

Additive Fertigung – das massgeschneiderte Massenprodukt

ETIF – Empa Technology & Innovation Forum

Industrie 4.0: **Der intelligente Arbeitsplatz der Zukunft**

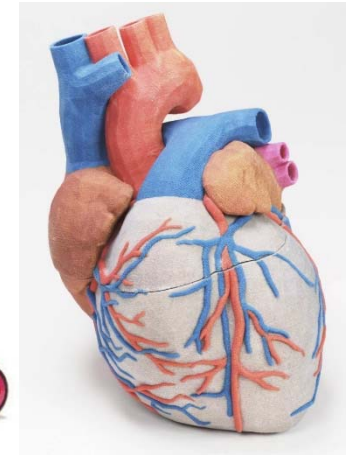
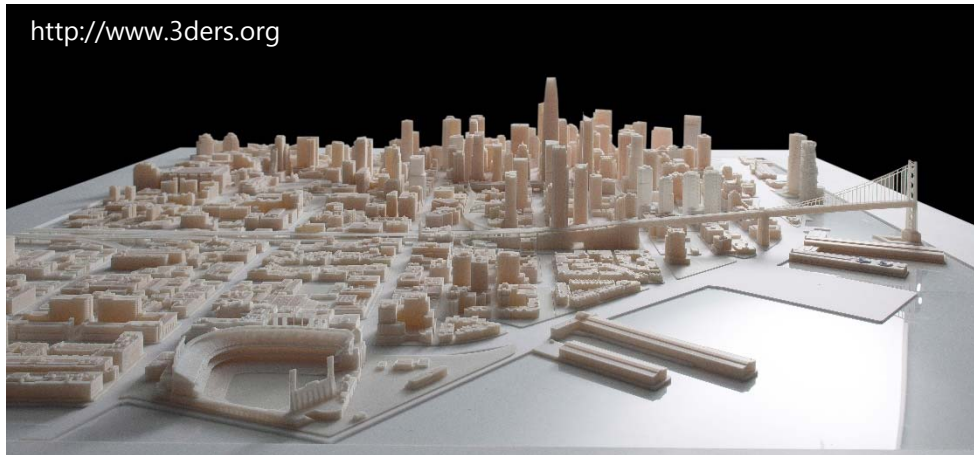
Donnerstag, 12. November 2015

Dr. Pierangelo Gröning

Empa, Materials Science and Technology
Head of the Department "Advanced Materials and Surfaces"
Überlandstrasse 129
CH-8600 Dübendorf
pierangelo.groening@empa.ch

3D-Druck

Fast alles lässt sich drucken!



3D-Druck: *Rapid Prototyping*

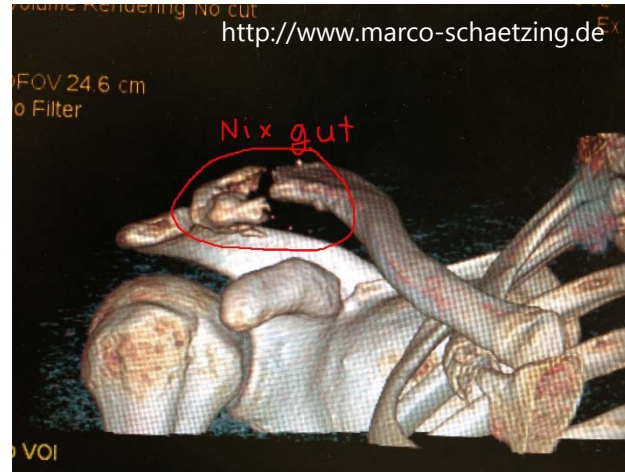
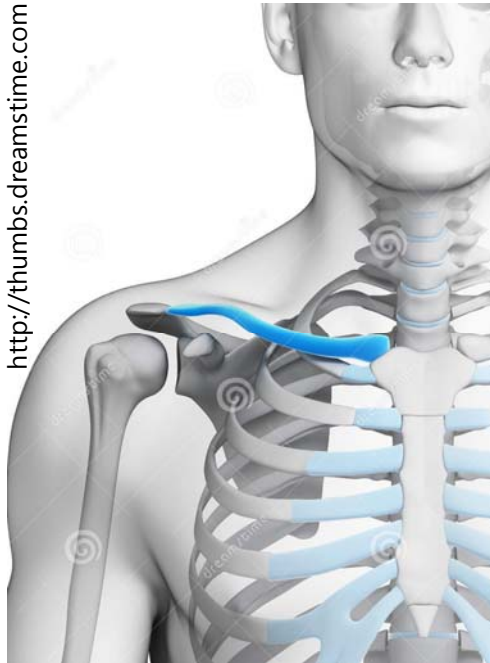
Nützliches Hilfsmittel in der Entwicklung



... es sind "aber nur" Modelle

Massgeschneiderte Massenprodukte

Beispiel: Implantate

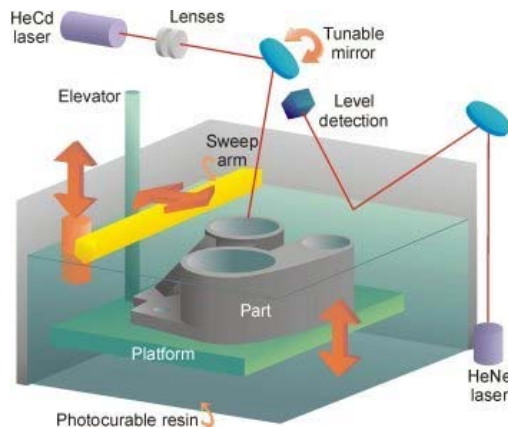


3D-Druck Verfahren

- ❑ Stereolithography
- ❑ 3D ink-jet printing
- ❑ Fused Deposition Modeling (FDM)
- ❑ Selective Laser Sintering (SLS)
- ❑ Selective Laser Melting (SLM)
- ❑ Laser direct Metal Deposition (LMD)

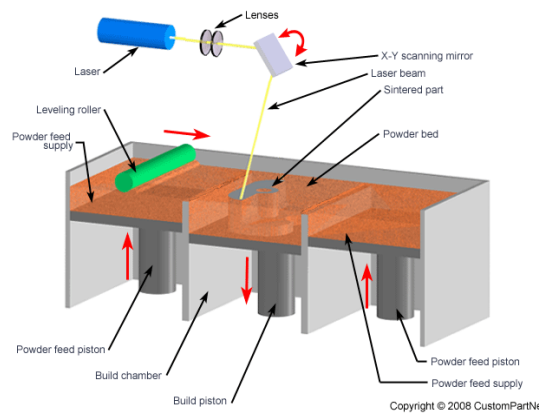
polymers
plaster, resin
polymers
metals
metals
metals

