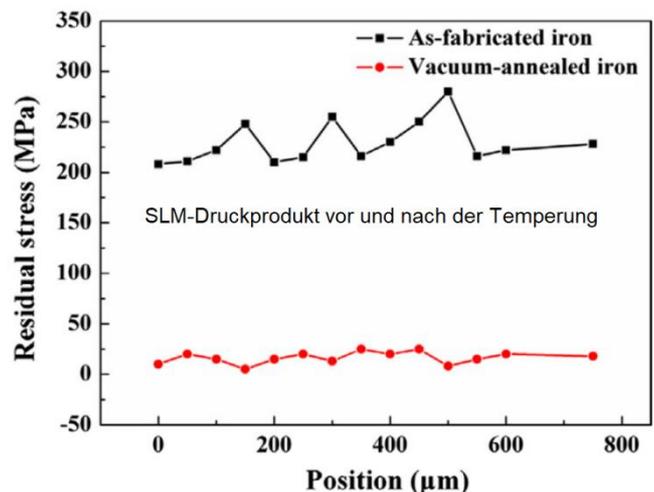
Das nächste Problem ist natürlich die Materialmorphologie: Wird die kleine Kugel aufgrund ihres höheren Oberflächen/Volumenverhältnisses schon kräftig angebruzelt, so wird die grosse Kugel gerade mal warm. Wie soll hier eine sichere Verschmelzung bei einem chaotisch gelegten Layer erreicht werden? Insbesondere bei Kunststoff können auf das jeweilige Material bezogen überhöhte Temperaturen die molekulare Struktur zerstören und die physikalischen Eigenschaften der Kugel völlig verändern.



**Melt ball formation**

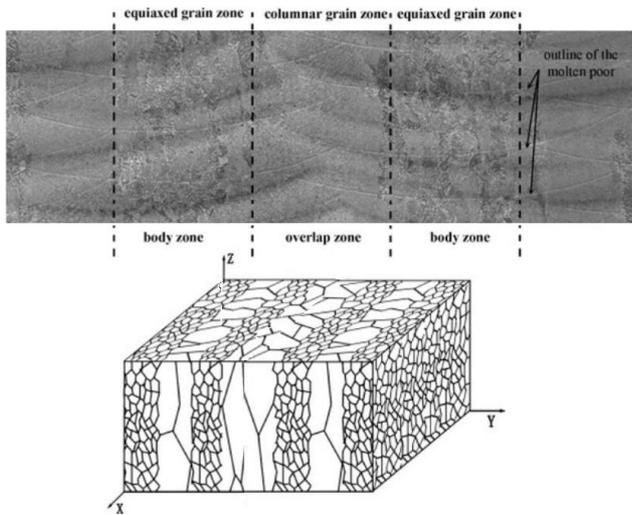
Der Balling-Effekt entsteht durch die Oberflächenspannung, das geschmolzene Material verbindet sich nicht genug mit der unterliegenden Schicht. Daraus resultierend teilt sich das Schmelzbad in mehrere Einzelsegmente auf, die schlechte mechanische Eigenschaften aufweisen. Um Balling zu vermeiden, darf das Schmelzbad nicht länger als doppelt so lang wie breit sein.

Dies beeinflusst aber wiederum die Druckgeschwindigkeit, denn nun können starke Maschinen die Schweissraupen schneller erstellen als diese abkühlen, und der Abkühlprozess beeinflusst wiederum die Entstehung von Eigenspannungen, denn nach dem Erstarren der geschmolzenen Schweißraupen kann es lokal zu elastischen und plastischen Dehnungen und Stauchungen, und dadurch neben Eigenspannungen auch zu Verzug, Delamination und Rissen kommen, wie obig schön anzuschauen ist. Fairerweise muss ich aber auch erwähnen, dass eine erneute Aufschmelzung mit anderer Scanstrategie die Kornanordnung bereits verbessern kann, zudem sind „Materialemlationen“ möglich, Scanprozesse können also die Funktion verändern. HP behauptet, dies sei auch beim Bindern mittels sogenannter „Material-Agents“ möglich, sowohl für Textur als auch für Lichtdurchlässigkeit, Festigkeit, Duktilität, etc. Gilt natürlich nur für Kunststoff.



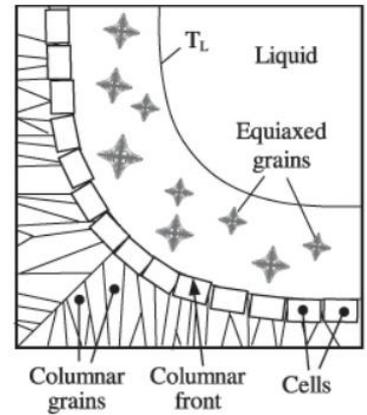
Auch die Temperung im Post-Processing hilft deutlich, die Eigenspannungen im SLM-Produkt abzubauen, wie obige Graphik zeigt (wobei dieses Ergebnis schon sehr gut ist).

Andererseits zeigt dieses Bild, dass es schwierig wird, Säulenregionen in

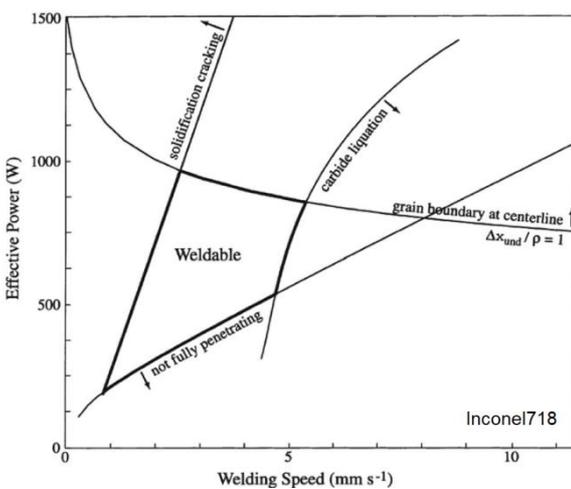


gleichgerichtete umzuwandeln:

Warum entstehen beim Sinterdruck (beim SLM noch mehr als beim EBM) so viele Säulenkörner (siehe rechte Graphik)?

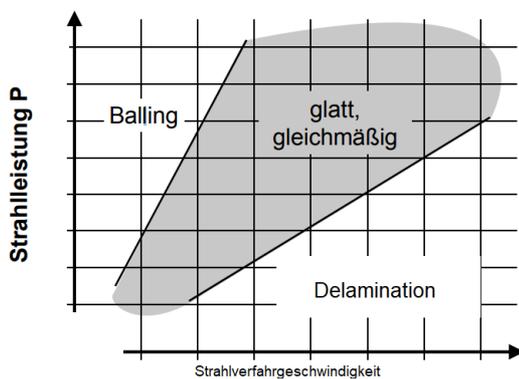


Weil das Material grosse Temperaturgradienten erleiden muss und das Produkt billionenfach erhitzt und abgekühlt wird, beim Binderdruck aber nur ein Mal **-schonend!**



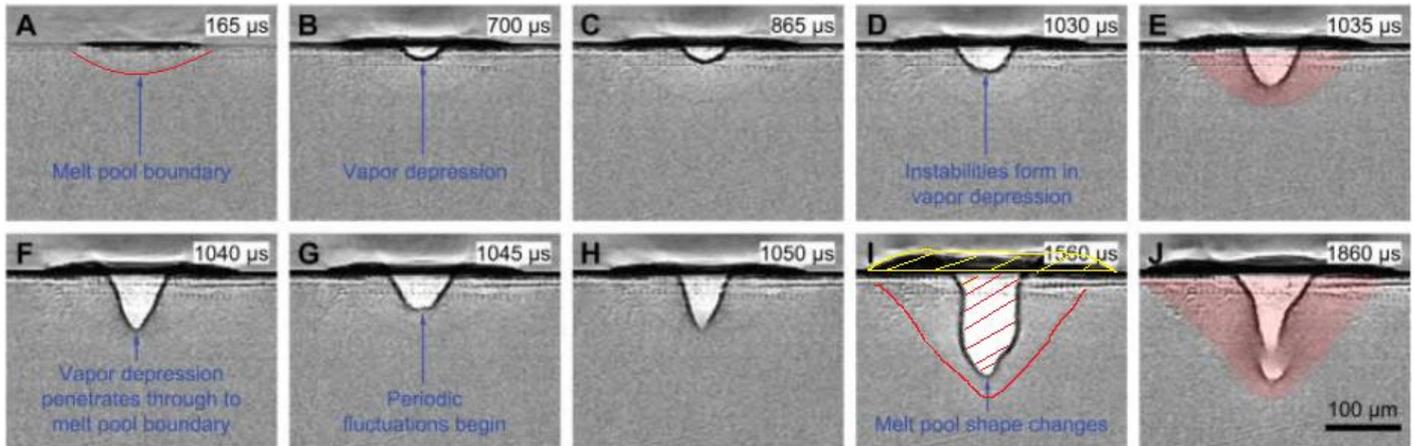
Auch aus anderen Gründen klappt die „was nicht mit Viel geht, geht mit noch Mehr“-Strategie nicht, wie der Beispielchart für Inconel 718 aufzeigt:

Dieses Problem herrscht beim Lasern vor, EBM kann/muss ja viel höher vorheizen (wegen der Leitfähigkeitserhöhung). Je höher die Aufheizung (Vorwärmung), umso langsamer der Abkühlprozess. Die Scanning Strategie spielt daher beim Lasern eine noch grössere Rolle als beim EBM, welches aber auch über mehr Scan-Strategie-



Möglichkeiten verfügt. Laser-Ablenkspiegel sind also zu langsam für komplizierte Scanstrategien, die zwar sehr wichtig sind, doch noch wichtiger ist das Strahlleistungs/Strahlverfahrensgeschwindigkeits-Verhältnis, wie die Graphik zeigt.

Die Mellon Universität (et al) zeigt unten sehr schön, dass zuviel Laser Power schädlich ist: Der Schmelzpool (rote Begrenzungslinie) wächst, Dampf drückt eine Kavität in den zu heissen Pool. Das Material (gelb) entweicht zu den Seiten und in die Höhe, die Oberfläche wird rau, vor allem aber wird hier eine Angriffsstelle für Materialbruch entstehen.



Laser schaffen bspw 1kW, EBM bspw. 50kw, bei gleichem Strahlfokus von ca 100 $\mu$ m. Bei gleicher Stromaufnahme ist die Strahlleistung des EBM der des Lasers um Magnituden überlegen. Dennoch drucken SLM-Maschinen nicht langsamer als EBM (SLM250/500/Arcam A2): 20 /100-170/ 80cm<sup>3</sup>/h. Ausserdem kann man die Maschinen nach dem Druck sofort wieder benutzen, der Arcam EBM-Drucker muss erst mal 8 Stunden abkühlen, viermal so lange wie SLM-Maschinen unbenutzbar sind. Diese Zeit muss man also quasi der Druckzeit hinzuaddieren.

Ein EBM-Bauraum muss weitgehend evakuiert und mit einer Inertgasatmosphäre versehen werden, um oxydische Reaktionen beim Bearbeiten zu verhindern; SLM evakuiert nicht.



Ausserdem druckt EBM weniger detailliert mit rauerer Oberfläche, bspw 25 vs 10 $\mu$ m beim SLM. Es können auch nur sehr begrenzt reaktive pulverförmige metallische Werkstoffe genutzt werden. Allerdings sind interne Druck-Schubspannungen viel weniger vorhanden als bei SLM Produkten, die daher häufig erst teure Druckplatten aus dem gleichen Material erstellen/drucken müssen um Verzug zu vermeiden. Danach müssen die Teile tlw. Mittels einer Säge von der Druckplatte getrennt werden, siehe Photo.

Positionieren Laser bei kleinen Winkeln im 100 $\mu$ s-Bereich, liegt man bei EBM im unteren einstelligen ns Bereich, also bei Ablenkgeschwindigkeiten von bspw 10km/s. EBM lenkt schneller ab, die Leistungsdichte ist höher. Allerdings sind nur elektrisch leitende Materialien verwendbar. Und es entsteht Röntgenstrahlung!

Der Elektronenstrahlfokus, die zugehörige Elektronenstrahlleistung sowie die Vorschubgeschwindigkeit bestimmen den zeitlichen Verlauf der Energieeinbringung, das Abkühlverhalten bestimmt die Ausdehnung des Schmelzbades.

Wird beim EBM zu viel Energie aufgebracht, kann die Schichtkugel aufgrund von Abstoßungskräften durch elektrostatische Aufladung glatt verdampfen/verspritzen, und es entsteht ein hübsches Loch. Dies geschieht, wenn Metalle oxydieren, Nachbarkugeln unterschiedlicher Zusammensetzung sind, oder (was am wahrscheinlichsten ist) der Elektronenfluss nicht weiter/ab-geleitet wird. Daher muss nun zeitraubend die Schichtkugelleitfähigkeit durch Kreierung von Sinterhälsen der Kugeln erhöht werden, indem die gesamte Schicht mit ca. 10m/s flächengescant wird

um bspw Stahlkugeln auf 1000°C aufzuheizen. Als Nebeneffekt wird weniger Supportstruktur benötigt, die Support-Kugeln pappen aneinander, und erstaunlicherweise konnte nicht bestätigt werden, dass die physikalischen Eigenschaften der Supportkugeln derartig verändert werden, dass sie, wie im Kunststoffprozess üblich, nicht zu 100% wiederverwertbar sind.

Der HIP-Prozess kann Änderungen der Korngröße, der Kornorientierung, der Ausfällung von Phasen, der Porosität und der mechanischen Eigenschaften bewirken. Die thermische Nachbehandlung von Metall beeinflusst die Mikrostrukturentwicklung durch Auflösung, Ausfällung, Rückgewinnung, Rekristallisation und Wachstum. Für Rekristallisation wird gesorgt, um die Bildung einer gleichgerichteten Mikrostruktur aus einer säulenförmigen Mikrostruktur zu fördern, da insbesondere SLM-Produkte in der Regel eine säulenförmige, orientierte Mikrostruktur aufweisen. Als brauchbare Parameter für TiAl6V4 wurde empirisch ermittelt: 2 Stunden bei 900°C mit 900 MPa, danach  $180 \pm 60$  min bei 895–955°C bei etwas über 100 MPa. Inconel718 kann günstig geHIPt werden mit: 4 Stunden bei 1120°C mit 200 MPa. Will man nur eine heterogene Kornstruktur erreichen, kann Tempern auch schon ausreichen, bei IN718 tritt eine teilweise Rekristallisation bereits während des Anlassens ein.

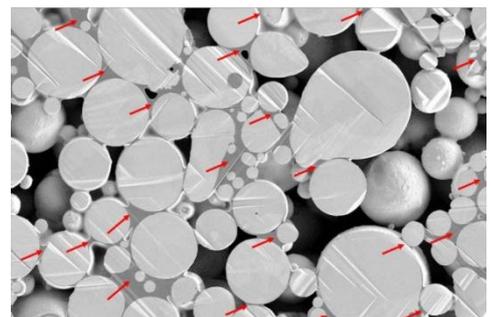
Fazit:

Beiden Verfahren SLM/EBM) ist gemein: Sie sind gefährlich: Elektrostatische Aufladungen, 10kW Strahlleistung, 60kV an der Kathode, Röntgenstrahlung, oder 1000 Watt Laser auf reflektierendes Metall, inertes Gas,... das hört sich auch teuer an: SLM 250/280/500: 0.5mio/0.6mio/1.2mio€; EOS m290: 0.2mio€, EOS 396: 0.35mio€; Concept Laser 2000R: 3.5 Mio€.

#### **4. Diskussion der grundsätzlichen Stärken und Schwächen des Binder-Prozesses**

Die 1990 vom MIT, Boston, entwickelte Binder Technologie wird kommerziell von Voxelet, ExOne und Z Corp eingesetzt. Hierbei wird im Gegensatz zu obig analysierten SLM/EBM-Verfahren die Schicht kalt gelegt; die komplizierte und zeitraubende Aufwärmung und Kontrolle der Temperatur entfällt, ein grosser Vorteil. Bearbeitet werden also nicht die Schichtkugeln, sondern die Lücken dazwischen. Mit  $1-\pi/(3x\text{Wurzel}2)$  ergibt sich bei bester Kugelpackungsdichte ein Leervolumen von 26%, kleine Kugeln dazwischen können es verringern, behindern aber den Fluss, ungleiche Höhen produzieren unschöne Oberflächen. Dem Layering wird beim Hyperfusion-Verfahren besondere Aufmerksamkeit geschenkt, daher werden wir uns später mit diesem Thema theoretisch wie praktisch beschäftigen.

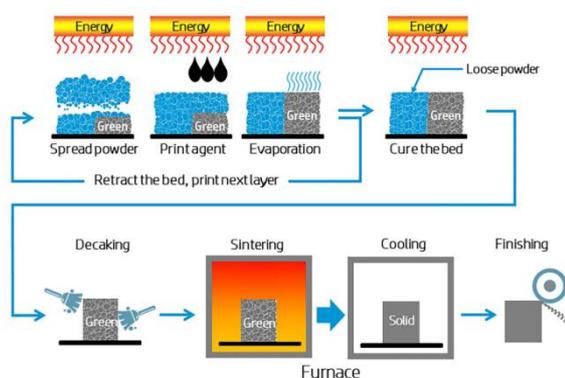
Wikipedia hat das Binder-Verfahren wie folgt gekennzeichnet: „Theoretisch sind alle Werkstoffe verwendbar, solange sie mit dem Binder verklebt werden können. Insbesondere lassen sich auch Lebensmittel oder temperaturempfindliche Stoffe wie Arzneimittel verarbeiten. Außerdem ist es möglich, innerhalb eines einzelnen Werkstücks verschiedene Binder zu verwenden und so Bereiche mit unterschiedlichen mechanischen Eigenschaften zu erzeugen. Als Binder lassen sich



zahlreiche Stoffe verwenden, z. B. welche, die auf Wasser basieren, Kunstharz oder lebende Zellen. Grundsätzlich müssen die Pulver auch nicht in jeder Schicht identisch sein. Zudem ist beim Binder Jetting, ähnlich wie beim Lasersintern, kein Stützmaterial nötig, da das Werkstück vom Pulver während des Produktionsvorgangs getragen wird. Das 3D-Drucken liefert jedoch kein besonders festes Werkstück. Vor allem bei der Verwendung von Metallen als Werkstoffe müssen die Werkstücke nachträglich vom Binder befreit und gesintert werden, um eine ausreichende Festigkeit sicherzustellen. Dabei kommt es zu Schrumpfungen, sodass die Endgeometrie nur schwer vorab einzustellen ist, was aber mit genügend Erfahrung grundsätzlich beherrschbar ist.“ Unter grundsätzlicher Beherrschbarkeit kann also nur near net shape verstanden werden, zudem muss ich auf die Porosität zurückkommen, die bereits oben als Leervolumen angesprochen wurde: Sie liefert schwachen Zusammenhalt zwischen den gesinterten Kugeln und beeinflusst daher die physikalischen Eigenschaften (Dehn- vor allem aber Zugkräfte), denn wenn sie bspw. beim SLM unkontrolliert auftreten, wurde die Wärmeabführung falsch berechnet, was nun zum Anschwellen nachfolgender Schichten und sogar zum Balling führen kann.

ExOne (ca 150 verkaufte Maschinen zu ca 0.5mio\$) infiltriert Metalle mit Bronze und kann 160L in 44 Stunden, also 3,6L/h (MFlex bei 1Min/0.15mm Schichtdicke) mit +-1.3mm Genauigkeit für ein 80x50x40cm Produkt (sehr ungenau) drucken. Damit ist der Drucker verglichen mit SLM/EBM (0.1L/h) extrem schnell! Allerdings darf die Genauigkeit keine ganz grosse Rolle spielen;-). Den Versuch einer „near net shape“-Formelfindung wollen wir später noch analysieren. Als zu verspritzende Bindemittel kommen bei ExOne Furan, Silikat, Phenol für Sanddruck, sowie auf Wasser basierende für Metalldruck zum Einsatz. HP macht das bei der Metal Jet-Maschine sehr ähnlich: Die Binder-Suspension enthält Polymere im Wasser, und der vorüberfahrende Wellenemitter bringt die Polymere zur Härtung. Diese Polymere bilden eine Gitterstruktur, die die Metallkugeln individuell bindet (von Umschliessen kann hier keine Rede sein, wie HP's Photo zeigt).

Desktop Metal, ein Unicorn (pre-IPO Wert>1 Milliarde\$) und Newcomer, der noch vor Verkauf seines Produktionssystems fünf mal mehr Investitionen (über ¼ Milliarde€ seitens Ford, GE, BMW u.a.) erhalten hat als bspw. der Sand/Kunststoff-Binder Voxeljet an der Börse noch wert ist, zeigt wie HP auch, dass Metalldruck gerade eine sexy Story ist. Und da der Name schon besagt, dass Desktop Metal sich ausschliesslich ums interessanteste Material kümmern will, erhalten sie Hype-Status.



## HP's Metal Fusion

Die Druckverfahren sind bei HP und Desktop Metal übrigens sehr ähnlich und haben mit Hyperfusion und ExOne gemein, dass eine Gitterstruktur zwischen den kalt gelegten Metallkugeln ausreicht um das Produkt in den Ofen zu schubsen. Damit hören die Gemeinsamkeiten aber auf, denn ExOne gönnt mancher Maschine dem Bauvolumen geschuldet keine ganze Druckkopfbreite und muss ihn damit mehrfach bewegen; derartig gross sind die ersten Versionen der obig genannten Anbieter noch nicht. HP fährt kreuz und quer, weil -vom Jet Fusion System

einfach übernommen- der Schichtlege-Prozess quer zum Jet-Bestrahlungsprozess stattfindet, wenigstens aber schon mal vom Dreischritt- auf einen Zweischritt-Prozess reduziert ist, wogegen das Desktop Metal Produktionssystem (ich

beschreibe nur dieses, das kleinere Studio System interessiert mich nicht) im Single Pass Modus arbeiten kann. Dies ist für die Hyperfusion Theorie sehr wichtig, denn es wurde hiermit bereits gezeigt, dass Single Modus funktioniert. Dabei werden Schichtlegezeiten von  $(12\text{L/h} = 3/4\text{m} \times 1/3\text{m} \times 1/4\text{m} = 62.5\text{L})$ , also 5.2h für den Druck des kompletten Bauraumes bei  $50\mu\text{m}$  Schichthöhe;  $= 5000 \text{ Layer} / 5.2\text{h} = 3.74\text{sec} / 750\text{mm} = 1\text{m} / 5\text{sec}$  erreicht.  $20\text{cm/sec}$  sind also kein Problem, HP Metal Jet ( $430 \times 320 \times 200\text{mm} = 27.52\text{L}$ ) gibt im White Paper noch keine Druckgeschwindigkeiten an, die Integra P400 von EOS ist jedoch bereits mit  $40\text{cm/s}$  unterwegs.

Im Sinterofen werden die Polymere vollständig aufgelöst, schreibt HP. HSS-Verfahren verspritzen bspw Russ-ähnliche Partikel –wie gefüllte Tinte, die dann einfach durch Absorption IR-Flächen-bestrahltes Material am bespritzten Ort über den Schmelzpunkt bringt; das bedeutet aber, dass die Kugeln hier wieder exakt vorgewärmt werden müssen. HP's Jet Fusion Maschine (bspw für PA12) muss auch wie HSS und SLM/EBM vorwärmen.

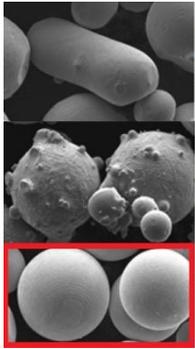
Sobald ein Teil des PA12-Pulvers aufgeschmolzen ist, wird dieses aufgrund der Kapillarkräfte zwischen die Pulverpartikel gezogen und es wird eine Neuordnung des Pulversystems ausgelöst. EBM erzeugt Dampfkapillare durch die hohe Energiedichte im Strahl. Auch beim Metal Jet erwähnt HP Kapillarkräfte, die die Polymerketten in die Ritzen zwischen die Kugel ziehen sollen. Die Definitionen kamen also während der schnellen Entwicklungen etwas durcheinander: PBF ist als Pulver-Bett-Fusion eine Schmelzung des Pulvers, das zuvor auf das Bett ausgewalzt wurde. Dies gilt für EBM, SLS, SLM, HSS, Desktop Metal und HP Jet Fusion. Eine DE(D) im Sinne einer gerichteten Energie ist DED wie auch EBM, SLS und SLM. Eine Flächenbestrahlung gibt es beim HSS, Desktop Metal, HP Jet Fusion wie auch HP Metal Jet und den Binder Verfahren von Voxeljet, und ExOne. Hier lassen sich unterschiedliche Pulver verdrucken, sofern Fließ- und Sinterfähigkeit gewährleistet ist.

Jede Kugelverschmelzung arbeitet mit Temperaturgradienten; von RT auf  $T_s$  sieht man nur bei einigen Binderverfahren (zB. ExOne-M und HP Metal Jet, wobei Letzterer den Layer zwecks Binderverdunstung heizen kann=RT), die nachträglich sintern= $T_s$ . Alle anderen Verfahren benötigen die Pulvervorheizung, sei es von ca  $170^\circ\text{C}$  bei HSS, HP Jet Fusion, SLS, oder ca  $200^\circ\text{C}$  bei SLM, oder knapp  $800^\circ\text{C}$  bei EBM, es sei denn, sie schmelzen nicht und jetten Binder als „Kleber“ auf bspw Sandkörner, wie Voxeljet-S, ExOne-S und Z Corp. Je höher der Temperaturgradient, desto anfälliger ist das Verfahren. So gilt für das Fazit auch der Umkehrschluss:

- **Je sanfter das Material auf Sintertemperatur gebracht wird, umso besser das Produkt. Und**
- **je weniger gefährlich das Verfahren, umso preiswerter die Maschine. Und**
- **je flächiger das Verfahren arbeitet, umso höher die Produktivität. Und**
- **je volumendichter gedruckt wird, umso weniger Schrumpfung entsteht beim Sintern. Und**
- **je weniger Eigenschaften das Druckpulver besitzen muss (wärmeleitend, lichtabsorbierend, stromleitend, eisenhaltig, etc), umso mehr Materialien sind nutzbar.**

Eigentlich alles ganz logisch. Dies sind die Kernpunkte, -eigenschaften und -motive für meine Hyperfusion-Idee. Für die Diskussion der Schichtkugelgeometrie und der Layer-Morphologie kommen wir nun zum

## 5. Einstieg in das Hyperfusion-Verfahren



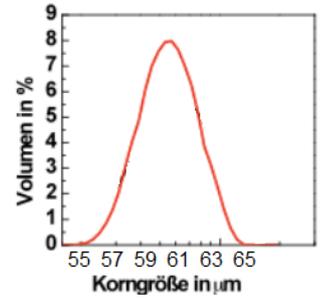
unerwünschte  
Kartoffeln:  
Gas Atomisation  
(GA)

unerwünschte  
Satelliten:  
Rotations-  
Atomisation  
(RA)

Akzeptable  
Geometrie:  
Plasma-Rotations-  
Elektroden-Prozess  
(PREP); 55-65µm!

