

Additive Manufacturing: 4. industrielle Revolution

TEXT: Rainer Klose / BILD: Trumpf GmbH + Co. KG

Die nächste industrielle Revolution steht vor der Tür: Sie nennt sich «Industrie 4.0» und soll die Produktionsmethoden in den Industrieländern tiefgreifend verändern. Der Entwicklungssprung wird ähnlich dramatisch sein wie bei den drei industriellen Revolutionen der Vergangenheit: der Mechanisierung mit Wasser- und Dampfkraft im 19. Jahrhundert – der Massenproduktion an Henry Fords Fließband ab 1915 – dem Einsatz von Elektronik und IT ab den 1970er-Jahren.

«Industrie 4.0» wird nach Einschätzung von Experten die Verschmelzung von virtuellen Daten mit realen Produktionsmaschinen sein. In einer so entstehenden «intelligenten Fabrik» rücken Kunde und Lieferant näher zusammen: Produktionsaufträge werden vom Kunden direkt an die Maschine geschickt, die Produktionsdaten in Echtzeit an den Vertriebspartner übermittelt. Die Produktion wird schlanker und schneller.

Additive Manufacturing – 3-D-Druck in Metall

Ein wesentlicher Baustein zur Verwirklichung von «Industrie 4.0» sind Maschinen, die Bauteile schneller, flexibler und präziser fertigen können als bisher. Weniger Prototypenbau, weniger Gusswerkzeuge, weniger Nachbearbeitung. Aus Daten müssen in Zukunft schneller Bauteile und Produkte werden.

Eine Vorstellung von dieser Art Produktion liefern 3-D-Drucker. Die ersten dieser Apparate wurden in den 1980er-Jahren erfunden; heute gibt es bereits Hobbygeräte für unter 700 Franken zu kaufen. Doch bislang produzierten 3-D-Drucker meist Objekte aus Kunststoff. Entsprechend begrenzt sind die mechanischen Eigenschaften und die Temperaturstabilität dieser Objekte, weshalb sie überwiegend zu Anschauungszwecken, also als Modelle verwendet werden. Deshalb wird der 3-D-Druck oft mit dem Synonym «Rapid Prototyping» umschrieben. Für die nächste industrielle Revolution muss die Technik des 3-D-Drucks einen Schritt weiter gehen: vom Rapid Prototyping zum «Advanced Manufacturing», dem Herstellen von dauerhaften, funktionellen Bauteilen mit definierten mechanischen und thermischen Eigenschaften: Produkte aus Metallen oder Keramiken.

Die Schweiz wird den Zug nicht verpassen

In der strategischen Planung des ETH-Rats für den ETH-Bereich für 2017 bis 2020 sind im Rahmen des Fokusbereichs «Fortgeschrittene Produktionsverfahren» Investitionen von insgesamt 10 Millionen Franken in Immobilien, neue Professuren und Technologieplattformen vorgesehen. Als Koordinator für diesen Fokusbereich hat der Rat Empa-Direktor Gian-Luca Bona beauftragt. Er soll die interdisziplinären Forschungsaktivitäten von ETH Zürich, EPF Lausanne, dem PSI und der Empa miteinander abstimmen.

In diesem Heft stellen wir die Herausforderungen vor, die es bei der Entwicklung von 3-D-Druck von Metallteilen zu meistern gilt – und die bedeutenden Chancen, die diese Technologie eröffnet. Die Empa arbeitet mit drei Forschungsgruppen an diesem Thema. Eine Gruppe untersucht die optimierte Anwendung von Lasern; eine erforscht neuartige Legierungen, die mit dieser Technologie erstmals greifbar werden. Eine weitere Abteilung nutzt Additive Manufacturing zum Bau neuer geometrischer Formen, die mit herkömmlichen Herstellungsmethoden bisher nicht möglich waren.

3-D-Druck mit Laser und Metallpulver

Beim Metallaufbau mittels Laser (Laser direct Metal Deposition, LMD) verschmelzen Metallpartikel im Fokusbereich eines Laserstrahls. Ein Werkstück aus massivem Metall entsteht, ohne Gussform und Fräsmaschinen, nur aus CAD-Daten.

Suche nach der Schmelzformel

3-D-Metalldruck ist doch ganz einfach – könnte man meinen. Dem ist nicht so. Denn viele Details sind noch völlig unbekannt. Patrik Hoffmann ist dem Geheimnis auf der Spur.

TEXT: Amanda Arroyo / BILDER: Empa



Eigentlich ist es doch nur eine einzige, lange Schweissnaht.» Patrik Hoffmann spricht vom Additive Manufacturing, dem Verschmelzen von Metallpulver mit einem Laser. Und vom Schweißen versteht der Forscher einiges. Patrik Hoffmann ist Leiter der Empa-Abteilung «Advanced Materials Processing» in Thun und lehrt nebenbei an der EPFL schon seit fast 20 Jahren das Fach «Laserbearbeitung». Er und sieben Mitarbeiter aus seiner Abteilung haben sich zum Ziel gesetzt, das Additive Manufacturing verlässlicher zu machen.