Stereolithography



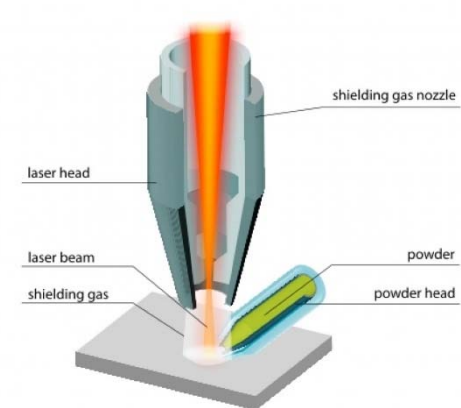
<http://www.princeton.edu>

Selective Laser Sintering (SLS)



<http://www.custompartnet.com>

Laser direct Metal Deposition (LMD)



<http://aptgadget.com>

Vergleich: 3D-Druck Verfahren für Metalle

Pulver Bett

Selective Laser Melting (SLM)

- Komplexe Geometrien
- Genauigkeit
- Geschwindigkeit
- Wiederherstellung
- Pulver recycling

Electron Beam Melting (EBM)

- Hochleistungswerkstoffe
- Komplexe Geometrien
- Genauigkeit
- Wiederherstellung
- Pulver recycling
- Vakuum

Direkte Laser Abscheidung

Laser Powder Deposition

- Produktivität
- Grosse Teile
- Geometr. Einschränkungen
- Pulver

Laser Wire Deposition

- Sauber & produktiv
- 100% Materialverwertung
- Geometr. Einschränkungen
- Material Einschränkungen



Etablierte 3D-Druck Anwendungen

Auftragsschweissen / Reparaturen



Selective Laser Melting (SLM)

Lohnfertigung

AlSi10Mg



35 mm

TiAl6V4



Stahl: Inconel 718



Zugfestigkeit: 460 ± 20 MPa

Preis: 155,00 €

1230 ± 50 MPa

1.993,00 €

1020 ± 50 MPa

276,00 €

Bauteilgenauigkeit: ~ 100 µm

Min. Wandstärke: 1 mm



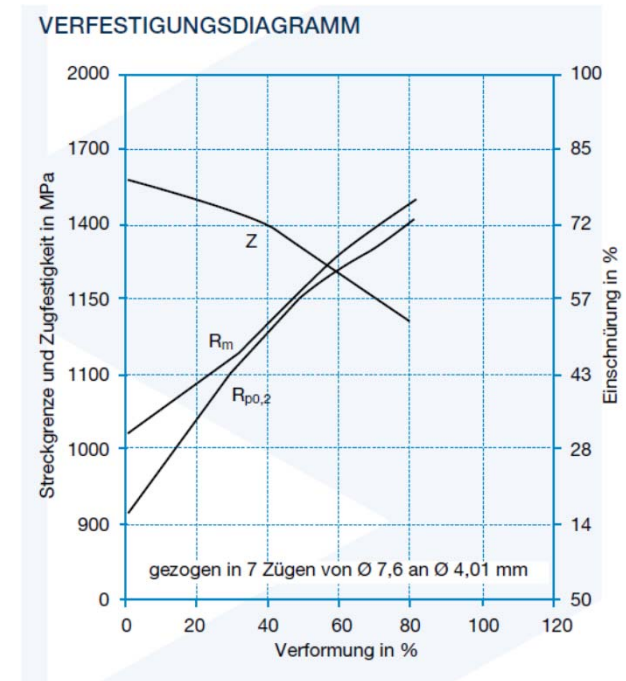
<https://www.rapidobject.com>

Werkstoffdatenblatt: X2CrNiMo17-12-2 1.4404

- Chemische Zusammensetzung
(in Massen-% nach DIN EN 10088-3)

	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	N
min.	-	-	-	-	-	16.5	2.0	10.0	-
max.	0.03	1.0	2.0	0.045	0.03	18.5	2.5	13.0	0.1

- Mechanische Eigenschaften bei Raumtemperatur
- Mechanische Eigenschaften bei erhöhten Temperaturen (100 – 550°C)
- Sepz. Wärmekapazität
- Wärmeleitfähigkeit
- Mittlerer Wärmeausdehnungskoeffizient
- Korrosionsbeständigkeit



E-Module in GPa bei

<20°C	200
20 – 100°C	194
100 – 200°C	186
200 – 300°C	179
300 – 400°C	172
400 – 500°C	165

Visionen für den 3D-Druck

Einzigartige Möglichkeiten

Im Prinzip erlaubt der 3D-Druck Werkstücke mit komplexen Geometrien und anisotropen Materialeigenschaften herzustellen! → **Eröffnet ganz neue Möglichkeiten!!**



<http://gfxspeak.com/>



<http://jonathan-byrne.com>

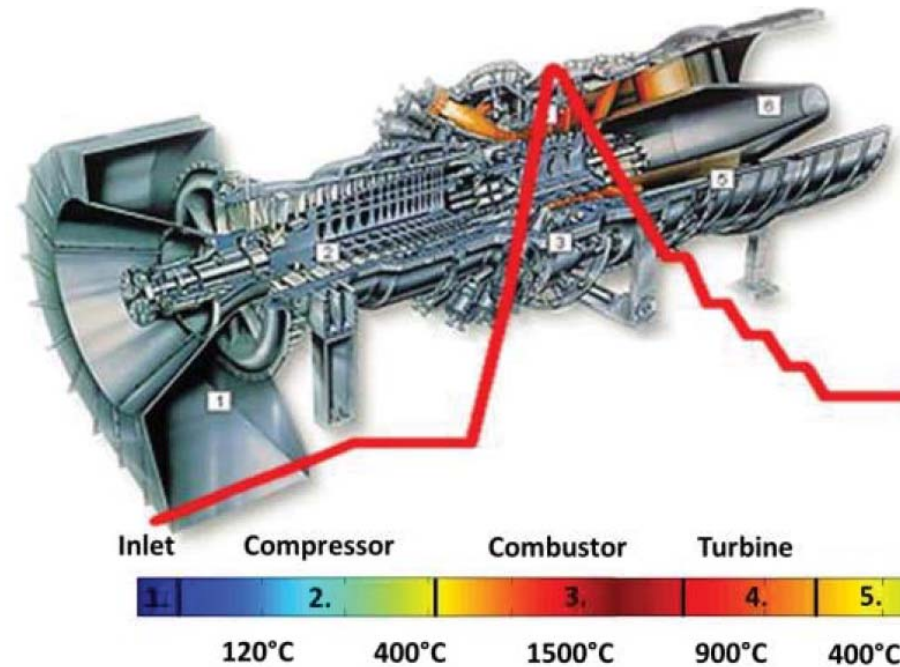
<https://74fdc.files.wordpress.com/>

LaserCUSING®
Source: www.design-engineering.de



EU-FP7 Projekt "OXIGEN"