Alles beginnt mit der Kugelform, -grösse und -zusammensetzung, wobei das Material in diesem Artikel nicht beschrieben wird. Der Melt-Flow-Index (MFI) ist von der Pulverform und -grössenhomogenität abhängig.

Der Plasma-Rotations-Elektroden-Prozess (PREP) scheint der einzig Geeignete zu sein um mit grösster Wahrscheinlichkeit die beste Kugelform



zu erhalten. Evtl. müssen weitere Filter/Sortierprozesse bemüht werden um die Grösse auf 55-65µm einzuschränken. Natürlich sind auch kleinere Durchmesser akzeptabel, solange eine steile Glocke für die gleiche enge



Grössenverteilung sorgt, siehe Beispielgraphik.

Ich teile nicht die Ansicht, dass kleine Kugeln die Packungsdichte erhöhen, sie tun das nur auf Kosten schlechteren Fließverhaltens und ungleicher Höhenverhältnisse, die den Körper nur



noch poröser machen bzw eine noch lichtabsorbierendere Oberfläche produzieren. Dazu ein paar Überlegungen und Berechnungen: Bei bester Kugelpackungsdichte erhalten wir wie schon weiter oben beschrieben ein Leervolumen von 26% (bei gleichgrossen Körnern in Kugelform), zB bei hexagonaler Anordnung. Nun umgibt jede Kugel ein Oktaederloch und zwei Tetraederlöcher, wie die Photos zeigen. Letzteres ist viel kleiner als Ersteres, also ermitteln wir seine Grösse: Sie liegt bei einer halbe Magnitude des gewünschten Schichtkugeldurchmessers, das ergäbe also eine Zusammenstellung von einer Kugel mit 60µm und eine je eine 12µm durchmessende für jedes Tetraederloch, plus ca 5 Kugeln um ein Oktaederloch aufzufüllen. Wir wollen und können hier keinen dritten Durchmesser einführen, weil die chaotische Layerlegung die Kugeln nicht wie gewünscht legen/aufschichten kann.



Korngrösse 60µm=113000µm<sup>3</sup>, Korngrösse 12µm=905µm<sup>3</sup>, davon 7 pro grosser Kugel.

Füllen wir nun einen Würfel von 10cm<sup>3</sup> auf: 74% Volumenfüllung erreichen wir, wenn die grossen Kugeln die obere



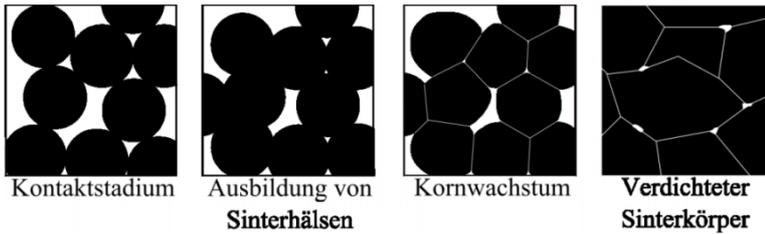
Würfelebene erreichen, mit 65 Millionen Kugeln, die restlichen 2.6cm<sup>3</sup> sollen nun mit den 905µm<sup>3</sup> je Kleinkugel erreicht werden. Je Grosskugel können wir ja nur 7 Kleinkugeln je 905µm<sup>3</sup> aufnehmen, so erhalten wir 7 x 905µm x 65mio=ca 0.41cm<sup>3</sup>, also nur 16% der gewünschten 2.6cm<sup>3</sup>! Für 16% brauchen wir diesen unsicheren Umstand nicht zu betreiben und entscheiden uns lieber, den Layer nur mit einer Grosskugelgrösse zu legen und die Löcher anstatt zu 84% nun zu 100% aufzufüllen. Wie das

geht sehen wir später.

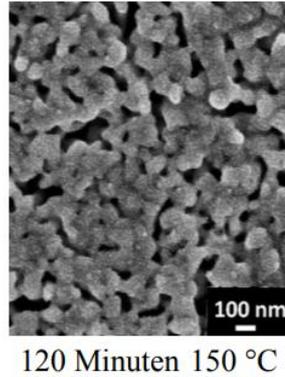
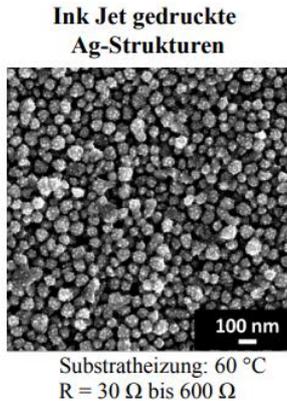
Die Fachliteratur schlägt zwecks Druckverbesserung vor, dass das Leervolumen mittels geschickt ausgewählter dual/multimodaler mehr oder weniger konstanter Durchmesser eine verbesserte Volumendichte erhält. McGeary soll bereits 82% erreicht haben mit 10:1 Pulvern, also dem Einsatz zweier genau zueinander abgestimmter Durchmesser von bspw 60 und 6µm. Nach meiner obigen Analyse komme ich mit 5:1 auf keine 80% und rate dringend davon ab, Pulver im einstelligen µm-Bereich einzusetzen, die Herstellung von genau 6µm Kugeln wäre ein Alptraum und der Umgang damit gefährlich, vor allem, wenn wir dann über 25µm zu 2.5µm Konstellationen nachdenken wollten. Daher lehne ich den Einsatz definierter multipler Durchmesser ab, Kugeln zwischen 55 und 65µm herzustellen ist mit PREP machbar aber bereits teuer genug und produziert zunächst sicher viel auszusortierende, wiedereinzuschmelzende Kugeln unpassender Durchmesser.

Schauen wir uns nun den Post-Prozess an, dessen Endergebnis sich mit den SLM/EBM-Produkten messen muss, bevor wir dann zu den charakteristischen Unterschieden zwischen Hyperfusion und Desktop Metal's Maschine bzw. HP's Metal Jet kommen.

Formgebung (Drucker) ist von Kornorientierung (Ofen) getrennt. Im Gegensatz zu bspw dem EBM Verfahren, welches bspw IN718 bei ca 975°C sintert, können wir uns die Temperatur und ihren Gradienten beim Binder-Post-Prozess sehr genau aussuchen und in aller gegebenen Homogenität bequem verändern. Zunächst müssen wir uns um das Bindermaterial kümmern, es muss normalerweise aufgelöst werden, damit die Schichtkugeln sich berühren und verbinden können. Binder-Verfahren arbeiten mit verspritzbaren Flüssigkeiten, hierbei ist auf die Viskosität des Mediums bei seiner maximalen Erwärmbarkeit in der Kartusche relativ zur Piezo-Kraft des Druckkopfes zu achten. Diethylenglykol in Wasserlösung (zB wasserbasiertes Bindemittel bestehend aus Ethylenglykolmonobutylether CAS # 111-76-2 und Ethylenglykol CAS # 107-21-1, nachlaufende Flächenwärmung mit ca. 200°C nötig), Phenol (ohne nachlaufende Flächenwärmung) und andere Flüssigkeiten kommen als Bindemittel in Frage. Wird eine Polymerisation angestrebt, muss mit einer UV-Leiste flächenbestrahlt werden. Auf Trocknungszeiten muss geachtet werden: Diethylenglykol benötigt tatsächlich diese Zeit, während Phenol einfach unbehandelt aufgespritzt wird. Metalle leiten Wärme unterschiedlich schnell, aber jedenfalls besser als Kunststoffe, sodass abhängig vom Binder/Schichtkugel-Volumenverhältnis schneller wärmeableitend gehärtet werden kann. Wichtig ist, dass alle unerwünschten Binder-Ingredienzen beim „Binder-Burn-Out“ austreten, damit der Sinterprozess nicht durch Verunreinigungen des Drucks gestört wird. Da fallen einem zunächst MODs, also Metall-organische Dekompositionen ein, die –anders als Nanopartikelsuspensionen- eben partikelfrei spritzbar sind und erst unter Hitzeeinwirkung Metallnanopartikel ausfällen. Ich präferiere diese Methode relativ zur direkten Partikelspritzung, sofern diese Lösung bezahlbar ist und eine Temperatur erreicht werden kann, die die Schichtkugel-Material-gleiche Ausfällung bereits vor dem Sintern, also unmittelbar nach dem Aufschlagen auf die Schichtkugeln, bspw über eine exotherme Reaktion durch Ingredienzen in der Spritzlösung und nachfolgender Bestrahlung möglich macht. XJet spritzen eine Metalldispersion mit Nanokugeln, die sich aufgrund des günstigen Oberflächen/Volumenverhältnisses bereits bei ca 300°C verbinden. Diese Methode nur zum Lückenauffüllen scheint mir interessant zu sein. Die Schrumpfung gibt XJET mit ca 16% an, ein durchaus akzeptabler Wert für die Schichtkugellücken.



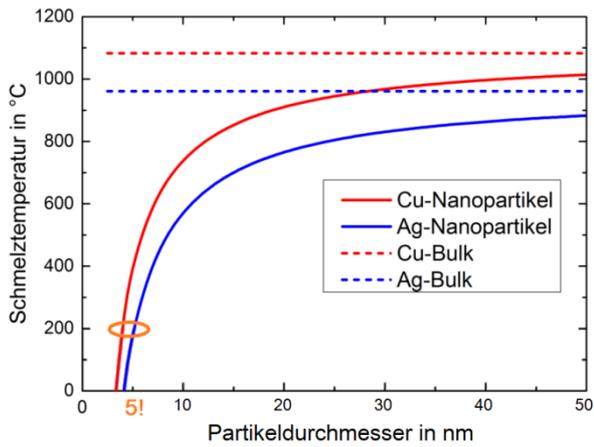
Die Zeichnung stellt die grundsätzliche Umformung von der geschichteten Kugel hin zum verdichteten Druckteil dar.



Beispielhaft werden hier gejettete ca 50nm Silberkugeln gezeigt, die bereits bei 150°C innerhalb von 120 Minuten gesintert werden konnten. Dieses Bild widerspricht dem auf der nächsten Seite gezeigten Chart eines Fraunhofer-Instituts, das AG-Nanopartikel von 50nm Durchmesser auf fast 900°C aufheizen zu müssen meint. Die Möglichkeiten gemäss Bild sind sehr interessant: Wahrscheinlich könnten nun auch bspw. Titan-Derivate bei leicht höherer Temperatur

als 150°C, aber dennoch bereits während des Druckens angesintert werden um die Schichtkugeln individuell zu halten! Dabei wäre keine konstante Temperatur und –überwachung von Nöten, dh keine stehenden Wärmefelder im Deckel wie bei bspw HP's Jet Fusion zu sehen, sondern die gejettete Dispersion kann bspw einen Stoff enthalten, der den Flächenstrahl des vorüberfahrenden Wellenemitters optimal absorbiert und daraufhin die nötige Wärme erzeugt, sodass die Dispersion evtl keine exotherme Reaktion mehr chemisch initiieren muss. Der Vorteil beim Hyperfusion System ist ja, dass die nächste „heisse Dusche“ des Folgelayers in viel kürzerem Intervall auftritt, anstatt alle 7,5 sec wie beim Jet Fusion sind es hier nur ca 100ms. Die Folgeerwärmungen reichen sicher einige Schichten herunter, sodass eine Ansinterung m.E. erwartbar ist. Dieses Verfahren sollte man ausprobieren.

Die Dispersion sollte eine Ohnesorge Zahl (Viskosität zu Dichte, Tropfenform und Oberflächenspannung) zwischen 0.1 und 1 aufzeigen und natürlich nicht den Druckkopf korrodieren lassen. Hyperfusion möchte gefüllte Dispersionen benutzen, wie wir gleich sehen werden, und schlägt hier vor, als Binder eine Dispersion mit Nanokugeln vorzugsweise gleichen Materials oder sogar mit einem  $T_g > T_m$  des Schichtkugelmaterials zu nutzen, sodass das Leervolumen nicht als zu akzeptierendes Übel anzusehen ist, sondern gemäss jeder Bindermethode Struktur gibt, allerdings nicht (ausschliesslich) mit vor dem Sintervorgang aufzulösendem Klebstoff, sondern unterstützenderweise mit Schichtkugel-gleichem Material, das nun während des Sintervorgangs aufgrund des viel grösseren Oberflächen/Volumenverhältnisses vorzeitig schmilzt und eine Verbindung zwischen den Schichtkugeln herstellt. Als Folge des Laplace Krümmungsdrucks entstehen in einer konvexen Kugeloberfläche Druckspannungen. Die Spannungszustände provozieren im Gefüge einen lokalen Leerstellenüberschuss, der in Form von Diffusion durch Materialtransport ausgeglichen wird. Die flüssige Phase der kleinen gejetteten zuerst schmelzenden Kugeln wird durch Kapillarkräfte in noch offene Poren gezogen und erleichtert die Verdichtung deutlich.



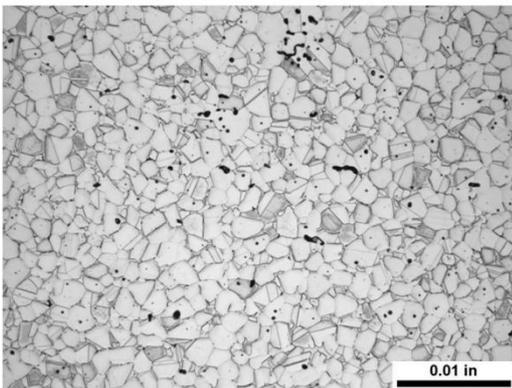
Schmelztemperatur in Abhängigkeit der Partikelgröße für Silber- (blau) und Kupferpartikel (rot)

Der Chart zeigt die erforderlichen Silber- und Kupferdurchmesser um diese Metalle bei 200° zu schmelzen. Dies begünstigt die Idee des integrierten Stromleiters in bspw PA12 Bauteilen, dh PA12 Schichtkugeln und Einsatz von Sonderdruckleisten (zB jede 10.), die Kupfer jetten könnten. Sollte die Dispersion eine exotherme Reaktion auf ca 200°C (bspw initiiert durch Bestrahlung) hervorbringen, die die Kupfer- oder Silberbahn während des Drucks sintert, wäre keine Nachbehandlung des Kunststoffproduktes nötig. Das vorige Bild zeigt jedoch, dass wesentlich niedrigere Temperaturen bereits genügen könnten.

Hier sind also mehrere Möglichkeiten im Versuch abzuklopfen. Wichtig ist zwecks Clogging-Verhinderung aber immer, dass die Jet-Dispersion ca 100x kleinere Kugeln beinhaltet als die Jet-Düse gross ist. HP setzt auf vierfache Redundanz, weiss also genau, dass seine Lösung für Clogging sorgt und kontrolliert die Kopfreihe optisch. Ein Reinigungssystem muss dem Hyperfusion-Drucker gegönnt werden, auch wenn seine schiere Druckkopfanzahl für erheblich mehr Redundanz sorgt als jeder andere Drucker, die Performance würde sonst leiden.

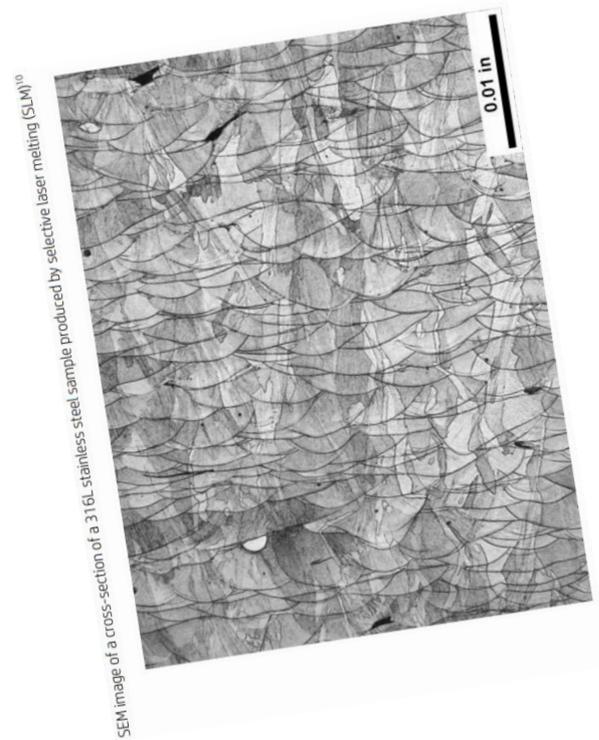
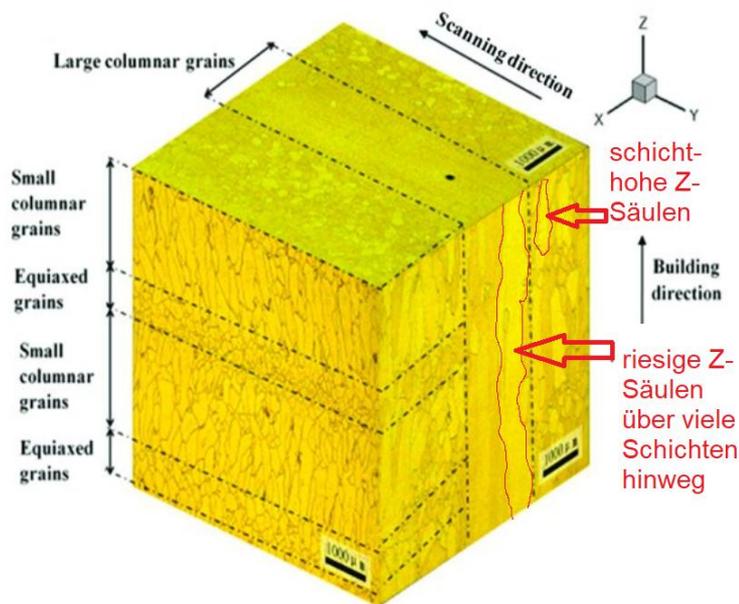
Kommen wir wieder auf die Sintertemperatur im Unterschied zu EBM's 975°C für IN718 zurück: Alleine schon für die Erhöhung der Volumendichte müssen Binder-Produkte wesentlich heisser behandelt werden, bspw auf ca 1260°C mit einem Gradienten >10°C/min, damit es nicht zu Porositäts-fördernden Laves Phasen kommt. Somit gehört das Binder Sintern in den Bereich des Supersolidus-Flüssig-Phasen-Sinterns. Bei Überschreiten der Solidustemperatur bildet sich eine erste flüssige Phase innerhalb der niedrigschmelzenden Gefügephasen. Die im Partikel entstehende flüssige Phase benetzt die noch festen Partikelbestandteile und bildet an den Partikelkontaktpunkten Sinterhalse aus. Abhängig vom jeweiligen Kugeldurchmesser könnte eine 30-40%ige Flüssigphase bei 1290-1330°C einsetzen. Untersuchenswert scheint mir der Ansatz, dass aufgespritzter im Ofen aufgelöster Bindestoff Kohlenstoff von über 1 Gewichtsprozent enthalten sollte um Laves-Phasen zu verhindern. Kleinere Kugeldurchmesser als die obig

SEM image of cross-section of a 316L stainless steel test specimen produced by an HP Metal Jet printer<sup>10</sup>

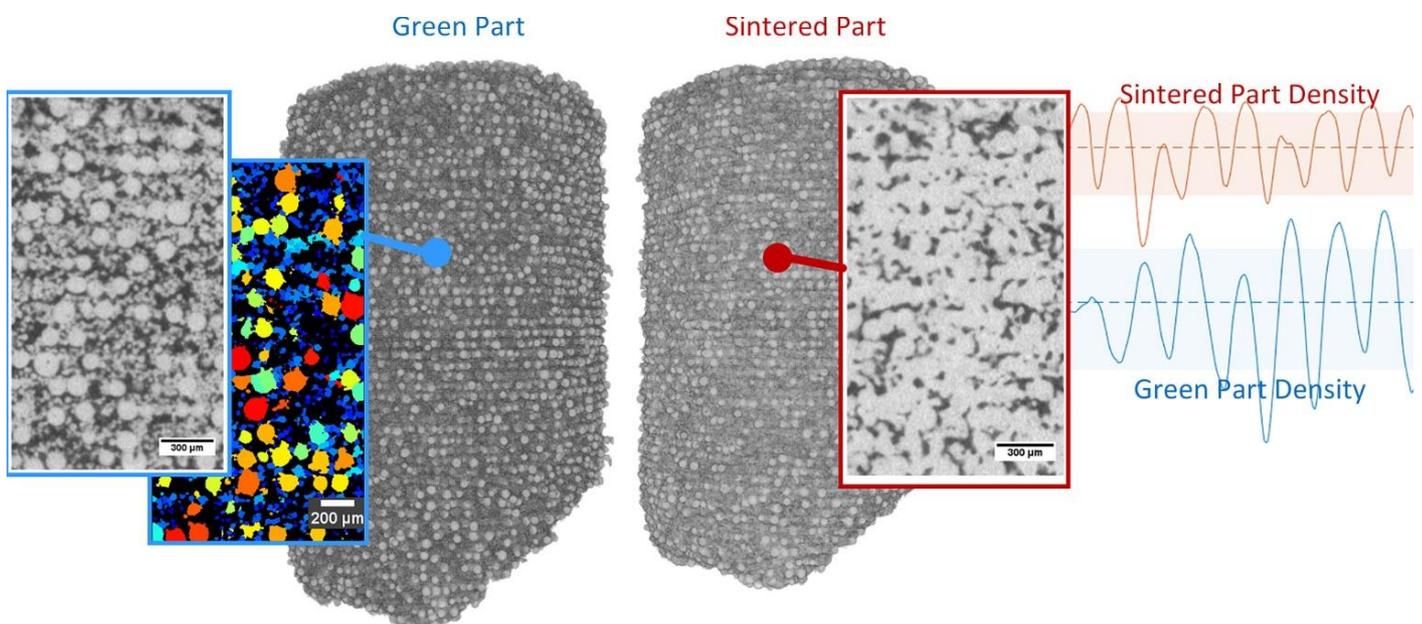


angegebenen/vorgeschlagenen 60µm bis runter auf 20µm werden wohl noch bessere Ergebnisse bringen, allerdings zu Lasten der Druckgeschwindigkeit, und ich bin mir nicht sicher, dass die Qualitätsverbesserung die Druckzeitverdreifachung wert ist. Im Endergebnis möchten wir natürlich ein gleichgerichtetes Gefüge erhalten, das sich mit HP's Analyse messen lässt. Wie HP's Kornanalyse des gesinterten Produktes schon zeigt, ist die Kornverteilung sehr isotrop.

Im Vergleich dazu aus HP's Analyse die anisotrope Lage eines SLM-Produktes mit seinen symptomatischen Schweisspools und Schweisslinien mit den typischen perpendicular zur Schweisslinie verlaufenden langen Körnern, die darauf hindeuten, dass das Produkt nicht in jede Richtung gleichmässig belastbar ist. HP's Analyse unterstütze ich gerne durch die 2.5D Darstellung einer weiteren Graphik. Zumindest die Schichtsäulen richten sich übrigens epitaktisch zur Schmelzraupe aus.



Der klar designte Hyperfusion-Prozess des Aufeinandertreffens der gejeteten Nanokugeln mit der homogenen Schichtkugelmorphologie lässt ein wesentlich berechenbareres Bild erwarten mit der ersehnten Reproduzierbarkeit 3D gedruckter Produkte! Zweckdienlich für die Forschungsphase ist natürlich, die Binderentfernungsphase von der Sinterphase zu trennen, späteres Einphasensintern sollte aber das Ziel sein.



Obiges Bild aus einer Studie von Wheat/Vlasea et al zeigt, dass es noch viel zu tun gibt: Schrumpfung und Anisotropie waren hier bei 70% Materialdichte hoch –und auf 70% war man schon stolz.

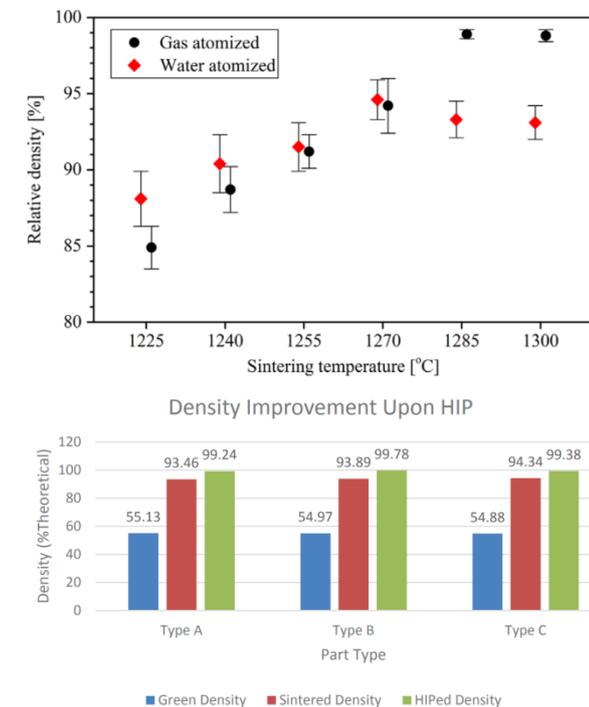
## HIP

Wie obig schon ausgeführt ist der HIP-Prozess ein sehr schönes Verfahren um die Porosität zu minimieren:

Heiß-Isostatisches Pressen (HIP) (engl.: Hot-Isostatic Pressing) ist ein Verfahren, dass bei Sintertemperatur einen allseitig aufgebracht, isostatischen Druck verwendet. Ziel ist es, bei den eingestellten Temperaturen eine vollständige Verdichtung zu erreichen. Der von außen auf eine evakuierte Blechkapsel applizierte Druck wird dabei höher gewählt als die Warmfestigkeit des Werkstoffs, was zu plastischer Verformung durch Kriech- und Diffusionsprozesse der einzelnen Pulverpartikel führt. Innere Poren werden geschlossen, und eventuell vorhandenes

Restgas löst sich in der Metallmatrix auf. Durch die langen Prozesszeiten bei erhöhten Temperaturen soll es nun durch Segregation zu Veränderungen der Gefüge kommen.

