

Additiver Hybrid-Leichtbau – Highlight 3D print

Personalisierte Leichtbauprodukte durch intelligente Technologiekombination

R. Geiger, S. Rommel, J. Burkhardt, T. Bauernhansl

Dipl.-Ing. Raphael Geiger, Dipl.-Ing. Steve Rommel M. Sc., Dipl.-Ing. Jochen Burkhardt, Prof. Dr.-Ing. Thomas Bauernhansl

Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA

Nobelstr. 12, D-70569 Stuttgart

Tel. +49 (0)711 / 970-1550

E-Mail: jochen.burkhardt@ipa.fraunhofer.de

Internet: www.ipa.fraunhofer.de

Additive Fertigungsverfahren bieten durch ihren schichtweisen Aufbau einzigartige Gestaltungsfreiheiten. Hieraus leitet sich ein enormes Potential für den strukturellen Leichtbau ab. Bionische Leichtbaustrukturen, integrierte Funktionalitäten sowie topologieoptimierte Bauteile lassen sich direkt produzieren. Neben dem strukturellen Leichtbau lassen sich durch die Verwendung hochfester Werkstoffe oder von Werkstoffen mit geringer Dichte ebenfalls Leichtbauprodukte generieren. Ein Beispiel für werkstofflichen Leichtbau sind Faserverbundstrukturen, welche geringe Materialdichte mit hoher Festigkeit kombinieren. Durch Bündelung der Vorteile additiver Fertigungsverfahren mit Halbzeugen aus Hochleistungswerkstoffen – wie etwa kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffen – werden noch leichtere Produkte realisierbar. Besonders die Funktionsintegration und die Designfreiheit additiver Verfahren schaffen hier völlig neue Gestaltungsmöglichkeiten und einen Individualisierungsgrad, der im Leichtbau bisher unbekannt ist. Anhand eines Produktbeispiels wird aufgezeigt, welche Potentiale additiver Hybrid-Leichtbau eröffnet. Ausgehend von einer topologieoptimierten Form wird ein Bauteil abgeleitet. Dies wird im Lasersinterverfahren (SLS) gefertigt und in Kombination mit Kohlenstofffaserverbund (CFK)-Rohren sowie weiteren additiv gefertigten Bauteilen zum Produkt „Hocker“ zusammengefügt. Parallel wird das Verbundsystem digital abgebildet und simulativ überprüft.

Additive Hybrid Lightweight Construction – Highlight 3D print

Additive manufacturing technology offers unique design flexibility due to its layer-based construction approach. This provides new potential for lightweight construction. Bionic lightweight structures, integrated functionality, and topology optimized structures can now be manufactured. Another method to generate lightweight design is the usage of high-strength materials with low density. For example, fiber reinforced materials which combine high-tensile fibers with low material density. The combination of these two unique benefits leads towards ultra-light products. The degree of individualization through additive manufacturing represents a new tool in the field of lightweight design, providing new construction possibilities. This paper presents the potential of hybrid lightweight design with the help of a specific product. An ergonomic lightweight seat starts with a topology optimized 3D form. The construction combines additive manufactured parts with carbon fiber reinforced plastic (CFRP) pre-products. Additionally, the interaction between the constituent parts has been simulated.

1 Motivation: Leichtbau für den Menschen – personalisierte Leichtbaulösungen

Additiver hybrider Leichtbau zeigt sein gesamtes Potential bei individuellen, personalisierten Leichtbaulösungen. Exemplarisch wird dies aufgezeigt an der Entwicklung und Umsetzung extraleichter, ergonomischer Montagehocker für die Automobilproduktion.

Hocker ins Auto heben, montieren, Hocker herausheben, im nächsten Auto weitermontieren. Diesen Vorgang wiederholen Monteure in der Automobilbranche viele Male am Tag – mit gesundheitlichen Risiken. Vor einem demografischen Hintergrund der Arbeiterschaft wird die Arbeitsplatzergonomie zukünftig weiter an Interesse gewinnen. [1]

In der Fertigungslinie durchlaufen die Fahrzeuge verschiedene Montagestationen. Die Monteure sind dafür zuständig, an jeder Station bestimmte Teile anzubringen, beispielsweise Lenkrad, Rückspiegel oder Radio. Da im Fahrzeuginnenraum im Sitzen gearbeitet wird, müssen die Monteure ihre Hocker nach jedem Montagevorgang aus dem Auto heraus und ins nächste hinein heben. Je schwerer die Sitzgelegenheit ist, desto stärker werden Skelett, Muskeln und Gelenke langfristig beansprucht. Leichtere Montagehocker schaffen bessere Produktionsbedingungen, was sich in einer höheren Produktqualität mit geringerer Fehleranfälligkeit niederschlägt und den Arbeiter entlastet.