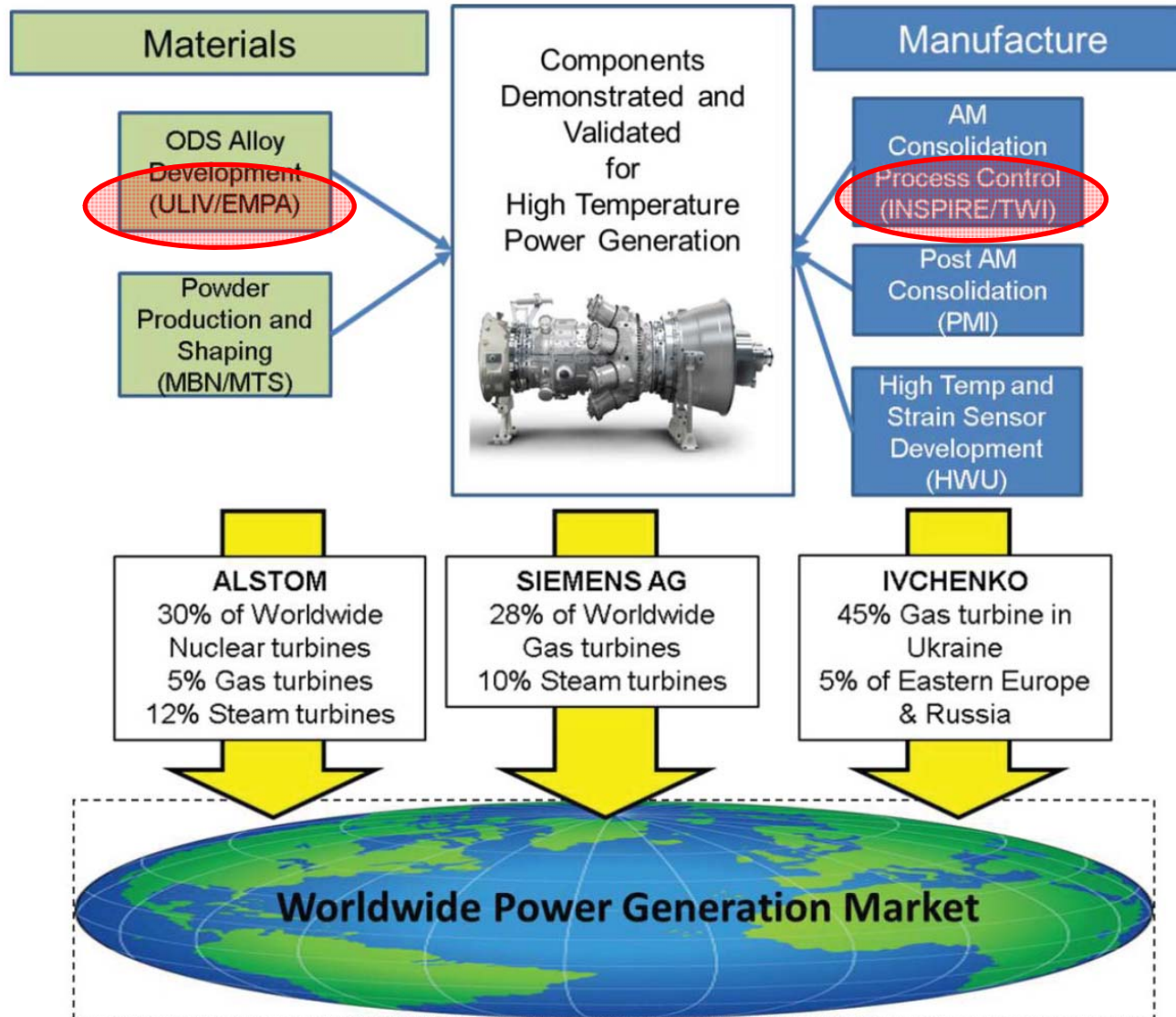
Ziele/Ansätze



1. Development and Production of Powder ODS Material (*ODS: Oxide Dispersion Strengthened*)
 - Ni-/Fe-base superalloys and intermetallics (TiAl)
2. Manufacturing Routes for Component Manufacture
 - Additive Manufacture as Selective Laser Melting (SLM) and Laser Metal Deposition (LMD)
3. Intelligent Design
 - Improved complexity and repair by sub-component replacement
4. Embedded Fibre Optic Sensing
 - Temperature and strain measurement «in service» inside the components

