

Leichtbau mit Additiver Fertigung

Prof. Dr.-Ing. Franz-Josef Villmer

Kaum eine Branche ist so stark durch Leichtbau geprägt wie die Luftfahrtindustrie. Verstärkt wird diese Ausrichtung durch gesetzliche Regularien zur Verringerung des Kohlendioxid-Ausstoßes und den zunehmend höheren Treibstoffkostenanteil. Wenn der Transport von einem Kilogramm Nutzlast über den Atlantik etwa einen Liter Kerosin verbraucht, ist intensiver und extensiver Leichtbau besonders notwendig. Allerdings ist bei Anwendung konventioneller Fertigungstechnologien die Gewichtsreduktion mit hohen Kosten verbunden und manche gedanklich vorstellbare Leichtbaukonstruktion ist mit diesen nicht verwirklichtbar. Einen Ansatz, die Schere aus Kosten und Leichtbau zu schließen, verspricht die Additive Fertigung (AM). Zum einen ist diese Fertigungstechnologie durch den völligen Verzicht auf Werkzeugbindung für vergleichsweise niedrige Stückzahlen, wie in der Luftfahrtindustrie üblich, prädestiniert, zum anderen liefert Additive Fertigung jede denkbare Komplexität der Geometrie ohne Mehrkosten und ist ein Schlüssel zur allseits geforderten Individualisierung. Es gilt also, Ansatzpunkte für einen wirkungsvollen Einsatz der Additiven Fertigung zu finden und die Voraussetzungen von der Konstruktion bis zu den Genehmigungsverfahren zu schaffen. Insbesondere muss sich das durch konventionelle Fertigungstechniken geprägte Denken der Produkt- und Prozessentwickler grundlegend ändern.

Leichtbau

Jedes bewegte Gramm kostet Energie. Dies gilt in besonderem Maße für die Luft- und Raumfahrt und den Fahrzeugbau. Deshalb hat Leichtbau hier höchste Priorität. Die Konstruktionen müssen nicht nur leicht sein, sondern auch hohe Festigkeit, Stabilität und gute Gebrauchseigenschaften aufweisen. Ferner spielen viele andere Anforderungen und Regularien in diesen Industrien eine wichtige Rolle, wie chemische Beständigkeit, Temperaturbeständigkeit und Entflammbarkeitsverhalten.

Bei einem Flugzeug hängen insbesondere die Speeding-up-Kräfte und die Pitch-Kräfte und damit ein großer Anteil der Treibstoffverbräuche direkt von der Masse ab, lediglich der Luftwiderstand (Drag) ist nicht direkt abhängig von der Masse. Die Fluggesellschaften weisen die Treibstoffkosten neben den Personalkosten als die größten Gesamtkostenanteile aus [15]. Leichtbau, auch zur Erhöhung des Nutzlastanteils, ist deshalb eine zentrale ökonomische Forderung, gleichzeitig wegen der CO₂-Gesetzgebung auch eine sehr wichtige ökologische Anforderung. Die Flugzeughersteller und deren Zulieferer sind seit jeher Vorreiter im Leichtbau. Dabei wird kaum eine Komponente oder eine Baugruppe vom Antrieb bis zum Kabineninterieur von diesem Bemühen ausgenommen. Längst ist die Entwicklung nicht mehr reiner Materialleichtbau, bei dem nur schwerere Werkstoffe durch leichtere ersetzt werden, auch wenn leichte Strukturwerkstoffe wie CFK wichtige Innovationstreiber sind. Struktur- und Funktionsleichtbau, oft inspiriert durch das Vorbild von Konstruktionen der Natur (Bionik), sind wesentlich weiter gehende Ansätze. Sehr häufig ist die Herstellbarkeit der begrenzende Faktor. Nicht zuletzt sind ökonomische Anforderungen zu berücksichtigen, führt doch Gewichtsreduzierung mit konventionellen Fertigungstechniken zu deutlichen Mehrkosten.