Ob Hip nun speziell fürs Sintern nach einem Hyperfusion-Prozess viel bessere Qualität liefert als drucklose Sinterung muss untersucht werden. Die Kugeldurchmesser spielen auch eine nicht zu vernachlässigende Rolle, Porosität kann je Material und Kugelgröße erheblich schwanken. Die besten Parameter können nur empirisch ermittelt werden, eine Volumendichte von 99.9% von geHIPpten Binderprodukten ist bereits nachgewiesen worden, HP bestätigt >93%. Ich nehme an, dass zumindest die Bruchdehnung verbessert wird. Die nächste Graphik zeigt aber sehr schön, dass der Pulverherstellungsprozess sowie die Sintertemperatur die



Dichte genügend massgeblich beeinflussen.

Natürlich sollte der gesamte Druck/Sinterprozess automatisiert werden. Daher muss der Post-Druck-Grünling fest genug sein um ein automatisiertes „Decaking“ zu überstehen, wofür das modifizierte Hyperfusion-Binding nun sorgen sollte. Vorgesehen ist dann eine automatische Übergabe an eine gelöcherte Trommel, in der das Pulver durch inneren Überdruck und äusseren Unterdruck weitgehend entfernt wird, bevor grössere sintertemperaturresistente Kugeln der Trommel zugeführt werden und der obig beschriebene Prozess weitergeht. Diese Kugeln dienen dem Schutz vor zu hartem Aufschlagen der Druckteile aufeinander. Der weitere automatisierte Vorgang besteht aus der Übergabe des Trommelinhalts mit den grossen Kugeln in den Sinterofen. Erst das abgekühlte Objekt wird kurz manuell gehandhabt. Damit wollen wir das Feld der Nachbearbeitung verlassen und uns dem Druckteil zuwenden.

Aus der Analyse obig aufgezeigter Schwächen der einphasigen Systeme, die suboptimale Temperaturgradienten während des Drucks nutzen, komme ich wie HP, Desktop Metal et al zum Schluss, dass jetzt die Revival Phase des Binder Jettings angebrochen ist. Manchmal deckt sich die eigene Ansicht mit dem Zeitgeist. Bindern scheint "IN" zu sein. Z-Corp > Voxeljet > ExOne > HP > Desktop Metal > Hyperfusion? Wie HP musste auch Desktop Metal den Verkaufsstart verschieben, die Dinge sind im Detail eben doch etwas schwieriger, gerade dann, wenn man noch eine oder gar zwei Magnituden draufsetzen will. HP ist also 10 mal schneller als ein von ihnen definierter SLM Drucker,

Desktop Metal schlägt nun HP um Längen, und Hyperfusion will über 100 mal schneller sein HP. Wie kann das funktionieren, zumal auch andere Schwächen gleichsam eliminiert werden sollen, und wozu ist das gut?

Beziehen wir uns hier erst einmal auf die Erstellung von PA12 Druckobjekten, weil weder HP's Metal Jet noch Desktop Metal's Metalldrucker auf dem Markt sind und ich keine verlässlichen Werte finden kann, mal druckt Desktop Metal's Produktionssystem 8.2L/h, mal 12, und das Bauvolumen hat sich auch schon wieder geändert...

HP gibt an, zehnmal schneller als herkömmliche PA12-Vergleichsmaschinen drucken zu können. Der Druckvorgang für 4,2 Liter Bauvolumen dauert eine Stunde. Diese Druckgeschwindigkeit liegt weit unter der benötigten um 3D Druck industriell zu nutzen. Statt 7,55 Sekunden pro Schicht (ca 1/10 Quadratmeter) müssten eher 400ms pro Quadratmeter erreicht werden. Ausserdem erzwingt die Pulver-Wiederverwendungsrate von 20-50% weitere Mechanik zur Pulvermischung gelegten aber ungesinterten Pulvers mit frischem, wobei natürlich fünffach genutztes mit zweifach genutztem vermischt von diesem ununterscheidbar wird, sodass teures Pulver verworfen werden muss, da die Produktvolumen-zu-Bauvolumen-Rate selten 10% übersteigt. Zudem leidet die Produktfestigkeit unter dem hohen Leervolumen, das zwischen den Kugeln entsteht, die Oberfläche wirkt häufig rau, matt und schwach detailliert.

## **6. Das Hyperfusion-Verfahren im Detail**

Aus allen obig geschilderten Problemen ergibt sich die Aufgabe der Hyperfusion-Methode: Wie kann man hundertfach schneller drucken, die Festigkeit durch Materialverdichtung steigern, das Druckmaterial dabei wiederverwertbar belassen, objekt detaillierter drucken und die Objekt oberflächen glatter und weniger matt erscheinen lassen?

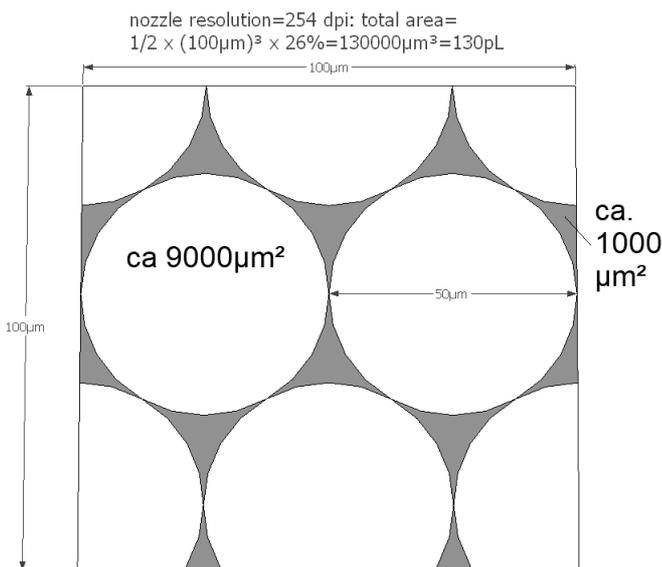
Eine Trommel bringt die erforderliche Geschwindigkeit um vielfach schneller zu drucken als bisher möglich ist.

Verglichen mit herkömmlichen Zweikreisssystemen (erst wischen, dann sintern), bietet der Trommeldrucker grosse Vorteile. Konnte bisher kaum eine Schicht im Zehntelsekundentakt erstellt werden, ist nun eine Schicht pro Zehntelsekunde möglich, evtl. auch mehrere.

Beim dem Verfahren des kontinuierlichen Hyperfusion-Drucks mittels einer Trommel (8, die geklammerten Nummern beziehen sich auf die erste Zeichnung) ist vorgesehen, dass der Schichtdruck teilkreisartig um die Trommelaussenwand erfolgt. Der Objektträger (Druckbett) (3) entfernt sich während einer Schichterstellung um eine Schichtdicke kontinuierlich. Wird das Pulver aus einem externen Reservoir (10) zur Trommel (8) geführt, besteht das Objekt nur aus einem Material. Erhält jede Schicht jedoch ihr Pulver aus trommelinternen Tanks, so können verschiedene Materialien schichtweise verbunden werden. Allerdings läge das ungesinterte Pulver vermischt im Druckraum und wäre wahrscheinlich unbrauchbar. Sinnvoll erscheint daher der Hyperfusion Trommeldrucker mit externer Pulverzufuhr, wobei unterschiedliche Materialeigenschaften (zB elektrische Leitfähigkeit) mittels unterschiedlicher Materialeigenschaften der Druckflüssigkeiten machbar sind. Der Druck erfordert keinerlei Supportstrukturen, erlaubt allerdings keine geschlossenen Objekte.

Im Unterschied zu DE102018006091.9, dem Trommeldrucker für Pulver, welches durch den in der Trommel befindlichen Wellenemitter aufgeschmolzen werden muss, sieht diese Druckmethode keine Aufheizung des Pulvers vor. Es wird kalt gelegt. Damit wird eine der drei Aufgaben erfüllt: **Das Pulvermaterial ist 100% wiederverwertbar.** Der Melt Flow Index MFI, der sich bei mehrfach erhitztem Pulver vierteln kann, sinkt nun nicht mehr.

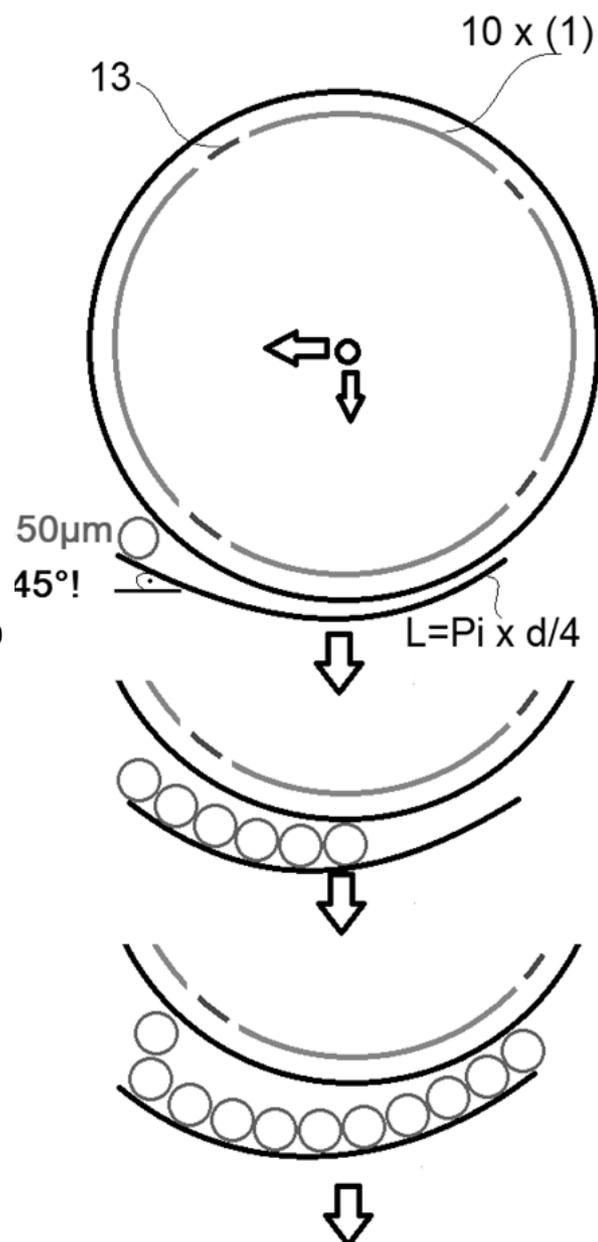
Liegt eine Kugel vierfach benachbart neben der anderen (Kugel in Würfel), so liegt das Leervolumen bei ca  $1 - \pi/6 = 48\%$ ; wird optimal hexagonal im Raum geschichtet (höchste Kugelpackungsdichte), so sinkt es auf immer noch beachtliche ca.  $1 - \pi/(3 \times \sqrt{2}) = 26\%$ . Hierdurch wird die Produktfestigkeit geschwächt, und eine postprozessierende Sinterung führt unweigerlich zu Masshaltigkeitsproblemen. Will man diese beiden Probleme beheben, so muss das Leervolumen aufgefüllt werden, sinnvollerweise mit dem gleichen Schichtmaterial um zwei bis drei Magnituden kleineren Volumens. Aufgrund des vorteilhaft grösseren Oberflächen-Volumen-Verhältnisses der viel kleineren aufzuspritzenden Kugeln ändert sich die Energiebilanz: Die kleinen Kugel benötigen weniger Wärme um miteinander zu verschmelzen. Sie bilden nun eine Gitterstruktur um die grossen Schichtkugeln und fixieren diese (können sie evtl auch partiell aufschmelzen, vorteilhafterweise sogar die Unterseite der Kugel der Folgeschicht, die bald aufgelegt wird). Da die Schichtkugeln ihre Geometrie weitgehend behalten, wird die Masshaltigkeit wesentlich verbessert, ebenso die Detailtreue. Die Auffüllung des normalerweise lichtabsorbierenden



Figur 3

Leervolumens sorgt nun für glattere und weniger matte Oberflächen. Somit werden weitere wichtige Aufgaben erfüllt:

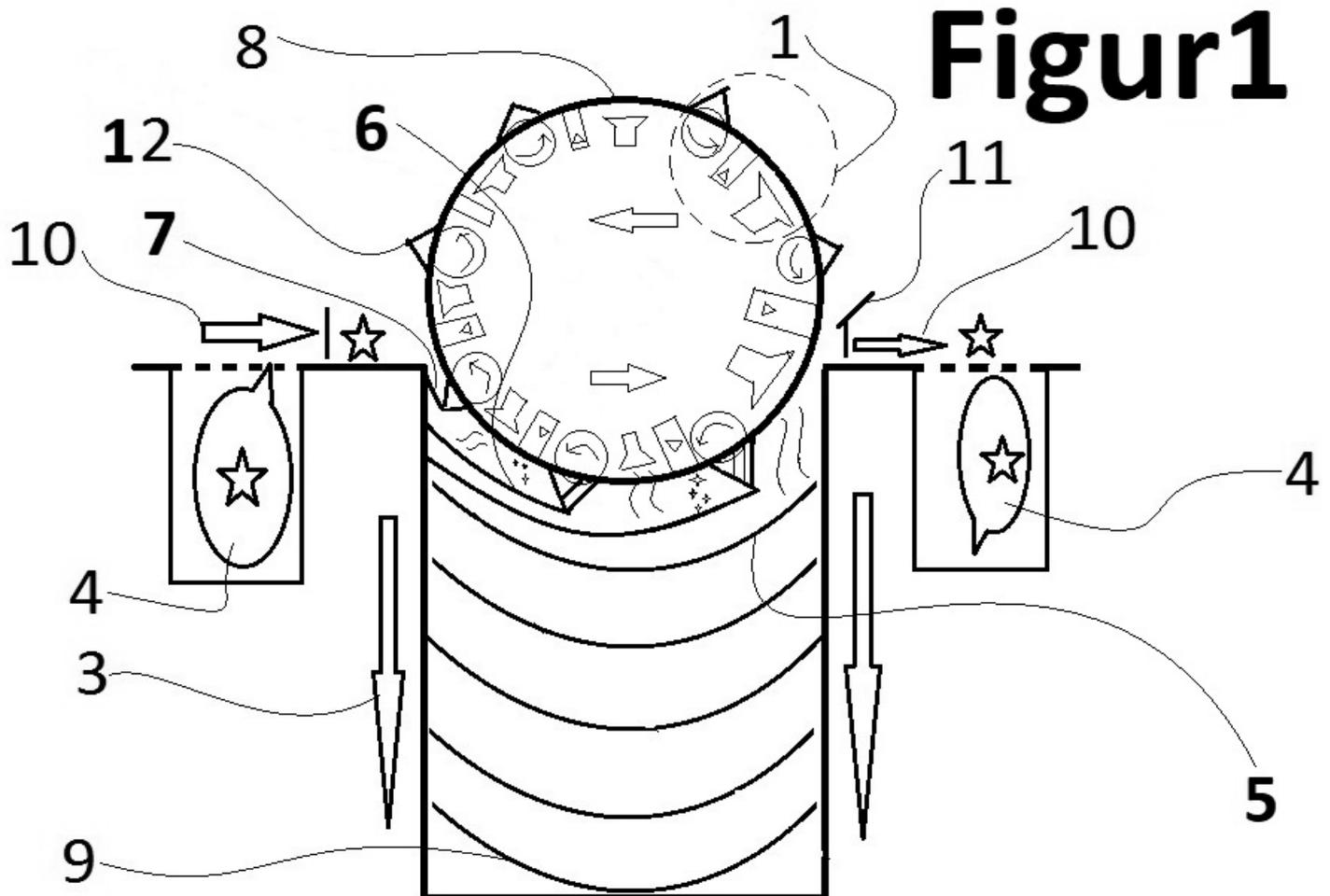
**Die Methode des Auffüllens erfüllt nun die Aufgaben des Verdichtens, Erzielens einer**



Figur 5

**höheren Produktfestigkeit, Detailtreue, Masshaltigkeit sowie weniger matter, dafür aber glatterer Oberflächen.**

Die um Magnituden schnellere Schichterstellung wird erreicht, indem die zu sprühende Dispersion bestehend aus **Mikrokugeln** (ca 1µm maximal, da die Druckkopfföffnungen <100µm sind und das zu jettende Druckmaterial <1/100 der Öffnung ausmachen sollte), einstelliger Nanobereich nur bei Metall nötig, hier jedoch abhängig von Produktmaterialkomponenten (bspw PA12 als Grundkörper, Silber als elektrischer Leiter oder anderes Metall zwecks Materialversteifung) eher im Rahmen von 5nm, sodass bspw Silberpartikel bei ca 200°C schmelzen ohne das PA12 zu zerstören), **Initiator und Reaktionsflüssigkeit** bei Bestrahlung durch den in die Trommel eingebauten Wellenemitter innerhalb von weniger als 50µs eine exotherme Reaktion startet, die theoretisch unbegrenzt laufen kann, gewünscht jedoch gerne >2ms, damit die obig erwähnte nachfolgend aufgelegte Kugel der Folgeschicht an ihrem Boden leicht aufgeschmolzen werden kann, siehe Figur 4. Im Unterschied zur herkömmlichen HSS-Druckmethode wird hier also nicht versucht, die grossen Schichtkugeln anzusintern, und der Wärmezuführungsvorgang soll explizit NICHT mit dem vorübergefahrenen Wellenemitter beendet werden. Der Bestrahlungsvorgang ist nur der Reaktionsinitiator, die Reaktion läuft unabhängig von ihm weiter. **Dadurch sind wesentlich höhere Geschwindigkeiten der Druckeinheiten (Walze/Spritzköpfe/Wellenemitter) möglich.** Sie sind so hoch, dass planar verfahrenende richtungsalternierende Methoden ihre physikalischen Limits längst überzogen.



Daher ist bei der Vorrichtung für dieses Verfahren vorgesehen, dass mindestens eine Pulver-verteilende rücklaufende Walze (12) im Druckbereich ständig Kontakt mit mindestens einer Schicht (5,6,7) hat, möglich und sinnvoll sind aber mehrere zeitgleich und ortsversetzt erstellte Schichten.

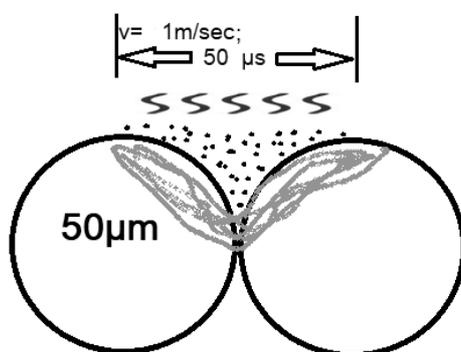
Die liegende rotierende in XYZ fixierte Trommel weist einen Durchmesser von ca. 1,4m und das Druckobjekt eine Schichtlänge von ca 1,11m auf (abhängig vom Schütt-Legeverhalten des Pulvers, hier werden 45° als Limit angenommen), sodass die Baulänge einen Meter beträgt; die Druckbreite wird mit 260mm angegeben (2 Druckkopfreihen à 2 Druckköpfe), die Schichterstellgeschwindigkeit wird auf eine Schicht pro Sekunde eingestellt, abhängig von Materialvielfalt und Farbmischung kann auch schneller oder langsamer gedruckt werden.

Bei einem Trommelperimeter von über vier Metern und einer benötigten Einbaubreite der 260mm langen Walzen-, Druckkopf- und Wellenemittereinheit (Hyperfusion Einheit) von 10cm werden 40 Hyperfusion Einheiten (zzgl allfälliger Sonder-Einheiten für Farben, Kühlung, Materialvielfalt, etc) in die Trommel eingebaut. Der Abstand zwischen Trommelaussenwand und oberster Pulverschicht soll optimalerweise minimal sein und wird auf 1mm eingestellt, womit sich bei einem 0,8 Meter tief absenkbaaren gekrümmten Bett ein Bauvolumen von  $0,8\text{m}^2 \times 0,26\text{m} =$  über 200L ergibt. Walze wie auch Druckbett fahren während der 1,11 Meter langen Schichterstellung innerhalb von einer Sekunde um eine Schichtdicke von  $50\mu\text{m}$  herunter, einstellbar sind jedoch auch Schichtdicken zwischen 30 und  $200\mu\text{m}$ .

So werden die Nachteile des Stands der Technik eliminiert und die folgenden Vorteile erzielt:

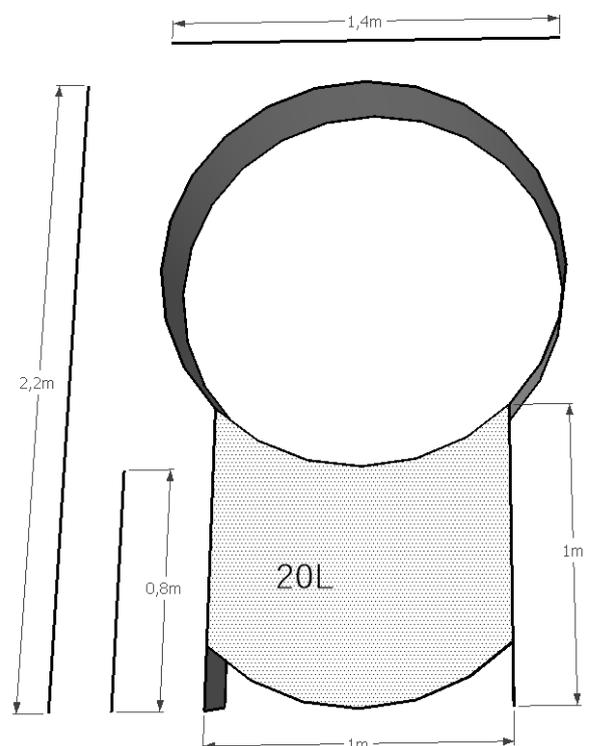
1. Kalte Pulverschichtlegung ermöglicht volle Pulverwiederverwertbarkeit.
2. Ca 2000 mal schneller als die von HP für Jet Fusion angegebenen Referenzen, bzw. bezogen auf HP Jet Fusion, hier bezogen auf die Schichtfläche, über 200 mal schneller.
3. Höhere Materialfestigkeit durch Materialverdichtung (Lückenfüllung)
4. Optisch weniger matte und haptisch glattere Oberflächen.
5. Mehr Detailtreue, weil Schichtkugeln ihre Form behalten.

Beschreibung der Hyperfusion:



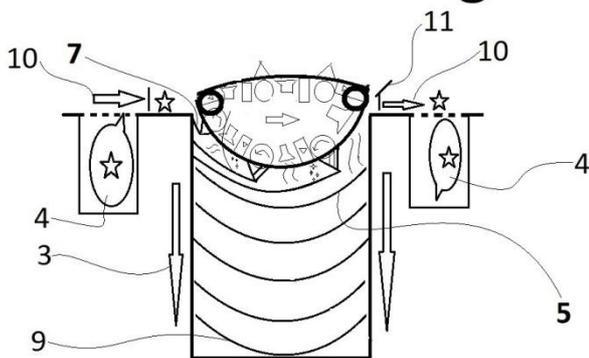
Figur 4

Die Trommel (8) rotiert unbeschleunigt während des Drucks. Das Pulver (4) wird, wie herkömmlich, extern (10) zugeführt. Es

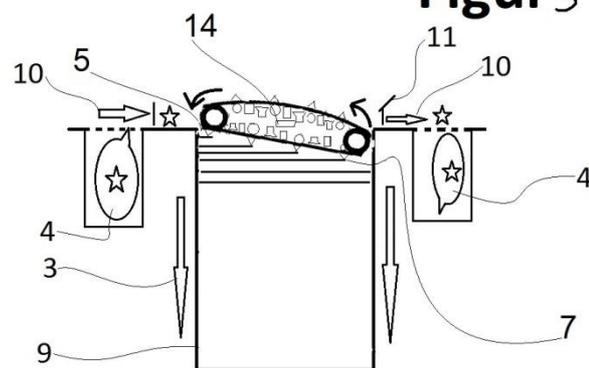


Figur 2

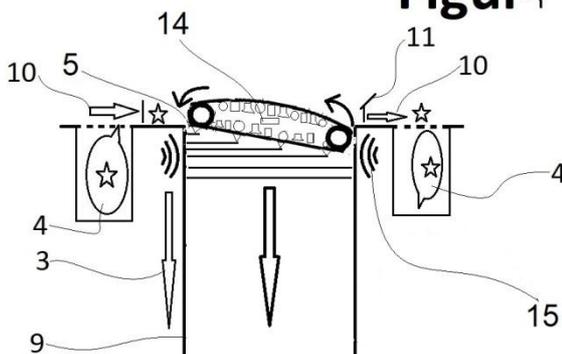
können so viele Walzen(2)-Druckkopf(1)-Wellenemittereinheiten [insgesamt gezeigt als (1)] kaskadiert werden wie in die Trommel (8) passen bzw wie sinnvoll erscheint. Wichtig für die kontinuierliche Absenkung (3) des Druckobjektes um eine Schichtdicke (5,6,7) pro Durchgang einer Bedruckungs- Bestrahlungs-Walzeneinheit (1) ist ein leichter Druckbettversatz um einen Schichtkugeldurchmesser in Richtung Pulverzuführung, siehe Figur 5. Hierdurch können die Druckeinheiten mitsamt Drehwalzen stationär eingebaut werden, da die kontinuierliche Druckbettabsenkung stets für genügend Kugelschichtabstand sorgt. Die Trommelwinkelgeschwindigkeit (Schichterstellungszeit) hängt von der Kugelschichtlege- und der Druckgeschwindigkeit und der Reaktionsinitiationsenergieübertragbarkeit des Wellenemitters (Material, Ansprechverhalten auf die Wellenlänge, Energiedosis, etc) ab. Weitere Druckkopfreiheiten hinter der ersten sind für Kühlung und Objektseparierung vom Supportmaterial günstig. Die Temperaturregelbarkeit des Bauraumes ergibt sich hieraus, sie wird aber auch durch den Einsatz der Trommel dahingehend erleichtert, dass nun wesentlich weniger Luftvolumen in der Maschine oberhalb des Druckbettes existiert und die Abfolge der ausschliesslich einseitig gerichteten Schichterstellung um ein Vielfaches schneller erfolgt, sodass Temperaturschwankungen minimiert werden. Zwecks externer Pulverzufuhr (10) wird eine Zuführungswalze mit 1-5 Kammern, bspw sternförmig ausgebildet, die je Kammer etwas mehr (zB 3%)

**Figur 5**

Pulver enthält als für die Schicht notwendig ist. Abgeführt wird das überschüssige Pulver ins Abfuhrpulverreservoir mittels eines Abstreifers (11) mit bspw. sternförmig ausgebildeter Abfuhrwalze.