«Bei der Laser-Material-Wechselwirkung weiss noch keiner, was wirklich passiert», sagt selbst der Experte. Man erkennt beim genauen Hinsehen, nachdem das Werkstück fertig aufgebaut ist, dass da Material geschmolzen ist, und man kann sich auch vorstellen, dass das Volumen des ursprünglich losen Pulvers kleiner geworden ist. Doch wie viel vom Material verdampft und wegspritzt, ist noch nicht ganz klar. Hoffmann ist überzeugt, dass es dafür eine Formel gibt. Und genau diese auszutüfteln ist schwierig, denn der Prozess ist hochdynamisch und nicht linear.

Um den Einfluss der Prozessparameter wie Laserleistung, Bewegungsgeschwindigkeit des Laserstrahls oder Fokusedurchmesser besser verstehen zu können, nutzt Hoffmann eine an der Empa selbst konstruierte Forschungslaseranlage. In seiner Anlage kann er mit Hilfe von Kameras und Mikrofonen den Verlauf des Laserschweissens nachvollziehen.

Laserbearbeitung: Eine sprunghafte Sache

Laserbearbeitung ist eine verzwickte und recht sprunghafte Sache: Wenn jemand aus Hoffmanns Forschungsteam den Laser mit einer gewissen Leistung auf eine Goldoberfläche fokussiert, passiert zunächst einmal nichts. Das Licht wird reflektiert, nur ein Prozent der eingestrahlenen Energie fliesst ins Material. «Wenn ich da reingucke, werde ich schon blind, bevor das Gold überhaupt warm wird», sagt Hoffmann. Regelt man die Laserleistung hoch, so kommt man an einen Punkt, an welchem das Gold so warm wird, dass es zu schmelzen beginnt. Im geschmolzenen Zustand reflektiert Gold viel weniger des Lichts, und plötzlich nimmt das Mate-



1 Eine Kette, fabriziert im Additive-Manufacturing-Verfahren (AM): Die Kettenglieder sind ineinander gefügt und dennoch in einem Stück gefertigt. Design und Herstellung: La Manufacture CSC.

2 Patrik Hoffmann an der selbst konstruierten Forschungslaseranlage, an deren Gehäuse sich Kameras, Mikrofone und Massenspektrometer anschliessen lassen. So kann Hoffmann die Wechselwirkung von Laser und Metallpulver genau analysieren.

3 Ein Uhrengehäuse, produziert im AM-Verfahren. Links der Rohling, mit einer Stützkonstruktion unter dem Ring, die später herausgebrochen wird. Rechts das fertig bearbeitete Werkstück. Design und Herstellung: La Manufacture CSC.

rial so viel Energie auf, dass ein Teil davon gleich verdampft. Das kann man nicht verhindern. Je mehr des Goldes jedoch verdampft wird, umso dichter wird der Dampf über dem Werkstück, und die Laserstrahlung kann nicht mehr durchdringen. Dieser Abschirmeffekt durch Dampf wird Shielding genannt.

Hoffmann und sein Team messen mit Hochgeschwindigkeitskameras, wie der Metalldampf entweicht und wo Tröpfchen wegfliegen, und sie untersuchen die Geschwindigkeit der kleinen Druckwelle, die vom Laser erzeugt wird. Daneben wird der Prozess auch akustisch verfolgt. Dabei werden drei Mikrofone am Prüfkörper befestigt, welche dann die Signale des Schweissens erfassen. Wenn beim Schweißen etwas schief läuft, kann man das hören.

Zusätzlich vermessen die Empa Wissenschaftler das Schmelzbad, das der Laser im Metall erzeugt. Während der Schmelzbad-durchmesser sich recht einfach optisch messen lässt, muss für die Ermittlung der Schmelzbadtiefe der Prüfkörper im Nachhinein aufgeschnitten werden.

Im Schnittbild eines Prüfkörpers, der im Additive Manufacturing (AM) entstanden ist, erkennt man nicht nur das horizontale Wachstum jeder aufgebauten Metallschicht. Darüber hinaus lässt sich auch noch senkrechtes Kristallwachstum durch die Schichten hindurch beobachten. «Eigentlich ist das nicht erstaunlich, wenn man etwas von Me-

tallurgie versteht», sagt Hoffmann. Die einzelnen Schichten werden bei solch einem Fertigungsprozess bis zu zehnmal aufgeschmolzen. So können Kristalle entstehen, die sich über mehrere Schichten erstrecken.

Ein weitere Herausforderung stellt sich: Weil Metall Wärme bekanntlich sehr gut ableiten kann, erkaltet das geschmolzene Material sehr schnell, was man einerseits für die Herstellung neuer Materialien nutzt, etwa für pulververstärkte ODS-Legierungen (ODS= oxide dispersion strengthened). Die schnellen Abkühlraten können andererseits auch zu Spannungen und Rissen im Material führen und produzierte Werkstücke unbrauchbar machen.