2 Vorgehen

2.1 Erstellung Konzeptstudie

Auf Basis der Produktionsbedingungen in der Montagelinie werden die Anforderungen abgeleitet. Die Arbeitsplatzergonomie soll durch ein leichteres Arbeitshilfsmittel (Hocker) erreicht werden. Zudem sollen Funktionen wie Drehbarkeit und Höhenverstellung erhalten werden. Erwünscht ist ein modularer Aufbau, um eine schnelle Anpassung an einen Produktwechsel oder geänderte Montagebedingungen zu ermöglichen. Hierbei soll nicht das gesamte Produkt ersetzt werden, sondern ausschließlich einzelne Module.

Das Lösungskonzept orientiert sich an drei Grundfunktionen des Hockers:

- Interaktion Mensch – Hocker
- Kraftübertragung und Erhöhung
- Interaktion Hocker – Karosserie

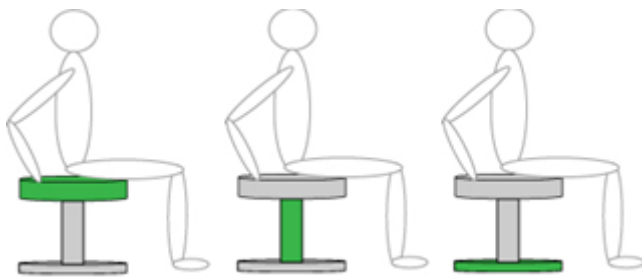


Bild 1: Konzept: Modulare Gliederung der Funktionen eines Montagehockers

Auf Basis dieser definierten Grundfunktionen wird die Konstruktion detaillierter ausgearbeitet. Für funktionelle Teile, etwa eine Höhenverstellung, bieten sich additive Verfahren an, da sie große Gestaltungsfreiheit bieten und somit eine Funktionsintegration ermöglichen. Für hochbelastete Teile bieten Halbzeuge aus hochfesten, leichten Werkstoffen, etwa Kohlenstofffaser-Verbundwerkstoffe, die optimalen Eigenschaften. Um das volle Leichtbaupotential additiver Fertigungsverfahren zu nutzen, sollte nur das benötigte Material generiert werden. Um ein spannungsoptimiertes Materialdesign zu erhalten, bietet sich die Methode der Topologieoptimierung an.

2.2 Topologieoptimierung

Unter „Topologie“ wird im Allgemeinen die Lehre von der Lage und Anordnung geometrischer Gebilde im Raum verstanden. Im Gegensatz zur Parameter- oder Formoptimierung wird bei der Topologieoptimierung keine Ausgangsgeometrie benötigt. Lediglich ein sogenannter Designraum wird vorgegeben, welcher dem zur Verfügung stehenden Bauraum des künftigen Produktes entspricht. Aus diesem Grund empfiehlt es sich, die Topologieoptimierung bereits in einer sehr frühen Phase des Produktentstehungsprozesses einzusetzen. [2]

Unter Berücksichtigung von Randbedingungen wie äußeren Lasten und Anbindungsstellen wird von der Topologieoptimierungssoftware im Designraum das Material optimal verteilt. Zudem können Fertigungsrandbedingungen wie Symmetrieebenen, Wandstärken oder Entformbarkeit bei Gussteilen mit berücksichtigt werden. Als Ergebnis steht dem Anwender ein kraftflussgerechter Designvorschlag zur Verfügung. Dieser auf finiten Elementen basierende Designvorschlag muss im Nachgang vom Konstrukteur noch überarbeitet und in eine fertige Gestalt überführt werden. Hierin zeigt sich der

Vorteil einer Kombination von Topologieoptimierung und additiven Fertigungsverfahren. Während bei konventionellen Fertigungsverfahren wie der spanenden Bearbeitung der konstruktive Aufwand für die Anpassung des Designvorschlages recht hoch sein kann, ist bei additiven Fertigungsverfahren die Möglichkeit gegeben, das Ergebnis der Topologieoptimierung nahezu ohne Änderung als Bauteil herzustellen. Als Abschluss des Topologieoptimierungsprozesses erfolgt in der Regel eine Validierungsrechnung mithilfe der Finite-Elemente-Methode (FEM), um die Festigkeit beziehungsweise Steifigkeit der Neuentwicklung nachzuweisen.

