

ENERGIE SPAREN IN DREI DIMENSIONEN

Immer neue Produkte werden mittels additiver Fertigung (3D-Druck) hergestellt. Darunter sind heute noch visionäre Anwendungen, aber auch handfeste Komponenten, die in Forschung und Industrie zum Einsatz kommen. Rund ein Dutzend Schweizer Anbieter nutzen Verfahren der additiven Fertigung für die Herstellung von Metallteilen. Ein Zürcher Forscherteam hat mit einem Industriepartner den Energieverbrauch additiv gefertigter Produkte untersucht und mit konventionellen Herstellungsprozessen verglichen. Fazit: Die additive Fertigungsmethode braucht viel Energie, ermöglicht aber Produkte mit hoher Wertschöpfung.



Feramic-Geschäftsführer Martin Hofer am Bedienungspult einer Anlage für additive Fertigung. Das Gerät stellt während eines 12- bis 48-stündigen Arbeitsgangs gleichzeitig mehrere Werkstücke her. Foto: B. Vogel



Blick durch das Sichtfenster ins Innere eines AM-Geräts: Zu sehen ist einer der beiden Laser, während dieser eine hauchdünne Schicht aus Metallpulver aufschmilzt und so zu einer Metallschicht verbindet. Jeder Laser ist ein stark gebündelter Lichtstrahl mit 400 Watt Leistung. Der AM-Prozess findet unter Stickstoff statt, um die Bildung von Schmauch (Rauch) und Spritzern zu vermindern. Foto: B. Vogel

Die additive Fertigung sorgt regelmässig für Schlagzeilen. Dank der Methode entstehen immer neue Produkte aus einer wachsenden Palette von Werkstoffen, die bisher ungekannte Anwendungen ermöglichen. Vieles klingt noch visionär, anderes ist bereits Teil der etablierten Industrieproduktion. In der Schweiz gibt es bisher eine Handvoll Unternehmen, die Metallteile additiv fertigen. Eines davon ist die Feramic AG, die mit sechs Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern jährlich gegen 1,5 Mio. Fr. Umsatz erzielt. Im Frühjahr 2022 hat die Firma ihre neuen Produktionsräume in Stallikon (ZH) bezogen.

Schicht um Schicht auftragen

Dort stehen drei Produktionsanlagen für additiv gefertigte Metallteile, jede von ihnen untergebracht in einem nüchternen, mannshohen Gehäuse. Spannend wird es, wenn man durch das Glasfenster ins Innere blickt: Dort entdeckt man eine Grundplatte. Ein Raket bedeckt sie mit einer hauchdünnen Schicht aus Metallpulver. Ein Laserstrahl huscht über das Metallpulver und lässt es stellenweise verschmelzen. Ist der Vorgang abgeschlossen, trägt das Raket eine neue Schicht Metallpulver auf, und der Laser tut erneut seine Arbeit. So wächst auf der Grundplatte das gewünschte Metallteil heran, Schicht für Schicht, jede nur wenige Mikrometer dick. Innerhalb von einigen Stunden entstehen Metallteile in komplexen Formen, die sich mit herkömmlichen Fertigungsverfahren wie Giessen, Zerspanen oder Biegen kaum herstellen lassen.

Feramic-Geschäftsführer Martin Hofer führt den Besucher zu



Blick auf Spritzguss-Werkzeuge, die im Pulverbett additiv gefertigt wurden (vgl. Bild links). Bei den runden Teilen sind die Kühlkanäle, die sich beim fertigen Teil im Inneren befinden, gut ersichtlich. Foto: B. Vogel

einer Auslage mit additiv gefertigten Metallteilen. Die Werkstücke bestehen aus filigranen Gitterstrukturen, weisen verschlungene Formen auf oder sind von winzigen Kanälen durchzogen. «Wir produzieren Spezialteile für Maschinen- und Werkzeughersteller, aber auch Prototypen für Industrie und Forschung», sagt Hofer. Das Teil mit den feinen Kühlkanälen beispielsweise wird in Maschinen für Kunststoffspritzguss verbaut. Die Kanäle ermöglichen eine Produktivitätssteigerung von bis zu 40 %. Daneben ist ein Teil, das als Gelenkarm eines Roboters eingesetzt wird. Dank additiver Fertigung ist es stabil und leicht zugleich.