**Figur 3**

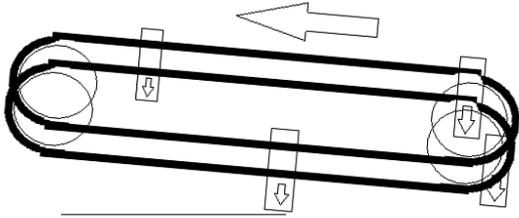
Im Unterschied zu herkömmlichen Sinterverfahren (SLS & HSS) wird keine Energie für die gezielte Aufschmelzung der Schichtkugeln benötigt. Das Leervolumen wird soweit wie möglich mit vorteilhafterweise schichtkugelgleichem Material (vorteilhafterweise sein  $T_g > T_m$  des Schichtmaterials) inklusive Initiator und Reaktionsflüssigkeit aufgefüllt, wobei das wesentlich günstigere Oberflächen-Volumenverhältnis der bezogen auf das Schichtkugelvolumen zwischen ein und zwei Magnituden kleineren aus den Druckköpfen gespritzten Mikrokugeln viel weniger Aufschmelzenergie errechnen lässt. Diese Energie rührt von der aufgespritzten Flüssigkeit, die aufgrund des durch den vorbeifahrenden Wellenemitter bestrahlten Initiators eine exotherme Reaktion einleitet und bezogen auf den Bestrahlungszeitraum von bspw  $50\mu s$  um mehr als zwei bis vier Magnituden länger läuft, sodass die nächste oberhalb des Reaktionsfeldes aufgelegte Schichtkugel aufgrund der heissen nun bereits verschmolzenen Mikrokugeln am Unterboden aufschmelzen kann.

**Figur 4**

Insgesamt ergibt die möglichst vollständige Leervolumenschmelzung von ca 20-30% des Druckobjektes eine

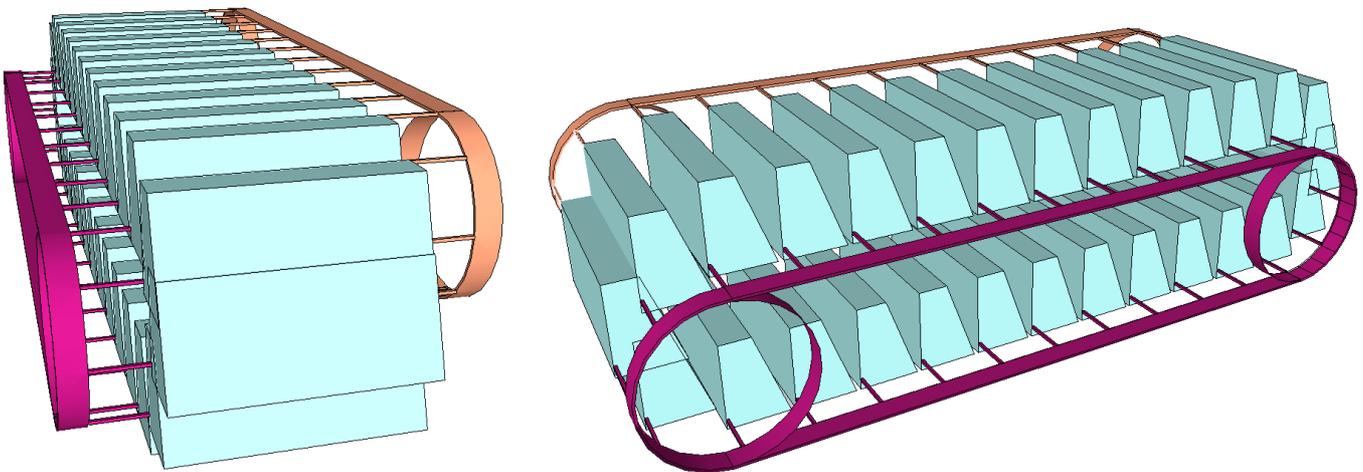
Gitterstruktur, die jede Schichtkugel einzeln an ihrer jeweiligen Position möglichst vollumgänglich umschliesst, wobei davon auszugehen wie auch gewünscht ist, dass die Reaktionstemperatur sowie die geschmolzenen Mikrokugeln auch die benachbarten Schichtkugeloberflächen thermisch angreifen und partiell aufschmelzen.

### Figur 6



Figur5 zeigt, dass die Druckkopfrückführung auch nicht immer kreisrund erfolgen muss, mit einer „Raupenkette“ könnte man Druckeinheiten einsparen, noch mehr sogar mit planarem kontinuierlich sich absenkendem Druckbett und um die Schichthöhe einseitig abgesenkter Kette, wie Figur 3 auf dieser Seite zeigt. Die Druckeinheiten können entweder kopfüber zurücktransportiert werden wie hier gezeigt, oder gemäss Paternosterprinzip, sodass der Druckkopf stets nach unten zeigt, wie im Bild der Figur 4. In der Mitte

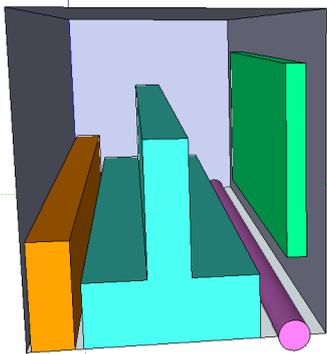
ist übrigens die optische Druckkopfüberprüfungseinheit angedeutet. Sie kann auch extern liegen, und ein Roboter könnte defekte Einheiten ausgliedern. Ausserdem muss die Anordnung der Druckeinheit nicht immer



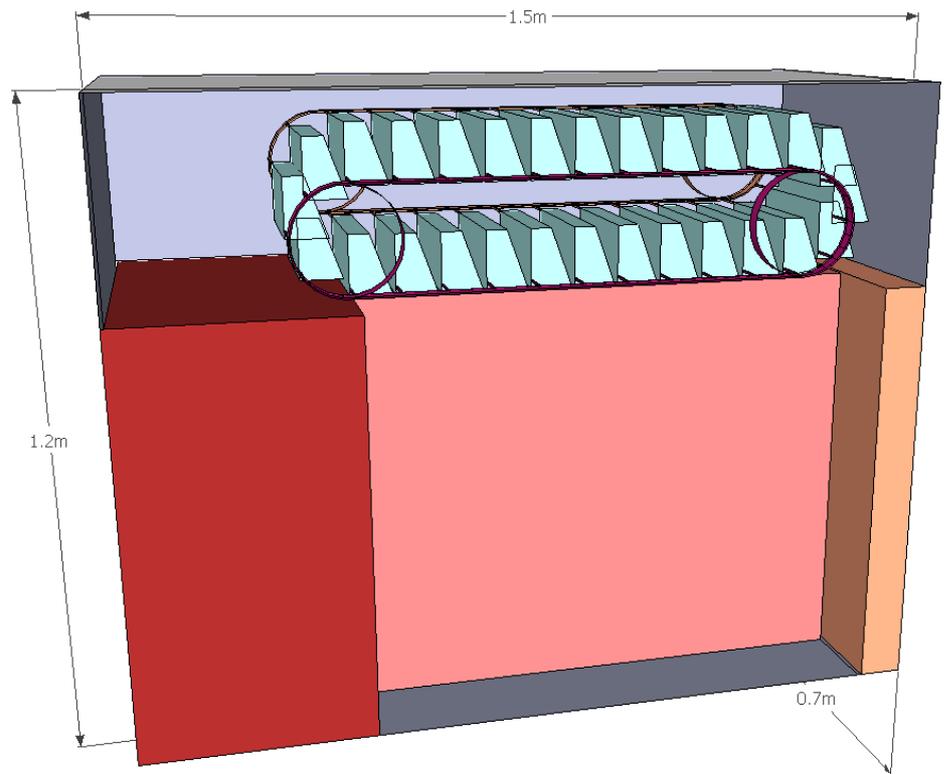
Walze>Jet>Wellenemitter sein, sinnvoll kann auch sein: Walze>Jet>Jet>Wellenemitter>Jet>Wellenemitter oder sonst wie günstig, dh es macht u.U. Sinn, die Schichtkugellücken in mehreren Phasen aufzufüllen, mal mit und mal ohne Bestrahlung, zB. damit die Dispersion tiefer wirken kann. Ebenfalls sind die Vibratoren um den oberen Drucktischrand angedeutet, sodass die komprimierten Schichten eine grössere Drucktiefe ermöglichen.

Figur6 zeigt nochmals das Paternoster-Prinzip (ca 1/3 Produktionskostensparnis verglichen mit dem Trommelsystem) mit den stets senkrecht ausgerichteten Einheiten. Dazu muss bemerkt werden, dass die Druckköpfe das „Backfire“-Prinzip nutzen, dh sie sind gegen die Fahrtrichtung versetzt eingebaut, sodass der Tropfen einen rückwärtsgewandten Vektor erfährt und mit  $V_x=0$  aufschlägt, damit ein Verwischen des Tropfens in X (immerhin 1.11m/sec angepeilt) unterbunden wird.

Hier die erste 3D-Zeichnung des Paternoster-Karussells: Für die gleichzeitige Erstellung von 10 Schichten müssen mindestens 25 Druckeinheiten verbaut werden; sie können extern stromgespeist werden, jede Einheit besitzt jedoch ihre eigene MCU mit bspw Wifi Modul, Akku, Walze, zwei versetzten Druckkopfleisten und dem Wellenemitter. Bei 3% angenommenem Produktvolumen mit 1/3 zu verspritzender Füllmasse die ihrerseits nur 50%

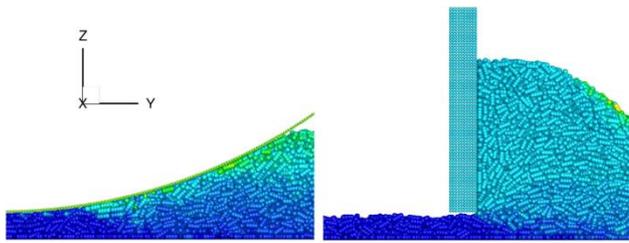


Schmelzkugeln beinhaltet muss bei 25 aktiven Druckeinheiten und 200L Bauvolumen jeder Einhängetank einer Druckeinheit  $200L \times 3\% \times 3 \times 2 / 25$ , also 1.44L beinhalten, bei ca 9cm X-Tiefe mit 28cm Y-Druckleistenlänge müsste diese Druckeinheit keine 7 cm hoch sein, gezeigt sind hier jedoch schon mal 10cm. Daneben eine erste Skizze des Druckers.



Fazit: Die unidirektionale Trommel- oder Ketten-Bewegung, Schichtkugellegung kalter Kugeln, der Einsatz moderner Druckköpfe sowie die exotherme Reaktion, die lediglich eine Initiationsbestrahlung als „Initialzündung“ benötigt, ermöglichen gesamtsystemisch den schnellsten Pulverdruck. Bei einer viertel Trommelrotation pro Sekunde und Nutzung eines Viertels des Trommelperimeters zur Kugelschichtlegung mit zehn gleichzeitig aktiven (schichtlegenden) Einheiten à 10cm Breite zzgl vier allfällig gleichmässig auf den Gesamtperimeter verteilter Sondereinheiten für Farben, Metalle etc. ist mit einer Schichterstellung pro Zehntelsekunde zu rechnen. Bezogen auf ein Bauvolumen von 200L mit 1m Länge (X) x 0.26m Breite (Y) x 0.8m Tiefe (Z) und einer Schichtdicke von bspw 50µm mittels bspw 70µm durchmessender Schichtkugeln wird der gesamte Bauraum bestehend aus 16000 Schichten und 100ms Schichterstellzeit innerhalb von 1600 Sekunden oder knapp 27 Minuten gedruckt. Abhängig vom Postprocessing, der Bauteilkomplexität (eingesparter Montagearbeit) und Bauteilgröße kann hier erstmalig 3D Druck schneller sein als Spritzguss. **Bezogen auf eine Schichterstellzeit von 7,55 Sekunden eines HP Jet Fusion 4200 Druckers für eine Schichtfläche von ca 38cm x 28,4cm ~ 1080cm<sup>2</sup> ~143cm<sup>2</sup>/sec druckt Hyperfusion mit 111cm x 26cm = 2886cm<sup>2</sup> ~ 28860cm<sup>2</sup>/sec über 200 mal schneller.**

Diese Aussage gilt nun für den Kunststoffdruck, und sie ist insofern mit Vorsicht zu geniessen, als sie den Druck- und Lege-Prozess mit 1.11m/s annimmt. Oben habe ich bereits gezeigt, dass Desktop Metal aber nur mit 20cm/sec fährt, die Integra P400 von EOS jedoch bereits mit 40cm/s und die Bautiefe ist auch nur ca 1/3 meiner erwünschten. Der



Unterschied ist folgenden Überlegungen geschuldet: Alle Anbieter arbeiten zur Zeit noch mit chaotischem Pulver, die grossen Kugeln stolpern über die kleinen, der Fluss wird gehemmt. Mehrere Kugeln werden in einer Schicht übereinander geschoben. Diese Vorgehensweise widerstrebt

Table 4: 316L mechanical properties [1, 5, 6].

Additive Manufacturing Process	Ultimate strength, MPa	Yield Strength, MPa	Elongation at Break, %	Hardness, HRB	Density, g/cm <sup>3</sup>
BJ	517	214	43	66	7.7
EBM [1]	509 ± 3	253 ± 3	59 ± 3		
DMLS [5]	482	172	30	77	
MIM [6]	450	140	40	67	7.6

einer geordneten, berechenbaren Bahnlegung. Ich möchte dagegen eine definierte Kugelhöhe (zB55-

65µm) und nur eine Kugel in Z pro Schicht. Ein Vibratorsystem soll den Baubehälter durch Anbringung mehrerer Vibratoren je Wand/Boden konstant in Schwingung halten (zB +10µm), sodass die Kugeln sich rasch setzen und eine hohe Packungsdichte erreichen wie auch eine grössere Bauraumtiefe ermöglichen. Gerade bei Metallkugeln ist abhängig von ihrer Masse und dem Gefälle (zB Druckbettlänge=¼ Trommelperimeter) davon auszugehen, dass die

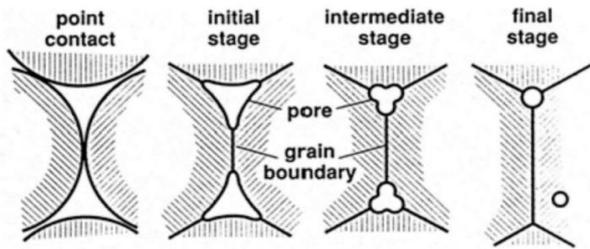
Equipment	Material	Sintering temperature (°C)	Relative density (%)	Ultimate strength (MPa)	Failure strain	Hardness
ExOne M-Flex [83]	Inconel 625	1280	99.6	612	0.41	237 (HV)
		1290	98	588	0.45	195 (HV)
		1300	97.9	522	0.356	185 (HV)

Kugeln zur Bettmitte drücken und damit die Komprimierung unterstützen. Der Effekt kann sich auch negativ

auswirken und muss empirisch bestätigt werden.

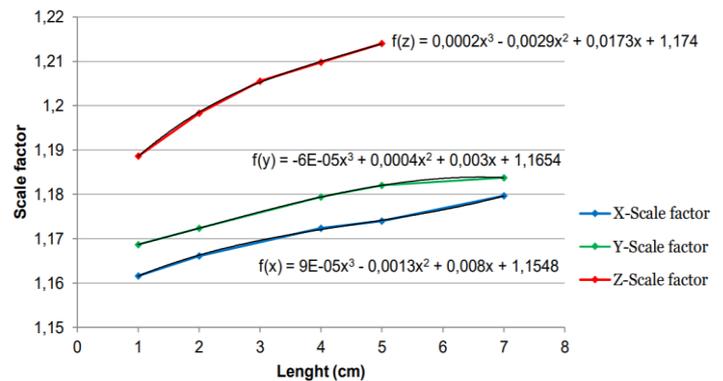
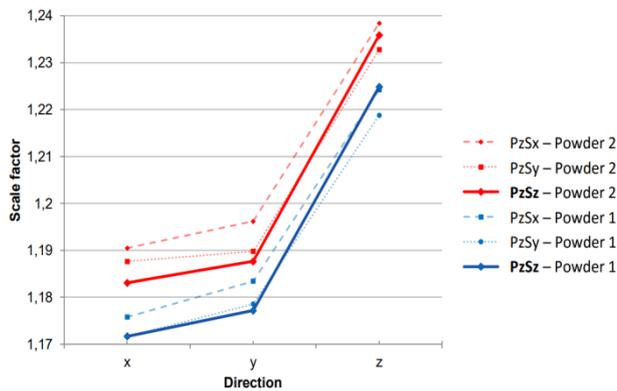
Dem Layern wird beim Hyperfusion-Verfahren besondere Aufmerksamkeit geschenkt: Discrete Element Modeling (DEM) muss hier den optimalen Walzendurchmesser (ich tippe hier auf einen extrem kleinen), dessen Winkelgeschwindigkeit bezogen auf die material- und grössenbezogenen Eigenschaften und natürlich die Legegeschwindigkeit determinieren. Hierbei soll die unimodale Distribution mit ca 80% einer Kugelhöhe pro Schichthöhe die angepeilten 1.11m/s erreichen. Die zuvor beschriebene Bettvibration soll zu einer grösseren Dichte beitragen, ein Walzen-Kompressions-Vektor ist m.E. nicht unbedingt von Vorteil, dies muss für die beschriebene Anordnung untersucht werden. Die Graphik zeigt also zwei Legemethoden, die m.E. nicht angewendet werden sollten.

Dass Binder Verfahren den MIM bzw SLM/EBM-Methoden in Sachen Festigkeit nicht unterlegen sein müssen, zeigen die beiden obigen Tabellen: Hier wird eine Dichte von bis zu 99.6% mit vielversprechenden Limits erreicht.



Sehr viel hängt eben davon ab, ob die Kugeln miteinander verschmelzen können und die Zwischenräume beim Sintern eliminiert werden, wie die Skizze zeigt. Denn sonst wird die Berechnung der Übergrößen-Produktion anstrengend, wie die beiden folgenden Grafiken zeigen:

Jedes Material schrumpft abhängig von Produktgröße und Vektor unterschiedlich, sodass wir uns nur noch im „near net shape“-Fenster bewegen und eine Dimensions-Nachbearbeitung notwendig wird.



Ein weiteres Hyperfusion-Patent geht detaillierter auf die Idee ein, den Bauraum zwar ungewärmt zu halten, das Pulver diesmal allerdings heiss zu legen um sich den Wellenemitter hinter dem Druckkopf auch noch zu ersparen:

Hyperfusion: Kontinuierlicher-heissgelegter-Mikroschmelz-verdichteter- 3D-Druck von sinterfähigem Metall-, Kunststoff- oder Keramikpulver auf ungeheiztem Pulverbett mittels eines Druckkopfkarussells.

Die Erfindung betrifft ein Verfahren und eine Vorrichtung zur Hyperfusion, der schichtweisen Herstellung von dreidimensionalen Objekten, insbesondere plan geschichtet mittels eines Druckkopfkarussells zwecks gleichzeitiger Erstellung multipler Schichten bei kontinuierlicher Z-Tischabsenkung, wobei die Pulverbettkugeln **Binder-los, OHNE Betaufheizung und OHNE** (dem Druckkopf allfällig nachfolgende) **Wellenemitter**, gezielt lokal verbunden werden, sodass heissgelegter, mikroschmelz-verdichteter 3D-Druck von sinterfähigem Metall-, Kunststoff- oder Keramikpulver auf ungeheiztem Pulverbett ermöglicht wird.

### Stand der Technik

Die Patentschriften DE102018010015.5, DE102018008594.6 (Hyperfusion), DE102014019392.6 (SLA), DE102016002598.0 (SLS) sowie DE102016015617.1 (Granulat) und DE102018006091.9 (HSS) nutzen bereits Trommeln zwecks vielfach schnelleren Schichtaufbaus. Bei DE102018010015.5 wurde jedoch ein Karussell anstatt einer Trommel eingesetzt um planar anstatt gekrümmt zu drucken, und die Einsparung von Druckeinheiten (allfällig Walzen, Druckköpfe, Wellenemitter, etc) betrug über 30%. Die Pulverlegung auf ungeheiztem Pulverbett erspart die komplexe Temperatursteuerung im Druckraum.

Allerdings benötigt letzteres Patent allfällig einen Wellenemitter, bspw. in Form einer IR-Heizleiste zwecks Energietransportes der Wärmestrahlung (Aufheizung/Schmelzung) bspw. auf PA12 Bettkugeln, bekannt aus HSS Anwendungen. Möglich ist auch die Initiation einer chemischen Reaktion aufgespritzten Stoffes mittels UV-Leisten. Jedenfalls wird hinter dem Druckkopf eine Energieübertragung auf das Pulverbett benötigt, es sei denn, man ist mit Kaltverklebung mittels bspw. Phenol zufrieden, was jedoch Debinding benötigt, also einen Zwischenschritt nach dem Druck- und vor dem Sintervorgang, wobei erwähnt werden muss, dass so gut wie jeder Klebevorgang, der Pulverbett-fremde Zusatzstoffe einbringt, dem Binder-Auflösungs/Zersetzungsschritt unterliegt, weshalb nahezu Binder-loser Druck (zb HSS & HPJetFusion) vorteilhaft erscheint. Nun müsste jedoch noch die dem Jetvorgang nachlaufende Energieübertragung zwecks Pulverbettkugelschmelzung entfallen. Ausserdem sollen die Eigenschaften des Hyperfusion-Patents erhalten bleiben, das Pulverbett also entgegen HP JetFusion/MetalJet und anderer Betttemperaturkontrollierter Verfahren kalt bleiben, und natürlich soll das Pulverbett kontinuierlich abgesenkt werden, indem die Druckköpfe nur in eine Richtung fahren.

#### Aufgabe dieser Erfindung

Aus obig geschildertem Problem ergibt sich nun die Aufgabe dieser Erfindung: Wie kann man die Pulverbettkugeln

***Binder-los, OHNE Betaufheizung und OHNE*** (dem Druckkopf allfällig nachfahrende)

***Wellenemitter***, gezielt lokal verbinden?

#### Offenbarung und Beschreibung der Erfindung: Grundsätzlicher Aufbau mit wesentlichen erfindungsgemäßen Merkmalen

Die Pulveraustragung wird räumlich (dadurch auch zeitlich) mit dem Spritzvorgang unmittelbar gekoppelt: Ein direkt am Druckkopf angebrachter Tank enthält das Bettpulver. Eine Karussell-Vorrichtung, die eine kontinuierliche Druckbettabsenkung durch unidirektionale Druckkopfbewegung über das Pulverbett ermöglicht, benötigt also so viele Pulverkugeltanks wie mit ihnen verbundene Druckköpfe. Dadurch sind theoretisch Materialmixe möglich, jedoch wird das unbedruckte Pulver vermischt und schwerlich sortierbar. Die im Allgemeinen rückdrehende Walze verteilt die Kugeln. Diese werden erwärmt, indem sie einen (sich verjüngenden) Spalt zwischen beheizter Tankwand und beheizter Walze passieren müssen. Der Spalt, durch den die Kugeln endlich auf das Druckbett fallen, sei einen Kugeldurchmesser breit, die untere Tankebene sei vertikal ca 0.5 Kugeldurchmesser einstellbar zum Druckbett abständig. Abhängig vom Kugelmateriale, gegeben sei bspw. PA12 (Tm 180°C) oder ein Metall (Tm 1200°C), werden die Kugeln nun beim Durchrutschen aus dem Tank aufs Druckbett auf 150°C bzw. 500°C aufgeheizt. Der Abstand zwischen Pulvertankauslass und Druckkopfdüse liege bei vorzugsweise 20mm. Die Vorwärtsgeschwindigkeit des Druckkopfes liege bei gegebener Vorrichtung bei 0.5m/s. In diesem Falle erreichte die gespritzte Dispersion die heissen Kugeln innerhalb von 40ms. Bis zum Auftreffen der gespritzten Dispersion aus dem Druckkopf verlören die heissgelegten Kugeln nun Wärmeenergie durch die Umgebung, bspw. die unterliegenden Kugelschichten, von angenommenen 10%. Bei angenommenem Einsatz von TIJ (Bubblejet-Prinzip, viel preiswerteres Fabrikationsverfahren als PIJ) enthielte die gespritzte Dispersion einen sehr hohen Wasseranteil, bis zu 90%. Das Wasser würde nun ohne weitere Wärmequelle verdampfen, sodass keinerlei dem Druckkopf nach/vorlaufende Bestrahlung mehr nötig wäre. Aufgabe der Dispersion sei der Transport von Nanokugeln, vorzugsweise natürlich Bettpulvermaterial-gleichen Materials. Preiswerter und daher ebenfalls überlegenswert ist jedoch auch der Einsatz grösserer Kugeln bis zu einer halben Magnitude des Pulverbettkugeldurchmessers (entspricht in etwa der Grösse des Tetraederlochs bei optimaler Kugeldichte), allerdings sollte der Dispersionskugeldurchmesser nicht 1% des

Jetdüsendurchmessers des Druckkopfes überschreiten, somit verbliebe besagte Dispersionskugel wohl maximal im oberen Nanobereich. Das Material dieser hundertfach grösseren Kugeln könnte nun nicht mehr den Nanoeffekt nutzen und müsste daher einen günstigen  $T_m$  (zB.  $< \frac{1}{2} T_m$  der Pulverbettkugeln) aufweisen. Die Matrix (Gitterstruktur, die die Pulverbettkugeln umfasst) sollte nicht gefüllt werden, damit die Pulverbettkugeln sich grossräumig während des Sintervorgangs verbinden könnten. Eine komplette bzw überhaupt grossvolumige Füllung wäre sowieso nicht erwartbar und könnte nur durch mehrmaliges Überfahren mehrerer Druckköpfe ohne Layering erreicht werden. Dieses Verfahren ist für die Herstellung glatter, reflektierender Oberflächen sinnvoll. Der Schrumpfprozess würde die Masshaltigkeit nun extrem beeinflussen, sodass, wie bisher beim Bindern üblich, trotz Übergrössendrucks und aufwendiger CAD-Antizipationen, keine gleichmässige Schrumpfung für alle Axen erwartbar ist und ein „net shape“ Druck wohl ausgeschlossen ist.