In aktuellen Topologieoptimierungsprogrammen stehen unterschiedlichste Optimierungsziele wie beispielsweise Masse, Nachgiebigkeit oder Eigenfrequenz zur Verfügung. Diese können entweder minimiert oder maximiert werden. Zusätzlich können diese Größen auch als Randbedingungen berücksichtigt werden, indem jeweils Grenzwerte vorgegeben werden. Zur Erzeugung einer Leichtbaulösung kann beispielsweise als Ziel die Minimierung der Masse, bei gleichzeitiger Einhaltung einer maximal zulässigen Verformung, vorgegeben werden.

Im Falle des Montagehockers sollte die Verbindung zwischen Sitzrohr und Hockerfüßen topologieoptimiert werden, da in diesem Bereich die größte Materialansammlung vorzufinden ist und hier folglich auch das größte Potential für Leichtbau liegt. Für einen sicheren und festen Stand wurde vorab festgelegt, einen Hocker mit fünf Standfüßen zu entwickeln. Ausgehend von der überschlägig berechneten, erforderlichen Einstecktiefe der Fußrohre, wurde der zur Verfügung stehende Bauraum abgeleitet. Wegen des rotations-symmetrischen Aufbaus von Hockern wurde der Designraum für die Topologieoptimierung als Zylinder aufgebaut. Zudem wurden Aussparungen für das Sitzrohr und die Fußrohre vorgesehen, da diese in jedem Fall im topologieoptimierten Designvorschlag enthalten sein müssen. Hierzu wurden in einer ersten Abschätzung die Durchmesser von Sitzrohr und Fußrohren bestimmt. In Bild 2 ist der Designraum für die Topologieoptimierung dargestellt.

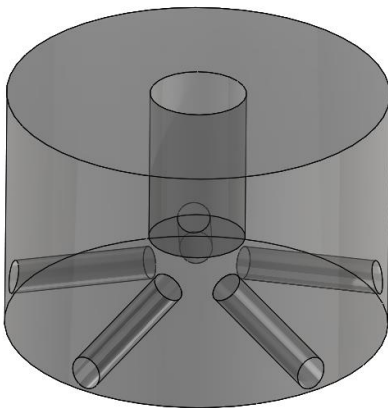


Bild 2: Designraum der Topologieoptimierung

Als Berechnungssoftware dient ein auf ANSYS Workbench basierendes Topologieoptimierungstool. Nach Integration der Ausgangsgeometrie werden hier im sogenannten Preprocessing die Randbedingungen definiert. Die äußere Kraft wurde überschlägig von der Belastung durch eine sich setzende Person abgeleitet und an der Anbindungsstelle zum Sitzrohr eingeleitet. Die Fußrohraufnahmen werden für die Topologieoptimierung als feste Lagerung angenommen. Als Optimierungsziel wurde eine maximale Bauteilsteifigkeit gesetzt und als Randbedingung ein Materialeinsatz von höchstens 10 % der Ausgangsmaterialmenge festgelegt.



Bild 3: Ergebnis der Topologieoptimierung

Bild 3 zeigt den vom Topologieoptimierungsprogramm erstellten Designvorschlag innerhalb des zur Verfügung gestellten Designraumes. Die entstandene Struktur weist konusförmige Materialanhäufungen entlang der unterschiedlichen Rohraufnahmen auf und verfügt über große Radien zwischen den Fußrohranbindungsstellen, woran die lastgerechte Materialverteilung und das Vermeiden von Spannungsspitzen zu erkennen ist.

2.3 FE-Validierung

Trotz der Möglichkeit, den Designvorschlag direkt additiv herzustellen, wurde im vorliegenden Fall das Ergebnis der Topologieoptimierung überarbeitet. Da es sich bei dem Verbindungsteil von Fußrohren und Sitzrohr um ein Sichtbauteil handelt, wurde neben der strukturellen Stabilität auch Wert auf ein ansprechendes Design gelegt. In Bild 4 ist das Resultat der Überarbeitung zu sehen.