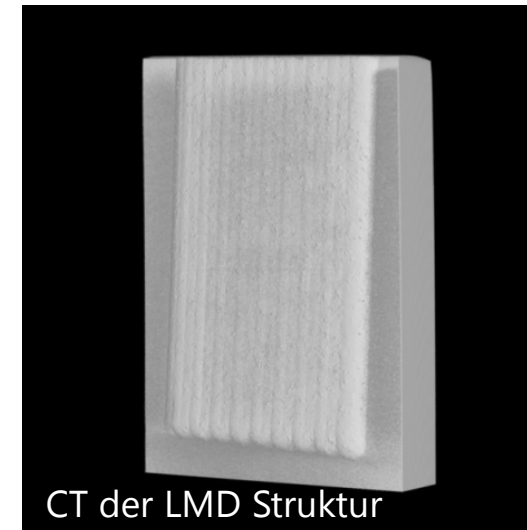
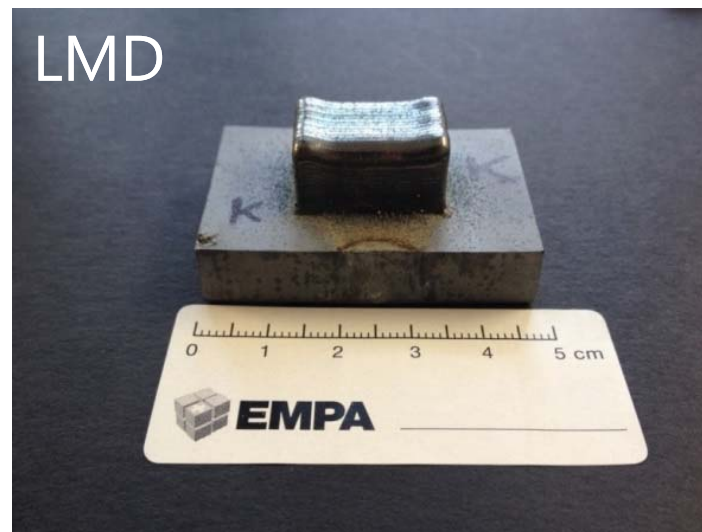
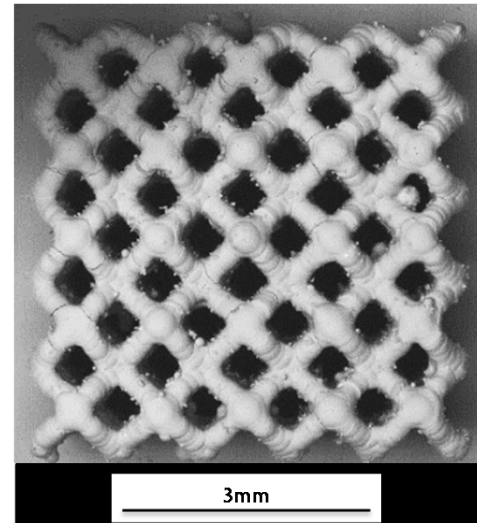
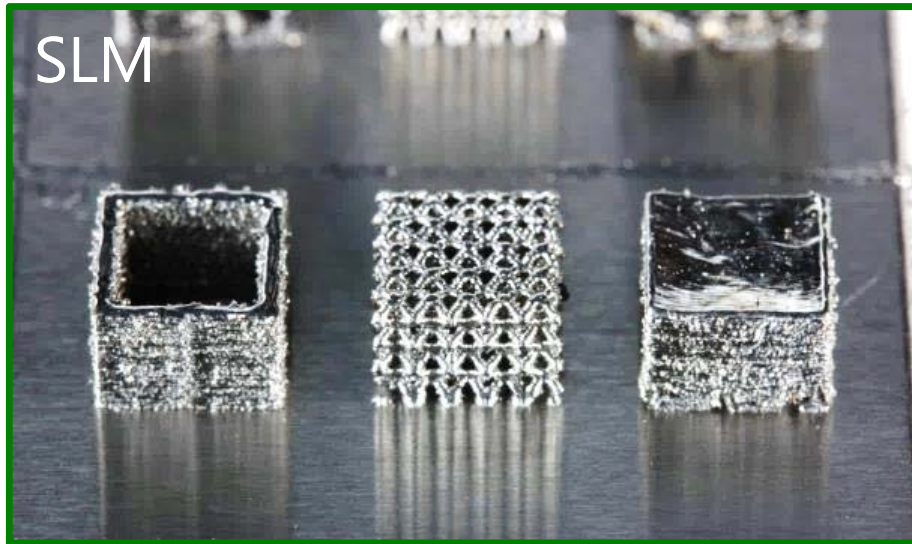
EU-FP7 Projekt "OXIGEN"

Partner



EU-FP7 Projekt "OXIGEN"

SLM und LMD Teststrukturen aus TiAl ODS-Legierungen



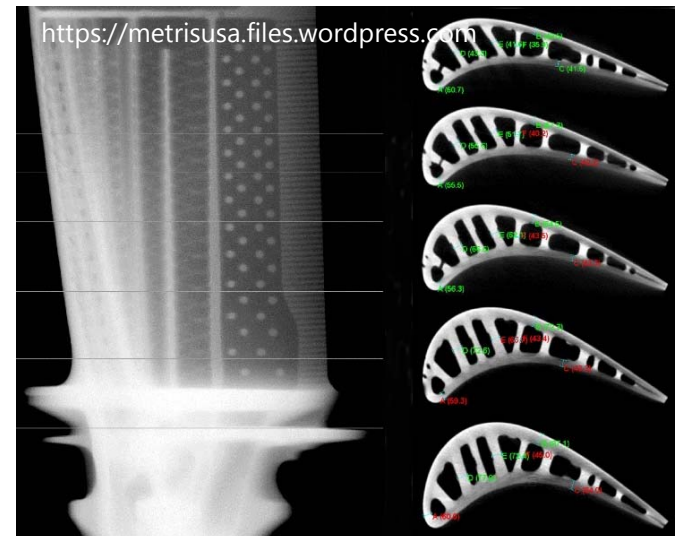
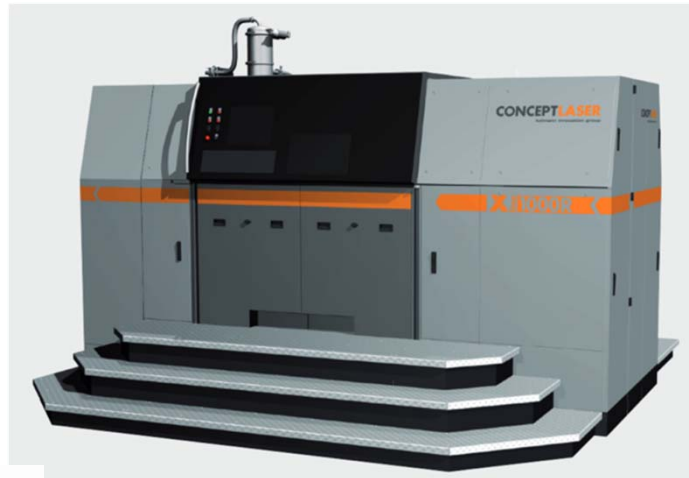
In Zusammenarbeit mit
inspire