Bionische Konstruktionen

Die Bionik beschäftigt sich unter anderem mit der Übertragung natürlicher Konstruktionsprinzipien in die Technik [4]. Immer wieder erstaunlich sind die Eigenschaftskombinationen, die die Natur in ihren Konstruktionen erzielt, beispielsweise die Festigkeit und Leichtigkeit der Knochenkonstruktion. Wenn man den Längsschnitt eines

Oberschenkelknochens oder Oberarmknochens betrachtet, sieht man, dass sie innen weder komplett hohl, noch ganz massiv sind. Stattdessen besteht das Knocheninnere aus einem Schwammwerk feinsten, sich verzweigender Knochenbälkchen, die entsprechend der größten Zug- beziehungsweise Druckbeanspruchung angeordnet sind. Die Hohlräume sind dort angeordnet, wo die Zug- oder Druckbeanspruchungen verschwindend klein sind. Der Knochen ist also eine Konstruktion, die ein hohes Maß an Leichtigkeit mit hoher Festigkeit und Stabilität verbindet. Die Natur bedient sich dabei eines Wirkmechanismus, bei dem nicht nur bei hoher Beanspruchung Knochenmasse aufgebaut, sondern auch bei sehr geringer Beanspruchung Material abgebaut wird. Dieser Mechanismus wird beim von Claus Mattheck entwickelten SKO-Verfahren (Soft Kill Option [4]), einem rechnergestützten Topologie-Optimierungsprogramm, nachgebildet, indem an gering beanspruchten Stellen Material entfernt wird. Damit werden Leichtbaukonstruktionen erzielt, die aber an den Oberflächen noch Spannungsspitzen aufweisen können. Um auch diese Spannungsspitzen zu eliminieren, bietet Mattheck das CAO-Verfahren (Computer Aided Optimization [4]) an. Mit der Kombination von SKO und CAO lassen sich hochbelastbare, form- und gewichtsoptimierte Bauteile entwickeln. Leider sind die dabei entstehenden Geometrien mit konventionellen Fertigungstechnologien nicht oder nur unzureichend anzunähern. Eine Lösung liefert hier die Additive Fertigung, die nahezu unbegrenzte Geometriekomplexität ermöglicht.

Kurze Beschreibung der Additiven Fertigung

Ausgehend von ersten Erfindungen und Systemen Mitte der achtziger Jahre bezieht sich Additive Fertigung (AM) auf die direkte und automatische Fertigung von physischen Objekten. AM beschreibt dabei eine Reihe von Systemen und Technologien, die dreidimensionale, physische Objekte direkt aus Datenmodellen, häufig erstellt mit 3D-CAD, bauen. Daneben können auch Daten von Animationsprogrammen oder auch von 3D-Scannern in Reverse Engineering-Systemen und aus der Computertomographie genutzt werden. Die AM-Systeme benötigen diese Daten, auch unter Verwendung von STL-Daten als Quasistandard zum Datenaustausch, um die physischen Objekte in dünnen Schichten meist von unten nach oben aufzubauen. Deshalb können mit solchen Systemen Objekte mit nahezu unbegrenzter geometrischer Komplexität der Außen- und Innenkonturen gebaut werden. Werkzeuge und Vorrichtungen sind dabei nicht erforderlich, so dass diese Technologien infolge ihrer Geschwindigkeit vom Datenmodell zum physischen Modell auch als Rapid Technologien bezeichnet und zum Rapid Prototyping, Rapid Manufacturing und Direct Digital Manufacturing verwendet werden.

Die wichtigsten AM-Technologien sind [1,3]:

- Stereolithographie (SLA)
- Selective Laser Sintering (SLS)
- Fused Layer Modeling (FLM)
- Laminated Layer Manufacturing (LLM)
- 3D Printing (3DP)
- Inkjet Systems (IJ)

Diese Technologien, ihre Charakteristika und Anwendungen, Stärken und Schwächen werden in der Literatur ausführlich beschrieben [1, 2, 3, 8, 10,11].

Die Vorteile der Additiven Fertigung

The Economist bezeichnet AM und Direct Digital Manufacturing als Hauptbestandteil für die „3. Industrielle Revolution“ [14].

