



Mit Licht gebaut

Der Aachener Dom in Miniatur:
Mit dem 3D-Druck lassen sich sehr
filigrane Strukturen erzeugen.

Dem 3D-Druck gehört die Zukunft. Aber noch lässt sich aus den dafür verwendeten Werkstoffen und den Fertigungsprozessen nicht das Optimum herausholen. Daher arbeiten Wissenschaftler des **Max-Planck-Instituts für Eisenforschung** in Düsseldorf gemeinsam mit Kollegen des Aachener **Fraunhofer-Instituts für Lasertechnik ILT** daran, dem neuen Verfahren aus den Kinderschuhen zu helfen.

TEXT **ALEXANDER STIRN**

Der gleißend helle Lichtpunkt tänzelt hin und her, von rechts nach links, von links nach rechts. Er sprüht Funken. Er macht Pausen, nur um sich kurz darauf erneut in Bewegung zu setzen. Er ist unermüdlich und äußerst produktiv.

Der gleißend helle Lichtpunkt, der in einem Labor in Aachen vor sich hin wirbelt, verfolgt ein großes Ziel: Er soll die Materialforschung umkrepeln. Sein Licht ist das Ergebnis eines leistungsstarken Lasers, seine Funken sind unvermeidliche Begleiterscheinungen. Sie sind Zeugen dafür, dass der Laser fortwährend Metallpulver schmilzt, das dann auf einer Oberfläche erstarrt – Punkt für Punkt, Schicht für Schicht, wie bei einer Legokonstruktion mit winzigen metallischen Bauklötzchen.

3D-Druck heißt das Verfahren, in das die Produktionstechniker große Hoffnungen setzen. Es verspricht hochkomplexe Bauteile zu vergleichsweise geringen Kosten, mit wenig Abfall und kurzen Wartezeiten. Trotz vieler Fortschritte ist die Methode, Wissenschaftler nennen

sie „additive Fertigung“, allerdings noch lange nicht ausgereizt. Vor allem aufseiten der Werkstoffe steckt der 3D-Druck in den Kinderschuhen.

„Die Materialien, die man heute bei der additiven Fertigung einsetzt, sind für dieses Verfahren einfach nicht optimiert“, sagt Eric Jäggle, Arbeitsgruppenleiter am Max-Planck-Institut für Eisenforschung in Düsseldorf. Weder sind die Stoffe dafür gemacht, sich beim Drucken besonders gutmütig zu verhalten, noch sind die Druckprozesse dafür optimiert, das Beste aus bestehenden Materialien herauszuholen. Die Werkstoffe nützen die neuartigen Herstellungsmethoden noch nicht völlig aus – obwohl gerade dadurch, wie die Vergangenheit zeigte, immense Fortschritte möglich wären.

„Als das Gießen einst entstanden ist, hat man die Werkstoffe auch angepasst und Legierungen entwickelt, die perfekt für das neue Verfahren geeignet waren“, sagt Andreas Weisheit, Arbeitsgruppenleiter am Fraunhofer-Institut für Lasertechnik ILT in Aachen. „Ihr volles Potenzial wird die additive Fertigung folglich nur ausspielen, wenn



auch dafür die passenden Werkstoffe entwickelt und gleichzeitig die Prozesse an die neuen Materialien angepasst werden.“ Die Forscher experimentieren dabei auch mit altbekannten Stoffen, die sie schrittweise verbessern.

Genau deshalb tänzelt der gleißend helle Lichtpunkt in immer wilderen Mustern übers Metall. Genau deshalb versprüht er Funken aus immer komplexeren Werkstoffen: Der Laser ist Teil einer Forschungsanlage, mit der Jägle und Weisheit gemeinsam untersuchen, welche Materialien sich für den 3D-Druck eignen und wie die Produktionsprozesse optimiert werden können, damit etwa die Eigenschaften bekannter Legierungen verbessert und Stähle durch die Laserbehandlung zum Beispiel besonders fest werden. AProLAM (Advanced Alloys and Process Design for Laser Additive Manufacturing of Metals) heißt das Forschungsvorhaben. Vor zwei Jahren ist das Kooperationsprojekt der beiden Institute gestartet, jetzt liegt der Zwischenbericht vor – mit vielversprechenden Ergebnissen.