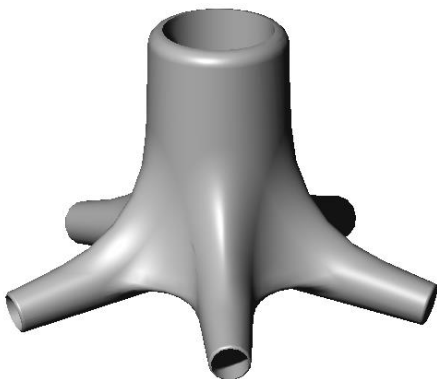


Bild 4: Überarbeitetes und angepasstes Modell

Im nächsten Schritt wurde das angepasste Modell einer FEM-Validierung unterzogen, um konkrete Aussagen über die auftretenden Spannungen und Verformung zu erhalten. Um das Bauteil möglichst realitätsnah in der Simulation abzubilden, wurden angrenzende Komponenten des Hockers mit berücksichtigt. Neben dem Sitzrohr wurden die Fußrohre samt Fußkappen im Simulationsmodell abgebildet. Zudem wurden die jeweiligen Klebeverbindungen in die Berechnung mit einbezogen. In Bild 5 ist das Modell des Hockers dargestellt, das zur Simulation herangezogen wurde.

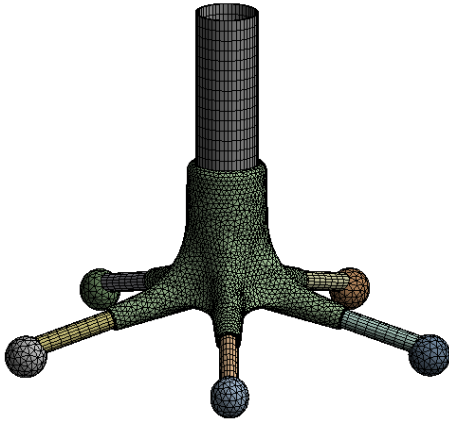


Bild 5: Simulationsmodell des Hockers

Das Modell wird lediglich in vertikaler Richtung an den Standflächen der Fußkappen gelagert, um ein Auseinandergleiten der einzelnen Füße zu ermöglichen. Ansonsten würde es zu einer künstlichen Versteifung kommen, die nicht dem realen Sachverhalt des auf dem Fahrzeugboden aufstehenden Hockers entspricht. Als äußere Kraft wird derselbe Wert wie bei der Topologieoptimierung verwendet.

Die aus CFK bestehenden Rohre werden durch ein vereinfachtes Werkstoffmodell abgebildet, bei dem die Faserorientierung nicht berücksichtigt wird. Da die Kennwerte sehr konservativ gewählt wurden und die CFK-Rohre deutlich steifer sind als die additiv zu fertigenden Teile ist diese Vereinfachung möglich.

In Bild 6 ist die berechnete Verformung des Hockers ohne Sitzfläche dargestellt. Die FE-Analyse zeigt eine Verformung von mehreren Millimetern. Bei diesem Anwendungsfall ist eine hohe elastische Verformung erstrebenswert, da ein Einfeldern beim sich-Hinsetzen als angenehm empfunden wird und auch aus ergonomischen Gesichtspunkten Sinn macht.

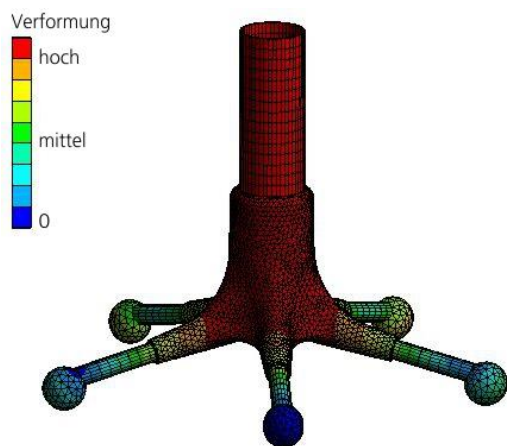


Bild 6: Verformung des Hockers

Die Analyse der auftretenden Spannungen ergab maximale Werte von etwa 21 MPa. Damit liegt für den verwendeten Werkstoff Polyamid eine ausreichende Sicherheit bei der Festigkeit vor, so dass der Hocker auch über gewisse Reserven bei Missbrauchsfällen verfügt. In Bild 7 sind die berechneten von-Mises-Vergleichsspannungswerte aufgeführt.