Vom Kompetenzzentrum zur vollständigen Kontrolle

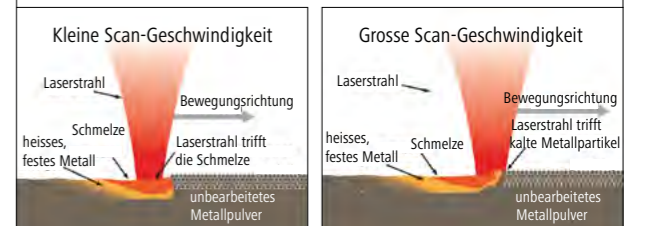
Um dieses Puzzle von Verständnis des Prozesses, von den Eigenschaften des Materials und den Eigenspannungen lösen zu können, will Hoffmann nun verschiedenste Fachkräfte hinzuziehen. Damit alle Seiten abgedeckt sind, benötigt er Physiker, Festkörperchemiker, Mechaniker, Akustiker, Metallurgen, Spektroskopie-Spezialisten, Elektroniker und Experten für Computersimulation.

Fernziel der Forschungsarbeit

ist eine so genannte Closed-Loop-Prozesskontrolle, bei welcher sämtliche Vorgänge beim Laserschweißen beziehungsweise Additive Manufacturing in Echtzeit überwacht werden. Wenn irgendetwas falsch läuft, muss die Steuerung den Laser sofort automatisch korrigieren, damit das gewünschte Bauteil ohne innere Materialfehler, ohne Spannungen und Risse aus dem Herstellungsprozess herauskommt. Bis zur Traumfabrik, die virtuelle Konstruktionsdaten schluckt und perfekt geformte, einbaufertige Metallteile ausspuckt, seien für die internationale Forschergemeinde noch einige Hürden zu meistern, meint Patrik Hoffmann. Mit seinem Team will er dazu beitragen, dass die Vision einer 3-D-Druck-Fabrik am Ende wahr wird. //

Schnell? Oder doch lieber langsam?

Beim Pulverbett-Verfahren (SLM) kommt es darauf an, langsam genug zu produzieren. Links: Der Laser erzeugt einen Pool geschmolzenen Metalls, der kontrolliert erstarrt. Rechts: Der Laser trifft auf Metallkörner. Manche verdampfen, andere schmelzen unvollständig. Poren und Einschlüsse im Werkstück sind die Folge.