Hoch sind allerdings auch die Erwartungen. 3D-Druck gilt als großer Hoffnungsträger im Produktionsprozess: Bisher müssen bei so gut wie jeder Fertigung zunächst spezielle Werkzeuge geschaffen werden, Gussformen etwa oder Pressfor-

men. „Das ist enorm teuer und rechnet sich erst, wenn sehr große Stückzahlen hergestellt werden müssen“, sagt Eric Jägle. Die additive Fertigung benötigt hingegen – abgesehen vom teuren 3D-Drucker – keine besonderen Werkzeuge.

VÖLLIG NEUE ANSÄTZE, UM STÄHLE ZU OPTIMIEREN

Auch ohne hohe Einmalkosten können somit Kleinserien oder Einzelteile gefertigt werden wie Prototypen, individuelle Gelenkprothesen oder Ersatzteile für Flugzeuge. Die könnten künftig direkt vor Ort aus dem Drucker kommen – ohne teure Logistik und ohne zeitraubenden Versand.

Zudem ermöglicht die additive Fertigung hochkomplexe Bauteile. „Normalerweise ist man fertigungstechnisch beschränkt: Man fräst ein Metall, man dreht es, man nimmt ein Blech, biegt und schweißt es, und wenn das nicht ausreicht, muss man die Teile zusammenfügen“, sagt Jägle. Beim 3D-Druck sind dagegen – wie bei einer Legokonstruktion – auch abenteuerliche Entwürfe mit Hohlräumen möglich. Zudem entstehen die oftmals filigranen Bauteile in einem Rutsch, ganz ohne Verschraubungen und ohne Abfälle durch Fräsen oder Drehmaschinen.

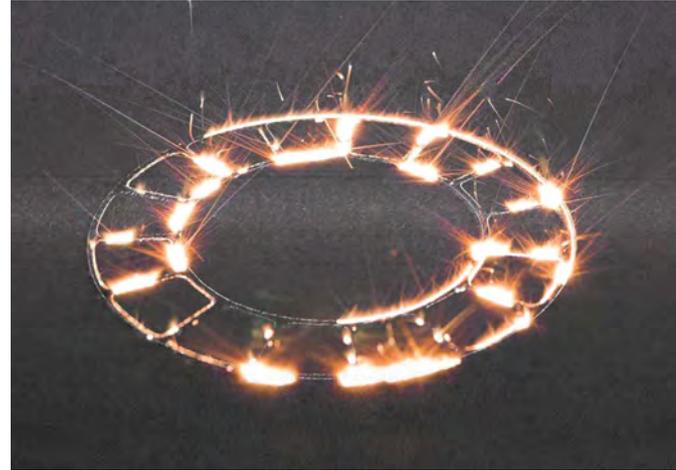
„Falls gewünscht, lassen sich komplette Baugruppen, die ursprünglich aus 20 oder 30 Einzelteilen bestanden, in einem Zug drucken“, meint Jägle. Für die Materialwissenschaft eröffnet der 3D-Druck zudem völlig neue Ansätze, um Stähle und andere Legierungen zu optimieren.

Zwei Druckverfahren stehen derzeit im Fokus. Beide verwenden Laser, beide verwenden Metallpulver. Eric Jägle holt ein Röhrchen mit einer grauen Substanz vom Fenstersims und schüttelt es leicht. Das Pulver ist so fein, dass es in seinem Behälter hin und her zu schwappen scheint. Lediglich 20 bis 40 Mikrometer (tausendstel Millimeter) messen die einzelnen Partikel, etwa ein Fünftel des Durchmessers eines menschlichen Haares.

Derart feines Pulver wird vor allem für die erste der beiden Methoden benötigt. Beim selektiven Laserschmelzen (Selective Laser Melting, kurz SLM) verteilt ein Schieber eine hauchdünne, nur 50 bis 100 Mikrometer starke Pulverschicht auf einer Trägerplatte. Ein Laserstrahl, der sich über Spiegel steuern lässt, wird darauf abgefeuert. Er schreibt Konturen in die pulvrige Schicht, schraffiert Flächen, belichtet einzelne Punkte. Wo er auftrifft, schmilzt das Metall.