Der allgemeine Trend zur Individualisierung der Produkte, der auch im Flugzeugbau durch die vergleichsweise kleinen Stückzahlen eine wichtige Rolle spielt, wird durch AM optimal

bedient. Während die Herstellkosten bei konventioneller Fertigung mit zunehmenden Stückzahlen und Losgrößen kontinuierlich abnehmen, sind diese bei AM nahezu konstant. Generell ist bei nahezu allen Produkten eine Zunahme der Komplexität festzustellen. Leichtbau, der über den einfachen Materialleichtbau hinausgeht, trägt mit komplexen Geometrien zu diesem Trend bei. Bei konventionellen Fertigungstechnologien führt zunehmende geometrische Komplexität zu deutlich steigenden Herstellkosten, während die Herstellkosten bei AM nahezu unabhängig von der Objektkomplexität bleiben. Durch Optimierung und Produktivitätssteigerungen werden die Kosten sogar weiter reduziert.

Für Individualisierungs- und Komplexitätstrends, auch infolge von Leichtbauanforderungen, scheint deshalb AM in seiner Ausprägung Direct Manufacturing die ideale zukünftige Fertigungstechnologie zu sein. Neben Fragen der Zulassung und der reproduzierbaren Eigenschaften der durch AM erzeugten Objekte ist deshalb die Optimierung der Produktivität von AM ein entscheidendes Erfolgskriterium.

Zwei Einflussgrößen müssen hier optimiert werden: Zahl der Teile pro Bau-Job und die Baugeschwindigkeit (build up speed), gemessen in gebautem Volumen pro Zeit (cm^3/h).

Herausforderungen und zukünftige Entwicklungsrichtungen

Produktivität

Der derzeitige Stand der Technik der Additiven Fertigung zeigt zumeist relativ geringe Baugeschwindigkeiten. Die Begriffe Rapid Prototyping, Rapid Manufacturing und Rapid Technologies beziehen ihre Berechtigung nur aus dem vollständigen Verzicht von zeitaufwändigem Werkzeugbau und der direkten Verbindung von Konstruktion und Fertigung. Gleichwohl sind die Baugeschwindigkeiten in den letzten Jahren z. B. durch leistungsfähigere Strahlquellen, Vervielfachung von Düsen bei Inkjet, FLM und 3DP und Strahlquellen sowie optimierte Baustrategien deutlich gestiegen und werden in den nächsten Jahren weiter steigen.

Bauräume

Die Bauräume der meisten Maschinen der Additiven Fertigung sind begrenzt. Typische Bauräume werden durch Quaderkantenlängen von ca. 300 mm festgelegt. Viele größere Objekte lassen sich deshalb nicht ungeteilt bauen, obwohl der ungeteilte Bau auch von komplexen Bauteilen einen der größten prinzipiellen Vorteile der Additiven Fertigungstechnologien darstellt. Auch ist das Bauen von möglichst vielen Teilen in einem Bau-Job ein entscheidender Beitrag zur Produktivität. In der Fahrzeug- und Luftfahrtindustrie wird ein breites Spektrum unterschiedlich großer Teile benötigt. Deshalb wurden in den letzten Jahren in den meisten AM-Technologien (SLS, SLA, FDM und besonders 3DP) größere Bauräume verwirklicht. Wünschenswert wäre die Entwicklung von AM-Maschinen, mit denen neben sehr kleinen auch sehr große Objekte gebaut werden können oder die sich an die zu bauende Objektgröße anpassen lassen.

Genauigkeit und Oberflächenqualität

Derzeit können die AM-Technologien meist nicht mit den konventionellen Fertigungstechnologien konkurrieren, wenn es um absolute und Wiederholgenauigkeit sowie um Oberflächenqualität geht. Nicht immer kann man die Konstruktion an diese Bedingungen anpassen und eine konventionelle, spanabhebende Nachbearbeitung ist ein unerwünschter, aber meist notwendiger Zusatzprozess. Eine Verbesserung der Genauigkeiten und der

Oberflächenqualitäten ist eine wichtige Entwicklungsrichtung, aber auch die Abstimmung auf Nicht-AM-Technologien und deren Integration.

Minimal abbildbare Feature-Größe

Als minimale Feature-Größe wird das kleinste abbildbare Objektdetail beschrieben. Hier gibt es technologiebedingte Grenzen, z. B. durch den Treppenstufeneffekt. Neue Baustrategien mit unterschiedlichen Parametern, z. B. variable Schichtdicken und variable Strahlparameter, innerhalb eines Objekts versprechen hier Verbesserungen.