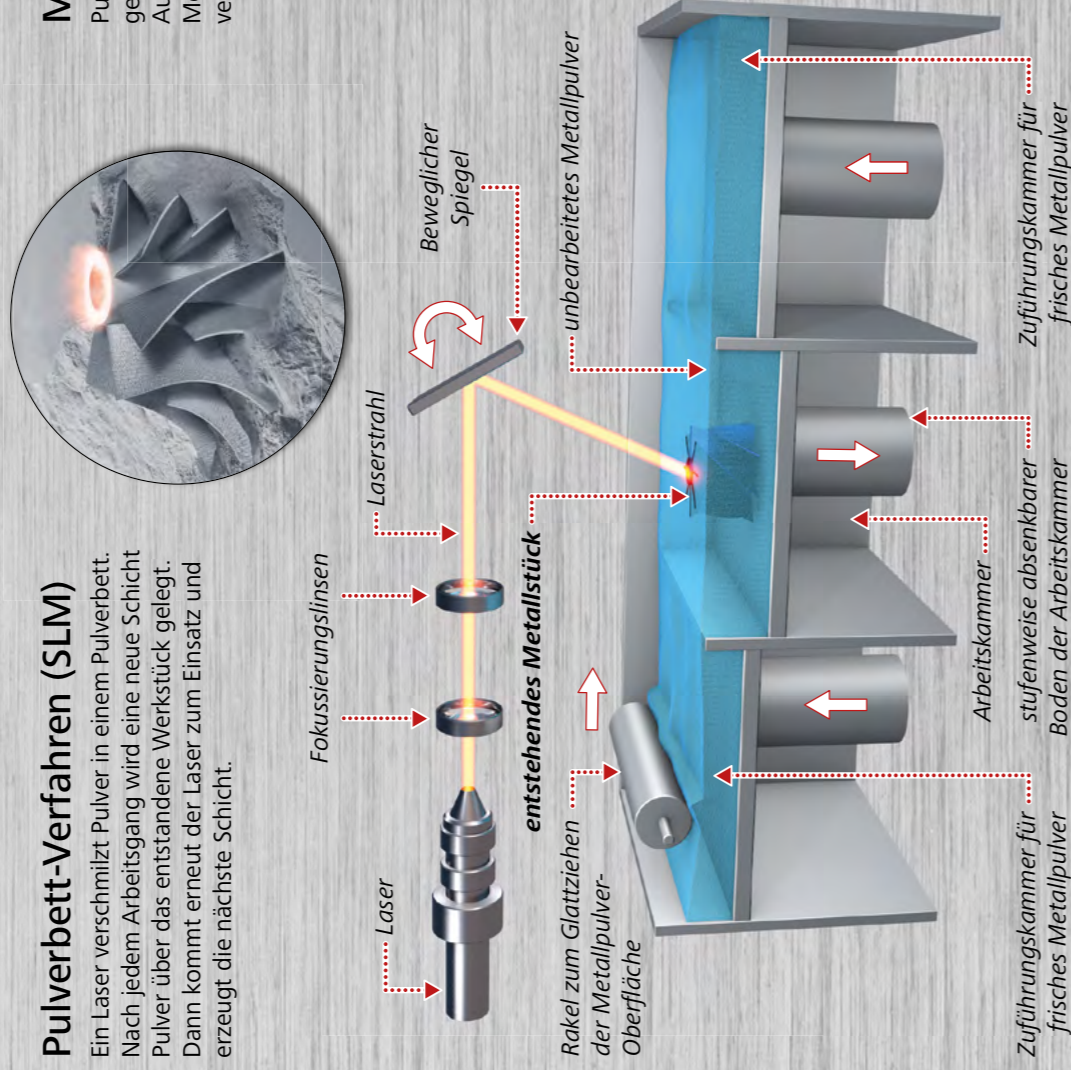


Additive Manufacturing

Die ersten 3-D-Druck-Verfahren wurden in den 1980er Jahren entwickelt. Als RapidPrototyping ist der 3-D-Druck heute eine etablierte Technologie, um aus Kunststoff sehr schnell und sehr flexibel Anschauungsmodelle zu fertigen, so z.B. in der Architektur, im Maschinenbau oder in der Chirurgie. In Zukunft sollen mit Hilfe des 3-D-Drucks nicht nur Modelle, sondern echte, funktionsfähige Bauteile mit ausreichenden mechanischen Eigenschaften und genügender Hitzebeständigkeit – als Einzelstücke und in Kleinserien hergestellt werden. Das geht nur mit Metallen oder Keramiken. Derzeit sind zwei Methoden bekannt, um mit Hilfe von Metallpulver und Laserlicht metallische Objekte zu formen.

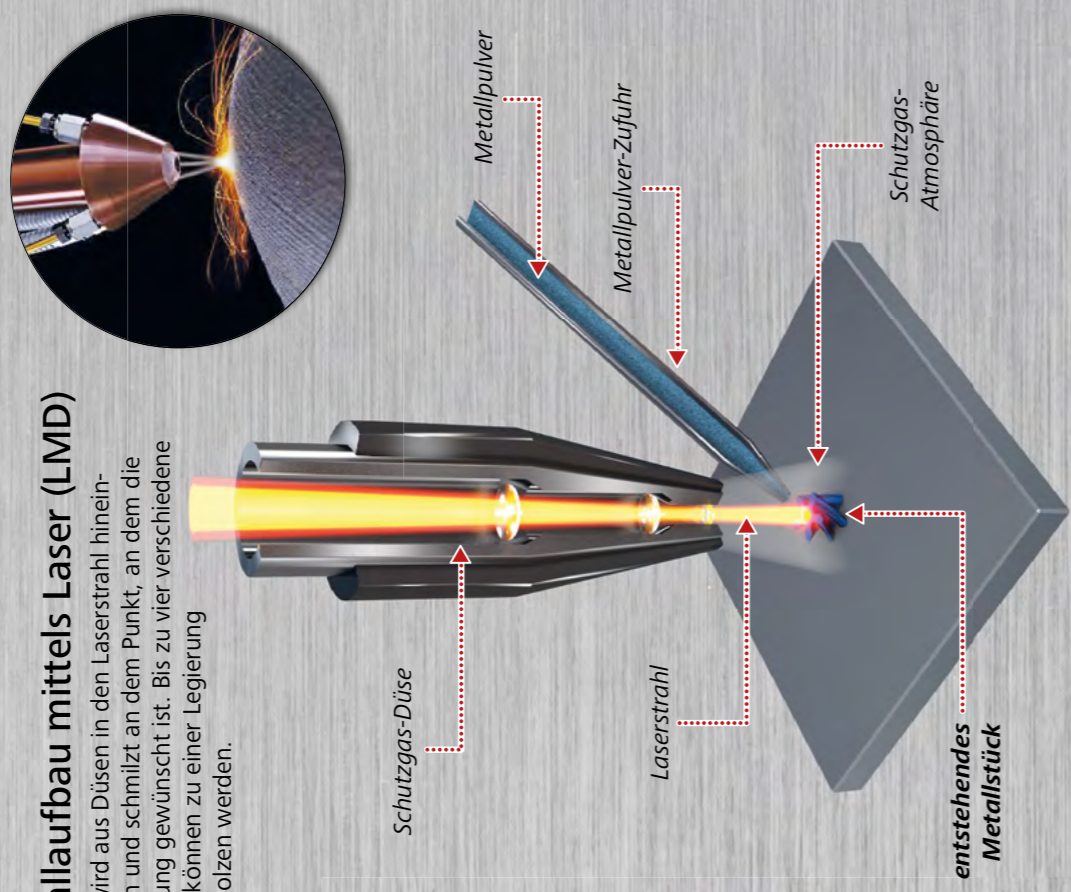
Pulverbett-Verfahren (SLM)

Ein Laser verschmilzt Pulver in einem Pulverbett. Nach jedem Arbeitsgang wird eine neue Schicht Pulver über das entstandene Werkstück gelegt. Dann kommt erneut der Laser zum Einsatz und erzeugt die nächste Schicht.



Metallaufbau mittels Laser (LMD)

Pulver wird aus Düsen in den Laserstrahl hineingeblasen und schmilzt an dem Punkt, an dem die Auftragung gewünscht ist. Bis zu vier verschiedene Metalle können zu einer Legierung verschmolzen werden.



