DHBW Mannheim

Potenziale der Ressourceneffizienz durch Additive Fertigung

Prof. Dr. Volker P. Schulz
volker.schulz@dhbw.de

05.12.2024

Agenda

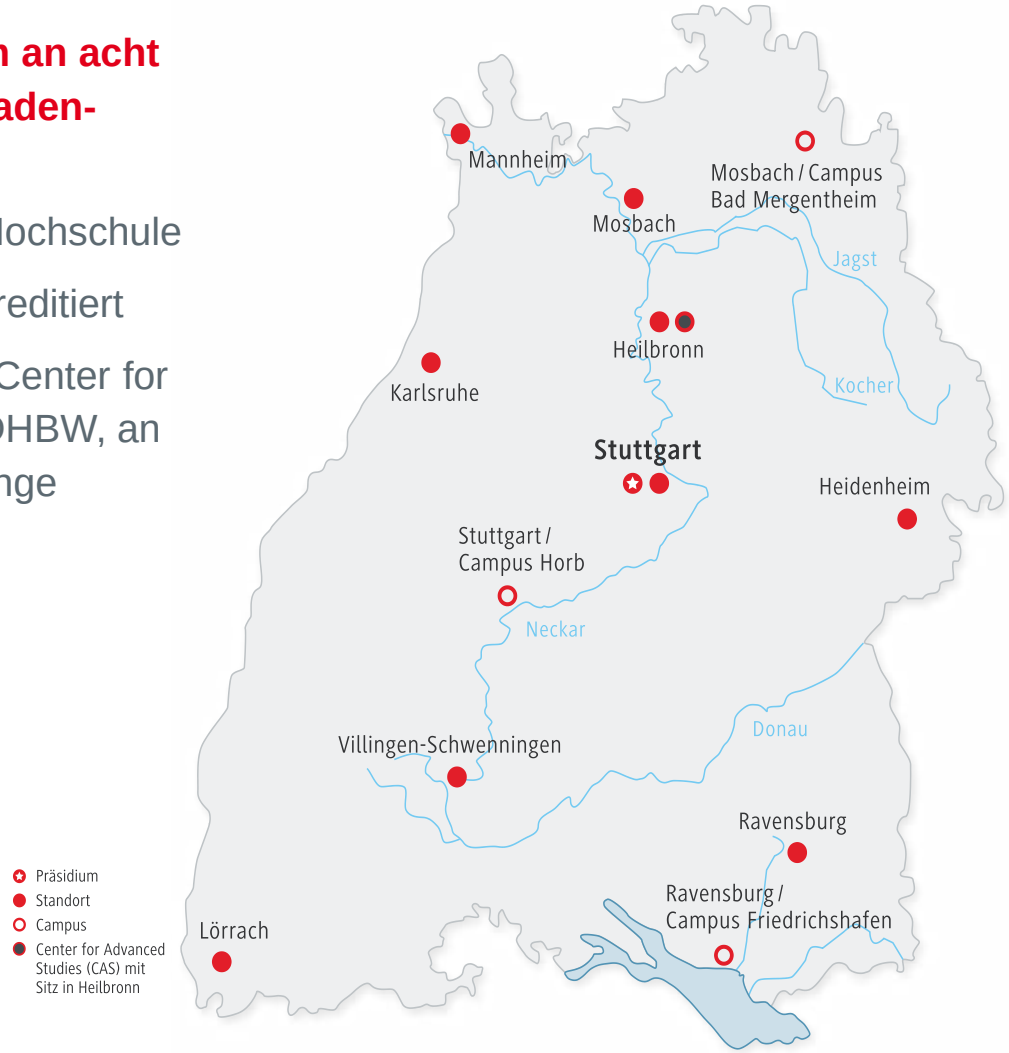
- Vorstellung
  - Duale Hochschule Baden-Württemberg
  - Prof. Dr. Volker P. Schulz
  - **Add**itivesFertigungs**lab**or (AddLab) an der DHBW Mannheim

- 3D Druck als Fertigungsverfahren
- Unterschiede der Verfahren
- Materialien

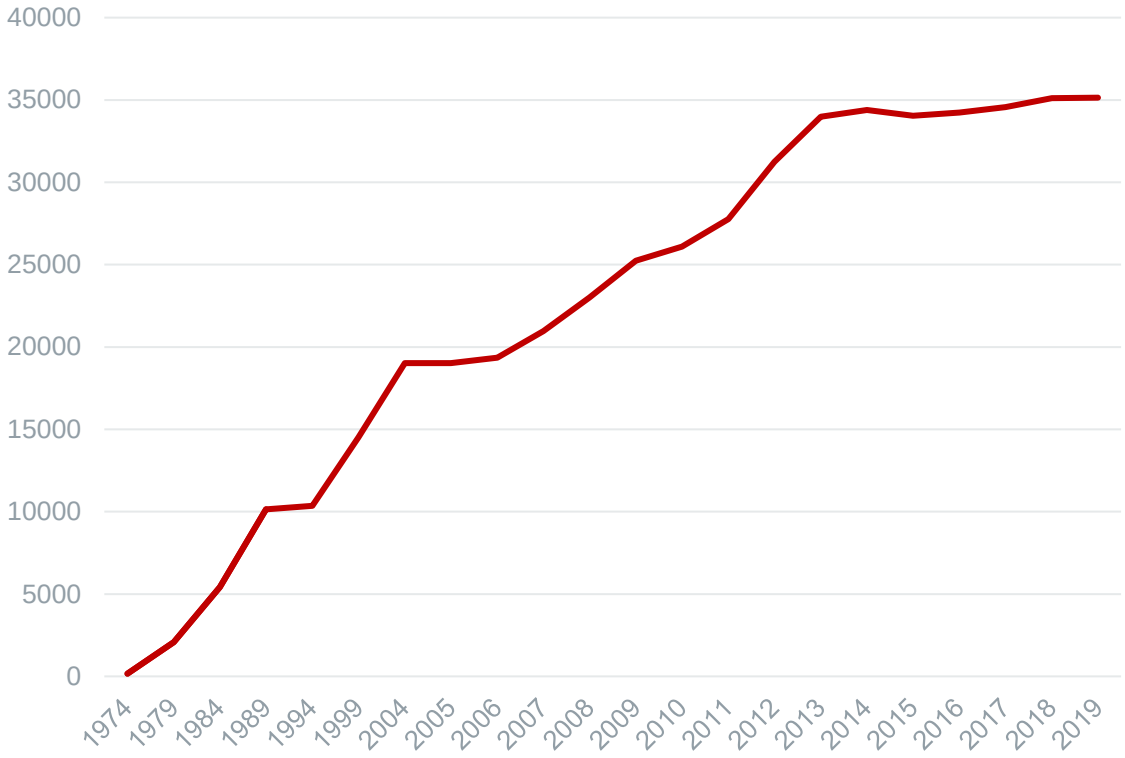
- Potenziale der Ressourceseffizienz
  - Protoypenfertigung
  - Leichtbau
  - Instandhaltung

Die DHBW ist neben Mannheim an acht weiteren Standorten in ganz Baden-Württemberg vertreten.

- Die DHBW ist eine staatliche Hochschule
- Alle Studienangebote sind akkreditiert
- In Heilbronn befindet sich das Center for Advanced Studies (CAS) der DHBW, an dem unsere Master-Studiengänge angeboten werden



Die DHBW: größte Hochschule des Landes



Entwicklung der Studierendenzahlen bis 2019; Quelle: Statistisches Landesamt BW 2020

- Über 34.000 Studierende
- Über 9.000 Duale Partner
- Über 100 Studienrichtungen (Bachelor)

Die DHBW Mannheim

- Ca. 5.500 Studierende
- wissenschaftliche Bibliothek mit Selbstlern-Plätzen
- Mensa und Cafeteria mit Wohlfühlatmosphäre
- Moderne Laborlandschaften für Wirtschaft, Technik und Gesundheit
- Moderne Vorlesungsräume

Prof. Dr. Volker P. Schulz

- 2003: Promotion an der Universität Heidelberg,
  Institut für Umweltphysik, Mehrphasen-Strömungssimulation
- 2003 – 2007: Fraunhofer-Institut für Techno- und Wirtschaftsmathematik
- 2008 – 2009: Automobil-Prüftechnik Landau GmbH
- seit 2010: Professor im Studiengang Maschinenbau an der DHBW Mannheim
- 2012 – 2022: Prodekan der Fakultät Technik
- Seit 2016: Leiter des Forschungsclusters Elektrochemie (ELCH)
- seit 2017: Mitglied des Beirats Cluster Energie & Umwelt der Metropolregion Rhein-Neckar
- Seit 2018: Leiter des Forschungsclusters AddLab (Additives Fertigungslabor)
- 2018: Gastprofessur/Kurzaufenthalt am Laboratoire de Thermique et Energie der Université de Nantes (Frankreich)
- 2018/2019: Forschungsjahr an der University of Toronto (Kanada)
- seit 2020: Honorarprofessor an der University of Toronto (Kanada) in Mechanical Engineering

Additives Fertigungslabor an der DHBW Mannheim: https://youtu.be/hF9LU47iFK0

Motivation

- Was sind die Potenziale der Ressourceneffizienz durch additive Fertigung?