Links Forscher des Aachener Fraunhofer-Instituts für Lasertechnik ILT beobachten den Prozess des selektiven Laserschmelzens. Dabei formt ein Laserstrahl, der als heller Fleck zu erkennen ist, Strukturen aus sehr feinem Metallpulver, das zuvor auf einem Träger verteilt wurde.

Rechts Um zwei Verfahren des 3D-Metall-drucks geht es im AProLAM-Projekt: das Laserauftragschweißen (links), bei dem Metallpulver in den Laserfokus auf einer Metallplatte gesprüht wird, und das selektive Laserschmelzen.



Kurze Zeit später erstarrt es wieder und verbindet sich mit der darunterliegenden Schicht. Ist eine Ebene gedruckt, wird die Platte um 50 bis 100 Mikrometer abgesenkt, der Schieber verteilt die nächste Pulverschicht, der Laser macht sich erneut an die Arbeit. Hunderte oder Tausende Schichten entstehen. Sie sind so fein, dass sie später, im fertigen Produkt, gar nicht mehr auffallen.

Das andere Verfahren, welches die AProLAM-Forscher als Erstes angepackt haben, ist etwas grober. Es heißt Laserauftragschweißen (oder Laser Metal Deposition, LMD), erzeugt dickere Metallklötzchen als der SLM-Prozess und verbirgt sich in Aachen hinter schweren, blickdichten Schiebetüren. Ist es in Betrieb, dann verwehrt eine rote Warnleuchte den Eintritt. Markus Benjamin Wilms, Mitarbeiter des AProLAM-Projekts am ILT, schiebt die Tür zur Seite. Dahinter kommt eine senkrecht montierte „Laserkanone“ zum Vorschein – nicht so schick und nicht so glänzend, wie sie Goldfinger oder andere James-Bond-Bösewichte verwenden, aber ähnlich leistungsstark.

Gelbe Kabel mit einem Lichtleiter, fast so dick wie ein Gartenschlauch, führen zur eigentlichen Laserquelle, einem schrankgroßen Kasten. Dort entsteht infrarotes – und damit für das menschl-

che Auge unsichtbares – Laserlicht mit einer Leistung von bis zu zwei Kilowatt. Es wird am anderen Ende des gelben Kabels so fokussiert, dass der Strahl mit maximaler Intensität auf eine Metallplatte trifft. Das Material wird flüssig und beginnt gleißend hell zu leuchten.

METALL-ZUSAMMENSETZUNG UND PROZESS IM WECHSELSPIEL

„Wir wollen das Metall allerdings nicht nur schmelzen, wir wollen auch etwas aufbauen“, sagt Wilms. In der Spitze der vermeintlichen Laserkanone, um den Strahl gruppiert, sitzen daher drei Düsen. Angetrieben vom Edelgas Argon schleudern sie Metallpulver in den fokussierten Laserstrahl – und damit in das kleine Schmelzbad auf der Oberfläche. Das Pulver schmilzt, versprüht den ein oder anderen Funken und erstarrt schlagartig, sobald der tänzelnde Laser weiterzieht. Übrig bleibt ein fest verschweißtes Legoklötzchen.

In der Vergangenheit, vor dem Start des AProLAM-Projekts, haben Materialforscher vor allem versucht, die Bedingungen des Laserprozesses zu optimieren, sodass mit altbewährten Legierungen brauchbare Produkte ohne Poren und ohne Risse entstanden. Oder sie haben sich Gedanken gemacht, welche

neuen Werkstoffe besonders gut für den 3D-Druck geeignet sein könnten.

Für Eric Jäggle sind die beiden Ansätze untrennbar miteinander verbunden. „Erst das Wechselspiel aus der Zusammensetzung von Metallen und aus einem ganz bestimmten Prozessweg führt zu Mikrostrukturen mit den von uns gewünschten Eigenschaften“, sagt der Max-Planck-Forscher.

Egal ob Festigkeit, Zähigkeit oder Widerstandskraft gegen Risse und Korrosion – nicht nur die physikalischen Eigenschaften der einzelnen Bestandteile einer Legierung sind entscheidend, sondern auch die Art und Weise, wie diese nach dem Erstarren räumlich angeordnet sind. „Mit der additiven Fertigung haben wir nun einen neuen, interessanten Prozess – und damit die Chance, völlig neue Eigenschaften zu erzeugen“, sagt Jäggle.