Visionen für den 3D-Druck

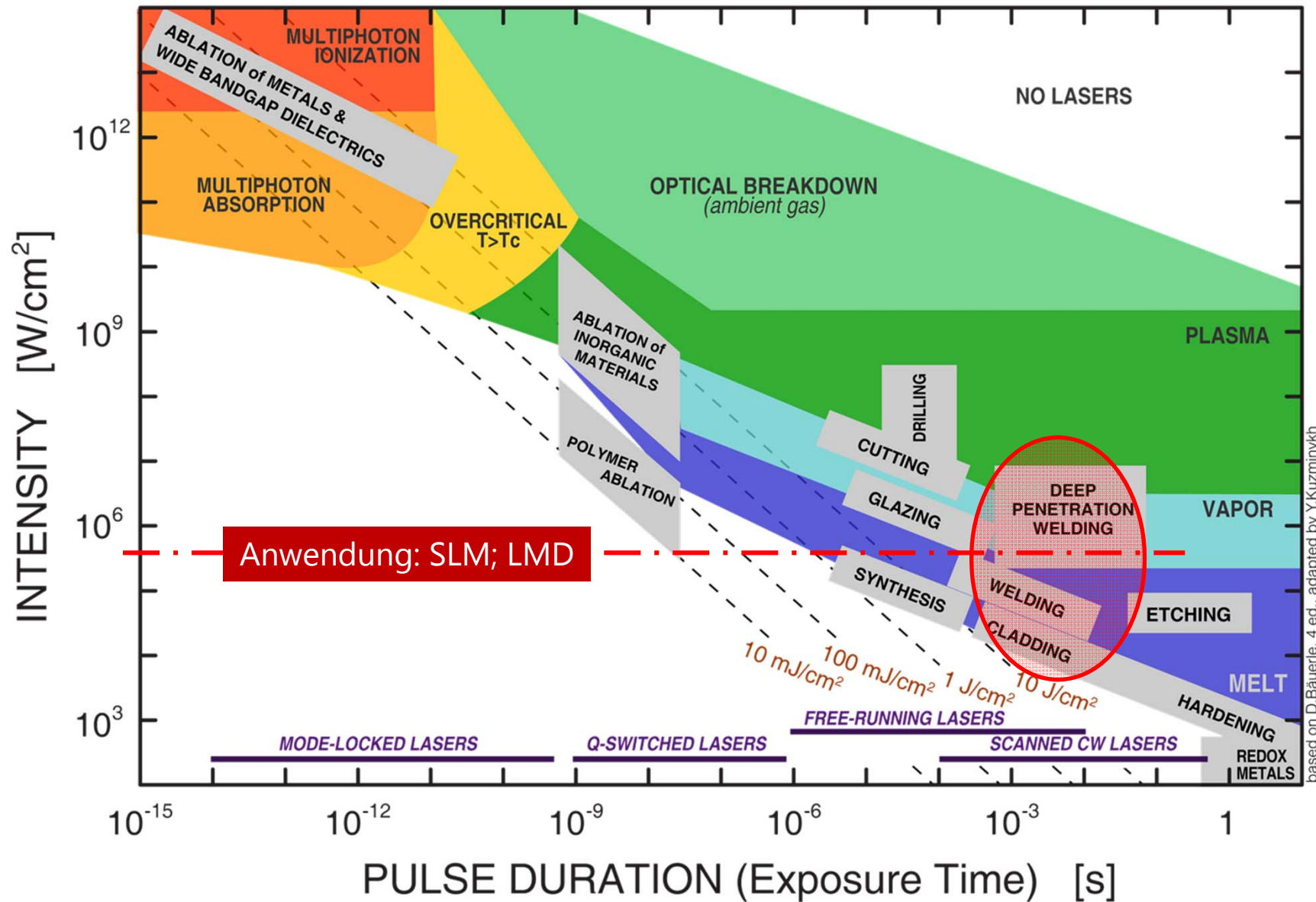
Beispiele: Das individuelle Implantat / Das "digitale" Ersatzteillager



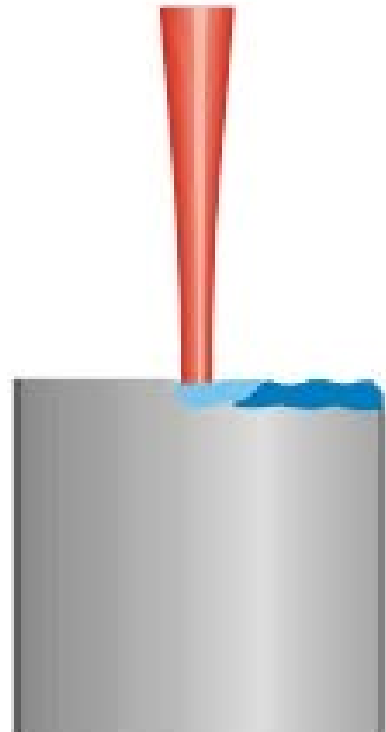
Was sind die Herausforderungen,
dass diese Konzepte funktionieren?



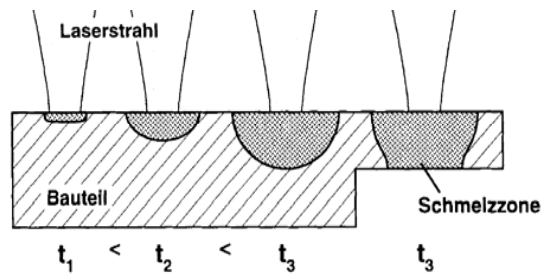
Laserparameter und Anwendungsbereiche



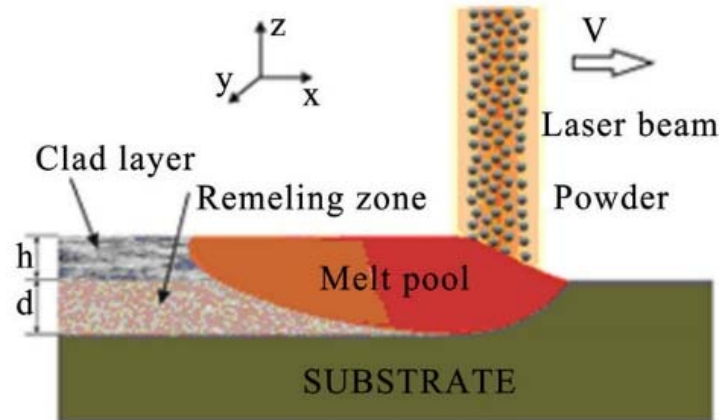
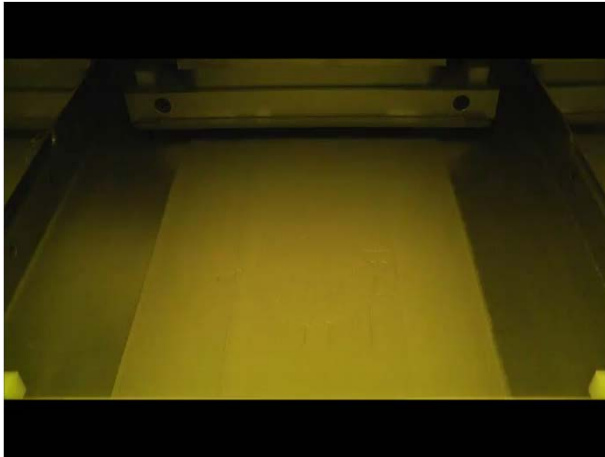
Laserschmelzprozess (I)



Wärmeleitungssmelzen

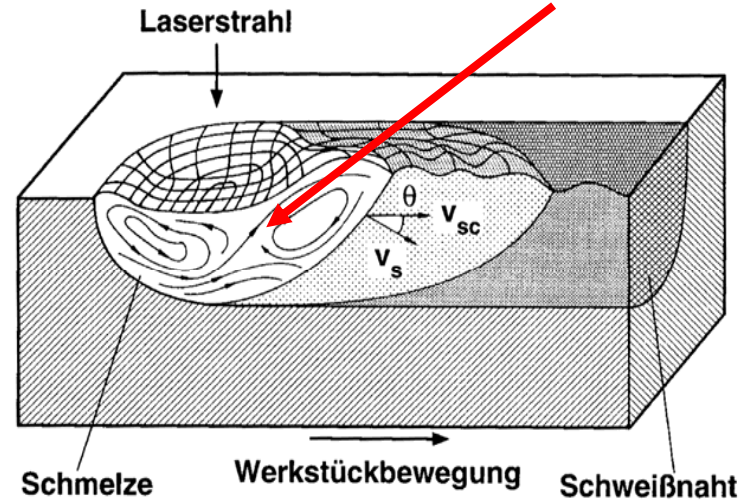


Laserschmelzprozess (II)