- chatgpt: „Die additive Fertigung (auch bekannt als 3D-Druck) bietet erhebliche Potenziale zur Verbesserung der Ressourceneffizienz in der Produktion und über den gesamten Lebenszyklus von Produkten hinweg. Diese Potenziale entstehen durch den spezifischen Charakter der additiven Fertigung, insbesondere den schichtweisen Aufbau von Materialien.“

Was ist additive Fertigung (3D Druck)

- „Klassische“ Herstellung von Werkstücken
  - Urformen, Umformen, Trennen, Fügen, Beschichten, Stoffeigenschaften ändern
- „Subtraktive“ Fertigung, da vom Rohling es weggenommen wird, wie z.B. beim Drehen oder Bohren

- Die Additive Fertigung bezeichnet Fertigungsverfahren, bei denen Material Schicht für Schicht aufgetragen wird, um dreidimensionale Gegenstände zu erzeugen

Historie der additiven Fertigung

Erster 3D-Druck von Charles Hull

3D-Druck mit mehreren Materialien

3D-Druck von Gold und Silber

1984

2002

2006

2008

2011

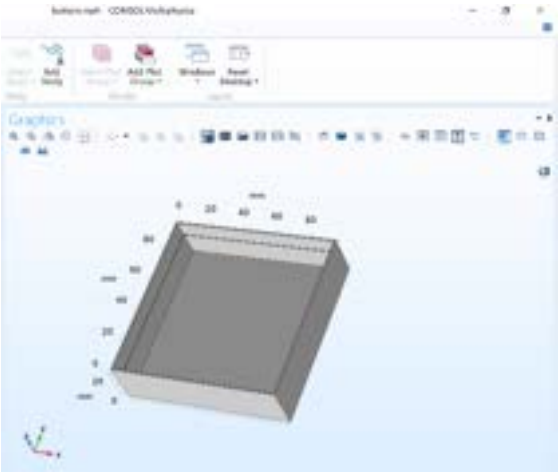
Erstmals 3D-gedruckte Organe

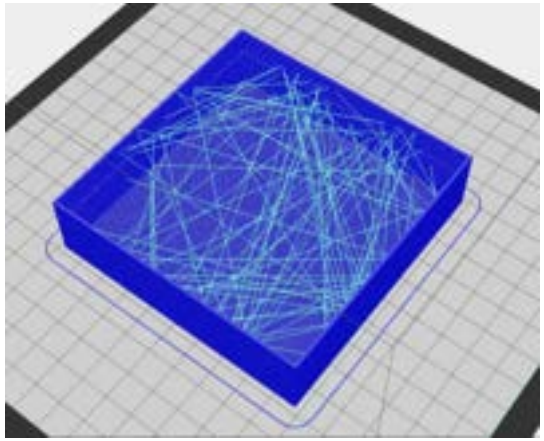
Gedruckte Beinprothese

Von der Idee zum Bauteil

- Additive Fertigung besteht immer aus folgenden Arbeitsschritten

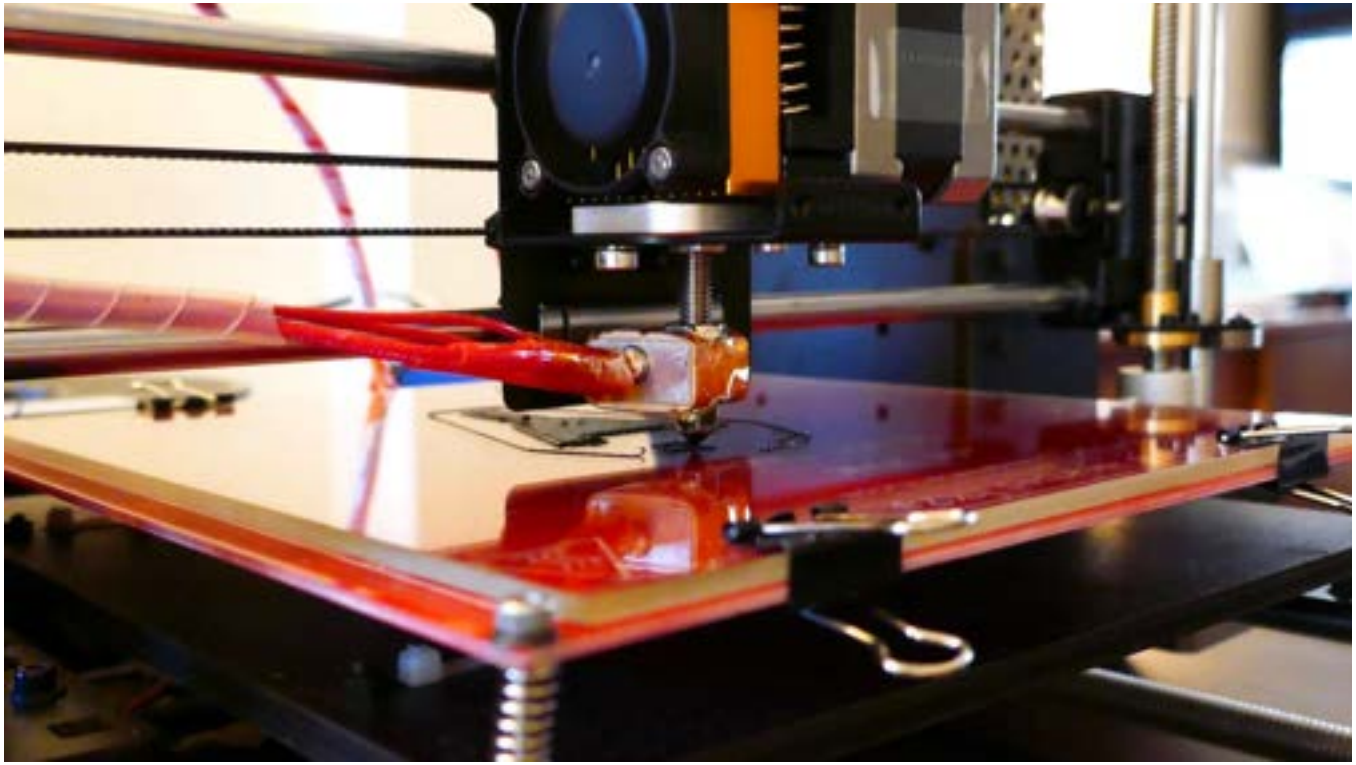
1. Konstruktion: Bauteildesign mit CAD erstellen, wobei – abhängig vom Druckverfahren - verschiedene Designvorschriften zu beachten sind
2. Slicing: Das CAD-Modell wird mit einer Software in einzelne Schichten „zerlegt“, entsprechend der späteren Fertigung (‚g-code‘)





3D-Druck

- Beispiel für den 3D-Druck mit PLA-Filament



- Eventuell weitere Fertigungsschritte

Größenordnungen

- Additive Fertigung umfasst heutzutage (fast) alle Größenordnungen

Micro 3D-Druck

3D-gedruckte Brücke in Amsterdam

Verfahren der additiven Fertigung

Nach der ISO/ASTM 52900 gibt es 7 Hauptkategorien von 3D-Druckverfahren:

- Materialextrusion
- Vat[1] Photopolymerization
- Powder Bed Fusion (PBF)
- Material Jetting
- Binder Jetting
- Directed Energy Deposition (DED)
- Sheet Lamination

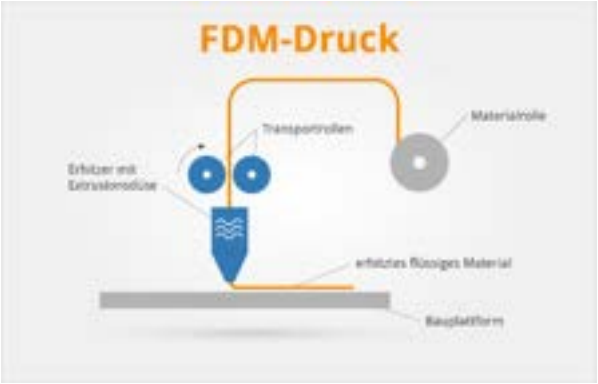
Zu jeder Hauptkategorie gibt es zahlreiche Unterkategorien

Die folgenden Beispiele sind nur ein kleiner Ausschnitt der häufigsten Verfahren

[1]engl. für Becken.