Internationales Forschungsprojekt

Jede der drei Maschinen, mit der Feramic Metallteile additiv fertigt, hat eine elektrische Leistung von 16 kW. Das erscheint nicht als sonderlich viel. Allerdings läuft der Herstellungsprozess über mehrere Stunden, und die gefertigten Teile sind relativ klein. Zudem kostet die Nachbearbeitung der Werkstücke zusätzlich Energie. Vor drei Jahren bot sich Martin Hofer die Möglichkeit, mehr über den Energiekonsum der additiven Fertigung zu erfahren. Damals wurde seine Firma als Industriepartner für ein entsprechendes Forschungsprojekt angefragt. Das Thema kommt nicht von ungefähr: Marktstudien prognostizieren für die additive Fertigung in den nächsten Jahren ein jährliches Wachstum von 25 %.

Beteiligt an dem Forschungsprojekt waren neben der Feramic AG das Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigung der

ETH Zürich sowie die Inspire AG, eine privatrechtliche Institution, die die Forschungszusammenarbeit zwischen ETH Zürich und Industrie fördert. Das Schweizer Projekt war Teil des CORNET-Projekts «Ad-Proc-Add», an dem auch akademische und industrielle Partner aus Belgien, Deutschland und Österreich beteiligt waren. Hintergrund der internationalen Zusammenarbeit waren die Bedeutung und vor allem die grosse Vielfalt der Fertigungsindustrie in Europa, der isolierte Studien von einzelnen Forschungsgruppen nicht gerecht werden können. Die Schweiz als bedeutender Fertigungsstandort, Hersteller und Exporteur von Werkzeugmaschinen hat an diesen Fragen ein unmittelbares Interesse.

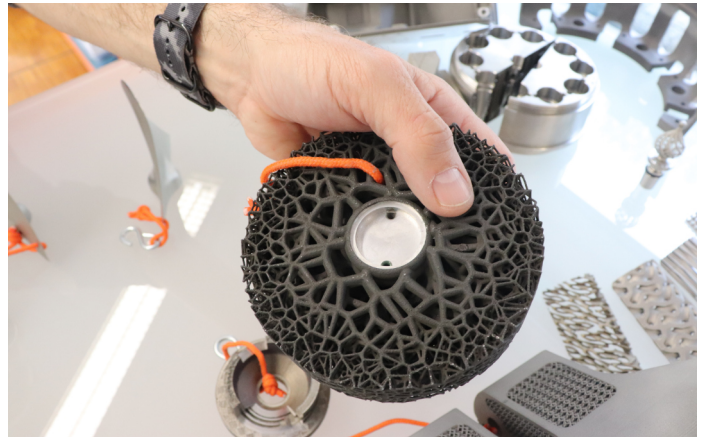
Zwölf Werkstücke beispielhaft untersucht

Die Schweizer Forschungspartner untersuchten im Rahmen des internationalen Projekts, wie viel Energie bei der additiven Fertigung von mechanischen Komponenten für Werkzeugmaschinen verbraucht wird, und zwar über die gesamte

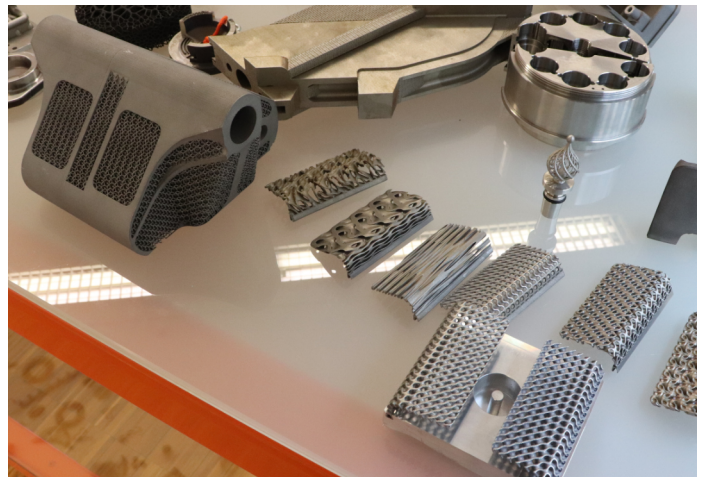
ADDITIV VS. SUBTRAKTIV

Unter «additiver Fertigung» (engl. additive manufacturing/AM) versteht man Verfahren, die Metallteile durch Aufschmelzen von Metallpulver oder Draht erzeugen. «Additiv» bedeutet, dass das Werkstück bei dieser Fertigung durch Zugabe von Material entsteht. Dies im Gegensatz zu den «subtraktiven» (oder «zerspanenden») Fertigungsverfahren, bei denen von Rohteilen überschüssiges Material mit Zerspanungswerkzeugen auf mechanischem Weg entfernt wird, beispielsweise durch Drehen, Bohren, Fräsen oder Schleifen.