Da sind etwa die sogenannten Maraging-Stähle – ein Kunstwort aus „Martensit“, dem Namen der Mikrostruktur, und „Aging“, dem englischen Begriff für Alterung. Solche Stähle, die Eric Jäggle und seine Kollegen für den 3D-Druck optimieren und weiterentwickeln, enthalten neben Eisen unter anderem Aluminium und Titan. Beide Metalle können winzige Ausscheidungen bilden. >

Diese Ausscheidungen verhindern, dass sich Versetzungen im Gefüge des Stahls frei bewegen können. Das Material verformt sich nicht so leicht, es wird deutlich fester. Allerdings: Um die Ausscheidungen zu erzeugen, ist normalerweise ein großer Aufwand nötig. Das Material muss zunächst stark erhitzt werden, damit sich die fremden Stoffe lösen. Dann wird es abgeschreckt und zum Schluss bei hohen Temperaturen für längere Zeit gehärtet, sodass sich die Ausscheidungen bilden können.

„Interessanterweise finden sich all diese Schritte auch bei der additiven

Fertigung“, sagt Eric Jägler. Dort heizt ein Laser das Material zunächst stark auf. Das Schmelzbad ist allerdings winzig, kleiner als die Spitze einer Stecknadel. Deshalb kühlt es umgehend wieder ab, sobald sich der Laser zum nächsten Punkt bewegt. Kommt er zurück und drückt haarscharf daneben eine Nachbarreihe, wird das ursprüngliche Klötzchen nochmals erhitzt. Der Effekt wiederholt sich bei der übernächsten Reihe, fällt aber etwas schwächer aus. Mit zunehmender Entfernung werden die Temperaturspitzen kleiner und kleiner.

Wird hingegen direkt über dem Klötzchen die nächste Lage aufgebracht, erhitzt sich der Metallklumpen nochmals so stark, dass Teile des Materials schmelzen. „Wir haben hier einen enorm komplexen, ganz wilden Temperaturverlauf“, sagt Philipp Kürnsteiner, AProLAM-Mitarbeiter am Düsseldorfer Max-Planck-Institut. „Genau das könnte uns helfen, in Zukunft ausscheidungsgehärtete Materialien direkt aus der Maschine zu bekommen – ganz ohne nachgeschaltete Wärmebehandlung.“

Um das zu testen, hat ILT-Forscher Markus Benjamin Wilms in den vergan-



genen Monaten ein ums andere Mal seine grün getönte Schutzbrille aufgesetzt sowie eine Atemmaske übergestülpt, die seine Lunge vor Metallstaub schützen soll. Er hat den Lichtpunkt tänzeln lassen und Quader aus einer Eisen-Nickel-Legierung gedruckt – unten, in den ersten Schichten, ganz ohne Aluminium; dann mit einem immer höheren Anteil, bis der Aluminiumgehalt in den obersten Schichten schließlich 25 Prozent erreichte.

„Da es uns ums Material geht, drücken wir in der Regel kleine Klötze, das ist die einfachste Geometrie, die man

sich vorstellen kann“, sagt Wilms. Die Proben werden anschließend, sofern sie keine Risse aufweisen, durchgesägt und poliert – mit einer zunehmend feineren Politur, deren Kügelchen zum Schluss nur noch einen Durchmesser von 0,04 Mikrometern (oder 40 Nanometern) aufweisen. Die glatten Proben werden angeätzt und unterm Lichtmikroskop begutachtet. Sie werden erneut poliert und landen in einem Elektronenmikroskop. Das liefert Aufschluss über die Feinstruktur des Materials.