Der Nanoeffekt sorgt bei Unterschreitung eines kritischen Oberflächen/Volumenverhältnisses nun für eine Schmelzung weit unter dem  $T_m$  des Bettpulvermaterials. Beim Verbinden der Nanokugeln wird das erwähnte Verhältnis verändert, sodass  $T_m$  der Nanokugeln steigt, allfällig sogar oberhalb der vorhandenen Umgebungstemperatur, sodass der Schmelzvorgang abgebrochen wird, vorzugsweise jedoch nachdem eine weitere Pulverschicht gelegt wurde, sodass diese die entstandene Matrix allfällig zusätzlich formgestalten kann, günstig ist aber in jedem Fall, wenn die Statik/Gitterstruktur nicht mehr belastet wird, die obige Schichtkugel also bereits aufgelegt ist, bevor der Schmelzvorgang beendet ist. Bei der vorgesehenen Vorrichtung (Karussell mit 5cm abständigen Walzen und 0.5m/s Vorschub) wird die nächste Schichtkugel spätestens nach 35mm oder 70ms aufgelegt. Die Dispersion soll also verdampfen, und die Nanokugeln sollen aufgrund der Umgebungstemperatur der volumenmässig tausendfach grösseren ( $7\mu\text{m}$  zu  $70\mu\text{m}$  Durchmesser) Bettpulverkugeln bei je nach Material 10-50% der  $T_m$  der letzteren schmelzen, bis der Nanoeffekt durch Nanokugelschmelzung verringert wurde und die Bettpulvertemperatur abgesunken ist. Gesteuert werden kann der Vorgang noch durch die (fast aufwands-/kostenlose) indirekte Vorwärmung der Dispersion im Druckkopftank, also die Wahl des Isolationsmaterials zwischen Pulverbettkugeltank und Dispersionstank. Beim PA12 (Pulvertank-Heizdraht  $150^\circ\text{C}$  bei  $T_m 180^\circ\text{C}$  zu  $80^\circ\text{C}$  Nanokugel- $T_m$ , Pulverkugeltemp bei Auftreffen der Dispersion ca  $130^\circ\text{C}$ ) würden die  $50^\circ\text{C}$  über Nanokugel- $T_m$  heissen Pulverkugeln die Nanokugeln nun innerhalb von ca 2s schmelzen. Jedoch ist zu bedenken: Die Dispersion wurde im Tank auf maximal  $60^\circ\text{C}$  aufgeheizt. Die Isolation zwischen Druckkopf und Pulvertank erfolgt mittels Kunststoff. Das gespritzte Wasser verteilt zunächst die Wärme, kühlt die Pulverbettkugeln jedoch auch auf ca  $105^\circ\text{C}$  ab und beginnt sofort mit dem Verdampfungsprozess; die Nanokugeln beginnen nun zu schmelzen bis der abklingende Nanoeffekt (Volumenwachstum relativ zur zusammenwachsenden Oberfläche) die notwendige Schmelztemperatur auf die absinkende Pulverbetttemperatur angeglichen hat. Daher wird der Schmelzvorgang stark verkürzt und keinesfalls 2 Sekunden dauern.

Beim Metall (Pulvertank-Heizdraht  $500^\circ\text{C}$  bei  $T_m 1200^\circ\text{C}$  zu  $300^\circ\text{C}$  Nanokugel- $T_m$ , Pulverkugeltemp bei Auftreffen der Dispersion ca  $400^\circ\text{C}$ ) würden die  $100^\circ\text{C}$  über Nanokugel- $T_m$  heissen Pulverkugeln die Nanokugeln nun innerhalb von ca 2s schmelzen. Jedoch ist zu bedenken: Die Dispersion wurde im Tank auf maximal  $60^\circ\text{C}$  aufgeheizt. Die Isolation zwischen Druckkopf und Pulvertank erfolgt mittels Luftspalt. Die gespritzte Dispersion besteht günstigenfalls aus einer niedrigviskosen Flüssigkeit (TIJ-Köpfe, die wasserbasierte Dispersionen aufgrund des Bubble-Jet Prinzips benötigen, müssen allfällig durch PIJ-Köpfe ersetzt werden, wenn eine Oxidation des Nanopartikels nicht verhinderbar ist), die bei Temperaturen über  $200^\circ\text{C}$  verdampft (aufgespritzter, später im Sinterofen aufgelöster Kohlenstoff von über 1 Gewichtsprozent als Dispersions-Rückstand kann Laves-Phasen verhindern); sie verteilt zunächst die Wärme, kühlt die Pulverbettkugeln jedoch auch auf ca  $350^\circ\text{C}$  ab und beginnt sofort mit dem Verdampfungsprozess; die Nanokugeln beginnen nun zu schmelzen bis der abklingende Nanoeffekt (Volumenwachstum relativ zur zusammenwachsenden Oberfläche) die notwendige Schmelztemperatur auf die absinkende Pulverbetttemperatur angeglichen hat. Daher wird der Schmelzvorgang stark verkürzt und keinesfalls 2 Sekunden dauern.

Diese Variante der Hyperfusion wird als Binder-looses Verfahren beschrieben, weil der Stand der Technik den üblich eingesetzten Binder häufig als gespritzten Klebstoff, bestrahlungnotwendiges Harz oder bestrahlungnotwendigen Wärmestrahlungsabsorber definiert, sodass stets druckbettpulverfremdes Material eingebracht wird, welches häufig dem De-Binding-Schritt vor dem Sintern unterliegt und allfällig Rückstände hinterlässt, die die Produktfestigkeit reduzieren können. Ziel dieser Hyperfusion-Variante ist aber die rückstandslose druckbettpulveridentische Materialverwendung ohne nachfolgende Bestrahlung und ohne Debinderprozesse.

Bei der Vorrichtung mit kontinuierlicher Druckbettabsenkung mit Drucklänge 1m und unidirektionaler Vorwärtsgeschwindigkeit der im Abstand von 5cm hintereinander angebrachten Druckköpfe muss jeder Druckkopf vertikal bspw. 50µm oberhalb des vorherlaufenden stehen, wenn die Druckschichthöhe auf 50µm eingestellt wird.

Vorteilhafte Ausgestaltungen sind in den Ansprüchen 1-10 angegeben.

Durch die erfindungsgemäße Lösung werden die Nachteile des Stands der Technik eliminiert und die folgenden Vorteile erzielt: **Bestrahlungslose UND Bettheizungslose UND Binder-freie Druckmethode**

#### Beschreibung der Zeichnungen und der bevorzugten Ausführungsform der Erfindung

Die vorliegende Erfindung wird nachfolgend beispielhaft und nicht einschränkend anhand von Zeichnungen näher erläutert.

Es zeigen:

Figur 1:

Vorzugsweise unimodales Pulver befindet sich -vorzugsweise leicht elektrisch aufgeladen- im jedem Druckkopf vorgespannten Pulvertank. Dieser weist hinter der unteren Vorderkante ein -vorzugsweise ebenfalls leicht elektrisch gleichladungsgerichtet aufgeladenes- Heizelement auf, welches –bspw im Falle von PA12- mit ca 150°C das Pulver auf ca. 140°C vorwärmt, bevor es aufgrund einer -vorzugsweise ebenfalls gleichladungsgerichtet leicht elektrisch aufgeladenen- mitdrehenden und allfällig vorzugsweise um ein paar Prozent vordrehenden Walze zwischen ihrer relativ zum Heizelement weicheren Umwandung und besagter Heizelementwandung durch die sich verjüngende Öffnung hindurch rollt. Aneinander reibende Kugeln und ungleiche Kugelgeometrien mit ungleichen Durchmessern erfordern die traktionsfördernde Heizelement-Walzenabstand-Anpassung mittels mindestens einer weichen Wandung, vorgeschlagen wird hier shore A90 der Walzenbewandung. Die überall gleichladungsgerichtete elektrische Ladung soll die Kugeln davon abhalten, an der Walze haften zu bleiben.

Das Heizelement weist unten nach vorne gerichtet eine runde Kante auf, die gegebenenfalls den Untergrund ordnen könnte, andere Kantenformen sind jedoch ebenfalls denkbar.

Das Heizelement weist unten nach hinten gerichtet eine sehr scharfe Kante auf, die vertikal um vorzugsweise weniger als einen halben Druckbettkugeldurchmesser genau positioniert werden sollte, sodass keine Kugeln nach vorne schießen können, nach oben durch die Walze begrenzt werden und nach unten durch die zuvor gelegte Schicht. Die leicht überdrehende (Perimeterabrollgeschwindigkeit bspw 5% über Druckkopfvorwärtsgeschwindigkeit) Winkelgeschwindigkeit der Walze sorgt jetzt für Staudruck und drückt die Kugeln nun auch in Y-Richtung (lateral zur Druckrichtung) gegeneinander, sodass die optimale Packungsdichte erzielt werden sollte. Am Ende jeder Schichterstellung wird die Walze gestoppt oder kurz in Gegenrichtung gedreht, sodass keine Kugeln mehr aus dem Schlitz austreten können. Hat der Druckkopf seine Schichtanfangsstellung erreicht, wird die Walze wieder mit-drehend gesteuert. Möglich ist noch die Anbringung eines Druckbettpulver-höhenordnenden Brettes mit haftungshindernder Abstreifkante hinter der Walze.

Die Kugeln werden aufgrund der heissen Walzenwand –bei PA12 allfällig ca 150°C- und der um die Walze von 10-fach auf einfachen Kugeldurchmesser- abständig verjüngend geformten Heizelement-Wand auf ca 140°C aufgeheizt, bevor sie während der weiteren Druckkopfbewegung (mit vorzugsweise 0.5m/s und um ca 20mm) auf ca 130°C abkühlen. Nun überfährt der Druckkopf (aus Kostengründen vorzugsweise Thermal Ink Jet=TIJ, bspw. HP HP SPT EDGELINE/TIJ4 A51-53) den Druckobjektort und spritzt eine wasserbasierte vorzugsweise auf ca 60°C vorgewärmte Nanopartikeldispersion, die volumenbezogen natürlich möglichst viele Nanopartikel enthalten sollte (vorzugsweise>10%). Diese Partikel sollen bei bspw. 80°C zu schmelzen beginnen. Der gespritzte Wasseranteil soll vor dem Verdampfen zur Wärmeverteilung beitragen. Vorzugsweise bestehen Nanopartikel und Schichtkugeln aus dem gleichen Material, in jedem Falle sollte darauf geachtet werden, dass rückstandslos gedruckt wird und der Debinderprozess somit entfällt.

Die gedruckte Schicht kühlt nach dem Schmelzvorgang, während dessen die Schichtkugellöcher nun teilweise aufgefüllt wurden, weiter auf 70°C ab, bevor die nächste Walze des folgenden Druckkopfes nach ca 35mm und 70ms die nächste ca 140°C heisse Kugel auflegt, sodass die Abkühlung in Z nach vielen Schichten kontinuierlich erfolgt.

Die kontinuierliche Druckbettabsenkung ist natürlich nur aufgrund der unidirektionalen Druckbewegung durch ein Karussell oder eine Trommel oä möglich.

Figur 2:

Beispielhaft wird hier eine Version und Vorrichtung gezeigt, die die Druckköpfe verarbeitet, die bereits in 3D Druckern von HP eingesetzt werden. Der Pulvertank besteht aus zwei spritzgegossenen Halbschalen, deren kurze Aussenseiten die durch Boxen angedeutete Batterie-gespeiste Elektronik aufnehmen. Pulvertank und TIJ-Kopf stehen nur mechanisch in Zusammenhang und können durch die Pulvertank-Traghalter eingerastet verbunden werden.

Figur 3:

Der die Walze antreibende Motor des Pulvertanks besteht in der Vorrichtung aus einem Planeten-Getriebe-Motor mit Drehzahl-Senor als Feedback-Kanal. Der Abtrieb dreht mit 1430RPM. Eine weitere Qualitäts-verbessernde Massnahme könnte eine laterale Walzenbewegung (hin und zurück) über einen Kugeldurchmesser pro Druckkopffahrgeschwindigkeit sein, also bei der Vorrichtung von 50µm lateral mit 20kHz. Transducer wären hier ideal, jedoch teuer, gross, schwer und nicht für 100% ED (Einsatzdauer gebaut), Handy-Vibratoren sind billig, klein und leicht, allerdings auch nicht 100% ED-tauglich –und die Frequenz liegt weit unter der gewünschten. Die Vorrichtung verbaut beide Systeme. Ausserdem werden die beiden langen oberen Kanten des Druckbettes der Vorrichtung mit einer Reihe von starken Vibratoren versehen um kurzhubige Wellen (<25µm) zu erzeugen, die die Schichten verdichten sollen.

Der Druckkopf zeigt die fünf in zwei Reihen versetzt angeordneten ca je ein Zoll langen TIJ-Einheiten. Ähnliche Köpfe werden in vielen Bubble-Jet Druckern als Wegwerfartikel eingesetzt (wenn der Tank leer ist).

Figur 4:

Die gezeigte Vorrichtung besteht aus einem Verbund von vier miteinander getriebe-verzahnnten Karussellen mit drei unterschiedlichen Laufgeschwindigkeiten: Karussell1 als Drucksystem läuft mit 0.5m/s, während die Karusselle 2 und 4 die Druckköpfe von einer Z-Ebene in die andere verbringen sollen. Karussell 3 sorgt für den schnellen Rücktransport auf der Hochebene, bevor jeder 30ste Druckkopf zwecks eines Boxenstopps in die Auffüll-Position ausserhalb des Karussell-Systems gestossen wird. Eine komplette Runde dauert ca 3s, sodass der Auffüllvorgang ebenfalls ca 3s in Anspruch nehmen kann. Jeder Druckbettpulvertank trägt eine WIFI-gesteuerte Akku-gespeiste MCU, die vor jedem Schichtdruckstart innert weinger als 100 ms den Schichtdruckplan erhält. Der Akku wird innert des ca 3 sekündigen Boxenstopps für die Energiebereitstellung der nächsten 30 Runden x 2 Arbeitssekunden=1 Minute seines angeschlossenen Druckkopfsystems aufgeladen.

Figur 5:

Innerhalb obig beschriebener 3s müssen ca 45cm<sup>3</sup> Dispersion sowie ca 150cm<sup>3</sup> Pulver in die Tanks übergeben werden.

Das Karussellsystem der Vorrichtung bewegt ständig 30 Köpfe, wobei jede Sekunde ein Austausch erfolgt, jeder Kopf also Pulver und Dispersion für 30 Runden aufnimmt.

Figur 6:

Dem Karussellsystem vorstehend werden zwei Ersatzdruckköpfe (rechts der Auffüllposition) gezeigt sowie ein Kopf links, der dem System zwecks Reparatur manuell entnommen werden muss. Beim Boxenstopp wird zeitgleich bidirektional versetzt: Während die gerade fast geleerte Druckeinheit in die Auffüllposition gestossen wird, läuft die gerade aufgefüllte nach Parallelversatz ins Karussell zurück. Die Ersatzköpfe werden automatisch ins System geholt, wenn ein Kopf ausfällt. Während des Auffüllvorgangs kann der Kopf innert ca 2 Sekunden gereinigt werden; sollte die TIJ-Elektronik bei Testfeuerung immer noch keine Blasenentwicklung jedes Ports detektieren, wird der (stets aufgefüllte) Ersatzkopf in die Auffüllposition gedrückt, weshalb der dort zuvor negativ-getestete Kopf in die Reparaturposition gedrückt wird.

Figur 7:

Gezeigt sei hier noch der grosse Bruder der bislang besprochenen (Test)-Vorrichtung: Diese Vorrichtung zeigt das gleiche System gleicher Geschwindigkeit, allerdings mit jeweils zehn aneinander-gereihten Druckköpfen, sodass hier ein zehnfach grösseres Volumen erstellbar ist: Zur Standardlänge des Testsystems von 100cm mit einer Drucktiefe von 80cm sollen nun anstatt 10cm hier 100cm Druckbreite entstehen. Dies ergäbe ein Druckvolumen von 0.8m<sup>3</sup> innerhalb der bereits aus dem Vorpatent bekannten 27 Minuten (16000 Schichten je 50µm mit 1m Drucklänge je 100ms). Bei einem geschätzten Produktvolumen/Druckvolumen-Verhältnis von nur 3% könnten hier ca 0.05m<sup>3</sup>/h oder ca 1m<sup>3</sup> reines Produktvolumen pro Tag entstehen, **eine** Maschine würde also ca 250 Tonnen PA12 im Jahr verbrauchen, wofür bei gleichen Bedingungen HP4210 Maschinen im Wert von über 100mio\$ angeschafft werden müssten.

## ***Das Prinzip***

Prinzipielle Darstellung der Druckmethoden für PA12 mit nachlaufender UV- oder IR Leiste. Zwecks verlustloser Wiederverwendung wird die Polymerisation vorgeschlagen, sollte ein Debindern bei niedrigen Temperaturen möglich sein. Will man den Sinterofenvorgang einsparen, kommt die IR-Leiste in Frage.

Der Metalldruckprozess kommt ohne IR/UV-Leisten aus und spritzt Pulvermaterialgleiche Nanokugeln mit der Dispersion. Ein Polymerisationsprozess anstatt Nanokugeln –dann wieder mit UV-Leiste- wäre eine Alternative. Gesintert wird das Metallobjekt natürlich in jedem Fall.



Dispersionsjetting pro Print:  $3\text{cm}^3 \times 400 \text{ Füllungen} = 1.2\text{L}$ .  
 Nanopartikel pro Druck (bei 7.3% Feststoffanteil von 1.2L) =  $88\text{cm}^3$ .  
 Bedruckungsfläche pro Schicht: 5% von  $1\text{m} \times 10.8\text{cm} = 54\text{cm}^2$ .  
 Bedruckungsfläche pro Druck:  $54\text{cm}^2 \times 12000 = 65\text{m}^2$ .  
 Bedruckungsfläche pro Tag:  $65\text{m}^2 \times 2/\text{h} \times 10\text{h}/\text{d} = 1300\text{m}^2$ .  
 Davon erstellt durch einen Dk (Druckkopf):  $1300\text{m}^2 / 30\text{Dk} = 43\text{m}^2$ .  
 Bedruckungsfläche pro Woche:  $1440\text{m}^2 \times 5\text{d} = 6500\text{m}^2$ .  
 Davon erstellt durch einen Dk (Druckkopf):  $6500\text{m}^2 / 30\text{Dk} = 216\text{m}^2$ .  
 Bedruckungsfläche pro Jahr:  $1440\text{m}^2 \times 250\text{d} = 324000\text{m}^2$ .  
 Davon erstellt durch einen Dk (Druckkopf):  $324000\text{m}^2 / 30\text{Dk} = 10800\text{m}^2$ .  
 Pulverlegung pro Schicht :  $1\text{m} \times 10.8\text{cm} \times 50\mu\text{m} \times 74\% = 4\text{cm}^3 \text{ max}$ .  
 Pulverlegung pro Füllung:  $4\text{cm}^3 \times 30 = \mathbf{120\text{cm}^3}$ . Der Pulvertank hält somit Pulver für mindestens 31 Schichten vor.  
 Pulverlegung pro Print:  $120\text{cm}^3 \times 400 \text{ Füllungen} = 48\text{L}$ .  
 Pulververbrauch pro Print:  $120\text{cm}^3 \times 400 \text{ Füllungen} \times 5\% = 2.4\text{L}$ .  
 Pulververbrauch pro Tag:  $48\text{L} \times 5\% \times 2\text{P}/\text{h} \times 10\text{h} = 48\text{L}$ .  
 Pulververbrauch pro Woche:  $48\text{L} \times 5\text{d} = 240\text{L}$ .  
 Pulververbrauch pro Monat:  $1000\text{L}$ .  
 Pulververbrauch pro Jahr:  $12\text{m}^3$ .  
 Pulververbrauch pro Life time:  $115\text{m}^3$ .  
 Pulverzufuhr pro Tag (75%):  $48\text{L} \times 2\text{P}/\text{h} \times 10\text{h} = 1000\text{L}$ .  
 Energieverbrauch ohne Heizeinrichtung und ohne UV-IR Leisten, also Metalldrucker (Hopper-Dryer bringt gesamte Wärmeversorgung): ca 1KW: (zB Karussellmotor=NEMA86, 2Nm, 3000PPS Half Steps, Bipolar, 60V, 5A, 300W; Drucker-PC 300W; 2x Bettstepper Nema 57 mit Getriebe total 200W –es sind bis zu 700kg zu heben, 20 aktive Faulhaber total 40W, 20 aktive HP SPT EDGELINE/TIJ4 A51 total 200W?); Testsystem-Hopper-Dryer 220v 3KW 25L ca 1000€.

### ***Diskussion der Verdampfungsenergie für bspw PA12:***

Behielte eine unimodale  $70\mu\text{m}$  dicke bspw.  $140^\circ\text{C}$  heiss gelegte Pulverschicht innerhalb von 40ms (-bspw.1s) genügend Wasserverdampfungs- und bspw. PA12-Nanopartikel-Schmelzenergie um wasserrückstandsfrei eine Matrix um die Bettpulverkugeln zu legen? Förderlich ist evtl, dass die nächste heisse Schicht bereits nach 100ms aufgetragen werden soll. Packungsdichte-optimiert umgibt jede Kugel ein Oktaeder- und zwei Tetraederlöcher.

Rechnen wir mit 70 zu 30% bezogen auf  $1\text{L} = 1\text{dm}^3$  (PA12-Kugelanteil zu Lochanteil), so stecken in  $140^\circ\text{C}$  heissen 0.7 Kg PA12-Kugeln mit  $1.8\text{kJ}/\text{kgK}$  ca. **180kJ** relativ zum um  $40^\circ\text{C}$  aufzuheizendem Wasseranteil 30% von 90% = 0.27kg in der auf  $60^\circ\text{C}$  vorgeheizten Dispersion mit  $4,3\text{kJ}/\text{kgK} \times 40\text{K} = 46\text{kJ}$  zzgl Verdampfenergie  $2260\text{kJ}/\text{kg} \times 0.27\text{kg} = 610\text{kJ}$ , zzgl um  $140^\circ\text{C}$  aufzuheizendem PA-Nanopartikelanteil 10% von 30% = 0.03kg in der auf  $60^\circ\text{C}$  vorgeheizten Dispersion mit  $1.8\text{kJ}/\text{kgK} \times 140\text{K} \times 0.03\text{kg} = 8\text{kJ}$ , zzgl. 10% von 30% PA12Nanopartikelschmelzenergie  $100\text{kJ}/\text{kg} \times 0.03\text{kg} = 3\text{kJ} = \mathbf{670\text{kJ}}$ .

Eine Lochauffüllung zwecks Schrumpfungsverhinderung wäre somit unmöglich, eine Klebeschichtbildung funktionierte auch nicht. Eine Pa12-materialgleiche Matrixerstellung kann durch reinen Schmelzprozess ohne Nanoeffekte beim PA12 Pulver nicht erfolgreich sein. Hilfe evtl billige Warmumluft mit Entfeuchtung im inneren Karussellbereich als IR-Alternative für dieses System?

**Für den Metalldruck ergäben sich sehr viel günstigere Bedingungen:** Die spezifische Wärmekapazität beträgt dort zwischen Magnesium und Silber von  $1-0.2\text{kJ}/\text{kgK}$ , bei Dichten zwischen  $1.7-10\text{kg}/\text{dm}^3$ . Von Titan- bis Eisenlegierungen wären die Kugeln also 4-8 mal schwerer als die PA12er und könnten im Volumen anstatt  $1.8\text{kJ}$  nun  $2.3-3.5\text{kJ}$  speichern.

Ausserdem könnte das Pulver heisser gelegt werden. Allerdings wäre die Nanopartikelschmelztemperatur auch partikeldurchmesserabhängig u.U signifikant höher.

