



## Hochrate-Mikro-SLM

- **Einführung:** die aktuelle Marktentwicklung und dessen Differenzierung
- **Background:** Ausgangspunkt der Mikrosintertechnologie: „Lasermikrosintern“
- **Entwicklung:** zwei neue Technologien notwendig für das Hochrate-„Mikro“-SLM
- **Hintergrund:** Prozessanalyse der Energiedissipation im Mikropulver
- **Resultate:** Ergebnisse der Hochrate-Sintertechnologie
- **Zusammenfassung und Ausblick:** Wie geht's weiter?

# Einführung: Entwicklung des 3D Metall Drucks

Bislang:

deutsche Hersteller über 70% Marktanteil

Die meisten SLM-Anlagen 2016:

Faserlasern mit max. Leistung von 400-500 W

Bauraum: 250 x 250 x 300 mm<sup>3</sup>

Bauraten: 5-20 cm<sup>3</sup>/h (40-160 g/h)

Preis: 450-600 T€

Makro

Bauraum ↑  
Laseranzahl ↑  
Laserleistung (↑)  
Auflösung (↓)

Concept Laser (GE)  
SLM-Solutions  
Trumpf  
EOS

Mikro

Bauraum ↓  
Laseranzahl ↓  
Laserleistung ↓  
Auflösung ↑

EOS GmbH  
3D - Microprint (3DMM  
& EOS)  
Realizer & DMG Mori

Konventionell &  
kostenoptimiert  
(Fernost?)

## Trends / Differenzierung:

- größere Anlagen mit mehreren Laserquellen
- Kleine Anlagen mit kleineren Bauräumen, weniger Leistung, höherer Auflösung
- Automatisierung / Messprinzipien: digitale Produktion

1981 EOS

1996 SLM-Solutions

2000 Concept Laser

2002 Realizer GmbH

2012 Viele neue Mitbewerber  
DE, IT, BE, FR, KR, CH, US

2016



# Einführung: Entwicklung des 3D Metall Drucks

deutsche Hersteller über 70% Marktanteil

Die meisten SLM-Anlagen 2016:

Faserlasern mit max. Leistung von 400-500 W

Bauraum: 250 x 250 x 300 mm<sup>3</sup>

Bauraten: 5-20 cm<sup>3</sup>/h (40-160 g/h)

Preis: 450-600 T€

Bislang:

Makro

Bauraum ↑  
Laseranzahl ↑  
Laserleistung (↑)  
Auflösung (↓)

Concept Laser (GE)  
SLM-Solutions  
Trumpf  
EOS

Konventionell &  
kostenoptimiert  
(Fernost?)

Mikro

Bauraum ↓  
Laseranzahl ↓  
Laserleistung ↓  
Auflösung ↑



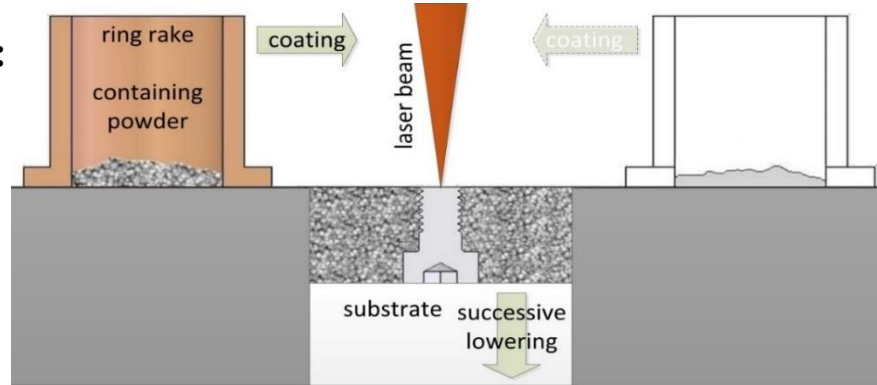
Hochrate-Mikro-SLM

## Trends / Differenzierung:

- größere Anlagen mit mehreren Laserquellen
- Kleine Anlagen mit kleineren Bauräumen, weniger Leistung, höherer Auflösung
- Automatisierung / Messprinzipien: digitale Produktion

# Ausgangspunkt: Lasermikrosintern

## Prinzip:

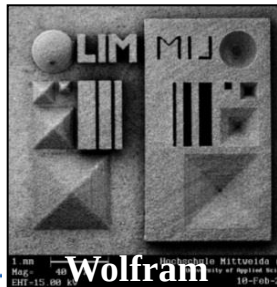


## Beispiel: Keramik ( $\text{SiO} + \text{O}_2$ )

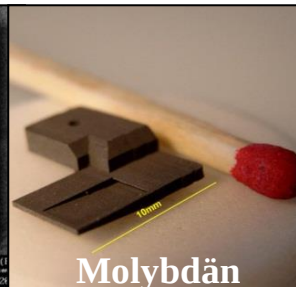


- Metalle: Stähle, Refraktär- und Edelmetalle + Keramik:
- Verwendung kleinster Pulverkorngrößen:  $0,1 - 5 \mu\text{m}$
- Pulvertransport mit Ring-, Hohlrakel
- stark fokussierte Laserstrahlung ( $d_{86} < 25 \mu\text{m}$  ~ laterale Auflösung)
- Intensive Laserpulse ( $\tau_H \sim 100 \text{ ns}$ ,  $P_{av} < 50 \text{ W}$ ,  $I_{av} > 10^7 - 10^9 \text{ Wcm}^{-2}$ )
- resultierenden Sinterschichtstärken:  $1 - 3 \mu\text{m}$  ~ vertikale Auflösung

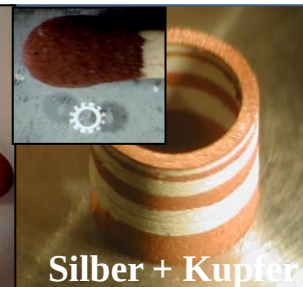
## Ergebnisse und Anwendungsbeispiele:



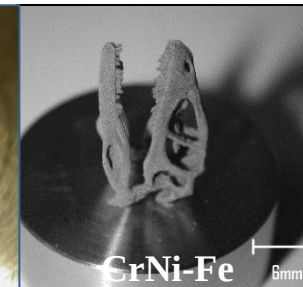
Wolfram



Molybdän



Silber + Kupfer



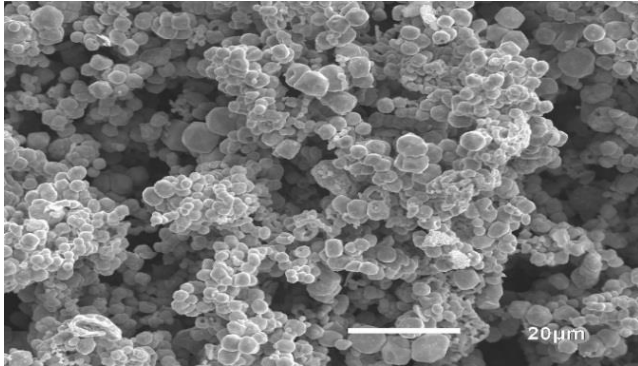
CrNi-Fe



Edelstahl

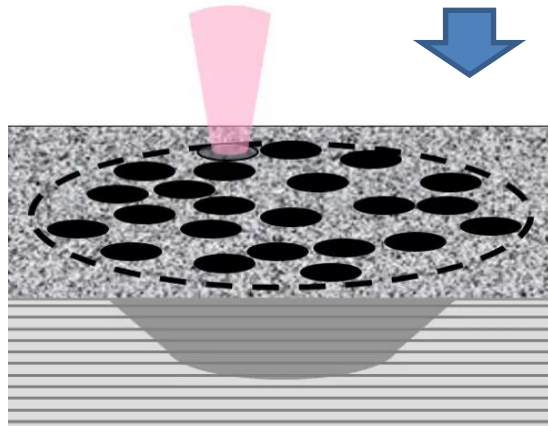
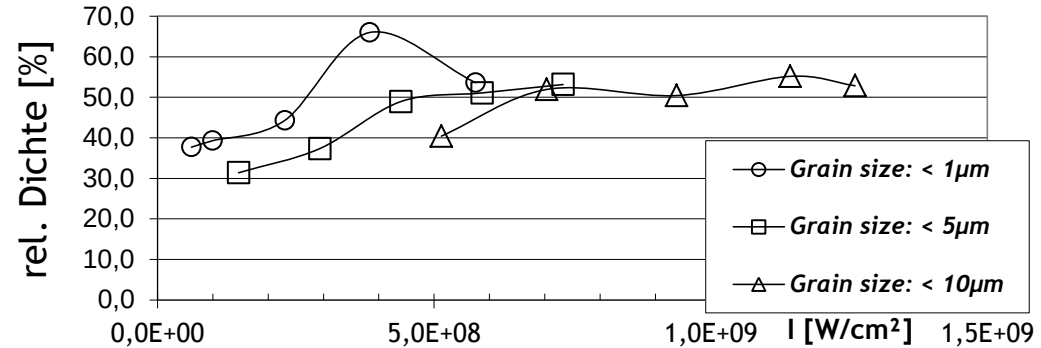


## Problem: begrenzte Aufzugsdichte der Mikropulver < 10 $\mu\text{m}$



Gerakeltes Pulverbett: Rakeldichte 19%

Resultat: hohe Präzision aber begrenzte Bauteildichte

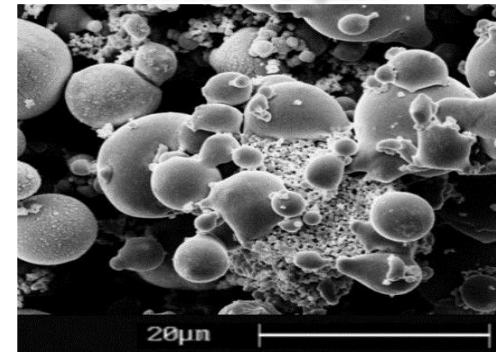


## Spezielles Bestrahlungsregime notwendig

quasi-stochastisch verteilte und hochintensive Laserpulse

1. Vertikale Vernetzung durch Plasmadruck und Rückstoß
2. laterale Vernetzung durch partielle Überlappung

geringe Intensität oder zu kurze Wechselwirkungszeit

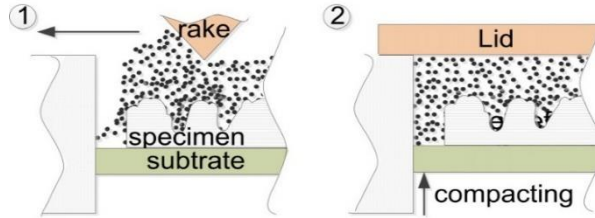


- Keine Vernetzungsbildung
- Kein Sintern!

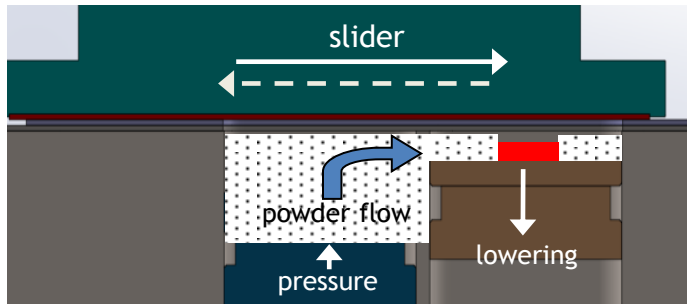
# erste Entwicklung: verdichtende Rakelmaschine

## Idee:

1. Pulveraufzug
2. Verdichten

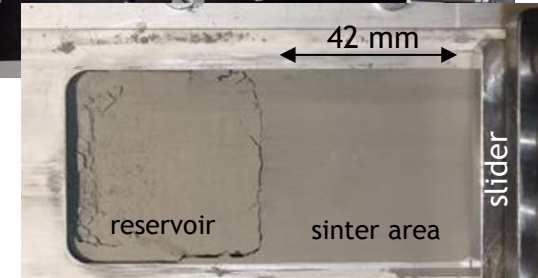
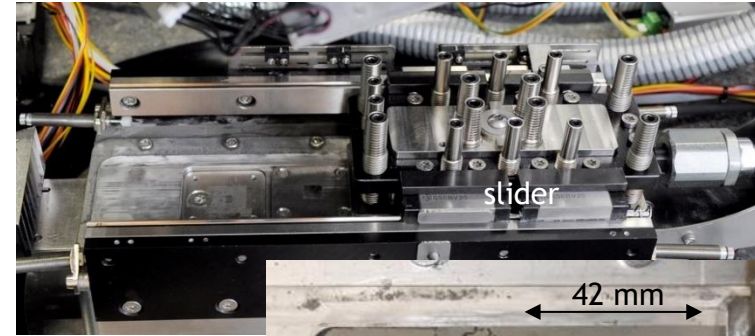


## Technologische Umsetzung:



- Pulver wird unter hohem Druck aufgebracht  
→ Pulver wird ab einem bestimmten Druck fließfähig!
- Kraftwirkung mittels Pneumatik einstellbar
- Druck bis 1 MPa erzeugbar (Pulververdichtung bis 50%)

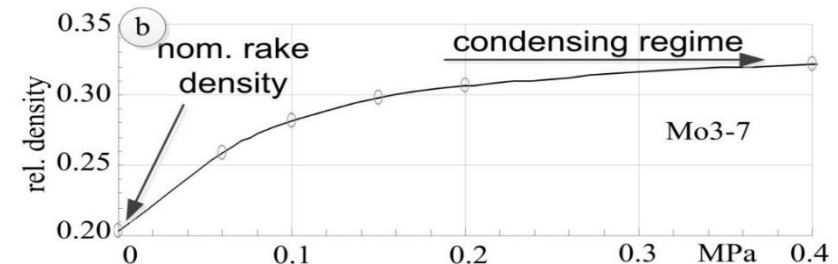
## pulververdichtende Rakelmaschine V1:



Blick in die Maschine (Druck abgelassen)

## Resultat:

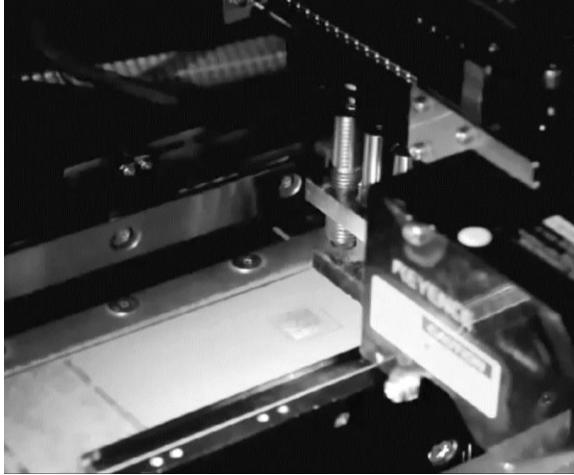
Verdichtung Molybdänpulver (3-7µm)