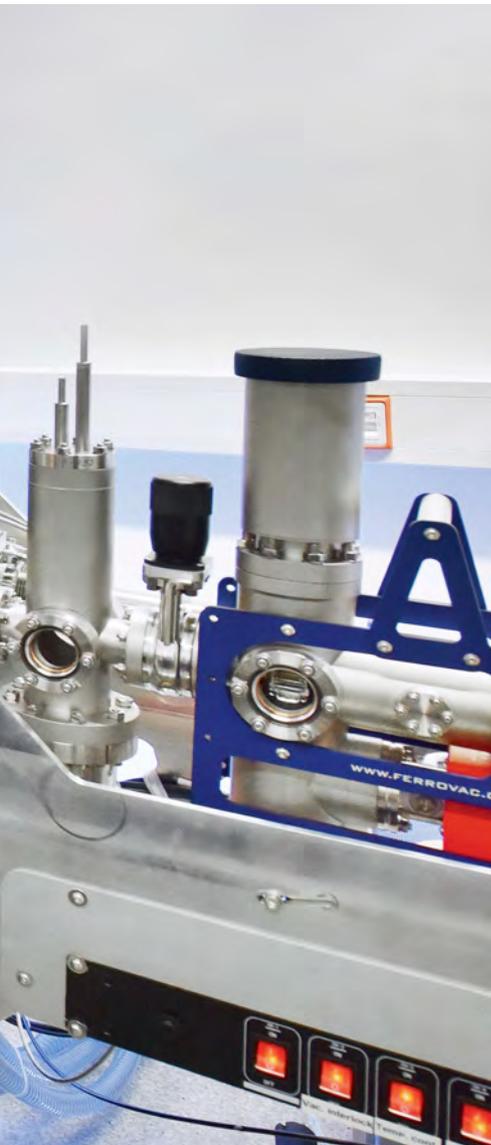
EINE 3D-GRAFIK ZEIGT DIE GENAUE ZUSAMMENSETZUNG

Der wirkliche Härtetest wartet auf die gedruckten Stahlklötzchen allerdings im Parterre des Max-Planck-Instituts für Eisenforschung. Dort steht, Wand an Wand mit historischen Schmiedehämmern, eines der modernsten Analyseinstrumente für metallische Strukturen: eine 3D-Atomsonde. Silbrig glänzt ihr Gewirr aus Edelstahlröhren, ein blauer Zierstreifen leuchtet oben an der Steuereinheit, im Hintergrund hämmert das Stakkato einer Heliumpumpe, die das Innere der Apparatur auf minus 220 Grad Celsius abkühlt.

Dort, im Hochvakuum, platzieren die Materialforscher eine winzige Nadel mit einem Radius von weniger als 50 Nanometern. Ein Strahl aus Galliumionen hat sie zuvor aus dem gedruckten Material geschnitten und dann wie einen Bleistift mit immer engeren Kreisbewegungen angespitzt. Die Nadel landet unter einem Detektorsystem, an das Hochspannung angelegt wird – etwa 5000 Volt. Zusätzlich malträtiert ein pulsierender Laserstrahl die Probe.

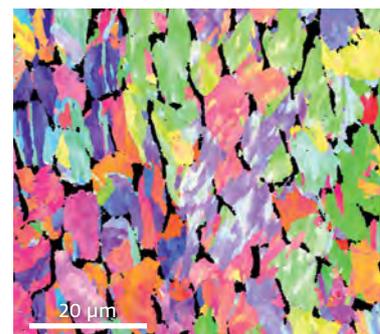
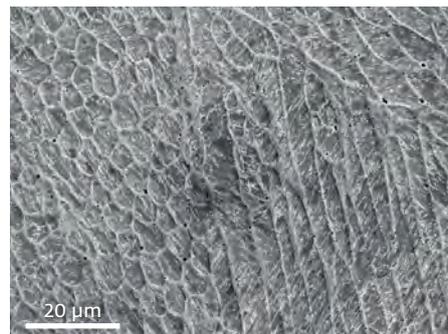
„Ziel dieser Tortur ist, dass sich bei jedem Puls ein einzelnes Atom aus dem Material löst“, sagt Eric Jäggle. Da es positiv geladen ist, wandert dieses Ion entlang der elektrischen Feldlinien zum Detektor, der den genauen Ort und die genaue Zeit des Einschlags registriert. Aus diesen Daten lässt sich zurückrechnen, von welchem Punkt der Nadel das Teilchen auf die Reise geschickt wurde, wie schwer und wie stark es geladen war. Am Ende erstellt das Gerät eine dreidimensionale Grafik. Sie zeigt detailliert, wie sich die Nadelspitze zusammensetzt.