Verfahren der additiven Fertigung

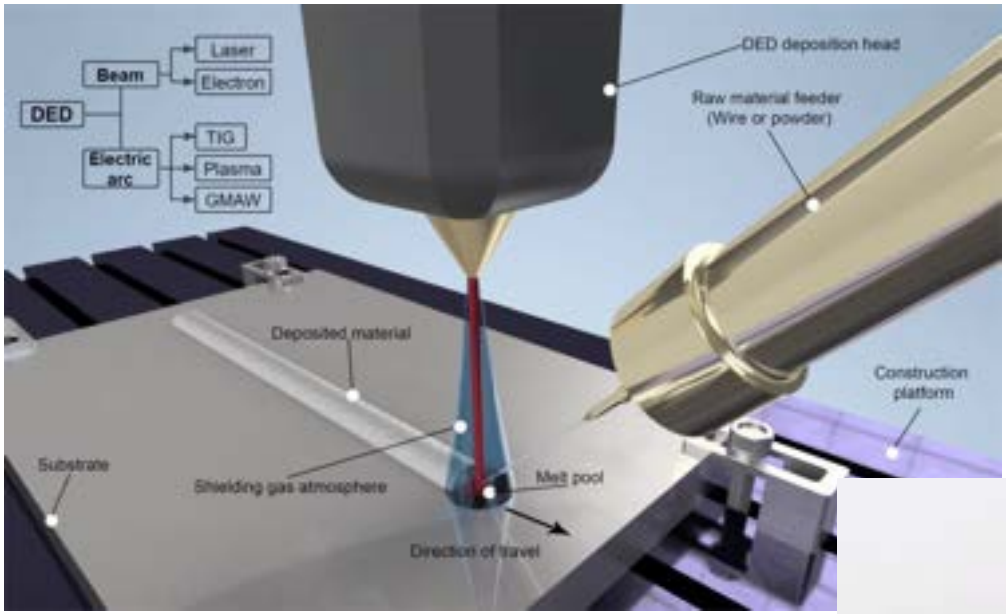
- Familie: Material Extrusionsverfahren
  - Fused Deposition Modeling (FDM)

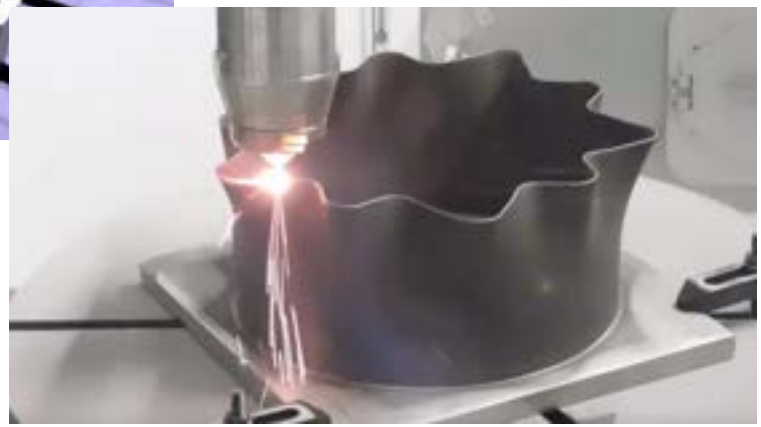


  - Chemical Reaction Bond

Verfahren der additiven Fertigung

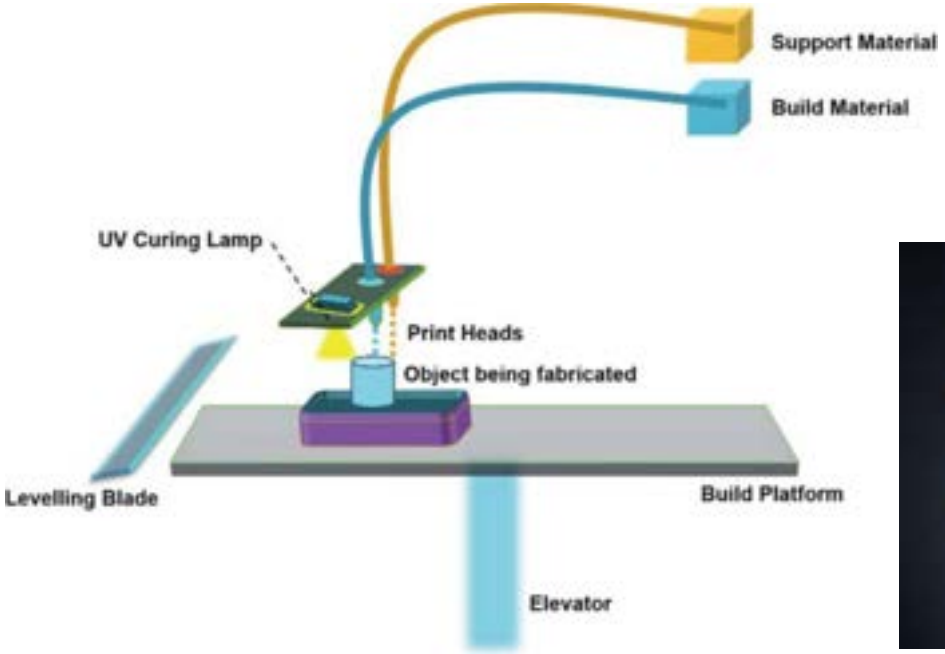
- Familie: Directed Energy Deposition





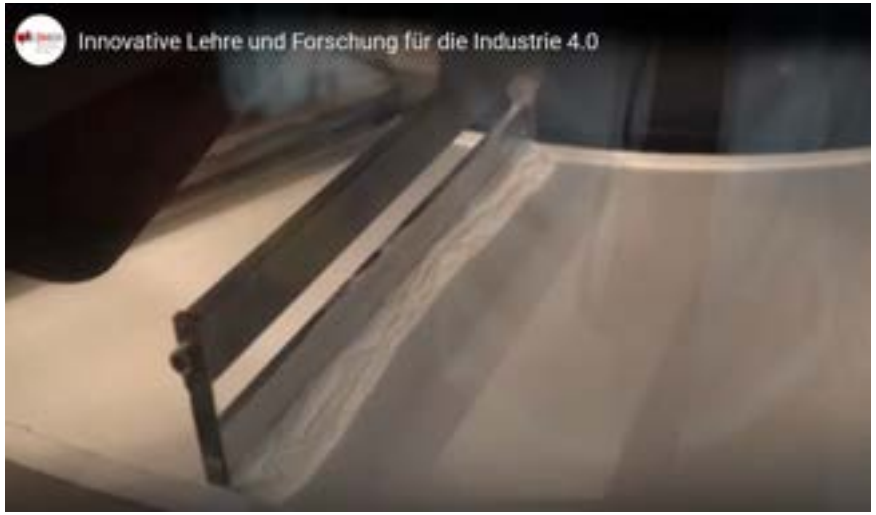
Verfahren der additiven Fertigung

- Familie: Material Jetting Technology
  - Flüssiges Material wird als Tröpfchen aufgestrahlt und härtet instantan aus (durch Abkühlen, chemische Reaktion oder durch UV-Bestrahlung)



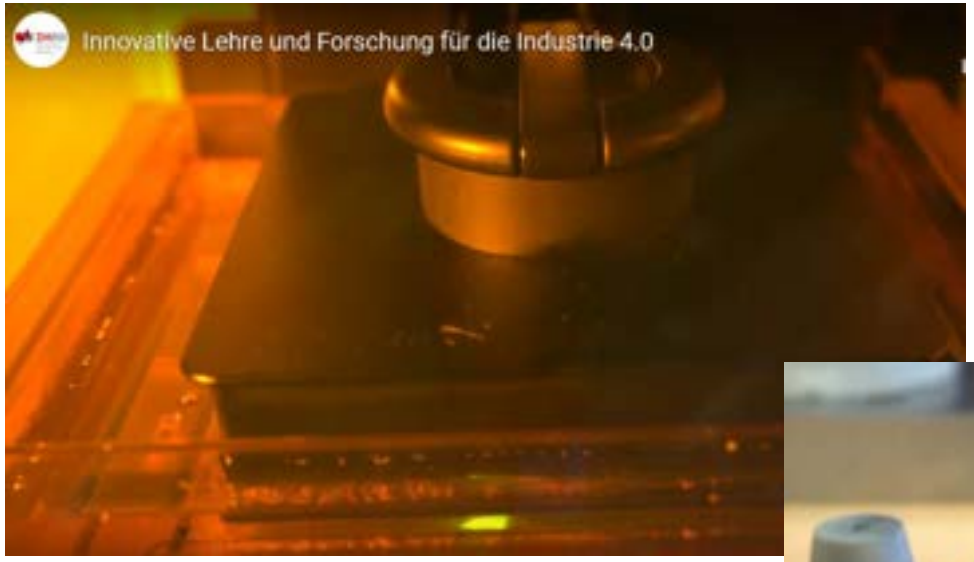
Verfahren der additiven Fertigung

- Familie: „In-Solid“-Druckverfahren
  - Powder Bed Fusion
    (Lasersintern oder Laserschmelzen)