Patent: DE 10 2011 014 610

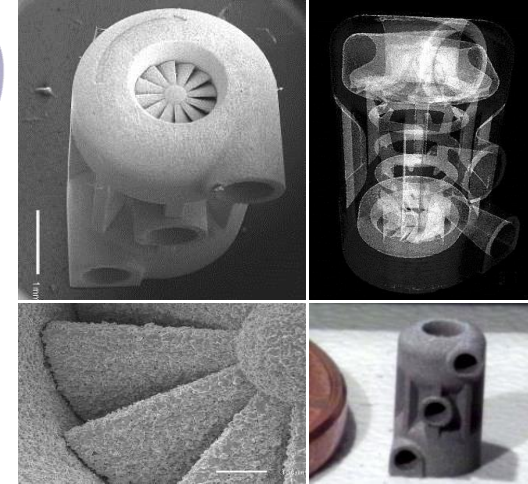
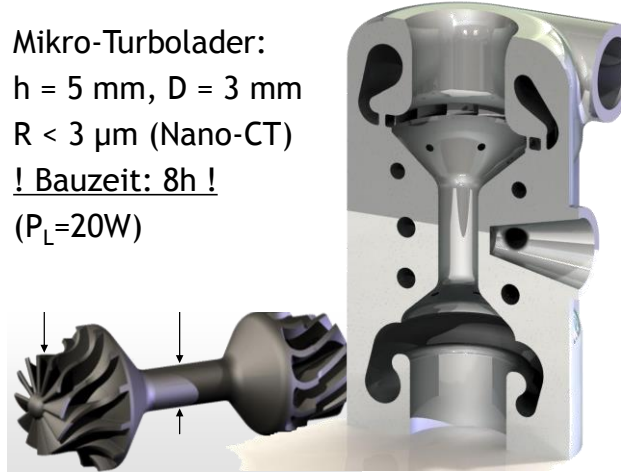
# Resultat: Verdichtung und konventionelle Scantechnik

## Sinterprozess:



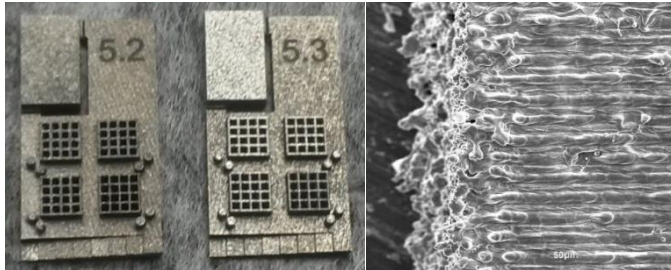
## Konventionelles Mikrosintern: PW (hohe Auflösung und Dichte > 0,98)

Mikro-Turbolader:  
 $h = 5 \text{ mm}$ ,  $D = 3 \text{ mm}$   
 $R < 3 \mu\text{m}$  (Nano-CT)  
! Bauzeit: 8h !  
( $P_L = 20\text{W}$ )



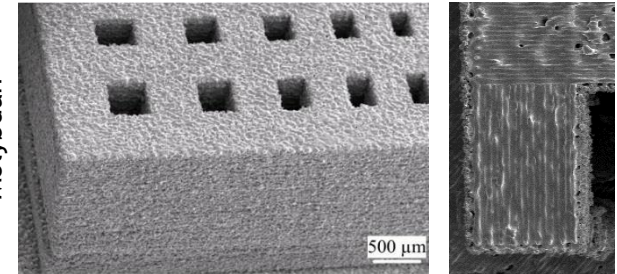
## Mikro-SLM mit cw - Laser + neuartiger Rakelmaschine: sehr hohe Sinter-, Baugeschwindigkeit

Wolfram



Laserleistung: 100 W  
Pulver:  $3 \mu\text{m}$   
Fokus:  $30 \mu\text{m}$   
Schichtdicke:  $10 \mu\text{m}$   
  
Sinterdichten > 98 %

Molybdän

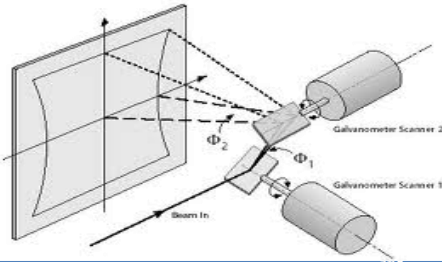




Relativgeschwindigkeit des Laserstrahls = Umsetzbare Laserleistung

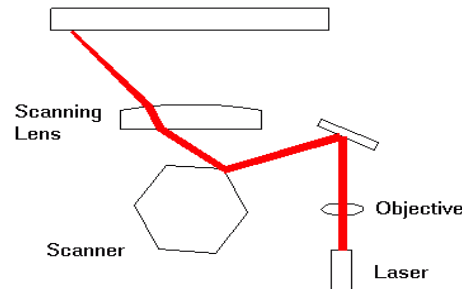
## Galvanometerscanner

- bis 15 m/s (für Mikro!)
- geringe Massenträgheit
- hohe Geschwindigkeiten durch lange Brennweiten
- große Aperturen für kleine Fokusdurchmesser!



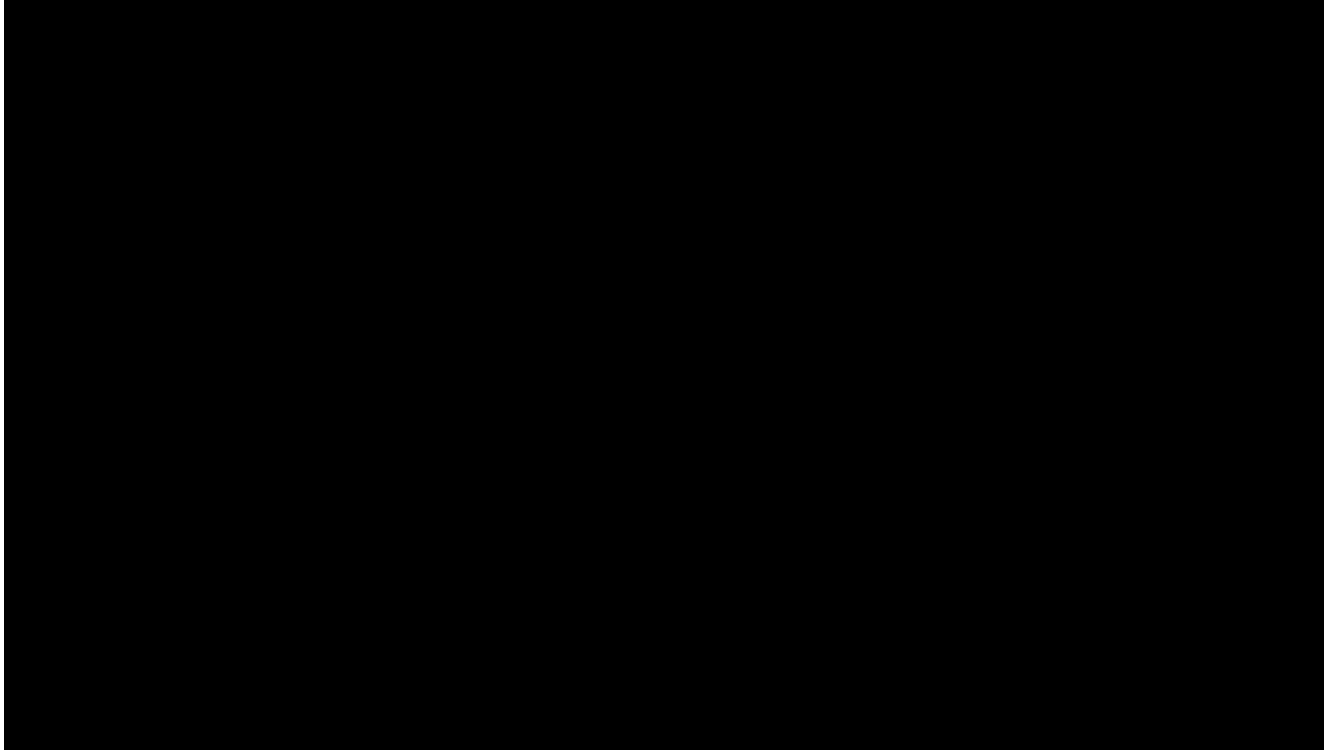
## Polygonscanner

- bis zu mehreren km/s (?)
- nur Linien im Rastermodus
- komplexe Ansteuerung und Scanfeldkorrektur
- geringe(re) Dynamik