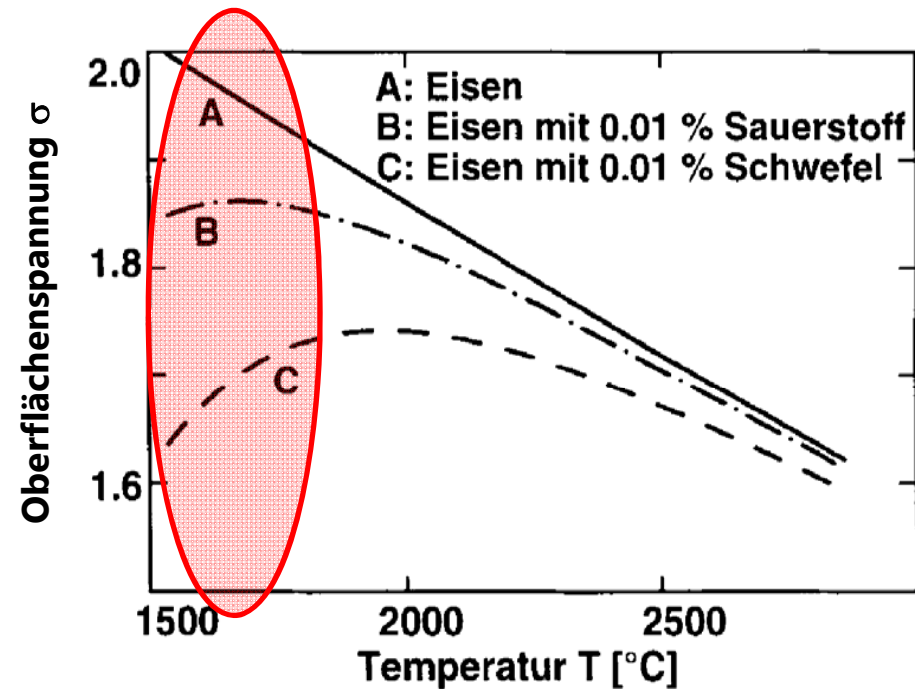
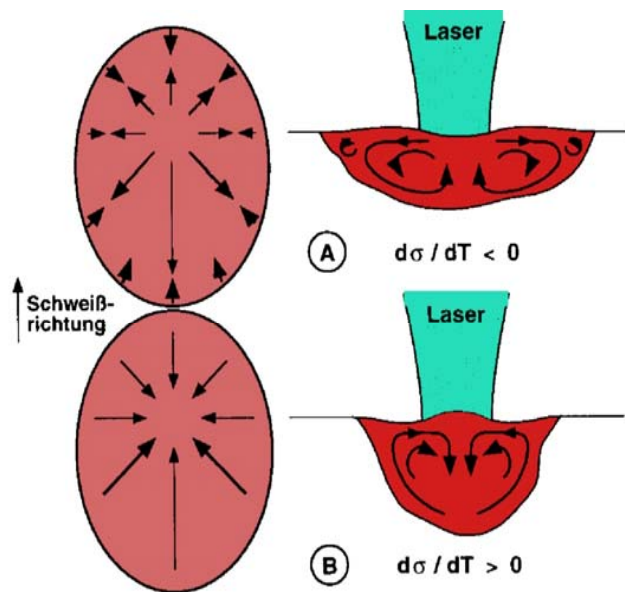
V. G. Niziev et al.,
Mod. and Num. Sim. of Material Science, **3** (2013) 9

Wärmetransport
durch Leitung
und Konvektion



Laserschmelzprozess (III)

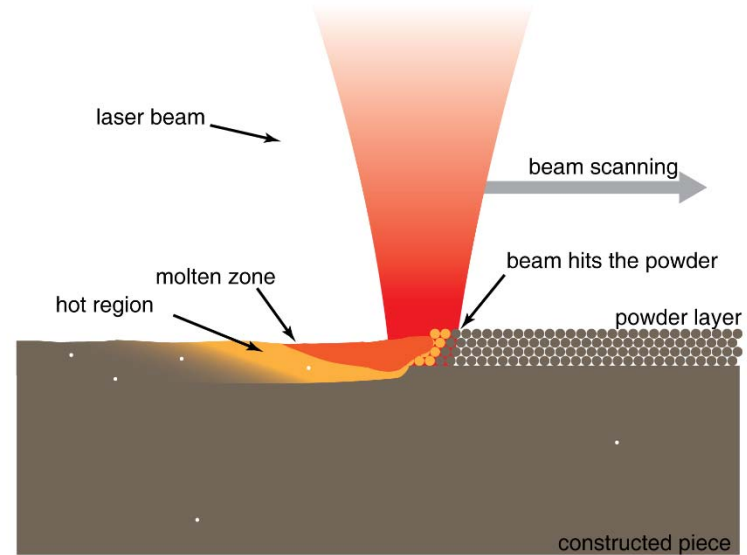
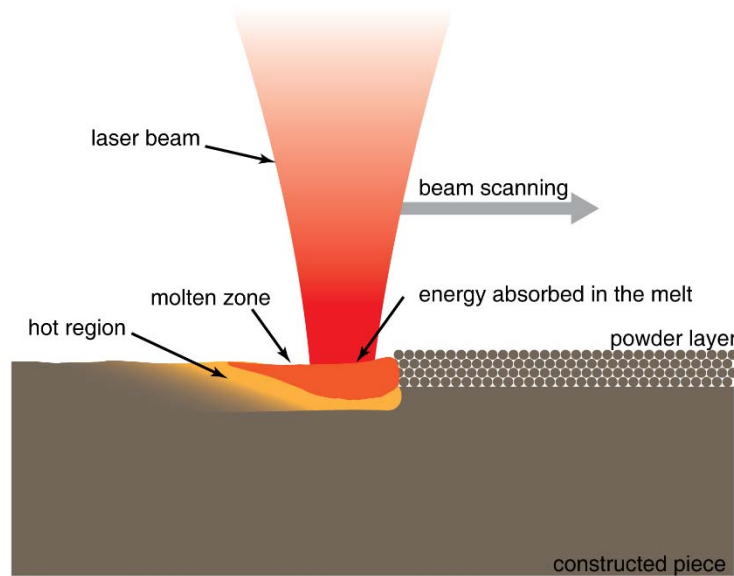
„Marangoni“ Effekt



Thermische Konvektion in der Schmelze aufgrund unterschiedlicher Oberflächenspannungen (σ)