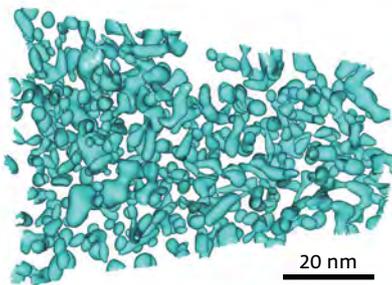
Mit ein paar Mausklicks holt Jäggle in seinem Büro hinter den Backsteinmauern des Düsseldorfer Max-Planck-Instituts eines der Messergebnisse auf den Monitor. Die Eisenatome, grau dar-



Links Philipp Kürnsteiner (im Hintergrund) und Eric Jäggle überprüfen Messungen eines Geräts, das als Rasterionenmikroskop und auch als Rasterelektronenmikroskop dienen kann. Mit Ersterem schneiden sie Proben für Atomsonden-Untersuchungen.

Unten Die Aufnahme des Rasterelektronenmikroskops (links) zeigt die zellenartige Struktur einer Stahlprobe, die zunächst poliert und dann angeätzt wurde. Die gleichen Zellen werden in einer Aufnahme der Elektronenrückstreubeugung (rechts) durch die schwarzen Bereiche voneinander abgegrenzt. Die Farben zeigen die Orientierung einzelner Kristalle.





Diese Seite Eric Jäggle schleust eine neue Probe in die 3D-Atomsonde, die Atom für Atom misst, wie sich verschiedene Metalle in einem Material verteilen (oben). In der Aufnahme links sind, türkis gefärbt, die Gebiete in der Probe eines Maraging-Stahls zu erkennen, die mehr als 20 Prozent Aluminium enthalten. Die Struktur mit der hohen Dichte an aluminiumreichen Ausscheidungen hat sich bei der additiven Fertigung gebildet – genau das wollten die Max-Planck-Forscher erreichen, um den Stahl fester zu machen.

Rechte Seite Eric Jäggle versucht im AProLAM-Projekt die Eigenschaften von Stählen und Legierungen mithilfe des 3D-Metalldrucks zu optimieren.

gestellt, sind gleichmäßig in der Nadel anzutreffen. An vielen Stellen finden sich aber fein verteilte, wenige Nanometer große, aluminiumreiche Ausscheidungen, am Bildschirm türkisfarben dargestellt. Sie stammen direkt aus dem 3D-Drucker, genau das, was die AProLAM-Forscher gesucht haben.

Damit sie auftauchen, auch das haben die Experimente gezeigt, muss der Aluminiumgehalt bei mindestens fünf Prozent liegen. Mehr als 14 Prozent darf er jedoch nicht erreichen, weil sonst die gewünschte Grundstruktur des Stahls verloren geht. Ein Aluminiumanteil von neun Prozent hat sich laut Jäggle als idealer Wert erwiesen. Und: Verglichen mit einer reinen Eisen-Nickel-Legierung liefert ein Stahl mit Aluminium-Ausscheidungen fast doppelt so hohe Härtewerte.

Als Nächstes wollen die AProLAM-Forscher die gleichen Versuche mit Ti-

tan als stärkender Beigabe wiederholen. Anschließend mit einer Kombination aus Titan und Aluminium. Auch andere Werkstoffe sollen künftig studiert werden, darunter Aluminiumlegierungen, die mit dem seltenen Metall Scandium verstärkt werden und im Flugzeugbau sehr beliebt sind. Oder Stahl, in dem eingelagerte Oxide selbst bei hohen Temperaturen enorme Stabilitätswerte versprechen.

DAS ZIEL: WERKSTOFFE MIT BESSEREN EIGENSCHAFTEN

Gleichzeitig schrauben die Forscher an den Druckprozessen – in der Hoffnung, die optimalen Bedingungen für besonders wirksame Ausscheidungen zu finden. „Die große Herausforderung besteht dabei darin, weder zu viel noch zu wenig Wärme ins Material zu bringen“, sagt Philipp Kürnsteiner. Hinter den

schweren Schiebetüren im Aachener Labor stehen den Forschern dafür viele Stellschrauben zur Verfügung. Markus Benjamin Wilms kann den Durchmesser des fokussierten Laserstrahls verändern – von 0,6 bis 1,8 Millimeter. Ein derart dicker Lichtpunkt führt zu einem großen Schmelzbad; umso länger dauert es dann, bis das Material abkühlt.