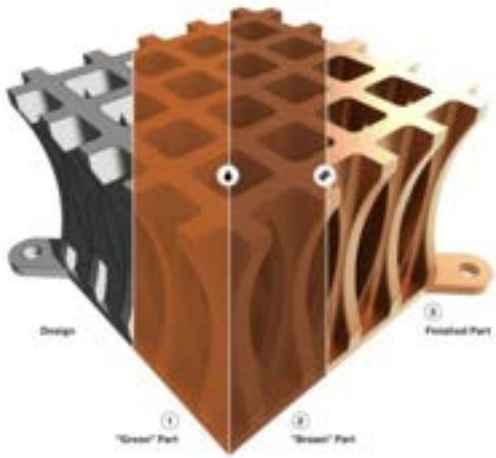
Verfahren der additiven Fertigung

- Familie: „In-Liquid“-Druckverfahren
  - Vat Photopolymerization mit UV-Laser



Verfahren der additiven Fertigung

- Kombinierte Verfahren, z.B. für Metall-3D-Druck
  - Fused Filament Fabrication mit anschließendem Sintervorgang
    Filament aus Metallpulver mit Kunststoff und Wachs wird im Schmelzschichtverfahren gedruckt
    Mittels Hexan wird das Bindemittel aus dem Grünling ausgewaschen
    Der Braunling wird zum fertigen Bauteil gesintert



Materialen im 3D-Druck

Druckbare Materialien sind eng an die Drucktechnologie gekoppelt

- **Materialextrusion:** Thermoplaste (PLA, ABS, PETG), Verbundstoffe, flexible Materialien, Metalle (bei anschließendem Sintern)
- **Vat Photopolymerization:** Photopolymere (lichthärtende Harze)
- **Powder Bed Fusion (PBF):** Kunststoffe (Nylon, TPU), Metalle (Titan, Aluminium, Stahl)
- **Material Jetting:** Photopolymere, Wachse
- **Binder Jetting:** Sand, Metallpulver, Keramik
- **Directed Energy Deposition (DED):** Metalle, Verbundstoffe
- **Sheet Lamination:** Papier, Kunststofffolien, Metallfolien

Consumer-3D-Druck

- FDM-Drucker für den Consumer-Bereich beginnen bereits bei unter 100 €
- Es empfiehlt sich Filament aus PLA
- PLA (Polyactide/Polymilchsäuren) ist ein „Biokunststoff“ aus Maisstärke und biologisch abbaubar[1]

- Software tinkercad.com oder thingiverse.com

[1]https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/publikation/long/3834.pdf

Potenziale der Ressourceneffizienz

“The findings indicate that AM offers notable environmental benefits, including reductions in material waste and energy consumption, […]. Economic analysis reveals that AM is cost-effective for small-scale production but less competitive in large-scale operations. The study also highlights that while AM promotes material recycling, its full potential in supporting a CE has yet to be realized. To further advance AM's sustainability, it is recommended to integrate more sustainable materials into AM processes and adopt industry-wide protocols to support global adoption of sustainable AM practices.”

„Die Ergebnisse zeigen, dass AM bemerkenswerte Umweltvorteile bietet, einschließlich der **Verringerung von Materialabfall** und **Energieverbrauch**. […] Die wirtschaftliche Analyse zeigt, dass AM für die Produktion in kleinem Maßstab kosteneffizient ist, für die Serienproduktion jedoch weniger wettbewerbsfähig. Die Studie unterstreicht auch, dass AM zwar das **Materialrecycling fördert**, sein volles Potenzial zur Unterstützung eines Kreislaufprozesses aber noch nicht ausgeschöpft wurde. Um die Nachhaltigkeit von AM weiter voranzutreiben, wird empfohlen, **nachhaltigere Materialien in AM-Prozesse zu integrieren** und branchenweite Normen zu verabschieden, um die weltweite Einführung nachhaltiger AM-Verfahren zu unterstützen.“

Aus: H. H. Shah, C. Tregambi, P. Bareschino, and F. Pepe, “Environmental and economic sustainability of additive manufacturing: A systematic literature review,” Sustainable Production and Consumption, vol. 51. Elsevier BV, pp. 628–643, Nov-2024, S. 628

Potenziale der Ressourceneffizienz

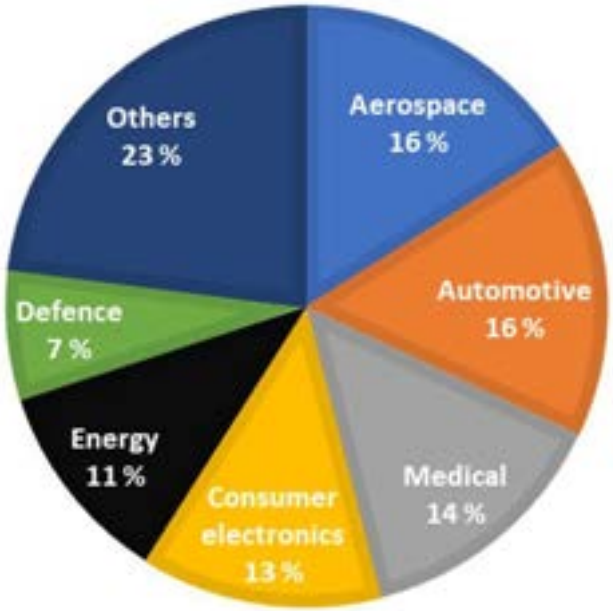
Definition: **Ressourceneffizienz** bezeichnet die möglichst effektive und schonende Nutzung von Rohstoffen und Energie. Das Ziel ist es, mit weniger Ressourcen mehr zu erreichen. So sollen Produkte und Dienstleistungen entstehen, die bei ihrer Herstellung, Nutzung und Entsorgung die Umwelt minimal belasten. (siehe: https://nachhaltigkeit-wirtschaft.de/glossar/ressourceneffizienz/)

Wir können unterscheiden zwischen

- Materialeffizienz
- Energieeffizienz

Einsatz von additiver Fertigung in der Industrie

- Einsatz von 3D-Druck verteilt sich auf unterschiedlichste Sektoren



S. Mika and E. Pei, “Additive manufacturing processes and materials for spare parts,” Journal of Mechanical Science and Technology, vol. 37, no. 11. Springer Science and Business Media LLC, pp. 5979–5990, Nov-2023.

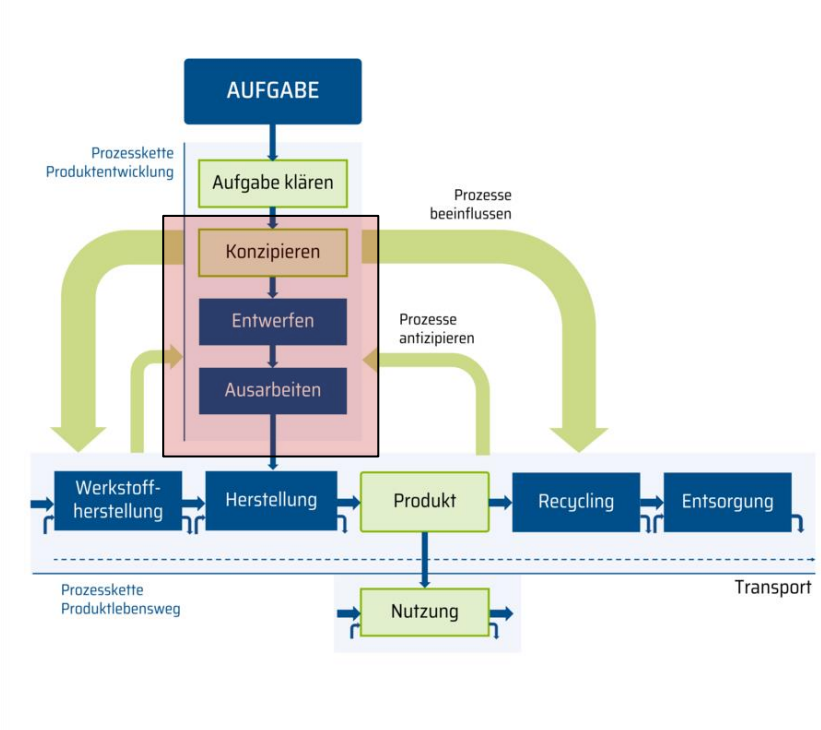
Materialeffizienz durch additive Fertigung

- Additive Fertigung wird (heutzutage) nur in wenigen Fällen zur Serienfertigung eingesetzt
- Beim 3D-Druck fällt in der Regel deutlich weniger Abfallmaterial an
- In Pulverbettverfahren kann unverbrauchtes Pulver zu einem gewissen Anteil recycelt werden

- Die Verbesserung der Materialeffizienz ist sehr stark vom eingesetzten Material abhängig
- Oft ist eine aufwändige life-cycle Analyse notwendig