- Zirkulation von niedriger zur höherer Oberflächenspannung σ
 - Oberflächenspannung ($\sigma(T)$) ist temperaturabhängig! (Nimmt mit steigender Temperatur ab)
 - Oberflächenspannung wird stark von Verunreinigungen beeinflusst!
- Kann zu Instabilitäten in der Schmelze führen und damit die Abmessungen der Schmelzzone (Tiefe vs. Breite) verändern! → **Beeinflusst die Oberflächenrauigkeit und die Präzision!!**

Selektives Laser Sintern/Schmelzen



„Kleine“ Scan-Geschwindigkeit $v < v_{krit}$

- Stabiler Prozess
- Geringere Produktionsleistung

„Grosse“ Scan-Geschwindigkeit $v > v_{krit}$

- Instabiler Prozess (Poren, Einschlüsse)
- Höhere Produktionsleistung

Thermische Eindringtiefe

$$l_{thermisch} = 2\sqrt{D\tau_{Puls}}$$

Diffusionskonstante:

$$D = \frac{\kappa}{\rho c_p}$$

κ : Wärmeleitfähigkeit

c_p : Wärmekapazität

ρ : Dichte

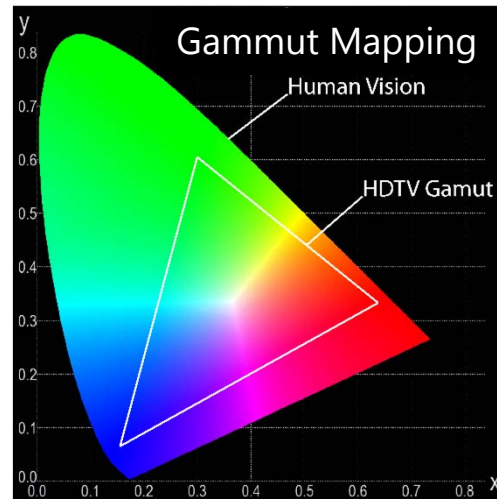
Für CW Laser: $\tau = \frac{d_{Laser Spot}}{v}$

Erfahrungen aus dem Digitaldruck



Ohne Prozesskontrolle geht fast gar nichts !!

Farbspektrometer



Fertigung im 3D-Druck

Herausforderungen / Forschungsbedarf

▪ **Produktivität / Qualität**

- Verbesserung der mechanischen Eigenschaften (Festigkeit, Ermüdungsverhalten)
- Präzision / Güte
- Geringere Oberflächenrauheit
- Höhere Produktionsgeschwindigkeit (x10!) (heute typisch: 0.1 – 2 m/s; 10mm³/s)
- Weniger Nachbearbeitungen
- Pulveraufbereitung / Pulver-Recycling
- Design Rules

▪ **Prozesskontrolle / Qualitätsmanagement**

- Reproduzierbarkeit / Prozessstabilität
- Prozesssteuerung / -regelung (Sensorik / Software)
- Qualitätsmanagement (Vom Pulver bis zum Endprodukt)
- Datensicherheit

▪ **Automatisierung**

- Prozessintegration (Kombinieren mit anderen Herstellungsprozessen)
- Datensicherheit

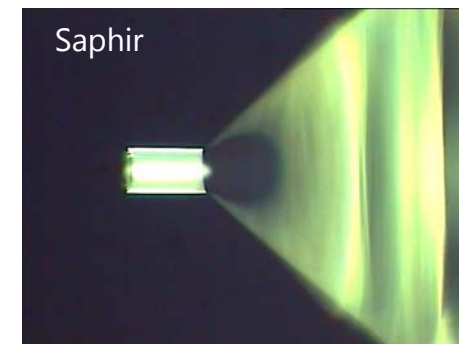
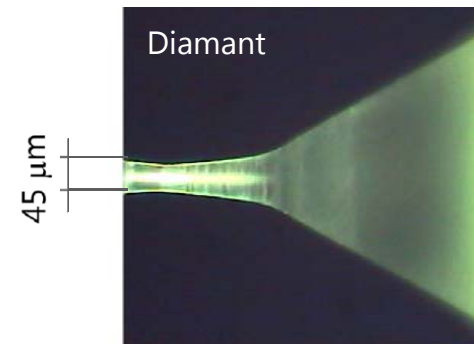
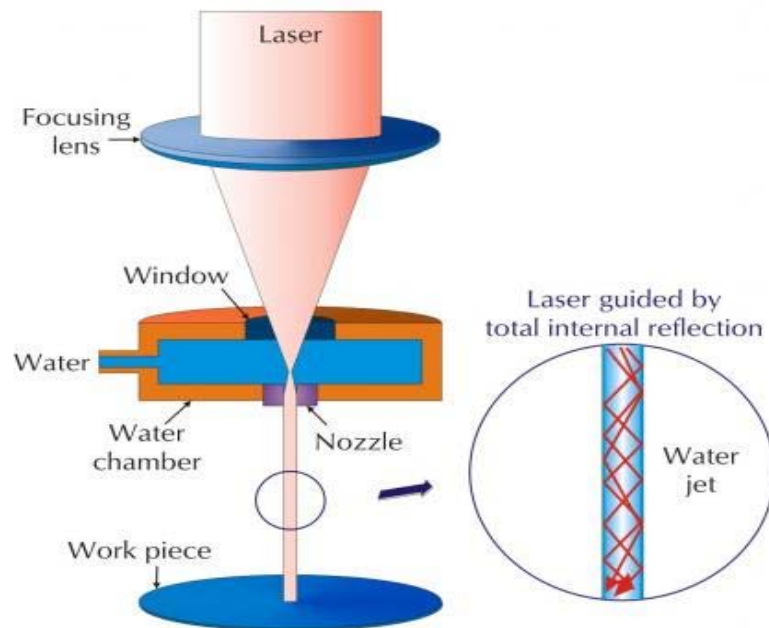
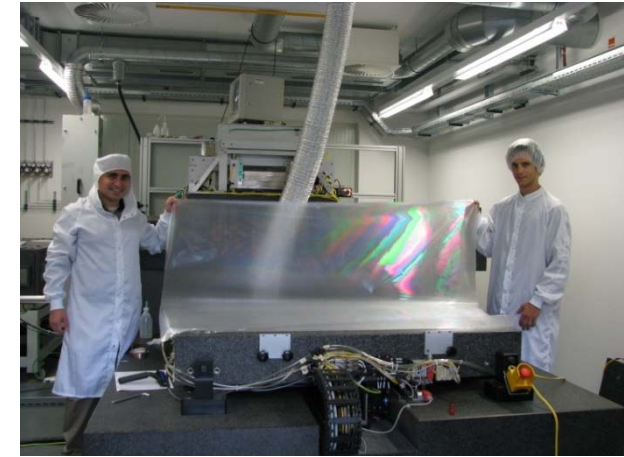
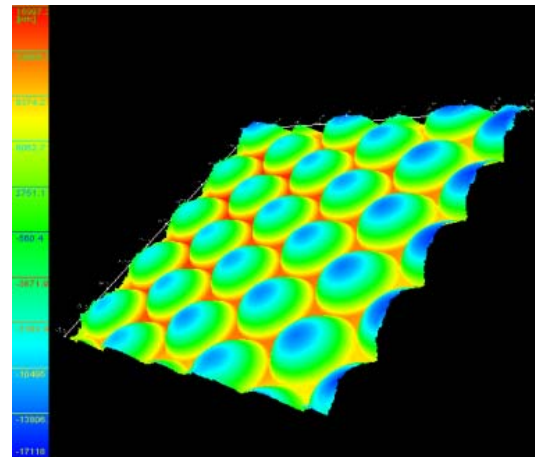
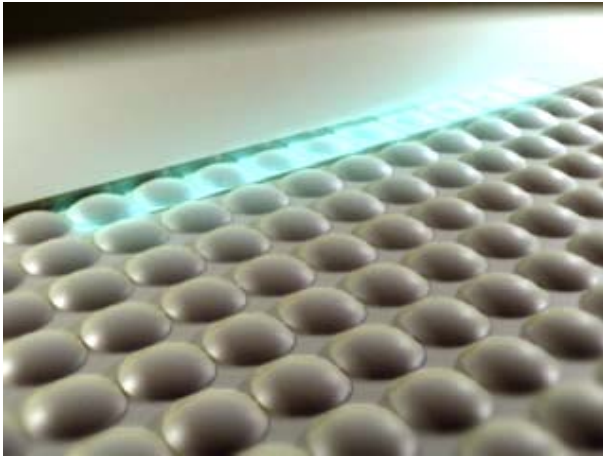
▪ **Rechtliche Fragen**