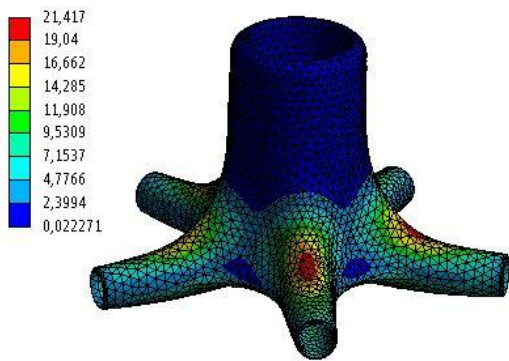


Bild 7: Auftretende Spannungen im Verbindungsteil

Durch die Topologieoptimierung mit anschließender FEM-Validierung konnte ein Design entwickelt werden, das einerseits eine ausreichende Sicherheit gegen Versagen und andererseits einen geringen Materialeinsatz aufweist. Für die gestellte Anforderung konnte eine leichtbaugerechte Lösung gefunden werden.

2.4 Angepasste Geometrie

Die gewählte Geometrie vereint die funktionalen Anforderungen an das Produkt. Durch den Einsatz topologieoptimierter Geometrien in Kombination mit Halbzeugen aus Faserverbundwerkstoffen wird das Gewicht signifikant reduziert unter Einhaltung der geforderten Stabilitätsanforderungen.

Die FE-Analyse des topologieoptimierten fünfarmigen Hockerfußes zeigte eine geringe Belastung im oberen Bereich des Bauteiles. Hierdurch konnte in einer zweiten Iteration weiteres Material und dadurch Gewicht eingespart werden (Bild 8 und Bild 10).



Bild 8: Rendering Prototyp 1. Einzelteile, Zusammenbau

Der fünfarmige Fuß, das untere Modul, verhindert ein Kippen des Hockers. Die als Standfläche fungierenden Fußenden werden der speziellen Beschaffenheit der Karosserie angepasst (Bild 9). Hierbei sind Material, sowie Geometrie nach Kundenwunsch anpassbar. Einstellbar sind Parameter wie Dämpfung, Gleiteigenschaften oder Elektrostatik. Der fünfflächige Stand erlaubt ein Montieren bei unterschiedlicher Beschaffenheit des Karosseriebodens. Zusätzlich ist, im Vergleich zur einfachen Standfläche, eine Durchführung verlegter Kabel am Fahrzeugboden möglich.

Das mittlere Modul, bestehend aus einem CFK Rohr und integrierter Höhenverstellung mit entkoppelter Drehfunktion, dient der Übertragung der entstehenden Sitzkräfte und der Generierung der gewünschten Sitzhöhe. Das hochfeste CFK Rohr mit dem lasergesinterten Funktionsbauteil zur Höhenverstellung bietet die gewünschte Funktion bei minimalem Gewicht.



Bild 9: Ausschnitt unteres Hockermodul, SLS Fußteil, CFK-Rohr und Fußende.

Die Sitzfläche, als drittes Modul, interagiert mit dem Monteur und ist in Form und Material an Kundenwunsch oder Körperform anpassbar. Das lasergesinterte Kunststoffteil ist durch seine Hohlstruktur leicht und stabil und integriert das Handling der Höhenverstellung. Die runde, gepolsterte Sitzfläche erlaubt ein ergonomisches Sitzen bei voller Drehfreiheit. (Bild 10)



Bild 10: Montierter Hocker mit runder Sitzfläche

Der modulare Aufbau erlaubt eine einfache Adaption an zukünftige Produktwechsel oder Personalwechsel, durch Austausch einzelner Module.

2.4 Produktion

In der Produktion der einzelnen Module werden CFK Rohre mit lasergesinterten Polyamid (PA)-Bauteilen kombiniert. Zusätzlich ist ein Lager für die Drehfunktion, eine gepolsterte Sitzfläche, sowie nach Kundenwunsch konfigurierte Fußkappen integriert. Die Einzelteile werden gesteckt und teilweise strukturell verklebt.