- **Aktuell:** Polygonscanner erzielen die notwendigen Geschwindigkeiten, um höchste Laserleistungen für Hochratelaserprozesse nutzbar zu machen.
  - **Problem:** kein 2D-Polygonscanner für hohe bis sehr hohe Laserleistungen am Markt
- ↓
- **Eigenentwicklung** durch Kombination eines Galvo-, und Linienscanners notwendig

## Modell / Optisches Funktionsprinzip des 2D-Polygonscanners Mittweida



### Vorteile:

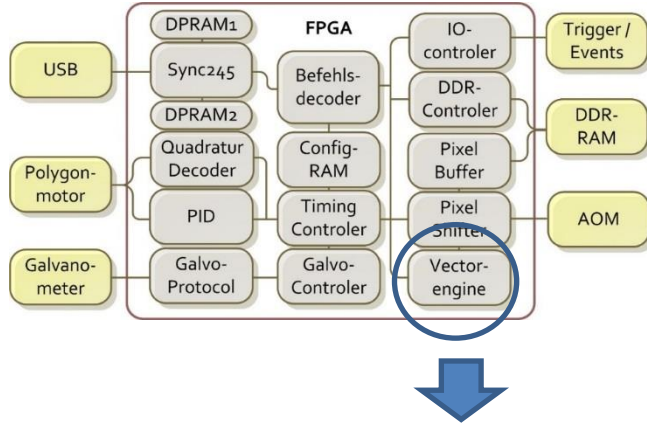
- Keine Verzerrung der Scanlinien durch das Polygonprinzip, bei beliebiger Auslenkung des Galvos.
- Abstandsvariation (Geschwindigkeitsvariation) nur durch Planfeld (Tangens - Symmetrisch)
- bessere Flächenrate durch großes Scanfeld (Nutzungsgrad gegenwärtig max. 66% )

### Nachteil:

- komplexer, schwierig zu fertigender Polygonspiegel

# Spezielle Features des 2D - Polygonscanners

## Scannerlogik (1 FPGA + 2 Prozessoren):



## Eigenschaften der elektronischen Ansteuerung:

**Zykluszeit:**

5 ns, parallel computing (@200 MHz)

**Speicher:**

1 Gbyte onboard Speicher

(max. Scanfield 90.000 x 90.000 Pixel)

→ 10 µm Auflösung @ 8bit bei 0.3 m Scanfeld

**Kommunikation:**

Gigabit Ethernet, max 125 Mbyte/s

**Galvosystem:**

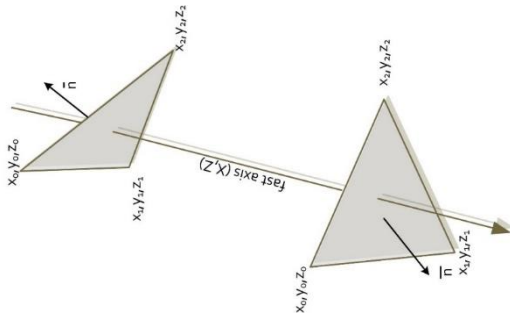
digitaler 20bit Galvo Genauigkeit

→ besseres position feedback, hohe Auflösung

**Synchronisation:**

auf externe Achsen per Quadraturencoder- /  
Triggereingänge → Echtzeittranslation (x,y,z)

## Vektormodus (3D) Kontur + Füllung:



- Spezieller Modus für das Rapid Prototyping / additive Manufacturing
- Hinterschnidungen möglich (3D)
- momentan unterstützt DXF(2D), STL (3D)
- Echtzeitfähig pro Scanlinie (Berechnung in der Austastlücke)
- 100 Millionen Dreiecke / s (erweiterbar auf 1.000 Mio/s größerer FPGA)

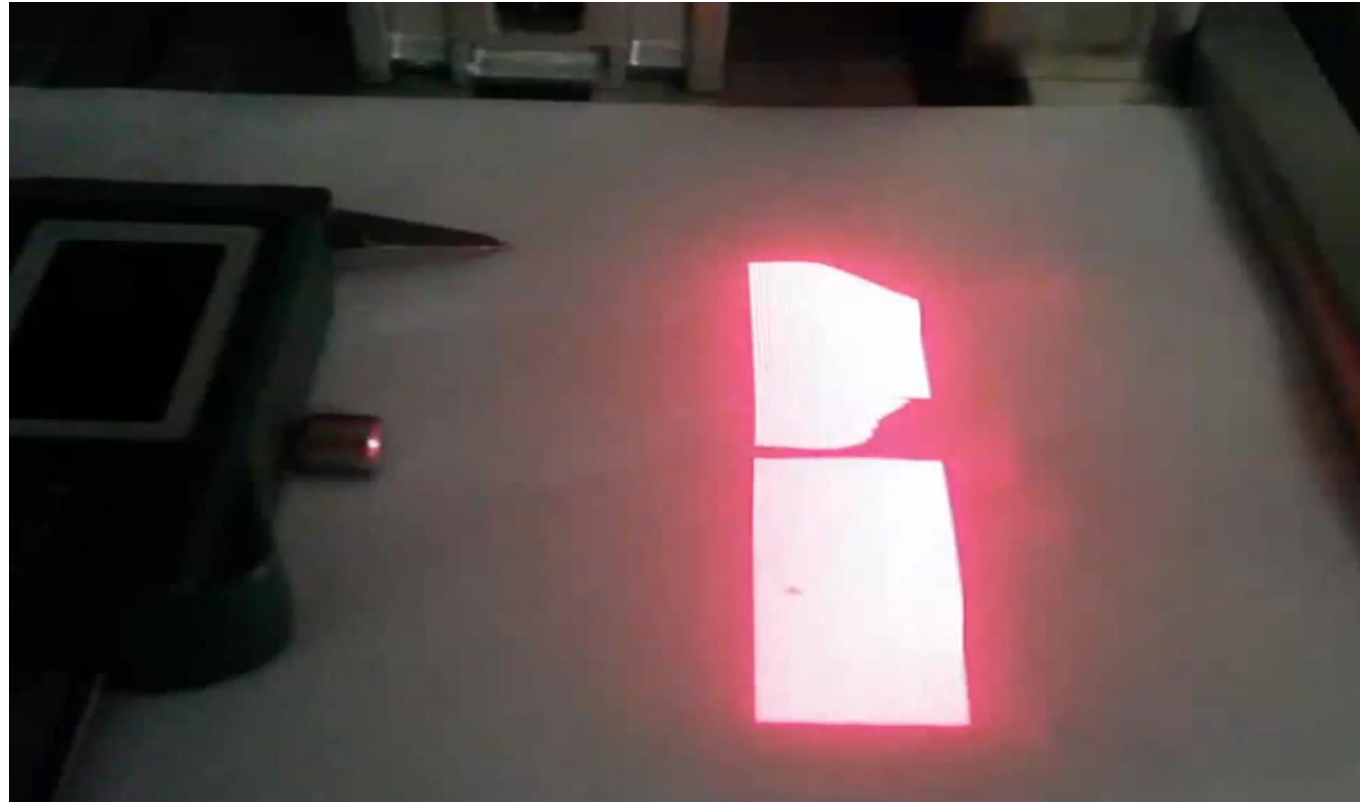
# Spezielle Features des 2D - Polygonscanners

Echtzeit - Volumen / Vectorengine (2D, 2.5D, 3D) (Hardware-Slicer)