Vom Labor zur Produktion

Um aus 3-D-Laserdruck eine völlig neue Industrie zu formen, braucht es mehr als nur spezielle Maschinen. Vieles muss neu erfunden werden. Neue Möglichkeiten im Maschinenbau, in der Hochtemperaturtechnik, im Design und in der Ausrichtung von Unternehmen tun sich auf. Die eidgenössischen Hochschulen und Institute bearbeiten viele der Fragestellungen gleichzeitig. Die Forschungsaktivitäten innerhalb des ETH-Bereichs im Überblick.

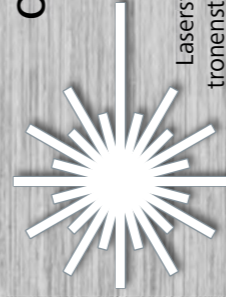
Pulver funktionalisieren

Neue, rieselfähige Metallpulver für SLM und LMD. (Empa)



Optimiertes Lasern

Optimierte Steuerung von Laserstrahlen oder Elektronenstrahlen ermöglicht bessere Materialqualität und zugleich höhere Fertigungsgeschwindigkeit. (Empa, EPF Lausanne, Inspire AG)



Mikrostruktur des gedruckten Bauteils

Welche Legierungen entstehen? Lassen sich neuartige Legierungen mit Materialgradienten formen? Neuartige Composite-Materialien mit bisher unerreichter Härte, Zähigkeit oder Temperaturbeständigkeit? (Empa, EPF Lausanne, PSI, Inspire AG)



Äussere Form des gedruckten Bauteils

Wie ist die Oberfläche? Wie ist die Masshaltigkeit? Sind im Bauteil innere Eigenspannungen entstanden – wie lassen sich die verhindern? Qualitätskontrolle mittels zerstörungsfreier Prüfverfahren. (Empa, ETH Zürich, Inspire AG)



Post Processing

Wie muss das Bauteil nachbearbeitet werden, bevor es eingebaut werden kann? (EPF Lausanne)



Recycling
Kann das Metallgranulat aus dem SLM-Verfahren erneut verwendet werden? Was ist zur Aufbereitung nötig? (Empa)

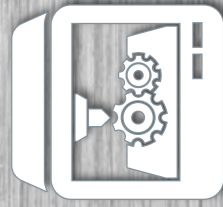
Design

Ingenieure können Bauteile konstruieren, deren Geometrie in Fräsverfahren nicht zu verwirklichen wäre. Neue Leichtbaukonzepte, neue Montagestrategien, neue Bauteilkombinationen werden möglich. (ETH Zürich, Inspire AG)



Neue 3-D-Druckmaschinen

Neue Konzepte für 3D-Fertigungsmaschinen und Maschinenparks. Von der Labor-Manufaktur zur Massenproduktion «on demand». (ETH Zürich, Inspire AG)



Neue Geschäftsmodelle für «Industrie 4.0»

Businessmodell für 3D-Produktion «on demand». Juristische Lösungen für die Produkthaftung und Zertifizierung bei 3-D-Einzelstücken und Kleinserien. (ETH Zürich)



Unmögliche Stoffe werden wahr

Vierorten wird versucht, bestehende Metallpulver optimal zu verarbeiten, also die Druckmaschine an das Pulver anzupassen. Die Empa geht einen Schritt weiter: Hier suchen Forscher nach neuen, besser für 3-D-Druck passenden Legierungen. Und sie versuchen, neuartige Composite-Materialien zu schaffen, die es ohne 3-D-Druck gar nicht geben kann.

TEXT: Rainer Klose / BILDER: Empa

Die letzte Novemberwoche 2015 war für Christian Leinenbach und Christoph Kenel ein lang ersehnter Moment: Die 3-D-Druckmaschine vom Typ M2 cusing steht fertig aufgebaut im neuen Laboratorium auf dem Empa-Campus und ist angeschlossen. Ab 2016 sind eigene Versuche mit Metalllegierungen, Lasergeschwindigkeiten und Linienabständen möglich. Die Maschine des deutschen Herstellers Concept Laser kann mit Hilfe eines Faserlasers komplexe 3-D-Bauteile aus Metall erzeugen, die bis zu 25 cm in jeder Dimension messen. «Die meisten unserer Prüfkörper sind jedoch deutlich kleiner», sagt Christian Leinenbach. «Wir wollen einerseits neue, an den Fertigungsprozess angepasste Werkstoffe entwickeln und andererseits erforschen, wie man mit Hilfe von Additive Manufacturing völlig neue Materialien erschaffen kann.»