- Internet der Dinge / Produkthaftung?

▪ **Businessmodelle**

- Wirtschaftlichkeit (Hohe Wertschöpfung)

Laserbearbeitung @ Empa



Nanopartikel-Synthese @ Empa

Flamm-Synthese

(TiO_2 , SiO_2 , Y_2O_3 , ... / 0.1 – 1 kg/day)



Plasma-Synthese

(TiC , TiN_xC_y , Si , SiC , WC , ... / 0.01 – 0.5 kg/day)



Vision: „Center of Advanced Manufacturing“

Phase 1: „Coating Competence Centre“ (im Aufbau)

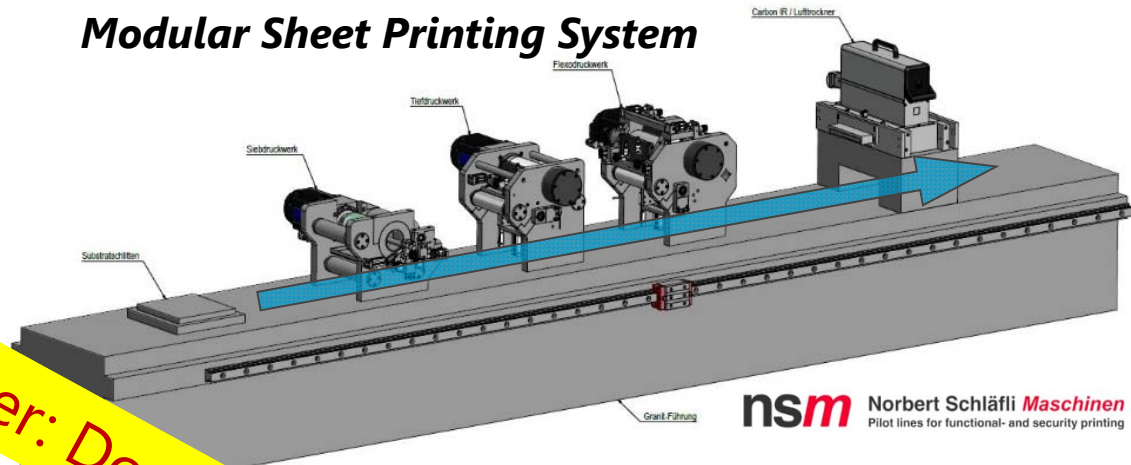
INGENIA

(High-Power Impulse Magnetron Sputtering)



oerlikon
balzers

Modular Sheet Printing System

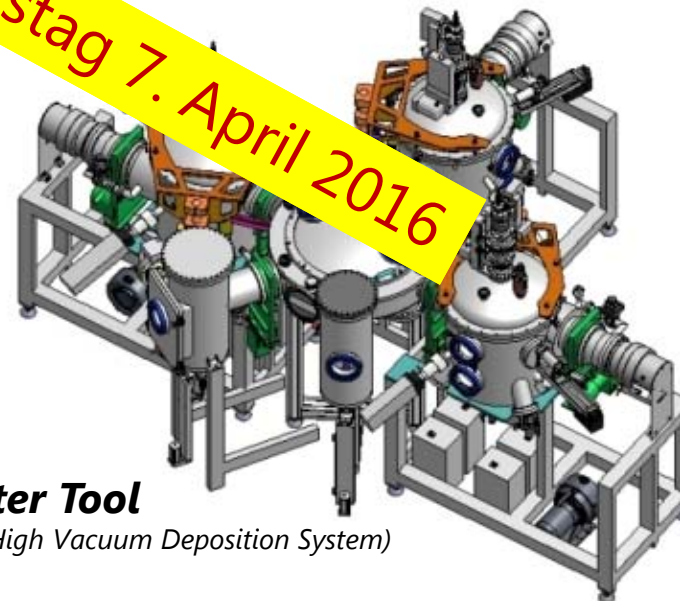


nsm Norbert Schläfli *Maschinen*
Pilot lines for functional- and security printing

Eröffnungsfeier: Donnerstag 7. April 2016

Cluster Tool

(Ultra-High Vacuum Deposition System)



Vision: „Center of Advanced Manufacturing“

Phase 2: Integration Laser Zentrum und SLM Anlage

Selective Laser Melting Anlage



Excimer Laser Anlage



Fertigung im 3D-Druck

Fazit

- Der 3D-Druck von metallischen Werkstücken ist heute noch im Stadium der **Manufaktur!**
- Der Weg von der Manufaktur zur industriellen Fertigungsmethode geht einzig über „**bessere Drucker**“!
- Die heutigen Rohmaterialien (Pulver) sind für den 3d-Druck **nicht optimiert!**
- Die Integration des 3D-Drucks in industrielle Fertigungsprozesse erfordert **neue Businessmodelle!**
- Einzelstückfertigung in Rahmen von Industrie 4.0 ist in vielen Bereichen (z.B. Produkthaftung, Zertifizierung, ...) **rechtliches Neuland!**



Danke
für Ihre
Aufmerksamkeit