Additive Fertigung in der Produktentwicklung

- Rapid Prototyping:
  - 3D-Druck von nicht endgültigen, physischen Modellen aus digitalen Entwürfen
  - schnelles Testen und Verfeinern von Teilen und Ideen auf der Grundlage von Feedback



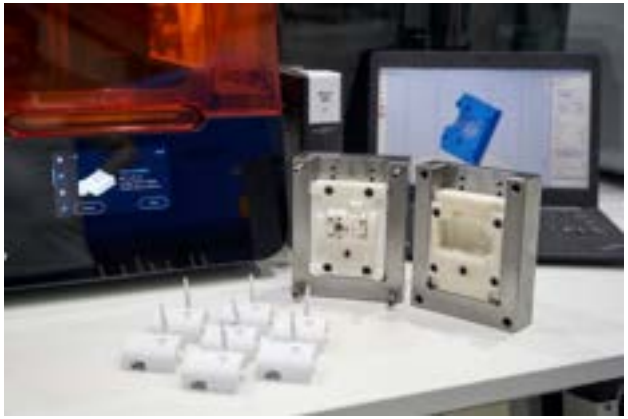
- Beispiel: Gehäuse eines Akkubohrers

Einsatz von 3D-Druck in der Herstellung

- Additive Fertigung wird nicht nur für das fertige Bauteil, sondern im Herstellungsprozess eingesetzt
  - Drucken von (verlorenen) Sandformen im Gießprozess

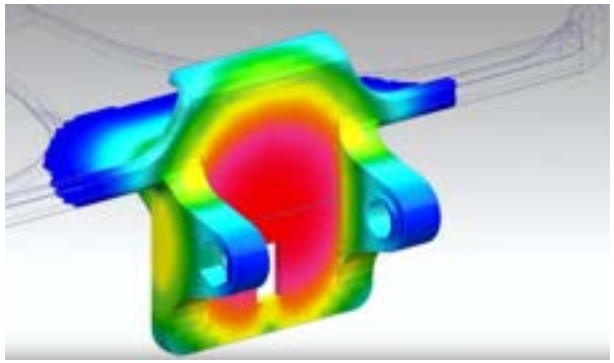
3D-Modell 3D-Druck Gussteil

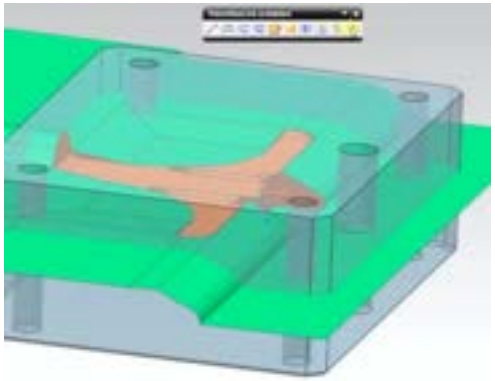
  - 3D-Druck der Formen von Spritzgussteilen



Additive Fertigung im Entwicklungsprozess von Spritzgussteilen

- CAD-Modell und 3D-gedruckter Prototyp



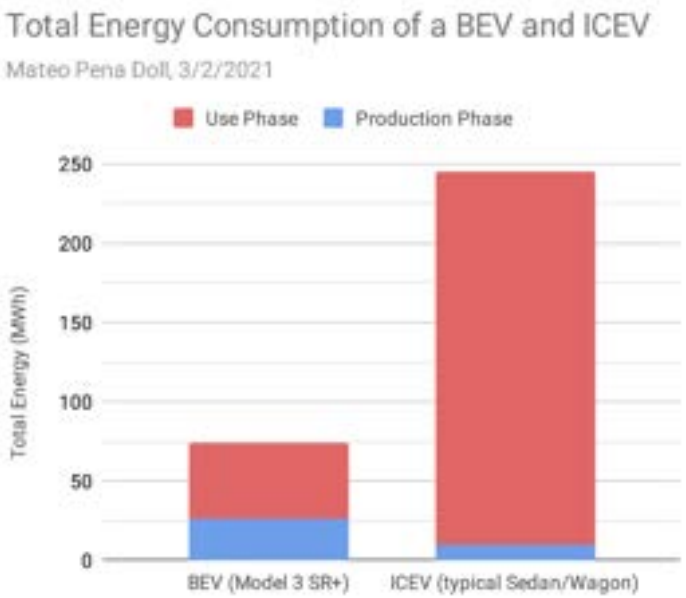


- Spritzguss-Simulation und 3D-Druck der Spritzgussform

Aus: Video der Firma alphacam, https://www.youtube.com/watch?v=k1hpVpIJpmc

Energieeffizienz durch additive Fertigung

- Energieeinsparungen während der Nutzung, z.B. durch Leichtbau



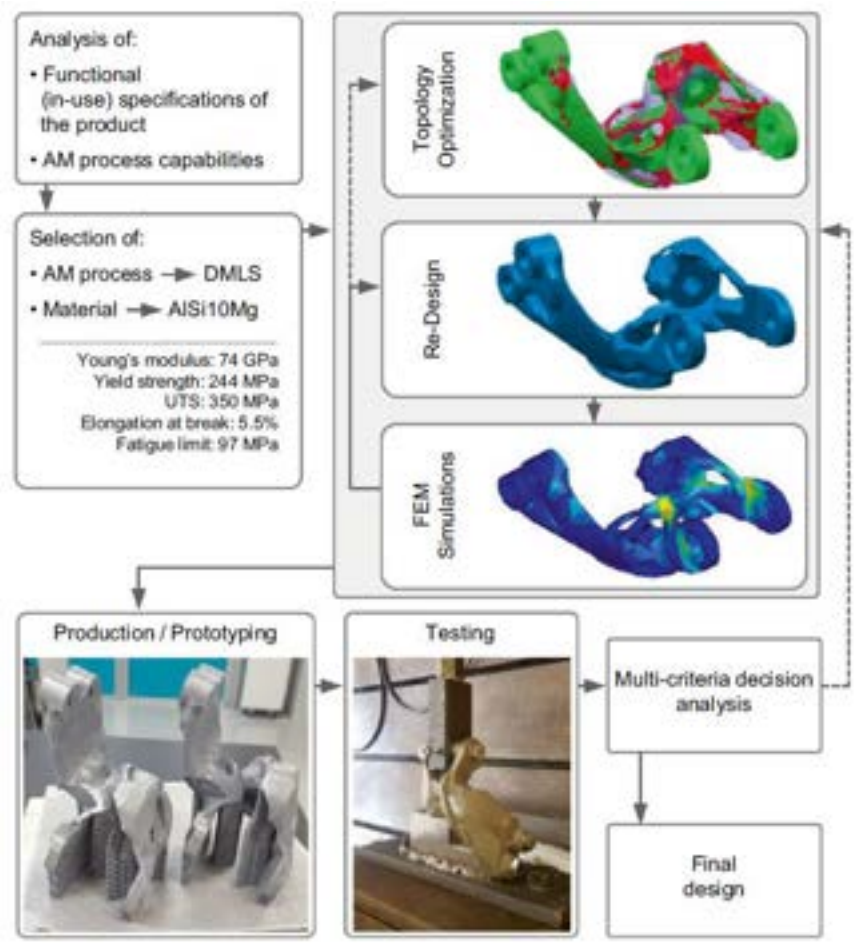
https://www.thriftybuilder.dev/post/bev-vs-icev-total-energy

Für Verbrenner-PKW ergibt sich durch Leichtbau eine Einsparung von
0,02 bis 1 Liter/(100 km 100 kg)[1]

1 Siehe: P. C. Priarone, A. R. Catalano, and L. Settineri, "Additive manufacturing for the automotive industry: on the life-cycle environmental implications of material substitution and lightweighting through re-design," Progress in Additive Manufacturing, vol. 8, no. 6. Springer Science and Business Media LLC, pp. 1229–1240, 25-Jan-2023.