Volumenmodel

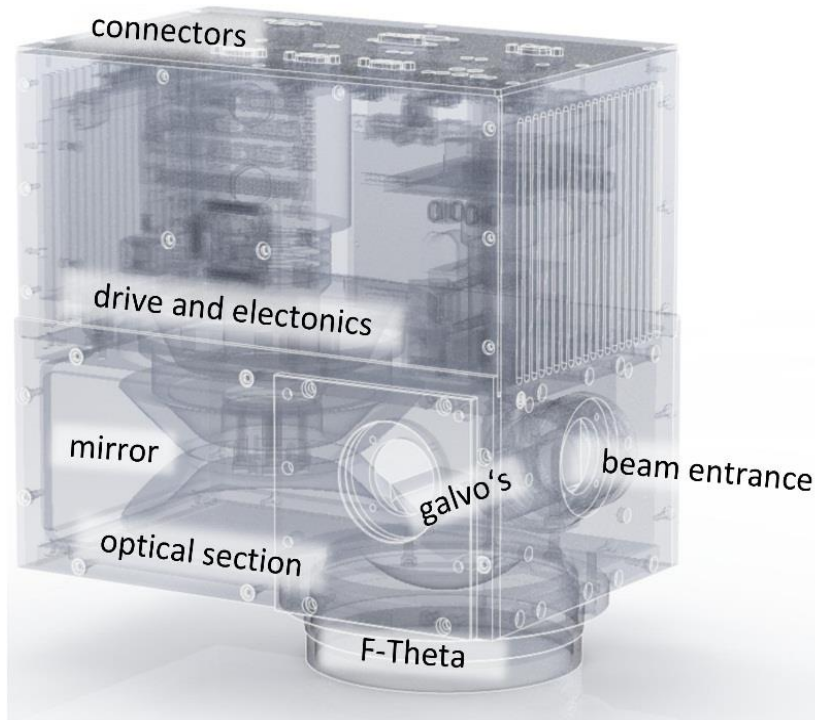


Tiefenabhängiges Slicen des Drachenkopfmodells (links)





## Polygon scanner UsanX-2D: (Mod. 2017)



- Spezielles optisches Design (*patented*)
- Getestet mit High-Power Lasern (**aktuell: 3 kW**) (next: 10 kW)
- Wechselbare Standard F-Theta-Optiken (**variable Scanfelder**)
- **Scan Speed > 1 km/s** möglich
- **Echtzeit Daten Verarbeitung** durch FPGA (*patented*)
- Schnelle **Energieverteilung** (*patented*)

### Nutzen für den Einsatz in Sinterprozessen:

- 10 - 100 mal schnellere Bestrahlung auf großen Flächen
- Mikrobearbeitung mit Hochleistungslasern
- Einfache Integration in gängige Laseranlagen
- Einfache Integration als Scan-Alone-System (Realtime Slicer)

### Im Vergleich zu allen anderen Scan-Systemen auf dem Markt:

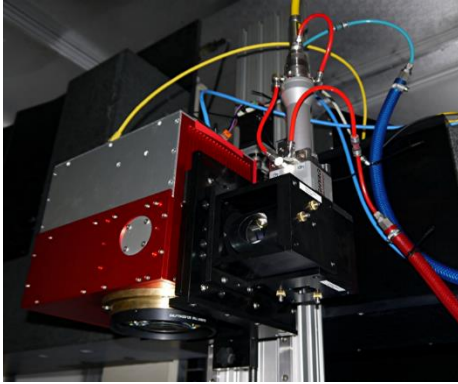
- Schnellste Scangeschwindigkeit auf dem Markt
- Schnellstes Positionskorrektursystem
- Schnellste Datenverarbeitung für Prozesse in 2D und 3D

### neues Alleinstellungsmerkmale bereits in Entwicklung:

- Rückwärtsscan-Option für Echtzeit-Monitoring

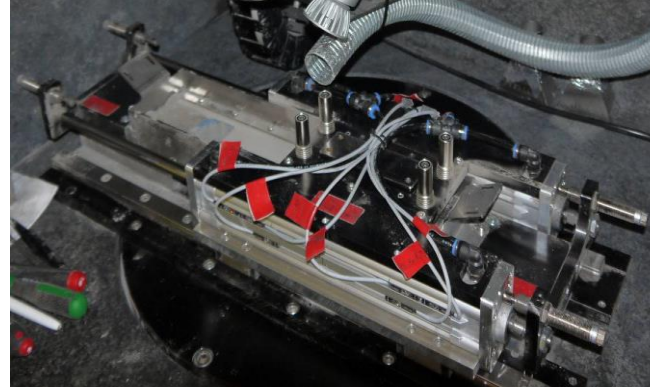
# Setup: Hochrate-Mikro-SLM

Polygonscanner



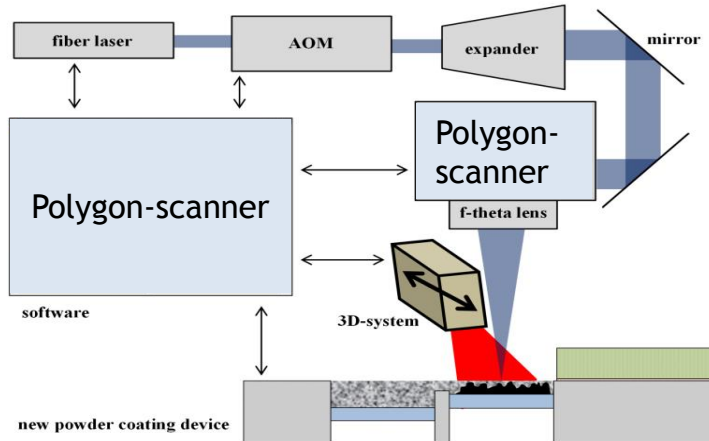
+

Rakelmaschine V2



=

Setup



## Polygonscanner:

- Master + Realtime-Slicer!
- Achsteuerung per Script oder Eventsystem

## Rakelmaschine V2:

- Doppelt pneumatisches Prinzip
- Längere Verdichterstrecke
- Höherer Druck (150 Kg auf Bauplattform)

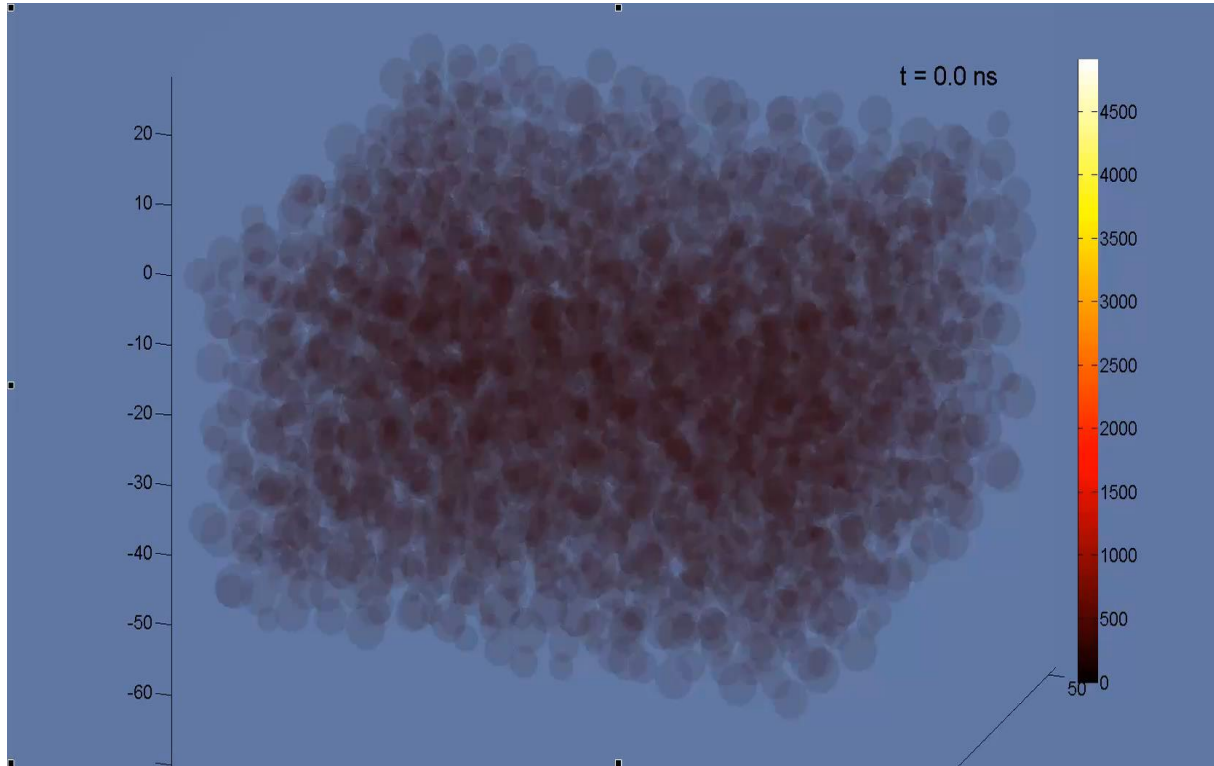
## Setup:

- Laser: 400W cw Laser ,F-Theta:  $f = 160 \text{ mm}$ , Spot =  $20 \mu\text{m}$
- Schnelle AOM-Schaltung (30 ns Anstiegszeit)

**Ziel: Sinterprozess bei  $v_{\text{scan}} \gg 15 \text{ ms}^{-1}$**

# Primäre Dissipation der Laserstrahlung im Pulver

## Raytracing und Temperaturverteilung im Wolframpulver durch Reflektion und Absorption



### Parameter:

- Fokus = 25  $\mu\text{m}$
- Intensität: Gauß
- $t_H = 180 \text{ ns}$

### Pulver:

- $d_{50} = 5 \mu\text{m}$
- polydispers
- Pd = 30 %

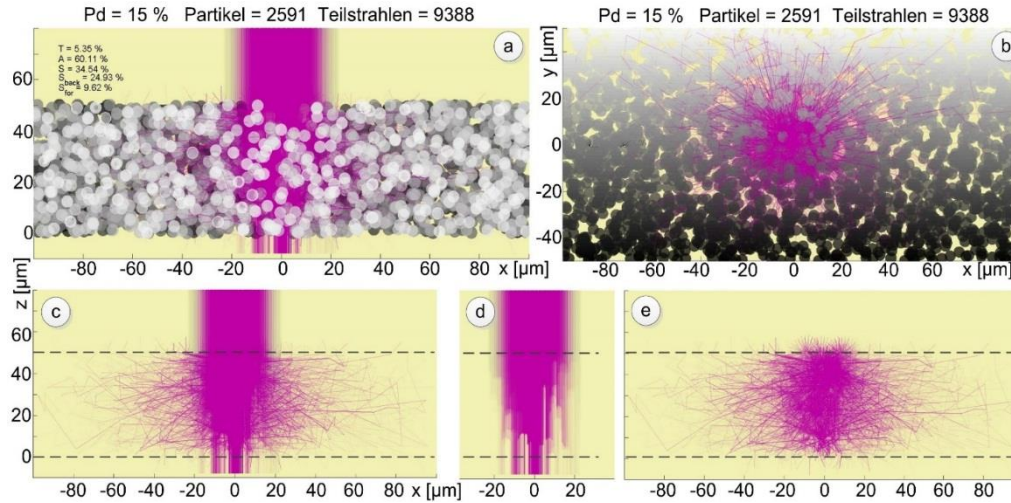
### Bedingung: $d_p \ll d_{\text{fokus}}$

- Streuung der Strahlung
- Pulverenergiespeicher
- Volumenwärmequelle

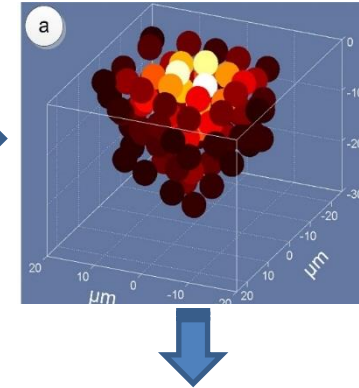
→ Höhere Intensitäten und Scangeschwindigkeiten als mit Makropulver möglich

# Lösung für hohe Geschwindigkeit → optische Dissipation → Einsatz von Mikropulvern notwendig

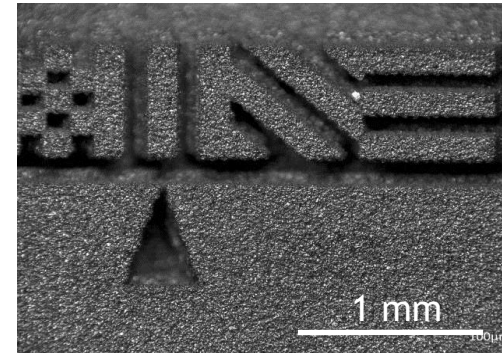
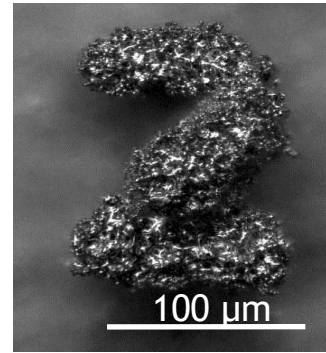
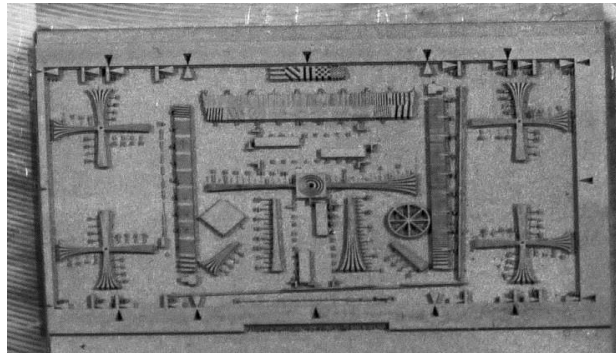
Raytracing  
(25  $\mu\text{m}$  Strahl, 5  $\mu\text{m}$  Pulver)



Primäre Energieverteilung



Auflösungstest  
Mo (5  $\mu\text{m}$ )



400 W(cw) bei  $150 \text{ ms}^{-1}$ , Sinterschichtdicke =  $2 \mu\text{m}$ , Fokus  $18 \mu\text{m}$  in die Mikrostruktur umgesetzt

- $v > 100 \text{ ms}^{-1}$  durch Volumenabsorption beim Mikropulver möglich
- Laterale Einflusszone  $30 \mu\text{m}$ , Auflösungsgrenze:  $30 \mu\text{m}$

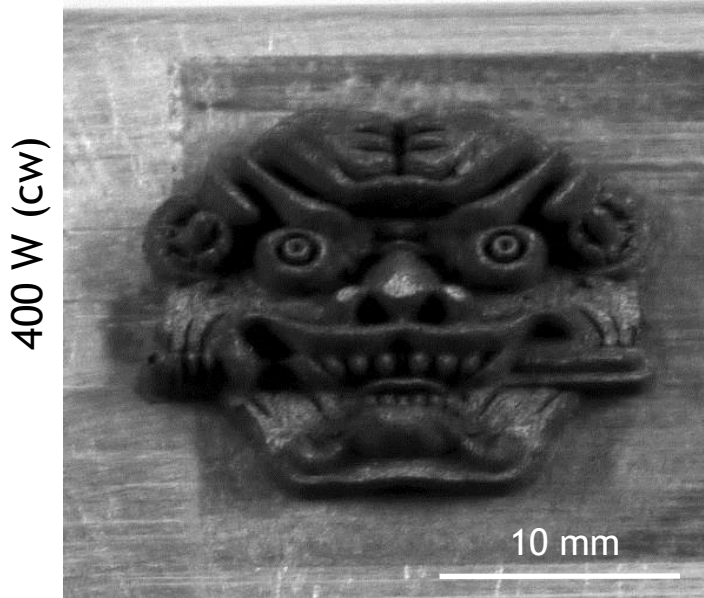


# Regime des Hochrate-Mikro-SLM

Mikro-SLM von Edelstahl: Partikel =  $2,5 \mu\text{m}$  bei  $v > 50 \text{ ms}^{-1}$