Materialeigenschaften und Materialvielfalt

Für konventionelle formative und subtraktive Fertigungstechnologien steht eine nahezu unbegrenzte Werkstoffvielfalt zur Verfügung. Dagegen ist die Werkstoffauswahl für Additive Fertigung noch sehr eingeschränkt. Sie wird im Wesentlichen durch neue Anwendungen erweitert. Gerade die Luft- und Raumfahrt könnte ein Motor für die Entwicklung neuer Werkstoffe sein. Zudem sind die heute verfügbaren Werkstoffe meist vergleichsweise teuer.

Fazit

Additive Fertigung ist nicht generell besser als konventionelle, weil noch viele Herausforderungen durch intensive Forschungs- und Entwicklungsarbeit zu lösen sind. Es ist zu erwarten, dass sich AM komplementär zu den konventionellen Fertigungstechnologien entwickeln wird, die nach jahrzehntelanger Optimierung für hohe Präzision, große Werkstoffvielfalt, hohe Prozessfähigkeit und gute Wirtschaftlichkeit bei großen Stückzahlen stehen. Insbesondere sollte für das Direct Manufacturing im Gegensatz zum Rapid Prototyping vermieden werden, die Konstruktionen und Prozesse der konventionellen Fertigungsverfahren nachzuahmen. Für den Leichtbau, bionische Konstruktionen mit hoher geometrischer Komplexität und für kleine Stückzahlen sind die Vorteile der Additiven Fertigung jedoch überzeugend. Wenn die Produkt- und Prozessentwickler zukünftig sehr gute Kenntnisse in Additiver Fertigung erwerben, kann die „3. Industrielle Revolution“ auch im Flugzeug-, Fahrzeug- und Maschinenbau stattfinden.

Literatur

- [1] VDI Richtlinie 3404 (2009), Additive Fabrication - Rapid Technologies (Rapid Prototyping), Beuth Verlag, Berlin
- [2] Chua C. K., Leong K. F., Lim C. S. (2010), Rapid Prototyping Principles and Applications, 3rd Edition, World Scientific, Singapore
- [3] Gebhardt A. (2007), Generative Fertigungsverfahren. Rapid Prototyping - Rapid Tooling - Rapid Manufacturing, 3. Auflage, Hanser Verlag, München
- [4] Mattheck, C. A. (2010), Denkwerkzeuge nach der Natur, KIT, Karlsruhe
- [5] Villmer F.-J., Hoffmann M., Hoffmann R. (1999), Der Modell- und Prototypenbau im Wandel, CAD-CAM Report 4/99, Seiten 88-93, Heidelberg
- [6] Villmer F.-J. (2011), Rapid Technologies – Prototyping and beyond, Proceedings of the 1st Intl. Conference Production Engineering and Management for Furniture Industry, M. Nicolich and A. Riegel, eds., Pordenone, Italien

- [7] Villmer F.-J. (2012), Additive Manufacturing- Ready for everyday use? Proceedings of the 2nd Intl. Conference Production Engineering and Management for Furniture Industry, M. Nicolich and A. Riegel, eds., Lemgo
- [8] Zäh M. F. (2006), Wirtschaftliche Fertigung mit Rapid Technologien, Hanser Fachbuchverlag, München
- [9] Bourell D. L., Leu, M. C., Rosen D. W. (2009), Roadmap for Additive Manufacturing- Identifying the Future of Freeform Processing, The University of Texas, Austin, TX, USA
- [10] Cooper K., Williams G., Salvail P. (2001), Evaluating RP Methods: NASA's side-by-side comparisons, Engineered Casting Solution Journal
- [11] Gartner Emerging Technologies Hype Cycle (2012), Stanford, CA, USA
- [12] Wohlers T. (2012), Wohlers Report 2012 Additive Manufacturing State of the Industry, Wohlers Associates, Fort Collins, CO, USA
- [13] Woodcock J., editor (2011), Focus on 3D Printing, the tct magazine 19/5, Tattenhall, Cheshire, UK
- [14] The Economist (2012), The third industrial revolution, www.economist.com/node/21553017
- [15] Lufthansa (2012), Geschäftsbericht 2011