Rechnen wir wieder mit 70 zu 30% bezogen auf  $1\text{L} = 1\text{dm}^3$  (Stahlkugelanteil zu Lochanteil), so steckten in  $200^\circ\text{C}$  heissen 5.6Kg Stahlkugeln mit  $3.5\text{kJ}/\text{kgK}$  ca. **3920kJ** relativ zum um  $40^\circ\text{C}$  aufzuheizenden Wasseranteil 30% von 90% = 0.27kg in der auf  $60^\circ\text{C}$  vorgeheizten Dispersion mit  $4,3\text{kJ}/\text{kgK} \times 40\text{K} \times 0.27\text{kg} = 46\text{kJ}$  zzgl Verdampfenergie  $2260\text{kJ}/\text{kg} \times 0.27\text{kg} = 610\text{kJ}$ , zzgl um  $140^\circ\text{C}$  aufzuheizendem Stahlnanopartikelanteil 10% von 30% = 0.24kg in der auf  $60^\circ\text{C}$  vorgeheizten Dispersion mit  $0.46\text{kJ}/\text{kgK} \times 140\text{K} \times 0.24\text{kg} = 16\text{kJ}$ , zzgl. 10% von 30% Stahlnanopartikelschmelzenergie  $270\text{kJ}/\text{kg} \times 0.24\text{kg} = 65\text{kJ} = \mathbf{736\text{kJ}}$ . Die angenommenen  $200^\circ\text{C}$  Stahlkugeltemperatur beziehen sich auf die Diskussion S.16f, wo eine Metallnanopartikelschmelzung unterhalb von  $200^\circ\text{C}$  gezeigt wurde.

Zwecks Lochauffüllung für optisch ansprechendere Oberflächen könnte man nun wärmeenergetisch betrachtet ohne Schichterstellung mit den Druckköpfen mehrmals über die gleiche Schicht spritzen, sodass die Matrix also stabiler wäre. Da aber die darunterliegenden Schichten einen Wärmeüberschuss aufweisen, kann man sogar noch weiter auffüllen, ein sehr schöner Effekt!

Die Nanopartikel schmelzen, haften aber nicht an den "vertikalen" Kugelwänden, sondern legen sich in die Zwischenräume oberhalb der unteren Kugel. Die Kugel bietet  $50 \times 70 \times 70 \mu\text{m}$  Würfelvolumen, besagte Fläche wäre ca  $5000 \mu\text{m}^2$ . Eine  $70 \mu\text{m}$  Kugel im  $245000 \mu\text{m}^3$  volumigen Würfel hat eine Oberfläche von  $15700 \mu\text{m}^2$ . Unter gegebenen 30% Packungsdichte-Bedingungen wüchse die Oberfläche durch Oberflächenanteile benachbarter Kugeln im gleichen Würfel von 52% Packungsdichte auf ca. 70% also um den Faktor 1.35 auf ca  $21200 \mu\text{m}^2$ . Der zwecks Matrixerstellung zu benetzende Anteil liege nun dank der Kapillarkräfte bei ca 10%, sodass ca  $2100 \mu\text{m}^2$  benetzt werden sollen. Dies entspricht  $400 \mu\text{m}^2$  Benetzung auf  $1000 \mu\text{m}^2$  Druckfläche. Wie dick kann die Matrixschicht durchschnittlich sein?

Der HP SPT EDGELINE/TIJ4 A51 schwarz druckende TIJ-Kopf wird mit 9pL/drop ausgewiesen. 5280 Öffnungen pro Reihe auf 108mm Druckbreite mit zwei hintereinanderstehenden Reihen spritzen also ohne jede Redundanz  $18000 \mu\text{m}^3$  auf ca  $20 \times 50 \mu\text{m}$ , wenn man eine Frequenz von 20kHz voraussetzt (HP zeigt in Videos, dass der HP SPT EDGELINE/TIJ4 A51 150mio drops/s jettet. Bei 10560 Öffnungen entspricht dies 14204 drops/s/Öffnung, also  $70.4 \mu\text{s}$ /Schuss. Abhängig von der Dispersionsviskosität –Kavitätswiederauffüllung– sind 20kHz für diesen Kopf also ambitioniert, der reine Heiz- Austritts- und Miniskusurzustands-vorgang dauert aber im Video nur  $50 \mu\text{s}$ ).

Ausgehend von  $18000 \mu\text{m}^3/1000 \mu\text{m}^2$  kann also  $18 \mu\text{m}$  dick gespritzt werden, abzüglich 90% Wasseranteil sollten knapp  $2 \mu\text{m}$  dicke Schichten erstellbar sein. Bei  $400 \mu\text{m}^2$ , die wir auf  $1000 \mu\text{m}^2$  Druckfläche nur benetzen wollen, kommen wir also auf  **$5 \mu\text{m}$  dicke Matrixschichten**, wenn die Kapillarkräfte dafür sorgen, dass nur 10% der Kugeloberflächen benetzt werden müssen. Unten sehen wir Bilder, die das Lochvolumen zwischen den  $70 \mu\text{m}$  Kugeln darstellen: Es benötigt zwecks kompletten Auffüllens ca 66pL, für eine projizierte Kugelfläche von  $5000 \mu\text{m}^2$ . Wenn der Druckkopf also 18pL/ $1000 \mu\text{m}^2$  spritzt, können 90pL auf  $5000 \mu\text{m}^2$  evtl.  $6600 \mu\text{m}^3$  Feststoff (bei 7.3% Feststoffanteil in der Dispersion) liefern, was ja 10% Lochauffüllung oder 10% von  $50 \mu\text{m}$  Lochvolumenhöhe, also wieder den  **$5 \mu\text{m}$  dicken Matrixschichten** entspricht.

Dies ist natürlich ein rein theoretischer Wert, da die erkaltenden Nanopartikel keine feste Unterlage sondern meist nur ablaufende Flächen finden können. Daher ist zu prüfen, ob die Schichten auch bei unterschiedlichen Temperaturgradienten aufgrund variierender Objektdichten verlässlich dick aufgebracht werden können. Hier könnte der nachlassende Nanoeffekt bei Kornvergrößerung während des Schmelzvorgangs helfen. Die unteren Schichten könnten dann nicht mehr warm genug sein um das Metall aufgeschmolzen zu halten, da die notwendige Schmelztemperatur exponentiell mit dem Kornwachstum zunimmt. Quasi ein kybernetischer Mechanismus.

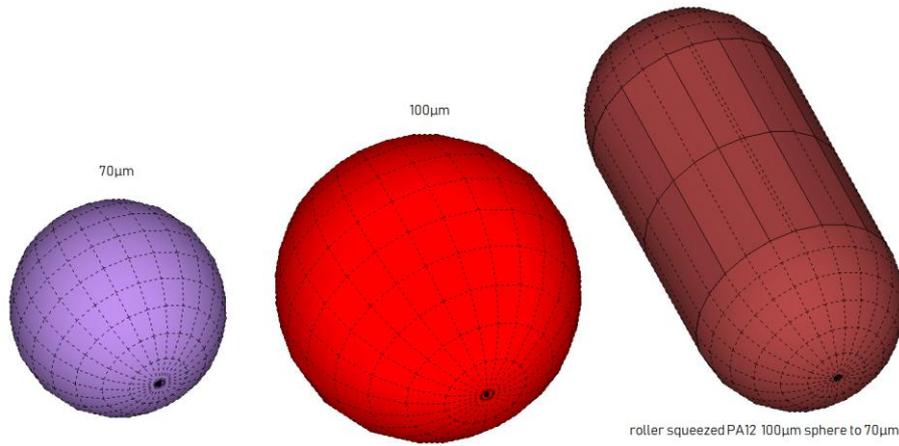
Sollten für das jeweilig genutzte Bettpulver keine materialgleichen Nanometallpartikel zur Matrixerstellung zur Verfügung stehen, kann man natürlich immer

- 1.: **Kunststoff über die Dispersion** ins Pulverbett als Schmelzmatrix einbringen. Möglich wäre auch eine
- 2.: **Polymerisation gespritzten Harzes** in der wasserbasierten Dispersion, wobei besagte Polymerisation zwecks UV-Leisten-Einsparung **über die Bettpulverwärme initiiert** werden sollte (thermische Polymerisation).

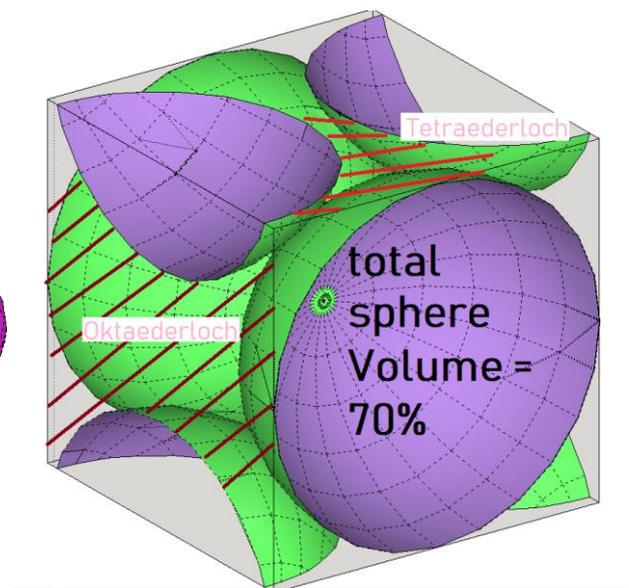
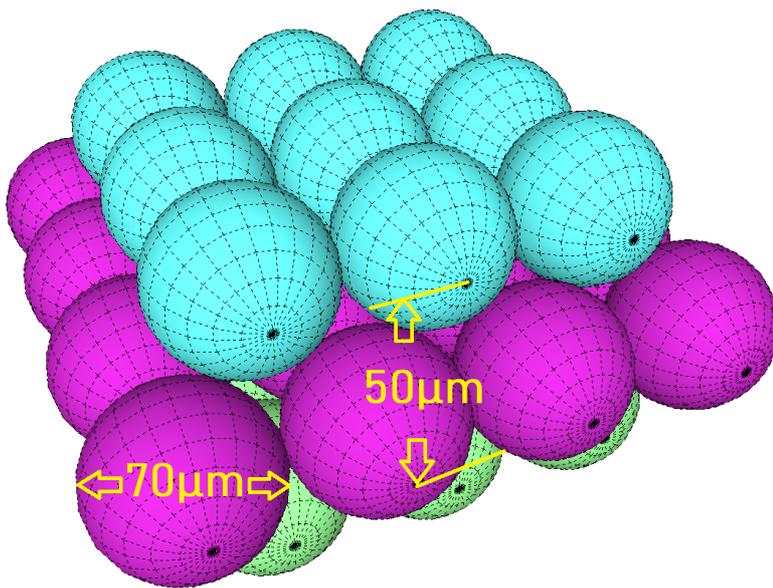
Wir werden diese beiden Möglichkeiten der Matrixbildung später ausführlich besprechen.

Nun müsste man ein bisschen ausprobieren: Kann man den Nanokugelgehalt signifikant steigern, also bspw auf über 10% bringen? Was wäre der maximale, was der optimale Nanokugeldurchmesser? Wäre eine langsame Ausgasung beim späteren Sinterprozess nützlich? Hier muss weitere Forschung stattfinden.

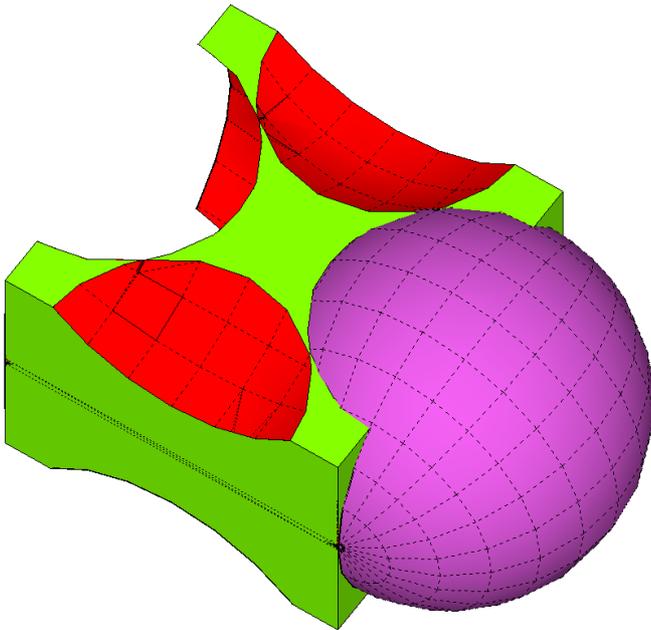
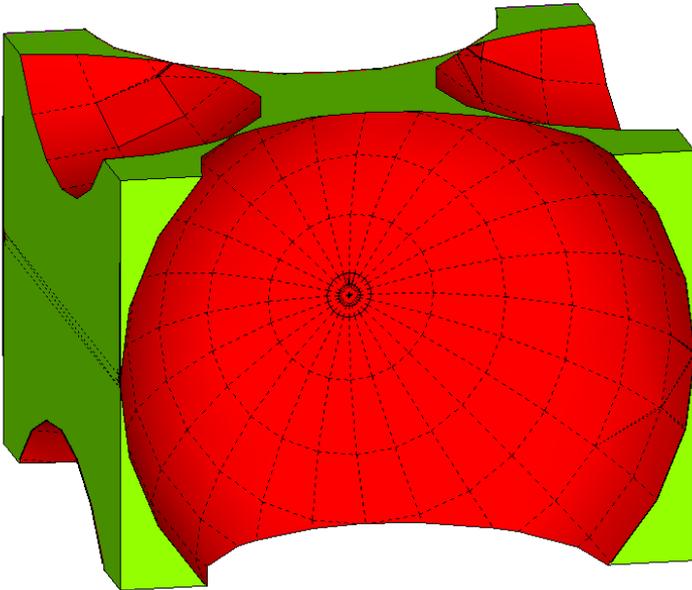
Zur Verdeutlichung der Schichtung, des 30%igen Lochvolumens, das mit Schmelze aufgefüllt werden soll, und der Durchmesserangleichung von Kunststoffkugeln ( $d_{10\%}=60 \mu\text{m}$ ,  $d_{90\%}=100 \mu\text{m}$ ) hier noch ein paar Bilder:



Die 100µm PA12 Kugel wird um 88µm gelängt wenn sie durch den Schlitz gerollt wird.

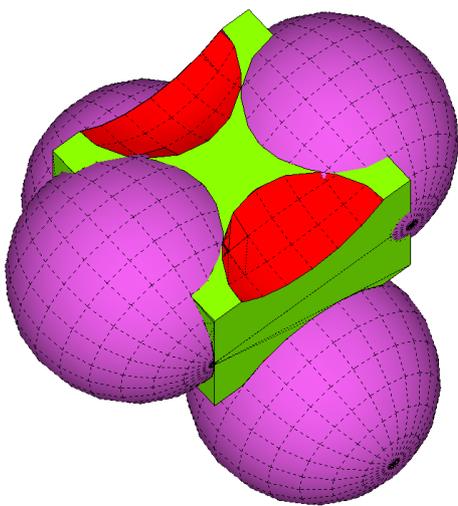


Einem Oktaederloch stehen 2 Tetraederlöcher gegenüber, Letztere machen also pro Loch  $\frac{1}{4}$  der theoretisch 26% des Lochvolumens aus.

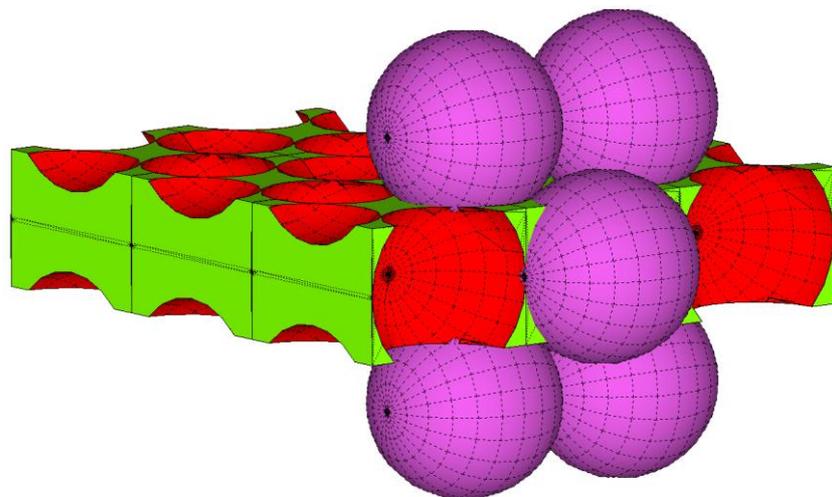


Das maximale Lochvolumen von 66pL bei 50x70x70µm

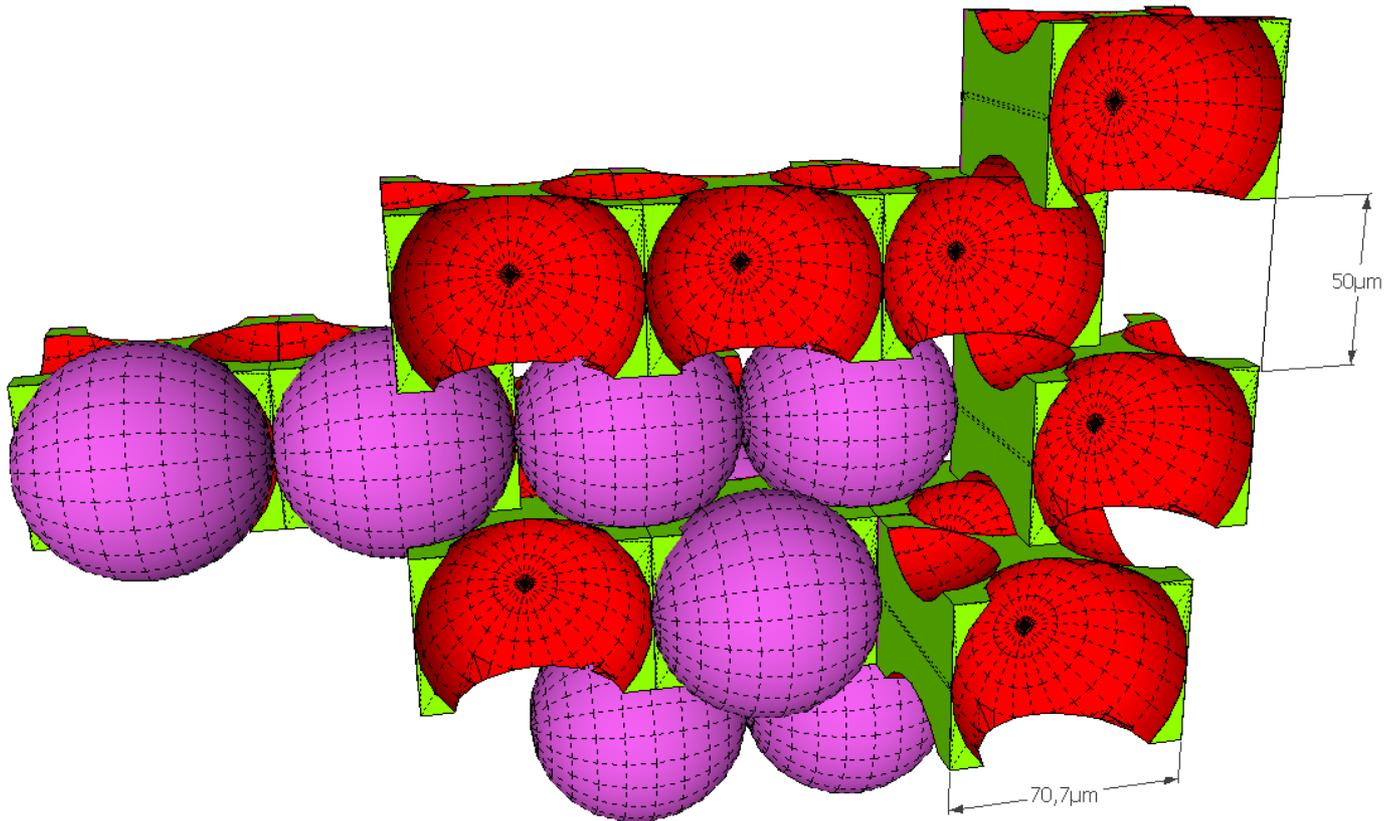
Eine Wurzel  $2 \times 50\mu\text{m}$  Schichthöhe =  $70,7\mu\text{m}$  Kugel



4 Kugeln eingebunden in das Lochvolumen



5 Kugel  $70,7\mu\text{m}$  im Lochvolumen-Layer, jeder Block ist  $50 \times 70 \times 70\mu\text{m}$



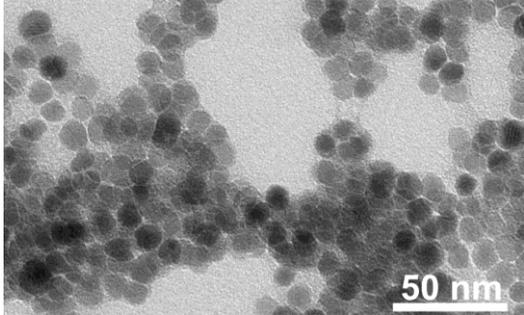
Eine rein theoretische Darstellung von teilweise eingebundenen 70,7µm Kugeln in die gestellte Lochmatrix

Jetzt wollen wir noch schnell abschätzen, ob die Datenkommunikation über Funk problemlos ist: Bei gegebenen  $20 \times 50 \mu\text{m}/\text{Punkt}$  benötigt  $1 \text{ mm}^2$  1000 binäre Informationen. Der Druckkopf erlaubt eine Druckbreite von 108mm, die Drucklänge ist auf 1000mm festgelegt. Damit ergeben sich  $108000 \text{ mm}^2$  je 1000 binäre Signale, also 108 Megabits, und zwar innerhalb einer Schichterstellung von 100ms. Die Rohdaten-Übertragung muss also bei ca 1.1Gigabaud liegen. Das schafft bereits ein handelsüblicher Internetrouter: Mit 10Gb/s LAN und 4-8Gb/s WLAN 802.11ad für <200€ kann er die gesamte Kommunikation übernehmen. Der CAD/Slicing-Rechner überträgt die Schichtdaten für maximal 16000 Layer nach dem Slicing innerhalb von weniger als 3 Minuten über ein 10Gb/s LAN-Kabel an den Rechner im Drucker. Die vorzuhaltende Datenkapazität im Drucker beträgt ca 1/4TB pro Druck.

## **Matrixerstellung für Metalle und Kunststoffe: Schmelzen oder Kleben?**

Im folgenden Abschnitt werden die Prozesse diskutiert, die die Bettpulverkugeln verbinden sollen. Dabei wird, wenn möglich, der Schmelzprozess dem Klebprozess (zB Polymersation) vorgezogen, denn Letzterer benötigt Debindern und bringt Verunreinigungen ins Produkt.

### **Metalldruck: Der Metall-Nanopartikel-Schmelz-Prozess**



Die Universität Braunschweig/IPAT zeigt hier ziemlich unimodale Metallpartikel zwischen 5-10nm.

Die Partikel werden bottom-up mittels einer nichtwässrigen Synthese hergestellt.

Nanopartikel werden so ausgewählt, dass eine Reduzierung der Schmelztemperatur von Nanopartikeln eintritt, da die Atome an der Oberfläche der Partikel eine geringere Bindungsenergie erfahren als die Volumenatome.

Je kleiner die Partikel werden, desto größer wird auch das Verhältnis von Oberfläche zu Volumen. Die Folge ist, dass sich ein größerer Teil der Gesamtzahl an Atomen an der Oberfläche befindet und dort aufgrund der Oberflächenspannung eine höhere potentielle Energie besitzt. Gemäss Dissertation der Julia Hambrock befinden sich beispielsweise in 50 nm großen Partikeln etwa 6 % der Atome an der Oberfläche, für 2-3 nm große Partikel sind es bereits 50 % und bei einem Durchmesser von 1.5 nm schließlich 75 % aller Atome. Oberflächenatome bzw. -ionen mit höherer Energie lassen sich wesentlich leichter bewegen oder gar aus dem Verbund entfernen. Die makroskopische Konsequenz dieses Sachverhalts ist ein Absinken der Schmelztemperatur mit sinkendem Partikeldurchmesser. Für 2-nm-Goldpartikel ist ein Schmelzpunkt von ca. 500 °C berechnet worden, der damit fast 600 °C unter dem für einen makrokristallinen Verbund liegt. Der Fraunhofer-Chart zeigte ja bereits Silber- und Kupfer-Nanopartikelschmelzung bei unter 200°C, nun muss geklärt werden, bei welcher Temperatur der Nano-Schmelz-Effekt für das jeweilige Metall zum Tragen kommt.

### **Metalldruck: Jetten einer wasserbasierten thermisch reaktiven Radikalstarter-Polymerdispersion**

1. das Bett wird nicht erhitzt. Das spart einigen Aufwand. Die Kugeln werden erhitzt, das kann aber der Hopper Dryer machen, der Pulvertank ist innerhalb von 1.5min ja schon wieder leer.
2. keine dem TIJ-Kopf nachlaufenden Leisten, weder UV, noch IR. Die warmen Metallkugeln verlieren innerhalb der maximal 1.5min Verweilzeit im isolierten Pulvertank und innerhalb der 40ms zwischen Legen (auf warmem Bett durch Vorschicht) und Jetten genügend wenig Energie, sodass eine Verdampfung gesichert ist. Berechnungen liegen vor.
3. Jetten einer wasserbasierten thermisch reaktiven Radikalstarter-Polymerdispersion, verkleben ähnlich wie HP das bereits macht. Nur eben ohne UV-Leiste.

Die Bindungsenthalpie wird mittels Thermolyse zugeführt. Als Radikalstarter wird bspw. DBPO gewählt und bei RT gespritzt. Die Reaktions- = Spaltungstemperatur beträgt bspw. 150°C.

**Tabelle 2.1.** Werte der Zerfallsgeschwindigkeitskonstante  $k_d$  und der Aktivierungsenergie  $E_{A,d}$  für ausgewählte thermische Initiatoren.