**Sehr effektives Regime**

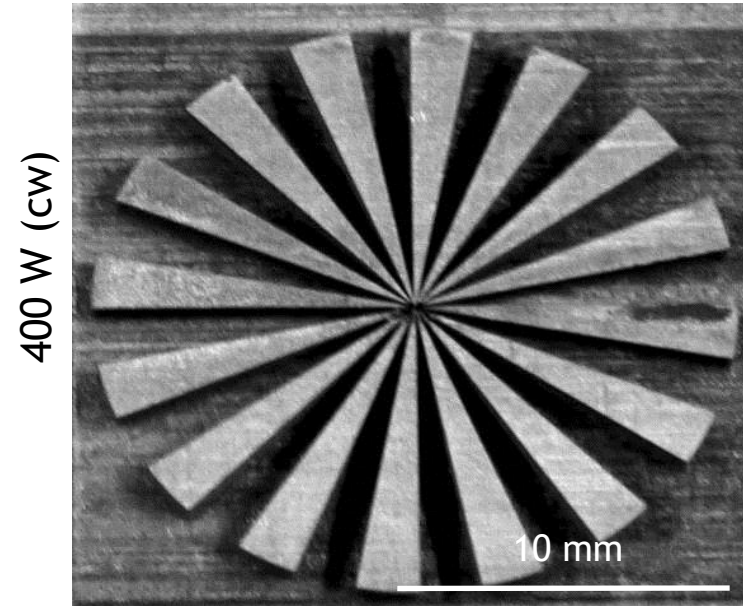
$50 \text{ ms}^{-1}$  /  $20 \mu\text{m}$  Sinterschicht



(Vollbelegung) Baurate:  $18 \text{ cm}^3/\text{h}$

**Grenzwertiges Sinterregime (Leistungsgrenze Laser)**

$200 \text{ ms}^{-1}$  /  $3 \mu\text{m}$  Sinterschicht

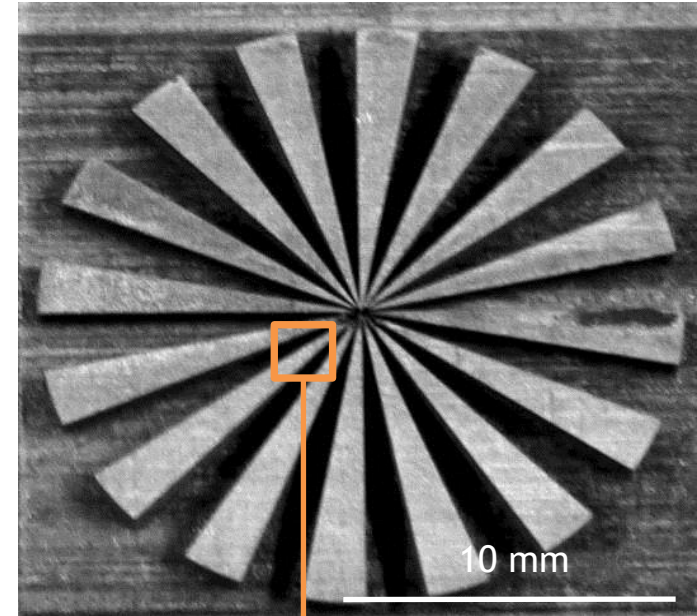
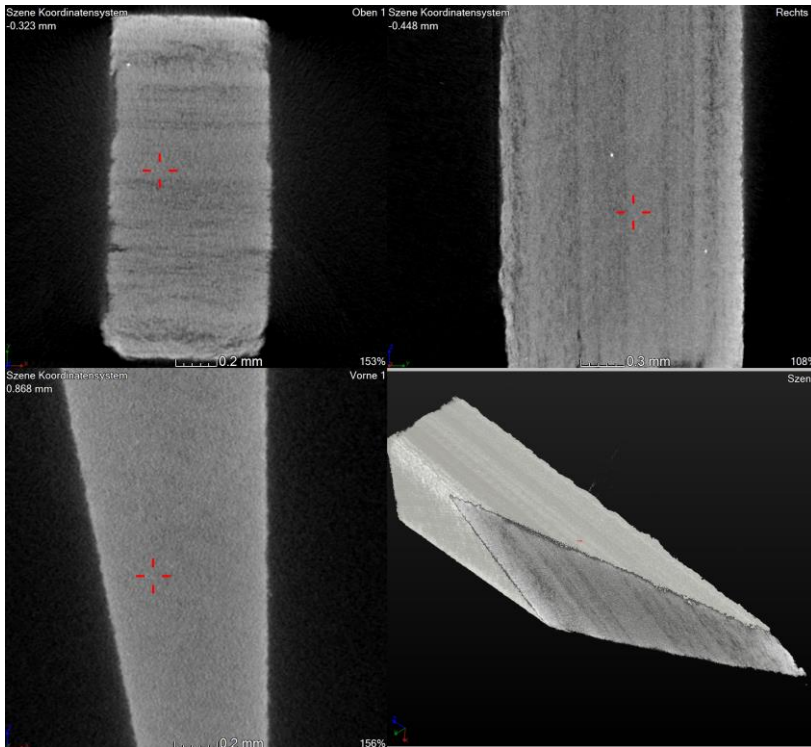


(Vollbelegung) Baurate:  $3 \text{ cm}^3/\text{h}$

- Erzieltes maximum gegenwärtig bei  $300 \text{ ms}^{-1}$  bei  $1 \mu\text{m}$  Sinterschicht
- Aber: dünnerer Sinterschichten → geringere Reproduzierbarkeit !

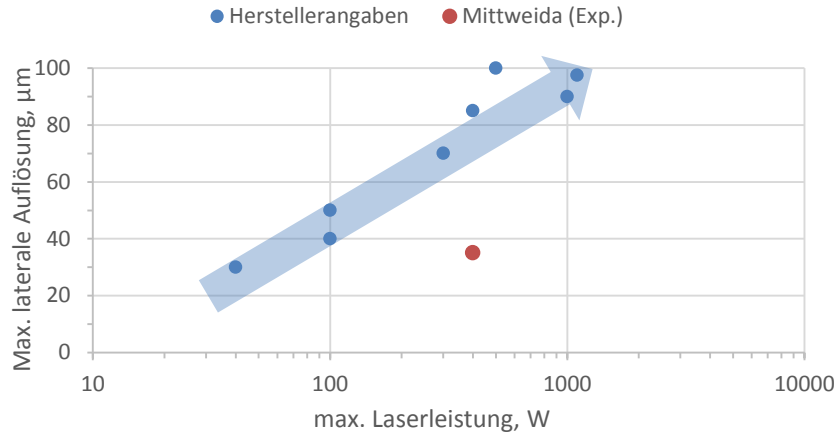


## Strukturanalyse bei sehr hohen Scangeschwindigkeiten 200 ms<sup>-1</sup>

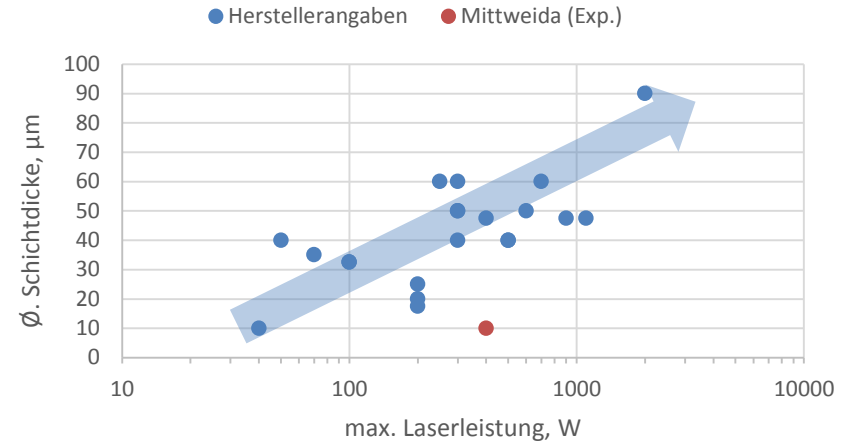


μCT-Rekonstruktion mittel nanotom von GE  
aufgenommen mit einer Voxelgröße 2,5 μm:  
Lokal sehr hohe rel. Dichte des Bauteils