Suche abseits der ausgetretenen Pfade

Die Forschung an 3-D-Druck mit Metall boomt; ständig finden rund um den Globus Konferenzen zu dem Thema statt. Leinenbach verfolgt die Veröffentlichungen in der Szene und hat eine gewisse Schiefelage entdeckt: Von über 200 Beiträgen, die an verschiedenen internationalen Konferenzen in den letzten beiden Jahren vorgestellt wurden, beschäftigen sich erstaunliche 75 Prozent mit nur drei Materialklassen: der berühmten Titanlegierung Ti-6Al-4V, kommerziellen Nickel-Chrom-Legierungen und rostfreiem Stahl. «Mir ist ganz klar, warum so viel auf genau diesen Legierungen geforscht wird», sagt Leinenbach. «Sie sind von hohem kommerziellem Interesse für Luft- und Raumfahrt, für die Rüstungsindustrie und im Offshore-Bereich. Viele für die Schweizer Industrie interessante Werkstoffe wie Werkzeugstähle oder Edelmetalle wurden bislang kaum oder gar nicht untersucht.» Auf der Strecke bleibt auch oft das grundlegende Verständnis für die Wechselwirkung von Material und Laser. «Mit einem komplexen System aus drei und mehr Metallen und etlichen Phasen kann ich nur sehr schwer funktionstüchtige Komponenten in einem Versuch-und-Irrtum-Verfahren entwickeln. Dafür gibt es zu viele Variablen», kritisiert der Metall-Spezialist.

Grundlagenforschung mit Titanaluminiden

Leinenbach hat sich mit seinem Doktoranden Christoph Kenel im Rahmen eines EU-Projekts daher Legierungen aus Titan und Aluminium vorgenommen, die aufgrund ihrer geringen Dichte für Teile etwa in Flugzeugtriebwerken interessant, allerdings sehr schwer zu verarbeiten sind. Allein diese beiden Metalle bilden bei verschiedenen Mischungsverhältnissen und Temperaturen mehr als ein Dutzend verschiedener Phasen aus, von denen nur eine Mischung aus zwei Phasen für die technische Nutzung geeignet ist. Dieses Phasensystem ist schon lange sorgfältig erforscht – und genau auf diesem bekannten Terrain lohnt es sich, mit Hilfe von AM neue Methoden der Verarbeitung zu ergründen.

Lange bevor die Laseranlage an der Empa installiert wurde, begannen die Forscher bereits mit ihren Grundlagenexperimenten. Ein Experiment betraf den Einfluss der Abkühlrate der Schmelze auf die Phasenbildung. Während klassische Verfahren wie Gießen mit Raten von maximal mehreren 10 Grad pro Sekunde gut verstanden sind, sind die Zustände beim Laserschmelzen bisher weitgehend unerforscht. Im sehr kleinen Schmelzpool, den der Laser erzeugt, sind Abkühlraten von über 10 000 Grad pro Sekunde möglich, wodurch auf einmal Phasen bei Raumtemperatur stabil werden, die es dort üblicherweise nicht gibt.



Christian Leinenbach am neu installierten 3-D-Laserdrucker.

Leinenbach und Kenel untersuchten Titanaluminide mit einer speziellen Versuchsanordnung in verschiedenen Zusammensetzungen bei Abkühlraten bis zu 15 000 Grad pro Sekunde. Die Ergebnisse verglichen sie mit Simulationsrechnungen. Damit wurde ein bisher unbekanntes Gebiet der Metallurgie gewissermaßen kartografiert. Mit diesen Erkenntnissen konnten die Empa-Forscher eine neue Legierung identifizieren, die sich deutlich besser für die Verarbeitung im 3-D-Laserdrucker eignet als die derzeit verfügbaren Titanaluminid-Werkstoffe.

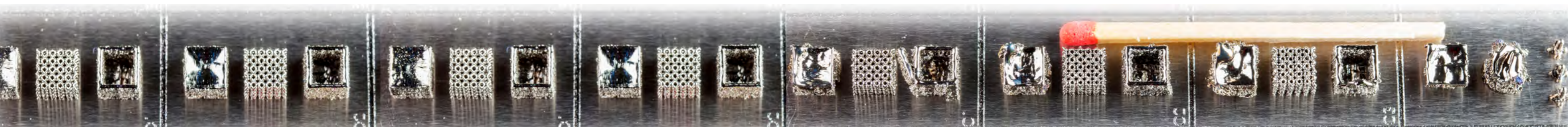
Traummaterialien für Schleifmaschinen

Ein erstes greifbares Ergebnis der hohen Abkühlraten im 3-D-Drucker könnten neuartige Verbundwerkstoffe aus Metall und Diamant sein. Gesinterte Diamantwerkzeuge mit einfachen Geometrien werden bereits heute zum Schleifen von Keramikbauteilen verwendet. Die Herstellung von Metall-Diamant-Verbunden auf schmelzmetallurgischem Weg ist jedoch sehr schwierig. Bringt man Diamanten mit flüssigen Metallen in Kontakt, so lösen sie sich meistens auf, oder sie schwimmen aufgrund ihrer geringen Dichte an die Oberfläche. Diamanten bestehen zudem aus reinem Kohlenstoff und verbrennen bei Temperaturen oberhalb 400 Grad an der Luft. Zusammen mit

Partnern von der ETH und Inspire gelang Leinenbach und Kenel im 3-D-Drucker die Herstellung von Metall-Diamant-Kompositen: Dafür mischten sie kleine Industriediamanten mit einem Pulver aus einer Kupfer-Zinn-Titan-Legierung. Nach dem Prozess blieben die Diamanten intakt und sind zudem mit einer dünnen Titancarbid-Schicht überzogen, die sie chemisch in der Metallmatrix verankert. Auf diesem Weg sollen in Zukunft Werkzeuge mit komplexerer Geometrie hergestellt werden, wie es sie heute noch nicht gibt.