Initiator	Lösungsmittel	T [°C]	$k_d$ [s <sup>-1</sup> ]	$E_{A,d}$ [kJ·mol <sup>-1</sup> ]
2,2'-Azo-bis-isobutyronitril (AIBN) <sup>[22]</sup>	Benzen	40	$4.83 \cdot 10^{-7}$	123.4
		50	$2.09 \cdot 10^{-6}$	
		60	$8.45 \cdot 10^{-6}$	
Azo-bis-isobutyramidin (AIBA) <sup>[23]</sup>	Wasser (pH = 1.9)	50	$8.30 \cdot 10^{-8}$	126.5
		60	$3.42 \cdot 10^{-5}$	
Di- <i>tert</i> -butylperoxid <sup>[24]</sup>	Benzen	80	$7.81 \cdot 10^{-8}$	142.3
		130	$2.48-3.04 \cdot 10^{-5}$	
Dibenzoylperoxid (DBPO) <sup>[25]</sup>	Benzen	50.8	$4.28 \cdot 10^{-7}$	123.8
		54.9	$8.53 \cdot 10^{-7}$	
		60.9	$1.66 \cdot 10^{-6}$	
Diacetylperoxid <sup>[26,27]</sup>	Benzen	35	$9.50 \cdot 10^{-7}$	134.0
		55	$3.14 \cdot 10^{-6}$	
		65	$1.27 \cdot 10^{-5}$	
Di- <i>tert</i> -butylhyponitrit <sup>[28]</sup>	Isooctan	45	$2.72 \cdot 10^{-5}$	116.9
		55	$1.07 \cdot 10^{-4}$	
		65	$4.00 \cdot 10^{-4}$	
Natriumpersulfat <sup>[29-30]</sup>	Wasser	40	$1.65 \cdot 10^{-2}$	83.4
		50	$4.02 \cdot 10^{-2}$	
		60	$1.08 \cdot 10^{-1}$	
	0.1 M NaOH	50	$9.50 \cdot 10^{-7}$	140.2
		60	$3.16 \cdot 10^{-6}$	
		70	$2.33 \cdot 10^{-5}$	

Aus der Dissertation des Ingmar Polenz

Tiefergehende Diskussion folgt...

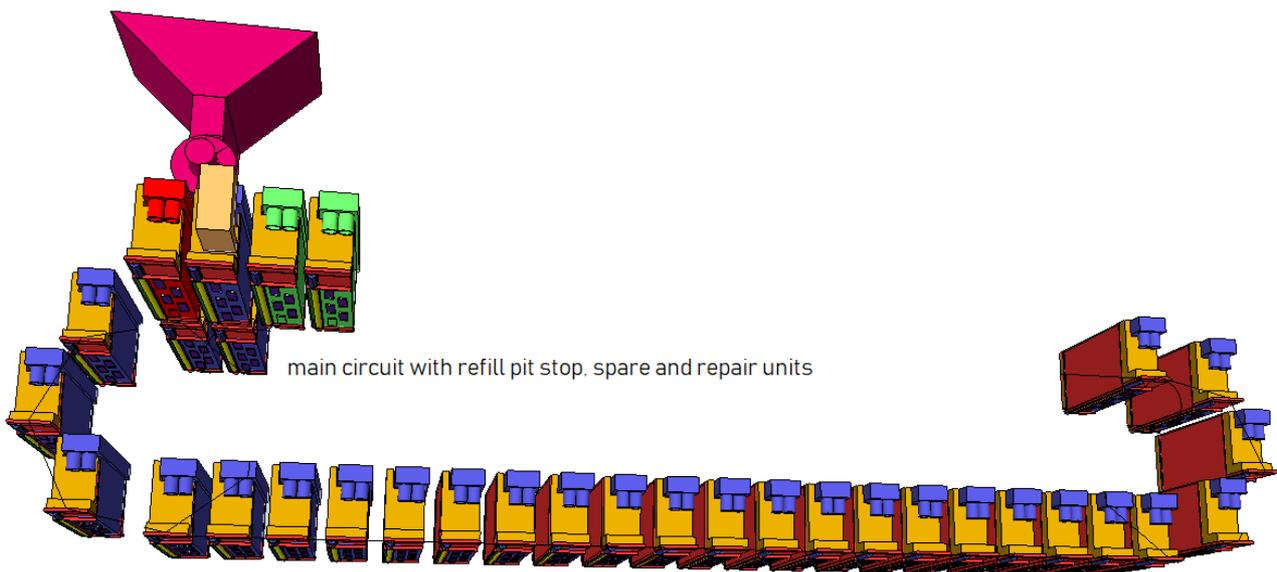
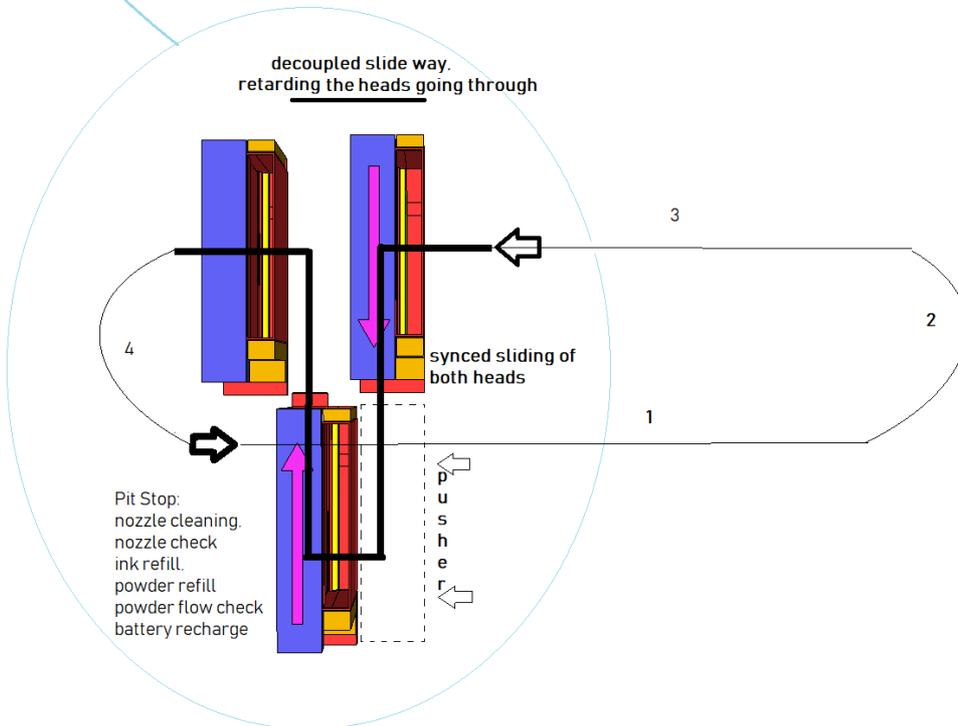
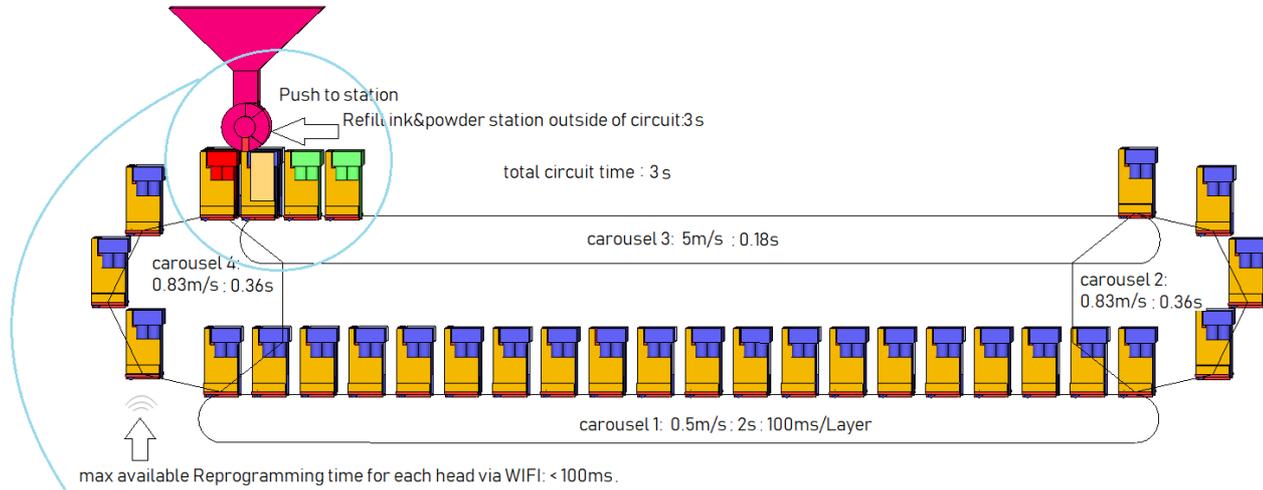
#### **Metalldruck: Jetten einer wasserbasierten Polymerdispersion**

Vorgang wie oben, allerdings Jetten einer wasserbasierten Polymerdispersion, es kommt zu keinerlei Polymerisationsanregung, sondern lediglich zum Schmelzprozess. Versuchsanlagen werden aufgebaut, Patentschriften gerade für diese Idee erstellt, eine tiefergehende Diskussion erfolgt daher erst später...

#### **Kunststoffdruck: Jetten einer wasserbasierten thermisch reaktiven Radikalstarter-Polymerdispersion**

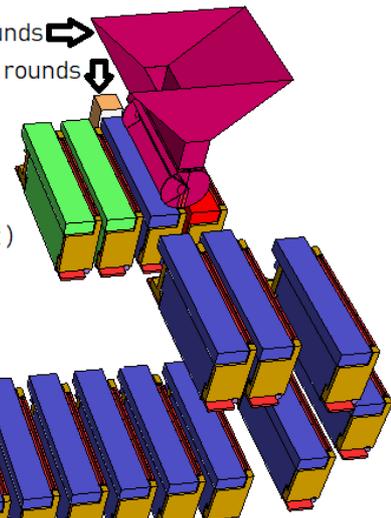
Tiefergehende Diskussion folgt...

Aus diesem Ansatz ergibt sich ein **Design**, das nun skizziert werden soll:

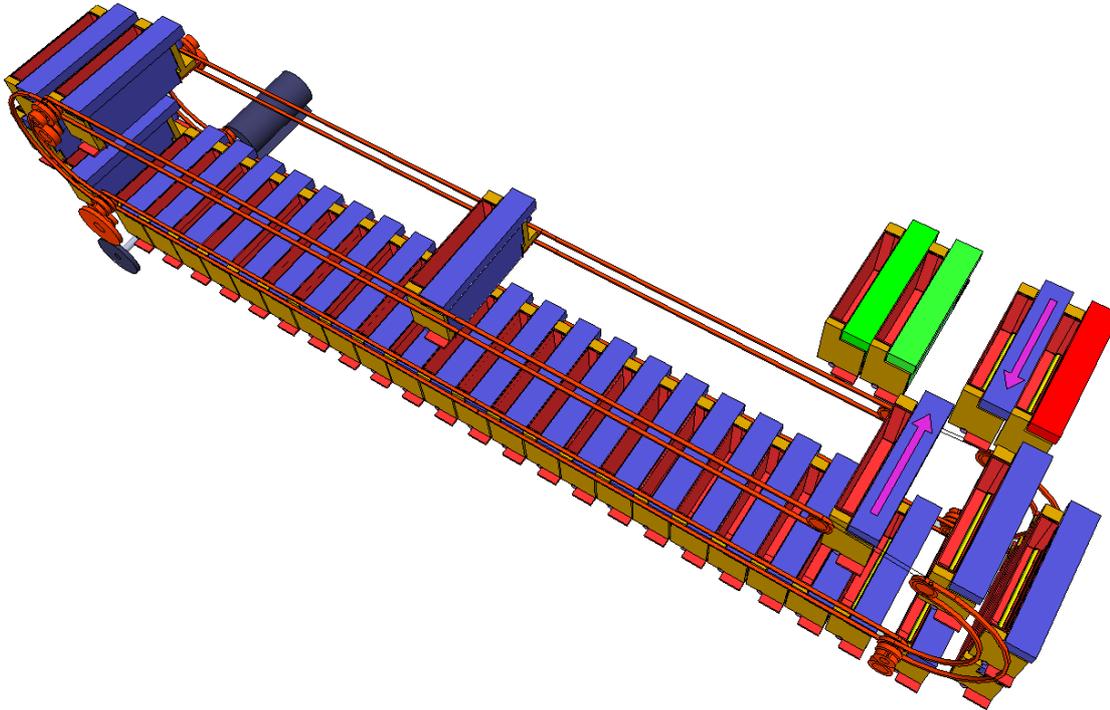
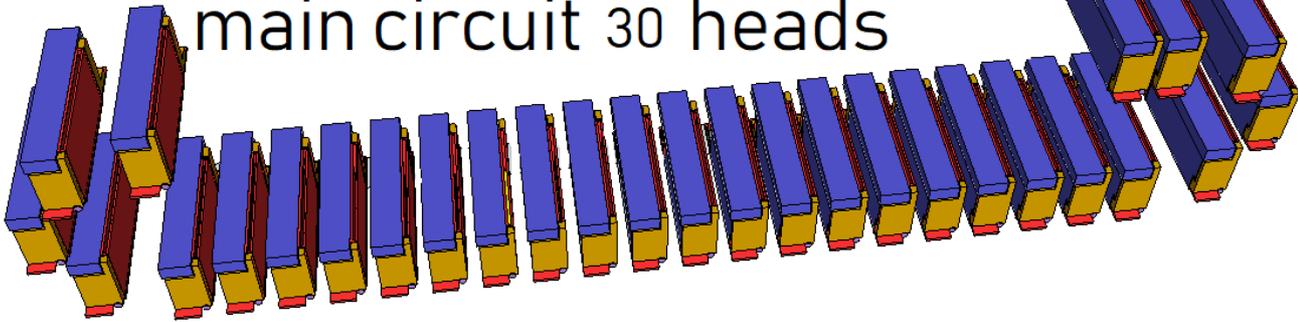


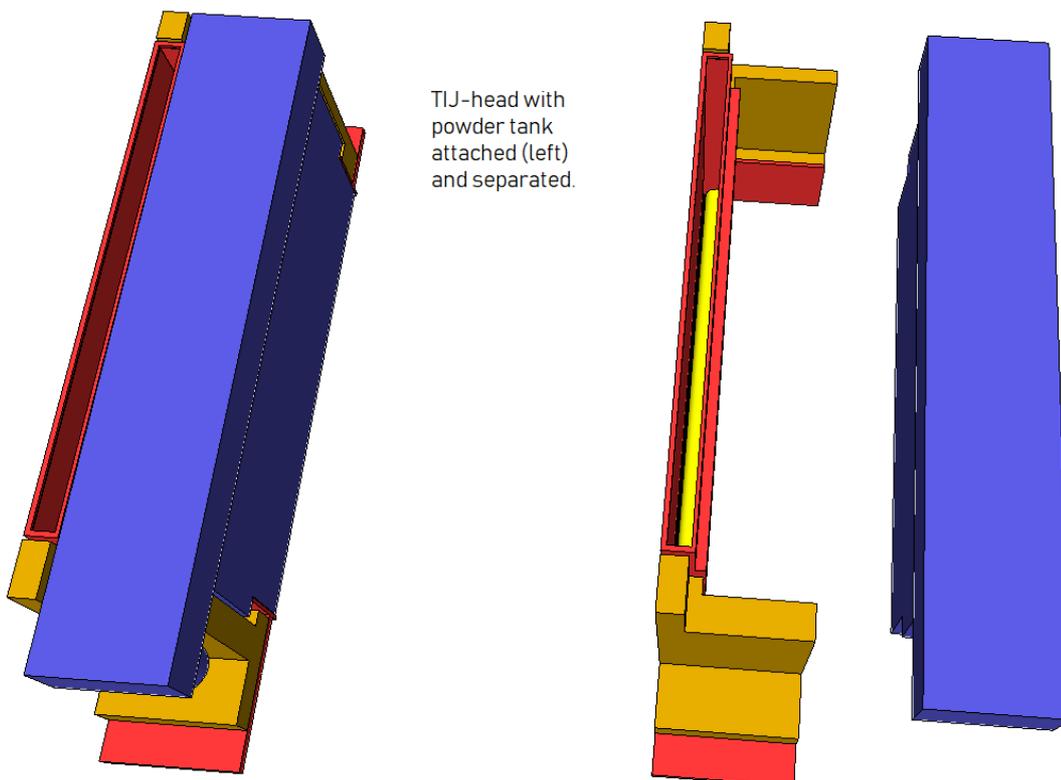
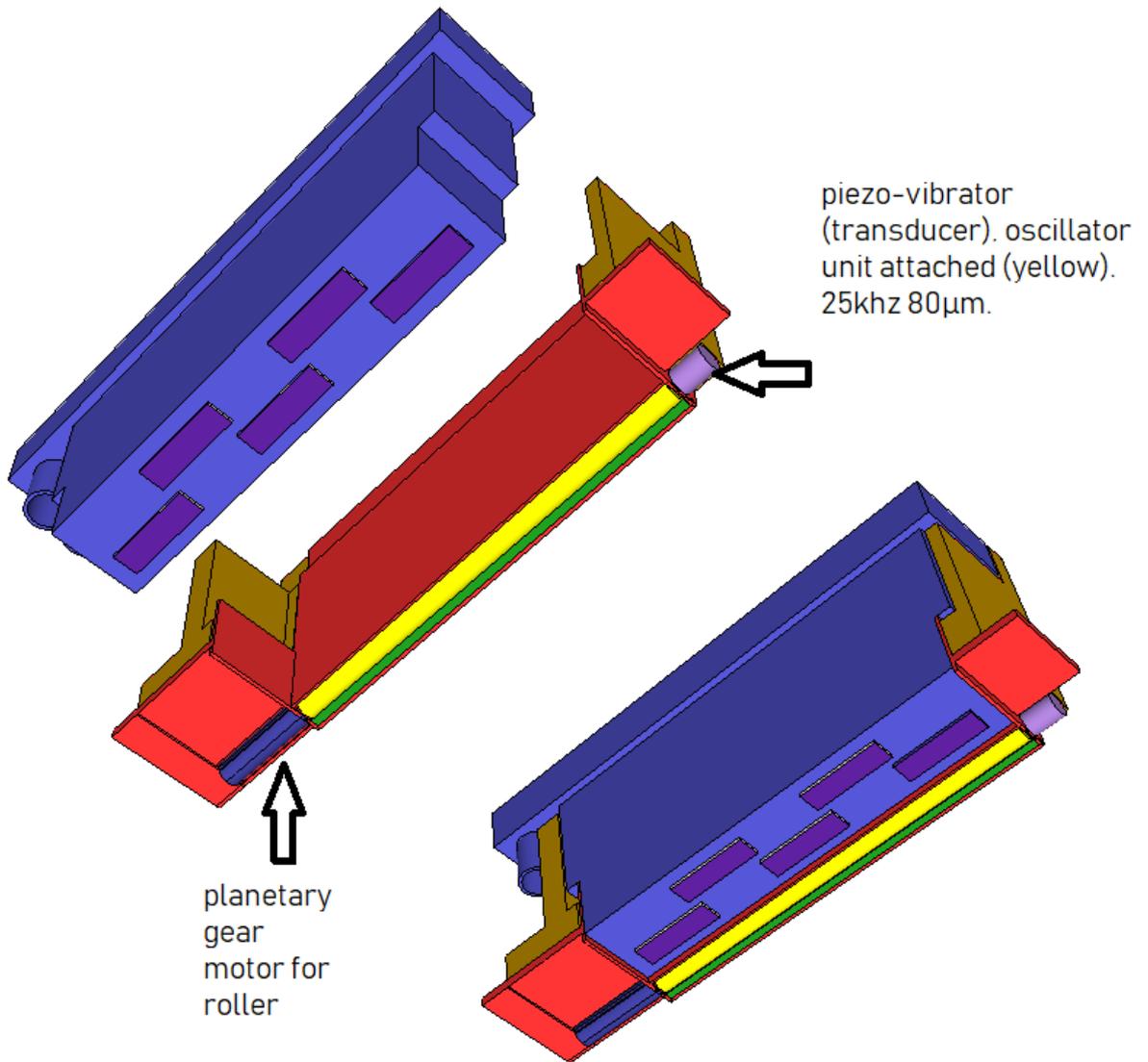
within 3 seconds: 150cm<sup>3</sup> powder refill every 30 rounds →  
within 3 seconds: 45cm<sup>3</sup> max (optimum) ink refill every 30 rounds ↓

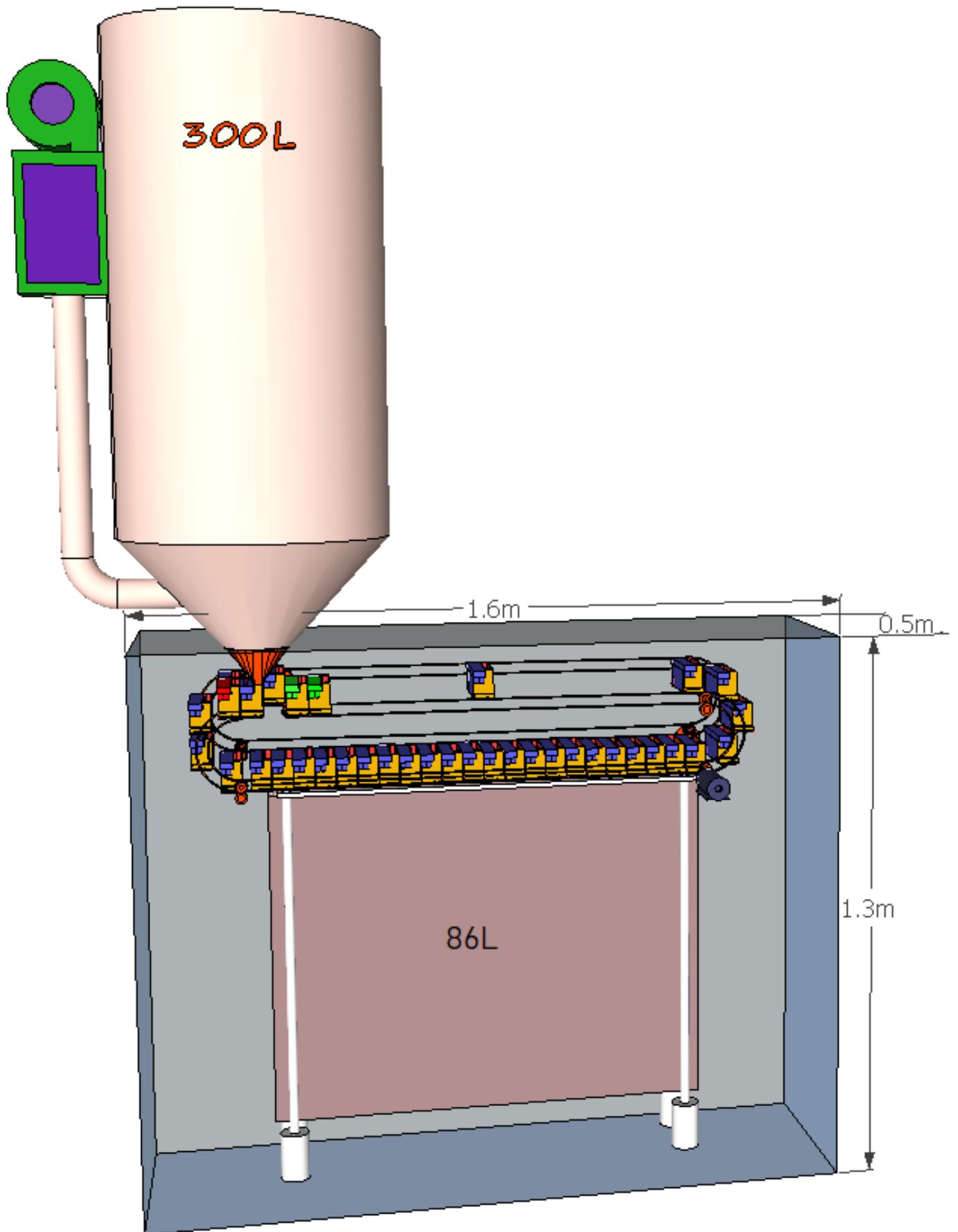
pit stop: 1 refill, 2 spare (green = 1 manual entry port).  
space for maybe 2 repair (out of order = red = 1 manual exit port)