## laterale Auflösung

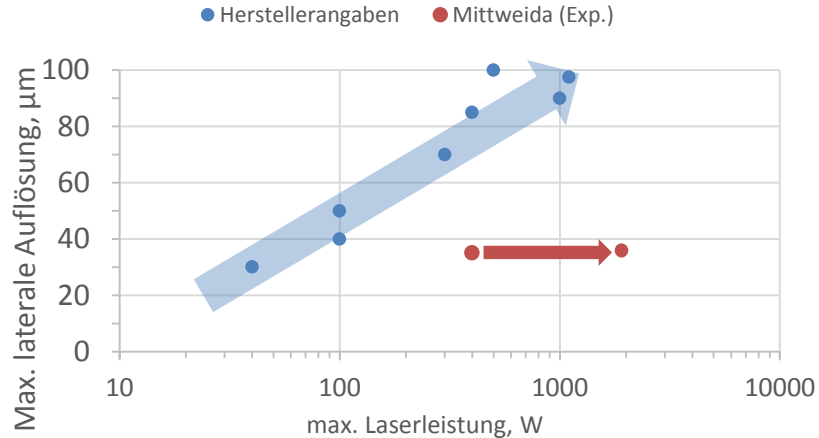


## axiale Auflösung

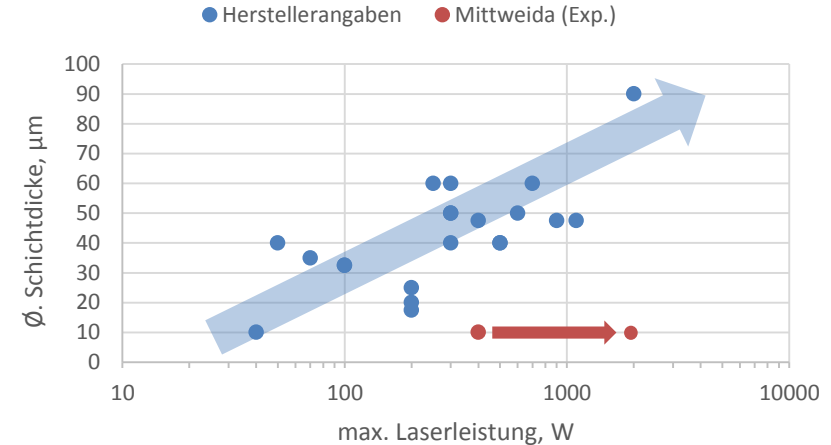


- ✓ Verdichtende Rakelanlage zum Aufzug eines verdichteten und feinen Metallpulvers (Korngröße  $\leq 10 \mu\text{m}$ )
- ✓ Polygonspiegelscanner für die schnelle Strahlableitung/Energieverteilung (bis  $200 \text{ m/s}$ )
- ✓ Schnelle Prozessdatenverarbeitung mittels FPGA direkt im Scanner
- ✓ Proof of Principle: anhand von Sinterstrukturen, Prozess sehr stabil bis  $100 \text{ ms}^{-1}$

## laterale Auflösung

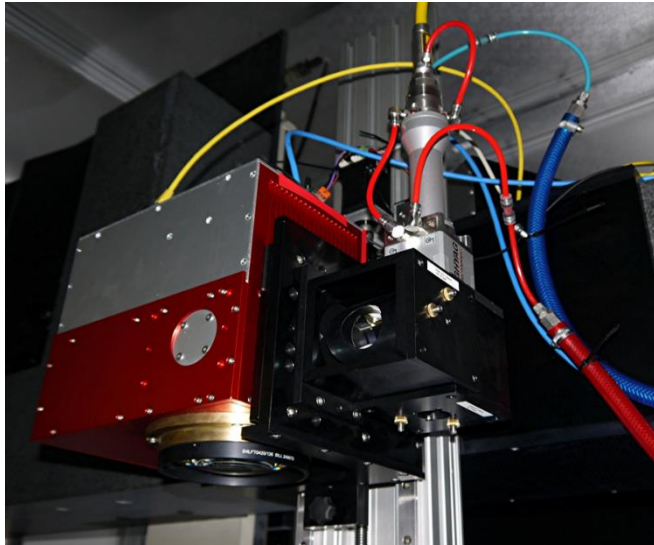


## axiale Auflösung



- ✓ **Erkennbares Potenzial in Richtung höherer Leistung und höherer Aufbauraten!!**
- ✓ **Einsatz Multi kw-Lasersystemen**
- ✓ Nächster Schritt: größerer Bauraum > 100 x 100 x 100 mm<sup>3</sup>
- ✓ Aufbaurate > 20 cm<sup>3</sup>/h (bei 50% Nutzungsgrad Polygon)

# Vielen Dank allen Förderern „der innovativen Lasertechnik / 3D-Druck“



**ACSYS**  
LASERTECHNIK

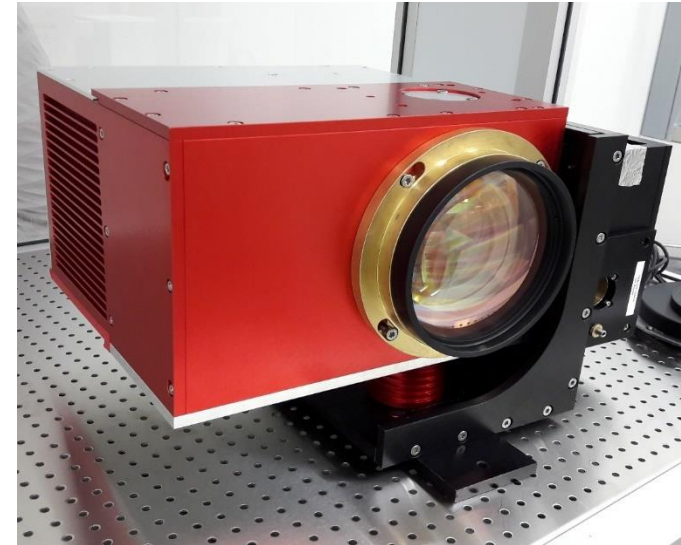


**IMM**  
electronics – made in germany

**SITEC**

**KOKI**

**ULT**  
UMWELT - LUFTTECHNIK



**3D MICROMAC**

**MAICOM GUARZ**

**fiberware**

**edgewave**



Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Energie

**PTJ**  
Projektträger Jülich  
Forschungszentrum Jülich

**INNOLAS**  
solutions



**Fraunhofer**



Bundesministerium  
für Bildung  
und Forschung



**Laserinstitut**  
Hochschule Mittweida

Europa fördert Sachsen.

**EFRE**  
Europäischer Fonds für  
regionale Entwicklung



André Streek



Gefördert aus Mitteln  
der Europäischen Union

Europa fördert Sachsen.  
**ESF**  
Europäischer Sozialfonds

**INNOPROFILE**  
**UNTERNEHMEN**  
Die BMBF-Innovationsinitiative  
Neue Länder **REGION**