Bauteiloptimierung und 3D-Druck

- Shape-Optimierung: Äußere Form wird nach bestimmten Kriterien angepasst
- Topologie-Optimierung: Äußere Form wird nur in bestimmten Bereichen beibehalten, es können aber auch Löcher oder innere Strukturen entstehen

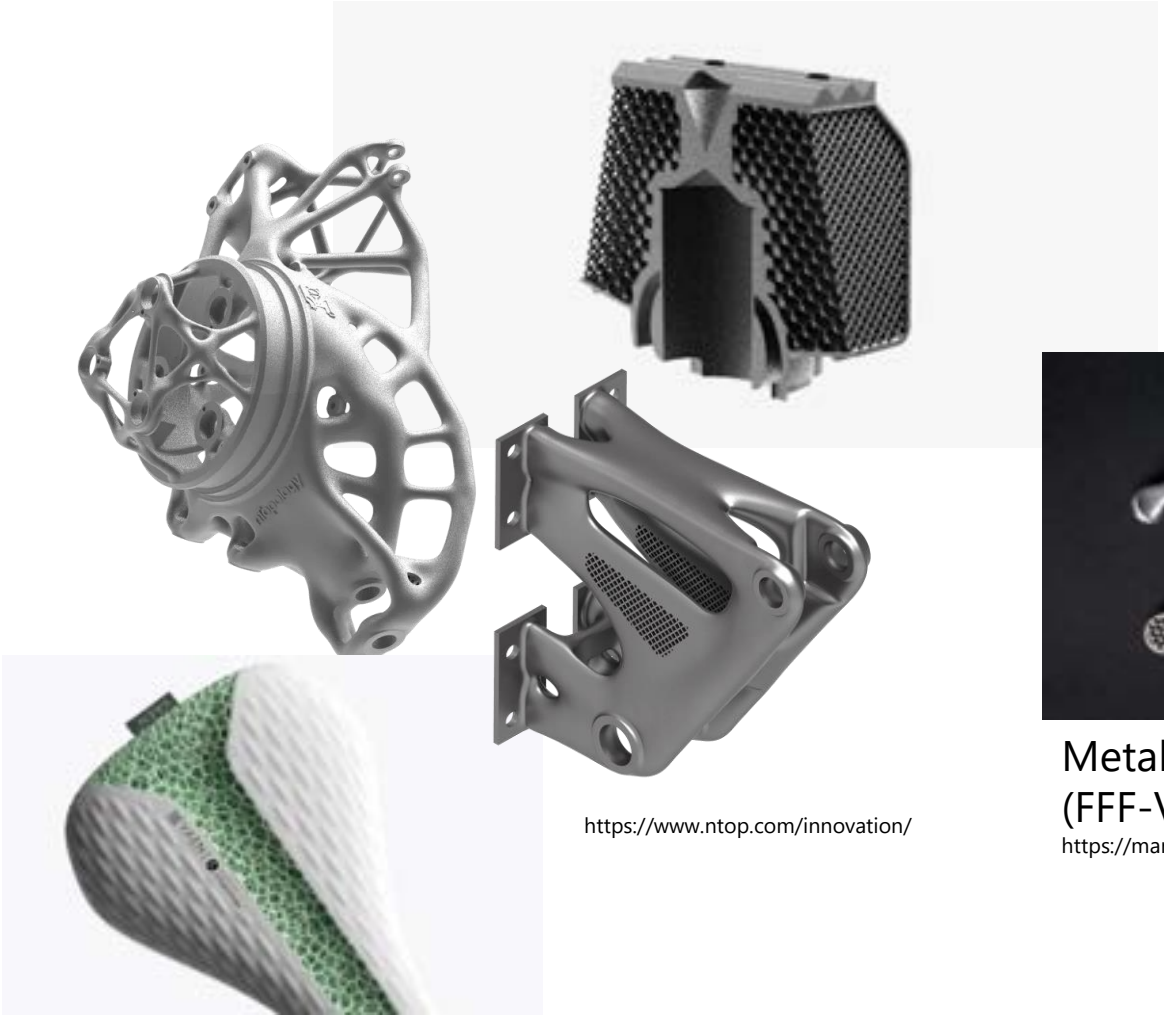


Siehe: P. C. Priarone, A. R. Catalano, and L. Settineri, "Additive manufacturing for the automotive industry: on the life-cycle environmental implications of material substitution and lightweighting through re-design," Progress in Additive Manufacturing, vol. 8, no. 6. Springer Science and Business Media LLC, pp. 1229–1240, 25-Jan-2023.

Topologie-Optimierung

- Vorgaben der Topologie-Optimierung sind z.B. „gleichbleibende mechanische Festigkeit bei minimalem Gewicht“
- Dadurch entstehen oft Bauteile, die sich nur additiv fertigen lassen oder bei denen die Formen additiv hergestellt werden müssen

Topologie-Optimierung: Beispiele



https://www.ntop.com/innovation/

Metall-3D-Druck mit Hohlräumen (FFF-Verfahren)

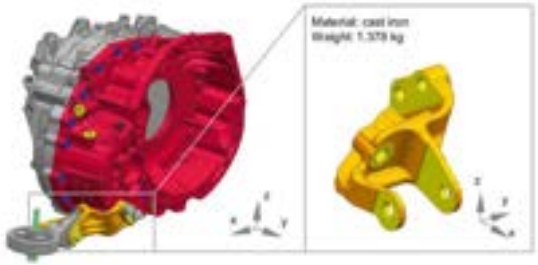
https://markforged.com/de/resources/blog/metal-3d-printing

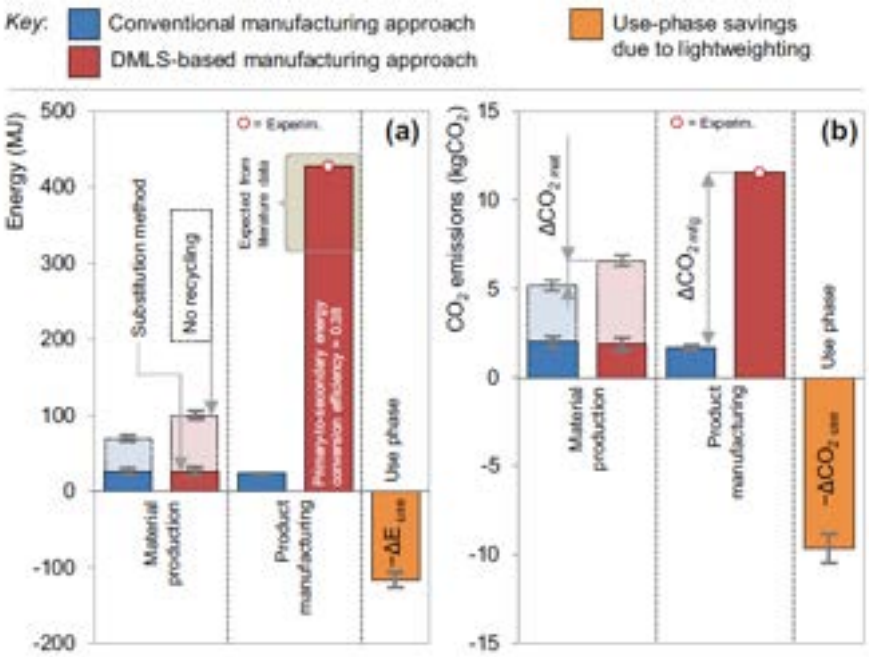
Energieeffizienz durch additive Fertigung

Reduzierter Energieverbrauch in der Fertigung?

- Energiebedarf des 3D-Drucks hängt extrem vom Verfahren, dem Material und eventuellen Nachbearbeitungsschritten ab

Im Vergleich von Direct Metal Laser Sintering (DMLS) und Gussteil schneidet die additive Fertigung deutlich schlechter ab. Ursache: Hoher Energiebedarf des Lasers in der Herstellung





Siehe: P. C. Priarone, A. R. Catalano, and L. Settineri, "Additive manufacturing for the automotive industry: on the life-cycle environmental implications of material substitution and lightweighting through re-design," Progress in Additive Manufacturing, vol. 8, no. 6. Springer Science and Business Media LLC, pp. 1229–1240, 25-Jan-2023.

Ressourceneffizienz durch längere Lebensdauer

Ersatzteile

- Shell, Deutsche Bahn, Daimler Truck berichten, dass sie bereits Additive Fertigung zur Herstellung von Ersatzteilen einsetzen
- Hauptmotivation sind:
  - Reduzierung des Lagerbestands
  - Bauteiloptimierung
  - Vereinfachung der Lieferkette
  - Kostenreduktion

Beispiel der Metropolitano de Lisboa, die 3D-gedruckte Haltegriffe als Ersatzteile einsetzt

Siehe: B. Naghshineh, M. Fragoso, and H. Carvalho, “Rethinking Additive Manufacturing for Spare Parts Supply Chain Management,” Research-Technology Management, vol. 66, no. 4. Informa UK Limited, pp. 38–47, 26-Jun-2023.