Auch das Tempo, mit dem der Laser übers Metall tänzelt und neues Material ablagert, beeinflusst die Ausscheidungen. Am meisten Spielraum bietet aber das Muster, mit dem die einzelnen Schichten gedruckt werden. Der Lichtpunkt kann immer von rechts nach links übers Metall huschen. Er kann rechteckförmig mäandern. Er kann nach jeder Schicht eine Pause einlegen, sodass das Material Zeit zum Abkühlen hat. Er kann sogar zwischen zwei Lagen die Druckrichtung um 90 Grad drehen.



All das hat Auswirkungen darauf, wie jedes einzelne Klötzchen des großen Metall-Legos erhitzt, abgekühlt und erneut erwärmt wird. Der Temperaturverlauf wiederum ist dafür verantwortlich, wie leicht sich die Aluminiuminseln während des Druckvorgangs bilden, wie groß sie werden und wie sie sich im Stahl verteilen.

„Um die jeweils passenden Parameter zu finden, braucht man viel Erfahrung“, sagt Wilms. Meist klappt es dennoch nicht beim ersten Mal. Um das zu erkennen, reicht ein schneller Blick auf den gleißenden Lichtpunkt: „Manchmal leuchtet es dort wie bei einem Gewitter, dann weiß man, dass der Prozess unruhig läuft und der Laser langsamer fahren muss.“

Letztlich hilft, allen Erfahrungswerten zum Trotz, nur ein iterativer Prozess: An einer der vielen Stellschrauben muss Wilms so lange drehen, bis die gedruckten Klötzchen nicht mehr besser werden. Der Wert wird eingefroren, die nächste Stellschraube wird bearbeitet – bis schließlich ein Material entsteht, das all seine Vorgänger in den Schatten stellt.

Denn das ist das große Ziel der AProLAM-Forscher, egal ob hinter den Düsseldorfer Backsteinmauern oder den Schiebetüren in Aachen. Sie wollen neue Werkstoffe möglich machen, die sich nicht nur leichter und ohne auf-

wendige Wärmebehandlung herstellen lassen, sondern die mit ihren verbesserten Eigenschaften konventionelle Materialien übertreffen. „Die ganze Technologie wird sich erst dann so richtig

durchsetzen, wenn die Leute eines erkennen“, sagt ILT-Forscher Andreas Weisheit: „Wollen sie solch einen neuartigen Werkstoff, dann geht das nur mit additiver Fertigung.“ ◀

AUF DEN PUNKT GEBRACHT

- Der zukunftsweisende 3D-Druck – additive Fertigung genannt – bietet viele Vorteile, ist aber noch längst nicht ausgereizt, vor allem hinsichtlich der Werkstoffe.
- Im Projekt AProLAM (Advanced Alloys and Process Design for Laser Additive Manufacturing of Metals) verfolgen Max-Planck- und Fraunhofer-Forscher gemeinsam zwei Ziele: Sie wollen erstens herausfinden, welche Werkstoffe sich für den 3D-Druck eignen, und zweitens die Produktionsprozesse optimieren, um die Eigenschaften bekannter Legierungen zu verbessern.
- Zwei Druckverfahren kommen vor allem zum Einsatz: Das selektive Laserschmelzen arbeitet mit einer nur 50 bis 100 Mikrometer starken Pulverschicht auf einer Trägerplatte; beim Laserauftragschweißen werden dickere Metallklötzchen erzeugt.
- Zu den Werkstoffen, welche die Forscher für den 3D-Druck optimieren und weiterentwickeln, gehören etwa Maraging-Stähle. Sie enthalten neben Eisen unter anderem Aluminium und Titan und verformen sich nicht so leicht.

GLOSSAR

Laser: Das Wort ist ein Akronym für Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation (Lichtverstärkung durch stimulierte Emission von Strahlung) und meint sowohl den physikalischen Effekt als auch das Gerät. Laserstrahlen sind scharf gebündelt, haben eine hohe Intensität und in der Regel einen sehr engen Frequenzbereich. Sie können auch extrem kurze und intensive Strahlpulse erzeugen. In der Fertigung werden sie als Schneide- und Schweißwerkzeuge eingesetzt.

Legierung: Ein metallischer Werkstoff, der aus zwei oder mehr Elementen besteht. Mindestens eines davon muss ein Metall sein.