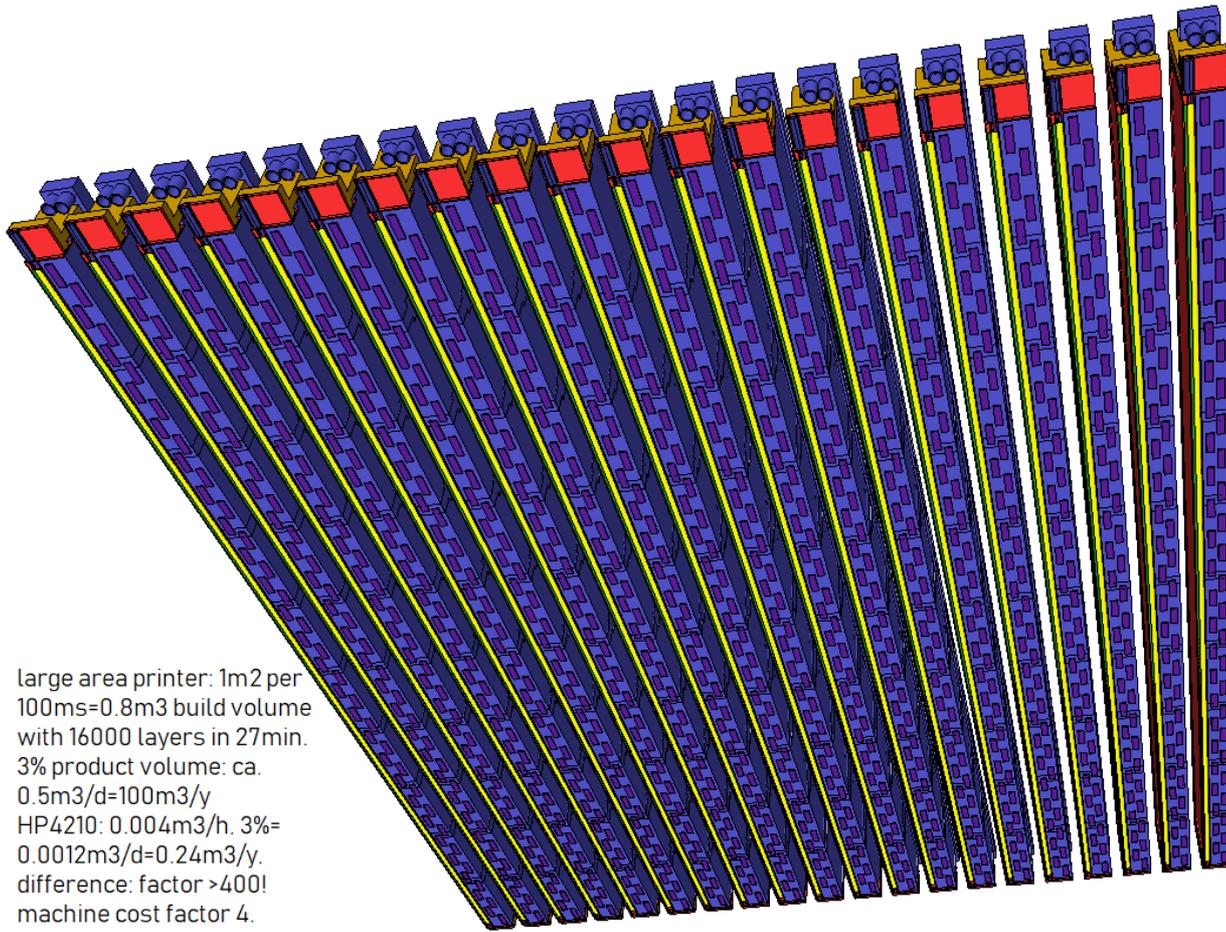


## main circuit 30 heads



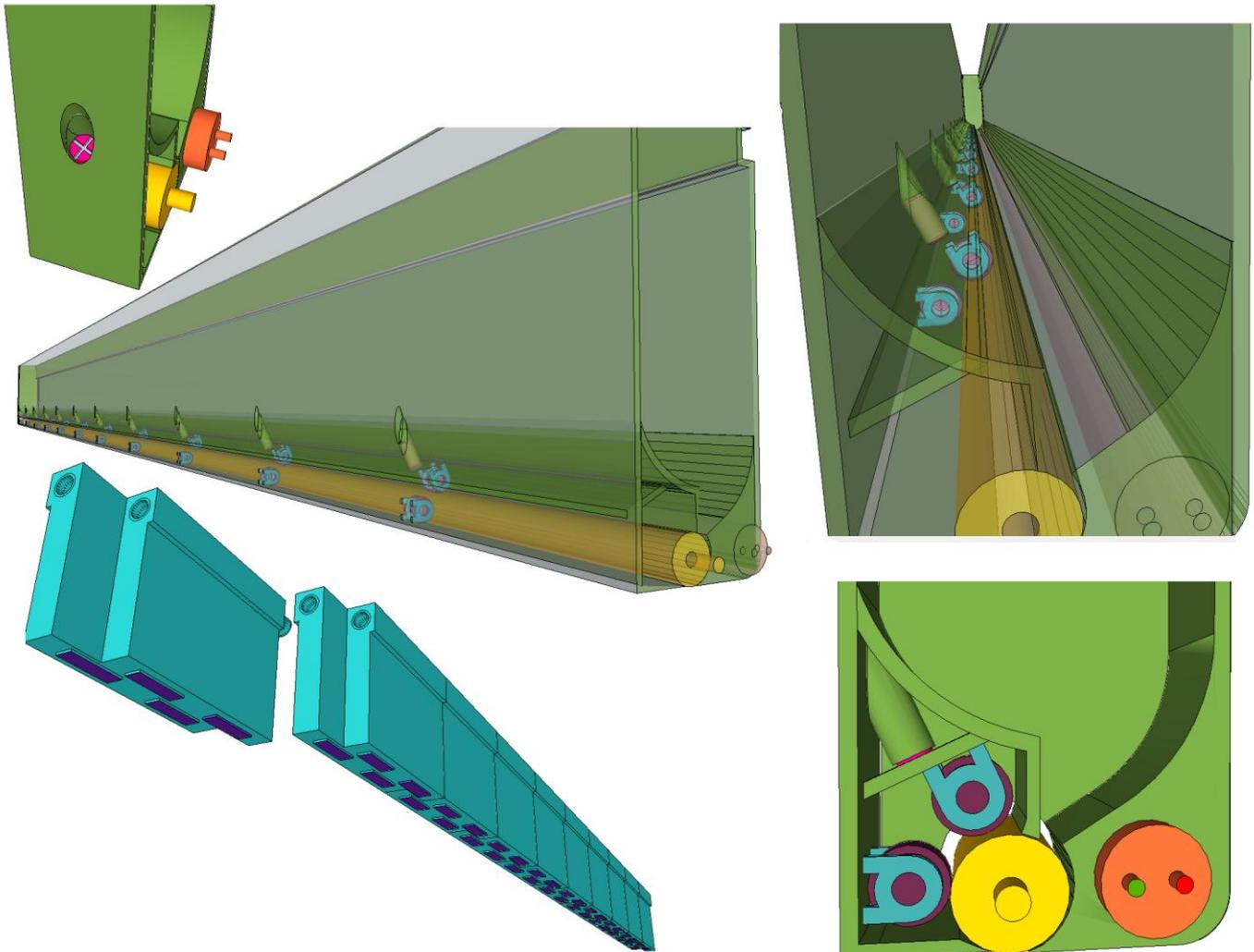


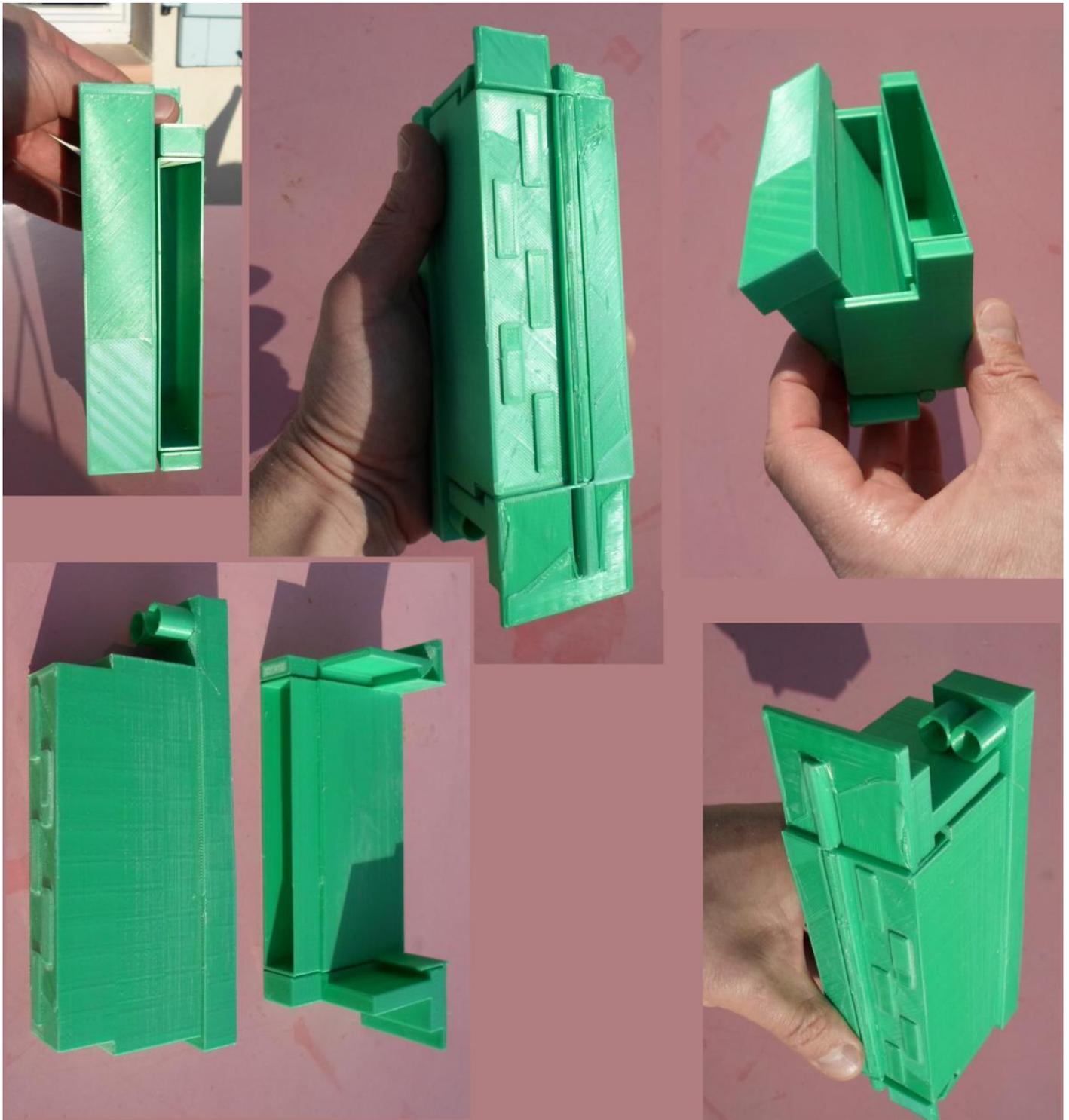




large area printer: 1m<sup>2</sup> per  
 100ms=0.8m<sup>3</sup> build volume  
 with 16000 layers in 27min.  
 3% product volume: ca.  
 0.5m<sup>3</sup>/d=100m<sup>3</sup>/y  
 HP4210: 0.004m<sup>3</sup>/h, 3%=  
 0.0012m<sup>3</sup>/d=0.24m<sup>3</sup>/y.  
 difference: factor >400!  
 machine cost factor 4.

7

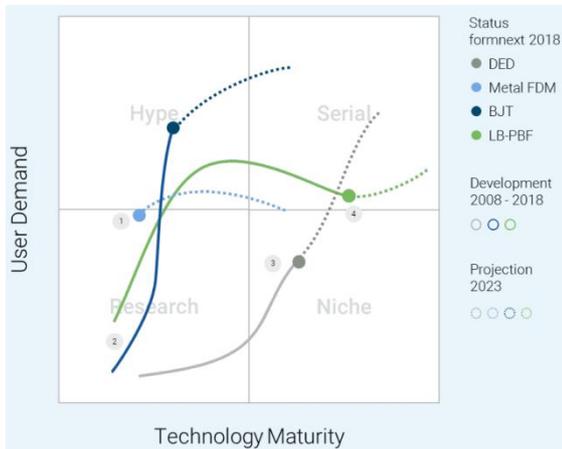




Weitere Designdetails werden folgen...

### 7. Ausblick

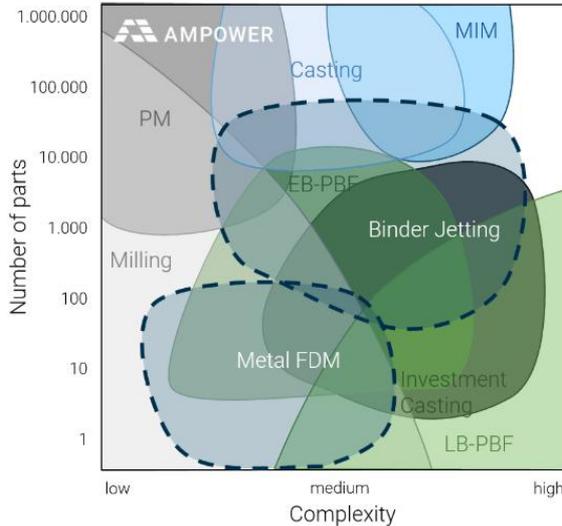
Nachdem wir nun die Stärken und Schwächen



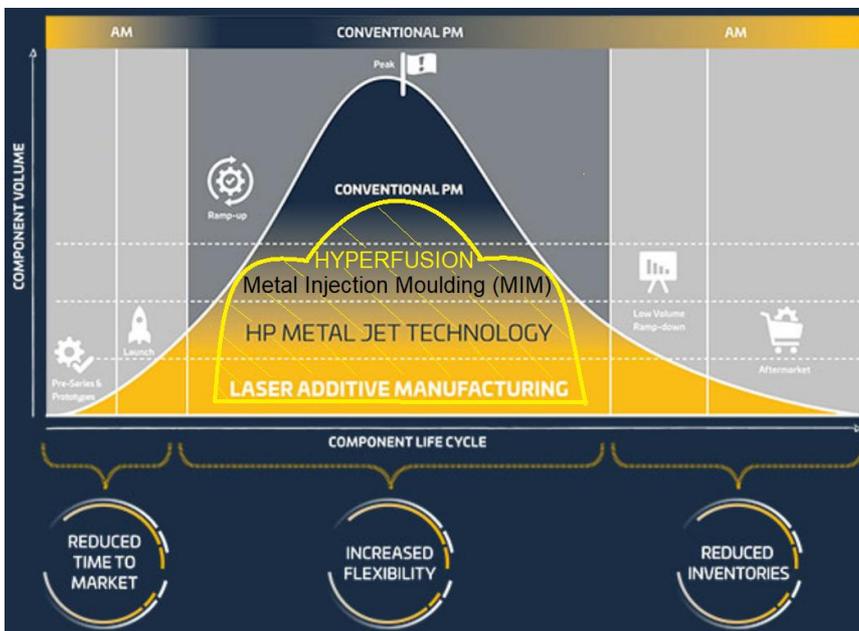
diese Systeme denn nun weiterentwickeln?

hier eine übersichtliche Graphik erstellt, deren Aussage ich durchaus teile: DED ist für den Nischenmarkt der Werkzeuginstantsetzung interessant, und die Nachfrage wird steigen, aber die Anwendungsmöglichkeiten hinsichtlich net shape und Oberflächengüte lassen das System kaum in den Produkterstellungsmarkt rutschen. FDM wird immer besser, kann aber mit gesinterten Produkten nicht mithalten, ich sehe hier kaum Chancen für die Massenproduktion. EBM/SLM ist so alt wie das Binder Jetting, erfuhr jedoch wesentlich mehr (auch wissenschaftliche) Aufmerksamkeit. Die Systemmöglichkeiten sind schon fast ausgereizt, man weiss was möglich ist, die early adopters haben alle bereits ein Gerät im Maschinenpark. Viel mehr Raum für die Massenproduktion sehe ich nicht, wenn Binder Jetting nun wiederentdeckt und entwicklungstechnisch vorangetrieben wird. HP wegen seiner Größe, insbesondere aber Desktop Metal wegen des Einstiegs von Ford, BMW und anderer -mit Investitionen jenseits der ¼ Milliarde €, vor Vorstellung des Produktionssystems- sprengen jede normale Finanzierungsdimension und hieven Binder Jetting tragischerweise in den Hype-Himmel. Sollte das Verfahren nun nicht sofort liefern was versprochen wurde, ist deren Fall tief, der 3D-Druck-Markt kennt bereits die Berg- und Talfahrt am Aktienmarkt wie eingangs gezeigt, und diese Sonderentwicklungen sind nicht wünschenswert.

Aufgrund des theoretisch viel höheren Outputs des Hyperfusion Verfahrens relativ zu bestehenden Maschinen sehe ich das Binder Jetting jedoch entgegen der Grafik dem MIM ebenbürtig und aufgrund der niedrigeren Stückkosten bei kleinen Auflagen dem Mim vertikal überlegen.



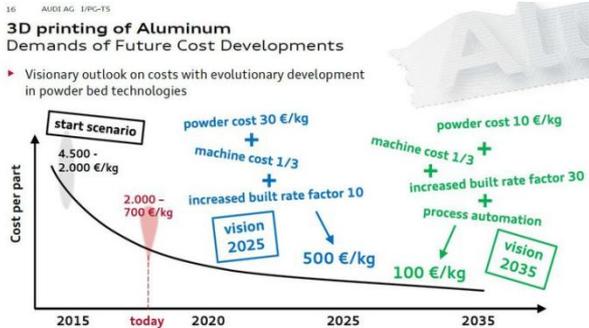
der verschiedenen relevanten industrietauglichen 3D-Drucksysteme analysiert haben, kommt natürlich die Frage auf: Wie werden sich AMPower hat



Wagen wir nun noch den Versuch, die Hyperfusion produktivitätsmässig zwischen den anderen herkömmlichen/zu erwartenden Verfahren einzuordnen: Da das Gerät mit SLM, EBM, HP Bindern sowie MIM-Maschinen preislich vergleichbar ist, kann es bereits für den Prototypen- und Vorserien-Bereich eingesetzt werden.

Kleinere Batches sind ebenso machbar wie mittelgrosse Serien, immer abhängig von der Produktgrösse. Bei optimierter Packung soll das geplante Gerät bspw 1000 mal 200cm<sup>3</sup>-Teile je 200L Bauvolumen innerhalb von weniger als einer halben Stunde schaffen, im Dreischichtbetrieb wären somit maximal 2 x 1000 x 24 x 365=17.5 mio Teile pro Jahr druckbar; 200cm<sup>3</sup> entspricht der Grösse eines Tablets, eines Brillengestells, einer Türklinke, etc.

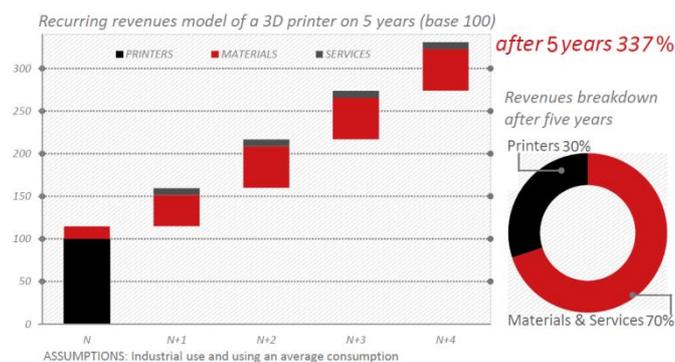
Eine einzige Maschine könnte also gegebenenfalls bereits die gesamte Palette bis zum Produktionspeak und zurück zur nachlassenden Nachfrage und Ersatzteilproduktion abbilden. Daher kann Hyperfusion meines Erachtens über das MIM-Verfahren gestellt werden.



Die Zeit für Massenproduktion ist nun gekommen, Analysten (immer abhängig davon, wen man fragt) schätzen das Wachstum für die Produktherstellung mittels additiver Verfahren auf 18%/Jahr bis 2025, jedenfalls wird es ein Milliardenmarkt. Eine wesentliche Rolle spielt hier sicherlich die Entwicklung des Pulvers. Sollten wir hier auf 2-10-fach über kommerziellem Stahlhandelspreis ankommen, wäre der Durchmarsch des 3D

Drucks in der Massenproduktion nicht mehr aufzuhalten. Der Chart zeigt ein solches Szenario auf.

Gedanken zur Verkaufsstrategie: HP verfolgt beim Metal Jet die gleiche Verkaufsstrategie wie beim Jet Fusion: Vorankündigen, den Markt verunsichern und schöne Produktbilder zeigen, Kaufbestrebung und –interesse für die Maschinen des Mitbewerberfeldes reduzieren, indem man jetzt schon mal den Mund vollnimmt, die eigene Maschine aber erst Jahre später anbieten kann. Den breiten Verkaufsstart für den Metal Jet gibt HP auf seiner Webseite mit 2021 an. Der hierfür verantwortliche Strategie erklärt diese Taktik für HP als erfolgreich, weil das Unternehmen ja keinen Umsatz einbüßt, da es über keinerlei Vorgänger verfügt. So lernt dann jeder Neuankömmling in diesem Segment wie es geht... Verschenke die Lampe um das Öl zu verkaufen: Auch was die „Anti Razor-Blade“-Strategie namens „Open Platform“ angeht, bin ich skeptisch, dass HP die komplizierte Lampe aufwendigst herstellt, sich den Ölverkauf –also das bisher eigentliche und sehr einträgliche Geschäft mit den Verbrauchsgütern- mit anderen Anbietern aber teilen will. Wo kein Know How besteht, macht es sicherlich Sinn, erst einmal von den Profis zu lernen, so fügte man für Jet Fusion Evonik, BASF und weitere Lieferanten hinzu, und diese sprechen nun ihre Kunden an um ihr Pulver (PA12 in diesem Falle) durch die Anschaffung eines HP Druckers verbrauchen zu lassen. Da man vorher kein Produkt hatte, hat man auch keinen Kundenstamm, der wird nun mit den Kunden der Lieferanten aufgebaut. Doch wenn der Markt sich genügend durchgesetzt hat, wird die Razor-Blade-Variante natürlich wieder



einträglicher. Bereits jetzt wird deutlichst aufgezeigt, dass man für Fremdmaterialeinsatz keinerlei Haftung übernehmen könne und dieses im Übrigen viel schlechter ist, da nur das tolle eigene PA12 über die 80% Wiedergebrauchsrate verfügt, man also dem nächsten Druck nur 20% Frischpulver zugeben muss, bei Evonik's seien das 50%, die anderen Anbieter werden nur gerade

noch erwähnt, doch wer will 150000€ ausgeben und dann „unsicher“ drucken? Eine ähnliche Strategie stelle ich mir bei den Metallpulvern vor, denn alle verfügbaren Geschäftsberichte aller Druckerhersteller zeigen klar auf, dass sie auf diesen margenträchtigen Verbrauchsgüterumsatz (bspw 3D Systems Q2/2016: Produktmarge <33%, Verbrauchsgütermarge >75%, mit einem Bruttogewinn von 17 zu 31 mio\$ ist der Verbrauchsgüterumsatz auch noch viel höher) angewiesen sind! Der Beispielchart einer anderen Gesellschaft bestätigt die Kausalität.

Generell wird sicher schnell klar, dass die alten schwerfälligen gesetzten westlichen Demokratien, die schon viel zu viel Produktion ausgelagert haben, sehr daran interessiert sein werden (und müssen), dass diese Schlüsseltechnologie für Individualproduktion in ihren Ländern genutzt wird, die Forschung und Maschinen-Anschaffungs-Finanzierung somit unterstützt wird, hierdurch intelligente Arbeitsplätze entstehen werden und die Produktion zurückgeholt wird. Also alles auf grün!

Weitere spannende Themen wie **3D Drucktechnologien für 24/7 Harzdrucker auf multiplen Tischen, von innen per Roboter arbeitende Kunststoff spritzende Hausdrucker, grosse Tageslicht Harz-Drucker mit 8K-Monitor, Gel-Drucker mit flexibler Düse für Grossobjekte (zB 1- 100m<sup>3</sup>), usw** erkläre ich im Business-Plan, bitte einfach anfragen

Abschliessen möchte ich mit einer kleinen Geschichte, die ich unlängst mal wieder für ein US-Magazin schrieb:

**Refusers welcome! Why (company) success depends on outsiders, fresh flesh redds cash -and nerds top herds.**

As I drove onto the parking lot I could already see the sheer dimension of this chemical producer. The barriers and welcome center only confirmed the impression: Now we are talking giants. I even hesitated to comment on the boring façade -and the orange tiles in the restroom proving the building must be of my age already- when the director led me to a glazed playground with foam benches, claiming the company has realized that a new era had arrived, and they were in midst of ramping up a special place, special team, special customer experience, special...I could see the engagement, motivation and devotion in this man, around 60, white beard, tie under a dark blue v-necked pullover. He gained all my attention when I heard this surprising phrase: "Markus, I know that I cannot build up a leading team in this new, chaotic 3D printing environment, not with my staff holding highest academic credentials". For a second I thought this team builder, founding entities within evolving technologies, had understood what it takes to reinvent and bring new energy to old power. Fresh flesh redds cash!

A short moment later I was disenchanted with the news that the position of strategy manager would be given to a guy who could prepare papers in a presentable way to the CTO. What? Bold bones cold coins?

A few months later I gave a workshop to another big player trying to find chemistry for this post-hype 3D-printing sector, examining our many patents. Their team was led by a French marketing guy who ought to build the best team -showing no knowledge of mechanics, physics, chemistry...would he ever like the phrase: Been there, did it? When discussing bringing in hindsight from our team specialized in this field my interlocutor laughed out loud: "Could you imagine our human resource team talking to non PHDs? Haha"! Where on earth does this arrogance come from?

Only PHD 's got the pansophy?

Last week I visited yet another giant chemist showing the slogan: Power to do the new. I started dithering: They all want the same, and they all do the same: they try to reinvent from the inside! Power to do the new, but shouldn't the NEW bring the power? Isn't a company where it is because its people are who they are? Now how can it evolve?

When a thousand horse powers weren't enough, Bugatti added another 500, changed the beast's name from Veyron to Chiron, and the price tag from one million to two. Yes, two! What do you expect from that team to come next?

Won't they probably stick to their track?

Comes Elon Musk, accelerates his electric roadster faster than Bugatti will ever be able to burn fuel for -and does it for a tenth of the price.

Business as usual: THE REFUSERS RULE! They don't need Harvard. Huge success derives from good ideas, and nerds top herds.

Take Google, Apple, Microsoft, Facebook, Tesla... there is a world of people without PHDs, some didn't even bother studying. What they have in common is that they were what I call refusers. They did the really big things without the intention. Many inventions, even honored with Nobel prizes, were "accidents". Refusers ignore the "no trespass" sign, they enter the no-go zones. Nothing ventured, nothing gained. We only hear from the winners of that strategy, yet millions lose. Now we are looking for the next Musk, or at least for the original's next thing. He forces the whole auto-world to fire the old ignition magician and hire the new accumulator demonstrator. When the paradigm shifter was asked what has been his best idea so far, he said: "Moving to the USA". Because if you need to fail in order to learn (80% do so), the best place could be progressive California. Go insolvent in conservative Europe and you are done in most cases.

This is where my experience meets my expectation: Times move fast, old companies need to turn faster than their staff is willing or capable (the same applies to nearly every civil society). Success will be determined by CEOs who prepare for the unexpected (even Jeff Bezos knows he will fail) and yet invites, welcomes and protects the "accident", integrates the hesitating refuser, copes with internal quarrels -and presents the unforeseen.

We need to broadcast these success stories of the few mighty seekers who risked a bit more than the standard golfers, and should neither flinch from collar's nor skin's color, sex, distance, certificates or whatever could hold us back from examining an idea, it might be the best one the herd will never see.

Geniusthings is a technical think-tank that has filed many patents and is currently looking for partners to realize promising 3D-printing technology-prototypes.

About the author:

Markus Ulrich is the founder and CEO of geniusthings. His think-tank offers unconventional solutions for tough nuts to crack. Markus studied mechanical engineering, founded and led an IT-database company for 13 years and built machines for all his life.