Beim Selektiven Lasersintern (SLS) wird ein pulverförmiges Ausgangsmaterial mithilfe eines Lasers punktuell verschmolzen (Bild 11). Durch mehrmaliges Beschichten mithilfe eines Wischers, der parallelen Absenkung der Bauplatzform und anschließendem Verschmelzen entsteht ein dreidimensionales Bauteil. [3]

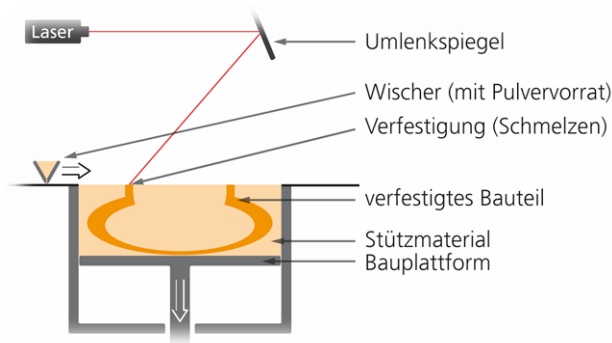


Bild 11: Selektives Lasersintern – Funktionsprinzip [3]

Die CFK Rohre sind im Wickelverfahren hergestellt und werden auf das erforderliche Maß abgelängt. Ausgangsmaterial sind vorimprägnierte Duromerprepregs [4]. Die Auswahl des Klebstoffes erfordert eine Abstimmung mit dem Matrixmaterial der Prepregs sowie dem Polyamid der SLS Bauteile.

3 Fazit und Ausblick

Die Möglichkeiten, personalisierte Leichtbauprodukte zu fertigen, bietet Chancen für zahlreiche Industriezweige und Branchen. Die Kombination aus topologieoptimierter Formgenerierung mit der gestalterischen Freiheit additiver Fertigungsverfahren eröffnet neue Potentiale für den gesamten Leichtbau.

Im vorgestellten Beispiel konnte das Gewicht im Vergleich zum Vorgängermodell um über 50 % gesenkt werden. Ergonomisch verbesserte Arbeitsplätze verringern Produktionsfehler und tragen somit zu einem qualitativ hochwertigeren Produkt, verringertem Ausschuss und einer profitableren Produktion bei. Verbesserte Arbeitsbedingungen werden, auch vor dem Hintergrund des demografischen Wandels, zukünftig noch wichtiger werden.

Additive Fertigungsverfahren ermöglichen im Bereich der Arbeitsplatzergonomie die Möglichkeit der Individualisierung. Speziell angepasste Arbeitsplätze für einzelne Menschen oder bestimmte Gruppen sind schnell umsetzbar. Durch die Fertigung ohne Form sind Produktionskosten für Einzellösungen und Kleinserien gering. Diese Chance, Leichtbauprodukte zu personalisieren, bietet sich gerade auch für körpergetragene Produkte an.

Zukünftig werden immer mehr Werkstoffe mittels additiver Fertigungsverfahren zu verarbeiten sein. Bereits heute können metallische Werkstoffe wie Titan und Stahl, Hochleistungskunststoffe wie Polyetheretherketon (PEEK) sowie endlosfaserverstärkte Kunststoffe wie CFK [5] verarbeitet werden. Diese Entwicklung wird zukünftig den Leichtbau noch stärker mit additiven Fertigungsverfahren verknüpfen.

Literatur

- [1] Hüttenrauch, M.; Baum, M.: Effiziente Vielfalt – Die dritte Revolution in der Automobilindustrie, Berlin Heidelberg: Springer-Verlag 2008
- [2] Harzheim, L.: Strukturoptimierung – Grundlagen und Anwendungen, Frankfurt am Main : Verlag Harri Deutsch 2008
- [3] Breuninger, J.; Becker, R.; Wolf, R.; Rommel, S.; Verl, A.: Generative Fertigung mit Kunststoffen – Konzeption und Konstruktion für Selektives Lasersintern, Berlin Heidelberg: Springer-Verlag 2013
- [4] Henning F. ; Moeller E.: Handbuch Leichtbau. München Wien: Carl Hanser Verlag 2011
- [5] Fischer, A.; Rommel S.; Bauernhansl T.: Additive Manufactured Thermoplastic Products via Fused Deposition Modeling (FDM) with integrated endless fibers. Proceedings of New Prolamat 2013, Digital Product and Process Development Systems. Dresden 2013