Ein wichtiges additives Fertigungsverfahren ist das seit gut zehn Jahren genutzte Pulverbett-Verfahren (engl. Laser Powder Bed Fusion/LPBF, auf Deutsch auch: Pulverbett-AM). Das Werkstück entsteht dabei durch Aufschmelzen von Metallpulver mittels Laserstrahl Schicht für Schicht. Ebenfalls zu den additiven Fertigungsverfahren gehört das schon seit vielen Jahrzehnten bekannte Auftragschweissen (engl. Wire Arc Additive Manufacturing/WAAM, auch Cladding). Hierbei wird ein Draht mittels Lichtbogen geschmolzen und so eine zusätzliche Materialschicht auf ein Werkstück aufgetragen. Das WAAM-Verfahren bietet in bestimmten Fällen eine energiesparende Alternative zur additiven Fertigung im Pulverbett.



Mit additiver Fertigung lassen sich Metallteile produzieren, die sich mit konventionellen Fertigungsverfahren nur schwer oder gar nicht herstellen lassen. Die bionische Struktur dieses Gegenstandes – ein Design- und Kühlelement – wurde mit einer speziellen Software modelliert. Foto: B. Vogel



Die Feramic AG nutzt für die additive Fertigung fünf unterschiedliche Werkstoffe: Edelstahl, Aluminium, Werkzeugstahl, rostfreien Werkzeugstahl oder eine Kobaltchrom-Legierung. Foto: B. Vogel

Prozesskette hinweg. Das Forscherteam schätzte den Verbrauch durch Literaturstudien und die Auswertung der verfügbaren Daten ab. Zudem quantifizierten die Forschenden den Energieaufwand der additiven Fertigung beispielhaft anhand von zwölf Musterteilen mit Gewichten von wenigen Gramm bis einem Kilogramm.

Eine zentrale Erkenntnis: Für die energetische Betrachtung zählt nicht nur die elektrische Energie für den additiven Fertigungsprozess. Relevant ist auch der Einbezug der Energie für die Produktion des Metallpulvers, das in der additiven Fertigung eingesetzt wird. Das Metallpulver ist nämlich ein Halbzeug, also ein vorgefertigter Rohstoff, der bereits einen (auch



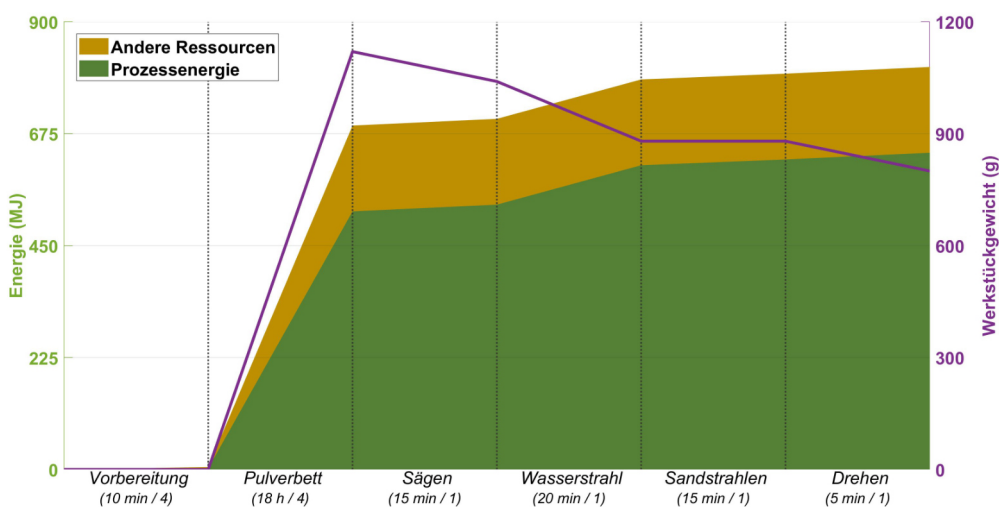
Ca. 80 % aller additiv gefertigten Metallteile müssen mechanisch nachbearbeitet werden, bevor sie an die Kundschaft ausgeliefert werden. Dafür werden Verfahren wie Fräsen (Bild), Drehen, Schleifen oder Sandstrahlen eingesetzt. Foto: B. Vogel

energetisch relevanten) Prozessschritt durchlaufen hat. Im Pulver, das aus Stahl oder einem anderen Metall hergestellt wird, steckt Energie in der Größenordnung von 30 MJ/kg (Stahl) bis 640 MJ/kg (hochfeste Titanlegierung Ti-6Al-4V). Hinzu kommt, dass bei der Verarbeitung unvermeidliche Pulververluste auftreten und in jedem Fall eine Nachbearbeitung notwendig ist, bei der ein Teil des aufwändig erzeugten Materials wieder entfernt wird.