Doch auch hier gilt: Die bisher bekannten Legierungen sind für eine Verarbeitung im 3-D-Drucker noch längst nicht optimal geeignet. Weitere Entwicklungen werden folgen. Die frisch aufgestellte 3-D-Druckanlage auf dem Empa-Campus wird also bald viel zu tun bekommen. //

Probekörper aus Titanaluminid mit eingebetteten Keramikpartikeln. Diese Legierung ist aufgrund ihrer geringen Dichte etwa für Flugzeugtriebwerke interessant, jedoch schwer zu verarbeiten. Die Probekörper zeigen, mit welchen Parametern der 3-D-Druck am besten funktioniert.





Pierangelo Gröning ist Mitglied des Direktoriums der Empa und koordiniert die Forschung zum Thema Additive Manufacturing. Im EmpaQuarterly erläutert er, wohin die Reise geht.

INTERVIEW: Rainer Klose / BILD: Empa

«Wir wollen Know-how für künftige Maschinen liefern»

Herr Gröning, welche Rolle spielt die Empa beim Thema Additive Manufacturing (AM)?

Advanced Manufacturing wurde vom ETH-Rat für die Periode 2017 bis 2020 zu einem strategischen Forschungsschwerpunkt erklärt. Additive Manufacturing – also der 3-D-Druck mit Metallen – stellt dabei eines von verschiedenen Elementen von Advanced Manufacturing dar, das generell neue, modernere Produktionstechniken umfasst. Sie sind für den Werkplatz Schweiz von grosser Bedeutung. Dort müssen wir gut sein, damit wir uns in Zukunft international behaupten können.

Auf welche der verschiedenen Bereiche, Materialien und AM-Verfahren konzentriert sich die Empa?

Als Materialforschungsinstitution sehen wir die grossen Herausforderungen in der Kombination von Metallen und Keramiken. Als Verfahren studieren wir zunächst Selective Laser Melting (SLM), Laser direct Metal Deposition (LDM) sowie Selective Laser Sintering (SLS).

Wird die Empa Kurse anbieten, in denen Fachkräfte Additive Manufacturing erlernen können?

Die Empa ist in erster Linie ein Forschungsinstitut. Zum einen wollen wir den Laserbearbeitungsprozess verstehen und zum anderen neue, für den 3-D-Druck optimierte Rohmaterialien entwickeln. Ziel der Forschung ist es, den 3-D-Druck von Metallen vom heutigen Stadium der «Manufaktur» in ein robustes und zuverlässiges industrielles Verfahren überzuführen. Mit der eigentlichen Verfahrenstechnik, also dem Betrieb von Anlagen oder der Konstruktion und Optimierung des Druckprozesses von Bauteilen, werden wir uns nicht befassen. Diese Aufgabe sehen wir gut bei den Schweizer Fachhochschulen oder Instituten wie dem ETH-Spinoff inspire aufgehoben. Dort ist auch die Ausbildung von Fachkräften in guten Händen.

Sie haben dennoch gerade einen 3-D-Laserdrucker an der Empa in Betrieb genommen. Was unternehmen Sie mit der Maschine?

Für unsere Forschung brauchen wir natürlich auch Anlagen, auf welchen wir die neu entwickelten Materialien unter Realbedingungen und bestmöglicher Prozessüberwachung verarbeiten können. Zum einen ist dies ein mit aufwendigem Prozess-Monitoring modifizierter kommerzieller 3-D-Drucker. Daneben werden wir eigene Forschungsapparaturen aufbauen, mit welchen wir die Laser-Material-Wechselwirkung und den Entstehungsprozess des Werkstücks und damit auch des Werkstoffes genau untersuchen und eines Tages kontrollieren können.

Es geht also um die Echtzeitsteuerung des Prozesses?

Genau. Wir wollen für zukünftige Maschinen Know-how liefern, mit dem sich der Laserbearbeitungsprozess regeln lässt.

Was ändert sich für Industrieunternehmen, wenn sie mit Additive Manufacturing beginnen?

Eine der Konsequenzen ist, dass das Qualitätsmanagement völlig neu organisiert werden muss: Heute produziert man im Serienbau eine Anzahl Teile, entnimmt Stichproben, testet sie und schliesst vom Ergebnis dieser Tests dann zurück auf die Güte des Herstellungsprozesses. Beim Additive Manufacturing erzeuge ich jedoch Einzelstücke oder nur sehr wenige Teile nacheinander. Das bedeutet aber, dass man vom ersten Produktionsmoment bis zur Fertigstellung des Werkstücks den kompletten Prozess überwachen muss, weil man hinterher keinen Test machen kann, ohne das Bauteil zu zerstören. Dem Kunden, der das Einzelstück kauft, muss der Hersteller die Produktionsprotokolle zur Verfügung stellen – nur dann kann er eine Garantie für das Produkt abgeben. Wir Forscher müssen für diese neue Produktionsweise die Grundlagen liefern. Wir müssen grundlegend verstehen lernen, wie ein solches Werkstück im Laserlicht entsteht, welche Fehler passieren, wie man sie erkennt und vermeidet.