Ressourceneffizienz durch innovatives Bauteildesign und Integration verschiedener Funktonen

Entwicklung neuartiger, integrierter Vapor-Chambers zur Kühlung von Proton Exchange Membrane (PEM) Brennstoffzellen mittels additiver Fertigung

- Forschungsprojekt der DHBW Mannheim, DHBW Heidenheim und ARVOS Ljungström

- Gefördert im Rahmen des Programms investBW

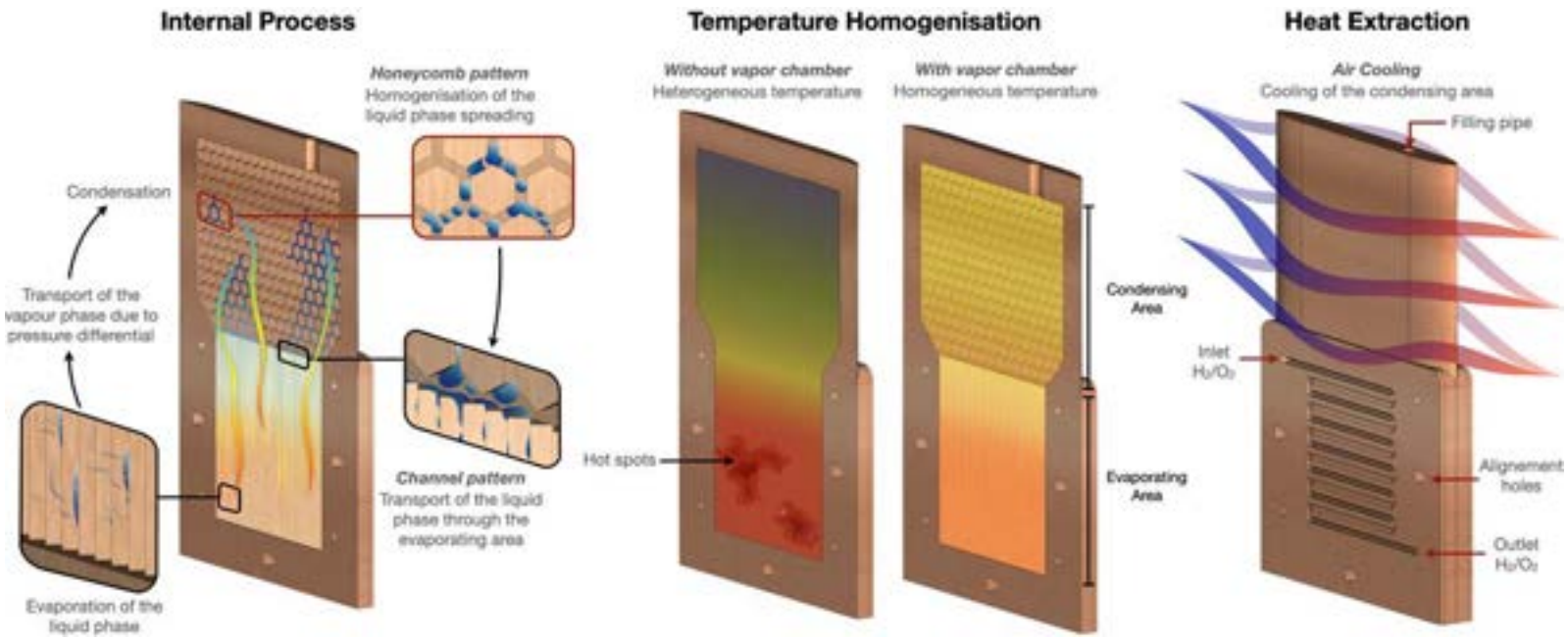
invest bw

Baden-Württemberg

MINISTERIUM FÜR WISSENSCHAFT, FORSCHUNG UND KUNST

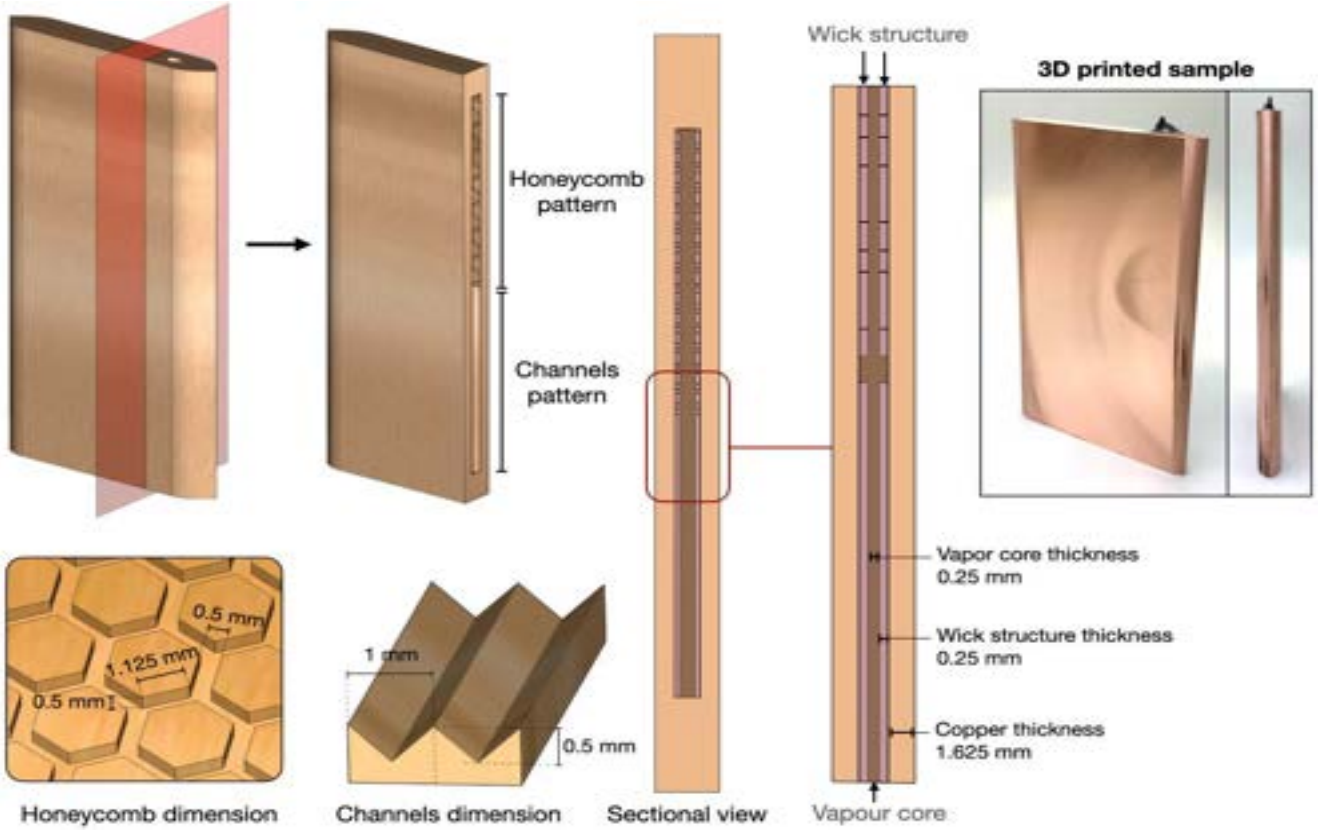
Additiv gefertigte Vapor Chamber

- Vapor Chamber = flache Heat Pipe



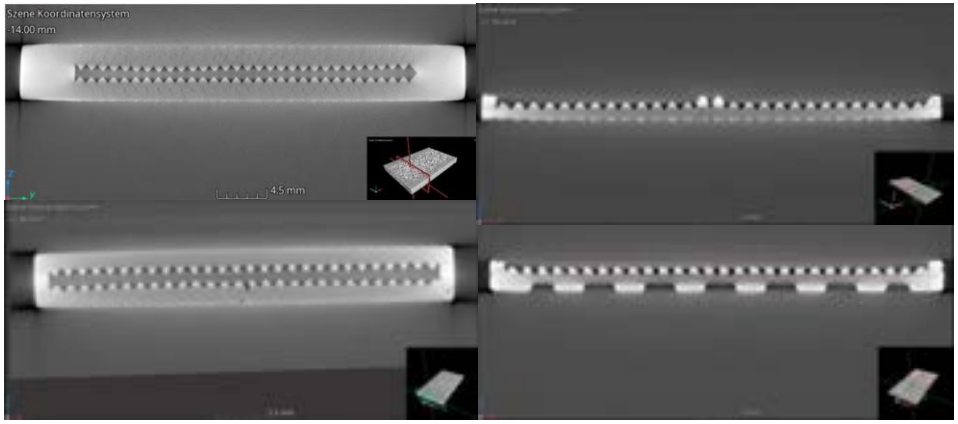
Additive Fertigung

- 3D-Druck im AddLab der DHBW Mannheim in Kupfer

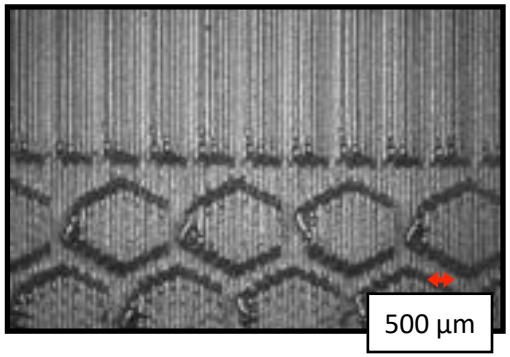


Qualitätsinspektion

- Röntgentomographie der Vapor Chamber



- Mikroskopie zeigt die Rauheit der Oberfläche



Zusammenfassung

- Additive Fertigung hat sich seit ihrer Erfindung vor 40 Jahren extrem breit entwickelt
- Es werden technisch 7 Hauptkategorien an 3D-Druckverfahren
- Heutzutage können Bauteile aus einer Vielzahl von Materialien additiv hergestellt werden