Vor diesem Hintergrund erstaunt es nicht, dass der additive Fertigungsprozess gesamthaft betrachtet mehr Energie braucht als die Fertigung durch ein zerspanendes Verfahren (wie Drehen, Bohren, Fräsen oder Schleifen), ein umformendes Verfahren (wie Stanzen) oder ein urformendes Verfahren (wie Giessen). «Die Fertigung eines Werkstücks im Pulverbett braucht mitunter zehnmal mehr Energie als mit konventioneller Zerspanung», sagt Inspire-Projektleiter Lukas Weiss. Als Beispiel verweist der ausgebildete Elektroingenieur auf die Herstellung eines Leitschauferl rings, dessen additive Fertigung 1011 MJ/kg braucht (vgl. Grafik unten). Die konventionelle Fertigung des Werkstücks mit Feinguss würde lediglich rund 100 MJ/kg an Energie benötigen. Die additive Fertigung hat in diesem Fall allerdings den Vorteil einer kurzen Durchlaufzeit.

Mehr Energie, aber...

Das Beispiel macht deutlich, dass der tendenziell höhere Energieverbrauch der additiven Fertigung den Vorteilen dieser Herstellungsmethode gegenübergestellt werden muss. Dazu gehören neben einer schnellen Durchlaufzeit weitere Vorteile: die einfache und schnelle Herstellung von Prototypen, die Produktion von Werkstücken mit besonderen konstruktiven Eigenschaften, ein hoher Grad von kundenspezifischer Anpassung, weniger Fertigungsmittel (z.B. Gussformen), kürzere Lieferfristen. «Um den Energieverbrauch der additiven Fertigung zu beurteilen darf man den Blick nicht nur auf die Fertigung an sich richten, sondern muss den gesamten Lebenszyklus des Werkstücks einbeziehen», sagt Lukas Weiss. Lässt sich ein Werkstück dank additiver Fertigung besonders leicht bauen, spart es während seiner Lebensdauer mitunter Energie, zum Beispiel, wenn es in



Die Grafik zeigt am Beispiel eines Leitschauferl rings die Energie für die additive Fertigung im Pulverbett (grün) und die im Pulver enthaltene graue Energie (braun). Zusammen ergibt sich der Energieverbrauch für die Fertigung des Werkstücks, der im vorliegenden Fall 1011 MJ/kg beträgt. Energie wird nicht nur für die additive Fertigung (LPBF) an sich gebraucht, sondern auch für die Nachbearbeitung (im vorliegenden Fall: Sägen, Wasserstrahlen, Sandstrahlen, Drehen), was das Werkstückgewicht reduziert (lila Linie, rechte Skala). Grafik: BFE-Schlussbericht

einem Fahrzeug eingebaut wird und dieses dank Minderge-
wicht weniger Antriebsenergie braucht.

Künftige könnte die additive Fertigung im Pulverbett mit we-
niger Energie auskommen. Einen konkreten Ansatzpunkt
dazu bieten die Stützstrukturen (‹Support›). Diese sind erfor-
derlich, um bestimmte Formen überhaupt additiv fertigen zu
können. Sie müssen nach der schichtenweisen Fertigung des
Werkstücks in der Nachbearbeitung entfernt werden. Wenn
es gelingt, ein Werkstück mit weniger Stützstrukturen zu fer-
tigen, spart das Energie sowohl bei der Herstellung als auch
in der Nachbearbeitung. Welche Einsparungen auf diesem
Weg erzielt werden können, will die Feramic AG in einem
neuen Projekt mit der Zürcher Hochschule für Angewandte
Wissenschaften untersuchen.

➤ **Schlussbericht** zum Projekt ‹EE-Proc-Add – Energieeffi-
ziente Bearbeitung von Additiv-Bauteilen› unter:
www.aramis.admin.ch/Grunddaten/?ProjectID=44324

➤ **Auskünfte** zum Forschungsprojekt erteilt Dr. Carina Al-
les (carina.alles@bfe.admin.ch), Leiterin des BFE-For-
schungsprogramms Industrielle Prozesse.

➤ Weitere **Fachbeiträge** über Forschungs-, Pilot-, De-
monstrations- und Leuchtturmprojekte im Bereich Indus-
trielle Prozesse unter www.bfe.admin.ch/ec-prozesse.



Die zwei Siebstationen im Hintergrund werden benötigt, um die
Schmutzpartikel, welche bei der additiven Fertigung entstehen, aus
dem Produktionspulver auszusieben. Auf dem Weg können rund
90 % des Metallpulvers wiederverwendet werden. Die übrigen
10 % werden als Altmetall entsorgt. Foto: B. Vogel