Lärmschlucker aus dem Drucker

Schwingungen tilgen mit Hilfe von Kristallstrukturen? Das klingt wie Esoterik – ist es aber nicht. Zwei Empa-Forscher beweisen, dass es geht. Beim Bau der Testmodelle hilft der 3-D-Drucker.

TEXT: Rainer Klose / BILDER: Empa

Was sehen Sie da?» fragt Andrea Bergamini und lächelt. In den Händen hält er eine Sandwichkonstruktion aus zwei dünnen Aluminiumblechen, dazwischen steckt eine Gitterstruktur aus orange Röhrchen und weissen Verbindungsstücken. Es sieht aus wie eine sorgfältige, sehr ordentliche Bastelarbeit ohne tieferen Sinn. «Zwischen diesen Blechen steckt eine Diamantstruktur», sagt Bergamini – nun schaut man genauer hin. Tatsächlich: Wer im Chemieunterricht schon mal etwas vom Diamant gehört und ein Kristallmodell des Diamanten betrachtet hat, erkennt die Struktur wieder: Die weissen Verbindungsstücke im Modell sind Tetraeder – genau wie die Kohlenstoffatome im Diamanten. Nur: was soll das? Was soll ein Diamantenmodell im Sandwich von Alu-Blechen?

Auf den Spuren von Paul Scherrer

Hinter der sorgfältigen Bastelarbeit steckt eine gewagte Idee: Lassen sich die Eigenschaften eines Kristalls um mehrere Grössenordnungen hochskalieren und nutzbar machen? Vor genau 100 Jahren entwickelte der Schweizer Physiker Paul Scherrer zusammen mit seinem niederländischen Kollegen Peter Debye das noch heute gebräuchliche Debye-Scherrer-Verfahren: Mit Hilfe der Beugung von Röntgenstrahlen lässt sich so die Struktur von Kristallen bestimmen. Nun sind ja Röntgenstrahlen nichts anderes als elektromagnetische Wellen, die von den Kristallstrukturen abgelenkt werden. Manche der Wellen löschen sich gegenseitig aus, andere verstärken sich – es entsteht ein charakteristisches Fleckenmuster rund um den Kristall. Die einfallenden Röntgenwellen werden in kleine Wellenbündel zerteilt und in verschiedene Richtungen zurückgeworfen.

Das Eigenleben des Makro-Kristalls

Wenn man nun die Kristallstruktur milliardenfach vergrössert, könnte diese Struktur dann auch grössere Wellen zerteilen und ablenken? Etwa Schallwellen oder Vibrationen? Andrea Bergamini und sein Kollege Tommaso Delpero gingen dieser Frage nach. Sie bauten das Sandwich-Modell aus Aluminiumblechen und Teilen eines Molekülbaukastens und zum Vergleich ein zweites Modell,

Schwingung an. Die Forscher hatten in ihrem Makro-Kristall damit eine sogenannte Bandlücke entdeckt – eine Eigenschaft, die auch in der Halbleitertechnik eine zentrale Rolle spielt. Innerhalb dieser Bandlücke gibt der Makro-Kristall keine Schwingung weiter.

Präzise Modelle aus dem 3-D-Drucker

Mit dieser Erkenntnis lassen sich möglicherweise schwingungsdämmende Zwischendecken konstruieren, auf die vibrierende Maschinen montiert werden können. Auch andere Anwendungen im Maschinenbau sind denkbar. Nun müssen die Forscher jedoch weg vom selbst gebastelten Modell mit all seinen typischen Fehlern. Hier hilft der nun an der Empa verfügbare Metall-3-D-Drucker. Das Gerät kann Geometriedaten aus theoretischen Berechnungen direkt in eine Kristallstruktur verwandeln. Die makrokristalline Zwischenschicht wird dann fest und gleichmässig aus Metall gedruckt – die Ungenauigkeiten der Bastelarbeit sind ausgeräumt. Durch die gesteigerte Präzision sind auch verschiedene Strukturvarianten gut vergleichbar. Die Forschung am Schallschluck-Kristall nimmt damit Fahrt auf. //



Andrea Bergamini und Tommaso Delpero zeigen Modelle ihres dreidimensionalen, fononischen Kristalls.

in dem zwischen den Alublechen nur harter Schaum steckt. Dann spannten sie mit ihren Kollegen der Abteilung Akustik, Armin Zemp und Stephan Schönwald, die beiden Konstruktionen in ein Rüttelgerät und untersuchten, was herauskam. Tatsächlich: Wie erwartet, schluckte der Schaum die Vibrationen gleichmässig, die Kristallstruktur entwickelte dagegen ein richtiges Eigenleben: Manche Vibrationen wurden quasi zurückgespiegelt: Die Alu-Platte, an der gerüttelt wurde, bewegte sich stärker, doch auf der Unterseite der Sandwich-Struktur kam keine

Literatur: Delpero T., Schoenwald S., Zemp A. and Bergamini A. (2015). Structural engineering of three-dimensional phononic crystals. *Journal of Sound and Vibration*, 1–10. doi: 10.1016/j.jsv.2015.10.033