- Additive Fertigung bietet ein großes Potential zur Ressourceneffizienz, insbesondere durch
  - hohe Materialeffizienz in der Produktentwicklung
  - Ressourceneffizienz mittels Leichtbau („Topologieoptimierung“)
  - Verlängerung der Lebensdauer mittels optimierter Ersatzteile
  - Funktionsintegration und „intelligentes“ Bauteildesign

Ausblick

VDI nachrichten

29. November 2024 · Nr. 24 TECHNIK WIRTSCHAFT GESELLSCHAFT Einzelpreis 4,80 Euro

VON STEFAN ASCHE

Das Wachstumspotenzial der additiven Fertigung ist gigantisch: Es geht um zweistellige Raten – über viele Jahre hinweg. Namhafte Experten untermauern das. Einer von ihnen ist Christian Seidel. Der Professor an der Hochschule München und Unternehmensberater bei der marktführenden US-Agentur Wohlers Associates bringt es auf den Punkt: „Diese Technologie ist ein Tanker!" Sie habe gerade Fahrt aufgenommen – und sei jetzt kaum noch aufzuhalten. „Was sie stark macht, ist ihre Vielfältigkeit, ihre Flexibilität."

Wie universell einsetzbar die Technologie ist, wurde vergangene Woche auf der Formnext deutlich. Ein Blick auf die Nominierten für den Technikpreis der Messe umreißt die Größe des zu bestellenden Ackers.

Dennoch werden additive Verfahren – laut Seidel – wahrscheinlich nie mehr als 10 % der gesamten industriellen Fertigung ausmachen. Daran würden einzelne Branchen mit deutlich höheren Quoten – etwa die Luft- und Raumfahrt – nichts ändern. Demnach sind frühere Prognosen, die das großflächige Verdrängen etablierter Verfahren wie Spritzgießen, Drehen und Fräsen verhießen, heute passé.

Woran es der additiven Fertigung aktuell mangelt, sind wirtschaftliche Einsatzfelder. Um diese zu identifizieren, braucht es Konstrukteure, die additiv denken. Die benötigte Technologie ist vorhanden... 20

Sustainability

CO_2 einsparen mit Gasturbinen

Das US-amerikanische Energietechnologieunternehmen Baker Hughes hat untersucht, welche Auswirkungen es hat, wenn Gasturbinenkomponenten aus Nickelbasislegierungen additiv gefertigt werden – statt im traditionellen Feingießverfahren. Dabei ging es nicht nur um Wirkungsgrad und Lebensdauer, sondern auch um die Verringerung der Umweltauswirkungen. Ergebnis: Die Umstellung der Produktion auf additive Fertigung kann die CO_2-Emissionen je nach Anwendung um 16 % bis 38 % senken.

Sustainability

Zweites Leben für Hartmetalle

Die Ceratizit Austria GmbH stellt Hartmetallwerkzeuge im Schmelzschichtverfahren her. Eingesetzt wird dabei Sinterkarbid, ein Verbundwerkstoff aus besonders harten, aber fragilen Wolframkarbidpartikeln, die durch ein duktiles Metall wie Kobalt gebunden werden. Die überlegenen Eigenschaften bedingen allerdings eine komplexe Prozesskette, die hohe CO_2-Emissionen verursacht. Um dem entgegenzuwirken, haben die Österreicher die Hartmetallsorte „upGRADE CT-GS20Y" auf den Markt gebracht. Sie besteht zu mehr als 99 % aus wiederaufbereiteten Materialien, wodurch sich der materialbedingte CO_2-Fußabdruck um 65 % bis 80 % reduziert.

Die Möglichkeit, innere Strukturen zu drucken, bietet überdies Potenzial für neue Funktionalitäten. Das Unternehmen verweist diesbezüglich auf einen Knethaken. Dank interner Hohlstrukturen, die ausschließlich additiv aufgebaut werden können, könne das Bauteil mit einem Thermofluid geflutet werden, das die Temperaturregulierung während des Knetvorgangs verbessert.

DHBW Mannheim

Vielen Dank für die Aufmerksamkeit!

Bildquellen

- https://www.3dmicroprint.com/products/parts/
- https://commons.wikimedia.org/wiki/File:World_first_3D_printed_steel_bridge_in_Amsterdam.jpg
- https://cdn-reichelt.de/bilder/web/xxl_ws/EB00/ULTIMAKER_S3_ANW_01.png
- https://www.china-gadgets.de/app/uploads/2018/08/fdm_druck_aufbau.png
- https://www.3dnatives.com/de/das-erste-3d-gedruckte-wohngebaeude-in-deutschland-011020201/#!
- https://www.researchgate.net/publication/344339380/figure/fig1/AS:938794249371652@1600837399776/Illustration-of-the-directed-energy-deposition-DED-process-the-deposition-head-defines.png
- https://markforged.com/de/resources/learn/design-for-additive-manufacturing-metals/metal-additive-manufacturing-introduction/types-of-3d-printing-metal
- https://pub.mdpi-res.com/polymers/polymers-13-02829/article_deploy/html/images/polymers-13-02829-g001.png?1629829217
- https://www.3dsourced.com/wp-content/uploads/2019/08/PolyJet-Parts.jpg
- https://www.ressource-deutschland.de/themen/ressourceneffizienz/
- https://www.pohl-metallbildner.de/bilder/gussteil.png
- https://3d.formlabs.com/spritzguss-mit-gussformen-aus-dem-3d-drucker/
- https://convercon.com/topology-optimization/
- https://3dprint.com/295299/daimler-truck-tackles-spare-part-challenges-with-e-shop-for-3d-printed-parts/

Literatur

Zeitschriftenartikel

- M. Candi and A. Beltagui, “Effective use of 3D printing in the innovation process,” Technovation, vol. 80–81. Elsevier BV, pp. 63–73, Feb-2019.
- A. Jandyal, I. Chaturvedi, I. Wazir, A. Raina, and M. I. Ul Haq, “3D printing – A review of processes, materials and applications in industry 4.0,” Sustainable Operations and Computers, vol. 3. Elsevier BV, pp. 33–42, 2022.
- M. Manoj Prabhakar, A. K. Saravanan, A. Haiter Lenin, I. Jerin leno, K. Mayandi, and P. Sethu Ramalingam, “A short review on 3D printing methods, process parameters and materials,” Materials Today: Proceedings, vol. 45. Elsevier BV, pp. 6108–6114, 2021.
- S. Mika and E. Pei, “Additive manufacturing processes and materials for spare parts,” Journal of Mechanical Science and Technology, vol. 37, no. 11. Springer Science and Business Media LLC, pp. 5979–5990, Nov-2023.
- B. Naghshineh, M. Fragoso, and H. Carvalho, “Rethinking Additive Manufacturing for Spare Parts Supply Chain Management,” Research-Technology Management, vol. 66, no. 4. Informa UK Limited, pp. 38–47, 26-Jun-2023.
- P. C. Priarone, A. R. Catalano, and L. Settineri, “Additive manufacturing for the automotive industry: on the life-cycle environmental implications of material substitution and lightweighting through re-design,” Progress in Additive Manufacturing, vol. 8, no. 6. Springer Science and Business Media LLC, pp. 1229–1240, 25-Jan-2023.
- H. H. Shah, C. Tregambi, P. Bareschino, and F. Pepe, “Environmental and economic sustainability of additive manufacturing: A systematic literature review,” Sustainable Production and Consumption, vol. 51. Elsevier BV, pp. 628–643, Nov-2024.

Bücher

- Gebhardt, Andreas: Additive Fertigungsverfahren : Additive Manufacturing und 3D-Drucken für Prototyping - Tooling - Produktion. M: Carl Hanser Verlag GmbH Co KG, 2017.
- Fischer, Andreas ; Gebauer, Stefan ; Khavkin, Evgeniy: 3D-Druck im Unternehmen : Entscheidungsmodelle, Best Practices und Anwendungsbeispiele. Am Beispiel Fused Layer Modeling (FLM). M: Carl Hanser Verlag GmbH Co KG, 2018.
- Richard, Hans Albert ; Schramm, Britta ; Zipsner, Thomas: Additive Fertigung von Bauteilen und Strukturen : Neue Erkenntnisse und Praxisbeispiele. Berlin Heidelberg New York: Springer-Verlag, 2019.
- Gebhardt, Andreas ; Kessler, Julia ; Schwarz, Alexander: Produktgestaltung für die Additive Fertigung. M: Carl Hanser Verlag GmbH Co KG, 2019.