

Victor Klamert

Entwicklung eines Fertigungsprozesses zur Verarbeitung von kohlenstoffverstärkten Faserverbundwerkstoffen durch generativ gefertigte Formgebung

112 - Digital Business Transformation - Technologisch-basierte
industrielle Innovationen in der produzierenden Industrie

Abstract

Die Untersuchungen¹ befassen sich mit der Evaluierung einer neuartigen Fertigungsmethode zur Herstellung von individuellen Bauteilen aus kohlefaserverstärkten Verbundwerkstoffen mit Einzelteilcharakter. Die Formgebung erfolgt durch selektiv hergestellte Negativformen, die auf das Trennverhalten nach dem Laminiervorgang untersucht werden.

Keywords:

Generative Fertigung, Selektives Lasersintern, Negativform, Kohlefaser, Produktentwicklungszeit, Losgröße 1

1. Einleitung

Generative bzw. additive Fertigungsverfahren haben sich mittlerweile als einer der wichtigsten Bestandteile der heutigen Industrie etabliert. Eine Technologie, die anfänglich ausschließlich großen Konzernen und der industriellen Nutzung vorbehalten war, wurde im Laufe der letzten Jahre weiterentwickelt. Es entstanden somit weitere Verfahren mit immer größer werdendem Anwendungsspektrum. Einer der Gründe dafür war das Auslaufen von international gültigen Patenten für das FDM² Verfahren.

Mittlerweile gibt es unzählige Firmen und Institutionen, die ihren Fokus auf bestimmte Anwendungsgebiete der additiven Fertigung gelegt haben und dort Forschung & Entwicklung vorantreiben. Neben Consumer-Anwendungen kommt die Technologie u.a. auch in den Bereichen Automotiv Design (Prototypen, Werkzeuge, aerodynamische Testmodelle), Medical Engineering (Implantate, Prothesen, chirurgische Schablonen, Übungsmodelle), Dental Engineering (Brücken, Kieferorthopädische Hilfsmittel, chirurgische Schablonen) und Aviation bzw. Aerospace Design (Kabelabdeckungen, Treibstoffsystem, Sitzteile, div. Anbauteile) zum Einsatz.

2. Technologischer Hype

Neben dem Hype sollte jedoch beachtet werden, dass noch viel an Entwicklungsarbeit notwendig sein wird, um das volle Potential der Technologie ausnutzen und diese als „Schlüsseltechnologie“ bzw. „Basistechnologie“ bezeichnen zu können. Unter der Betrachtung der Technologie-Hype Kurve von

¹ Durchgeführt auf der FH Campus Wien, Studiengang High Tech Manufacturing

² Fused Deposition Modeling

McKinsey (vgl. Abb. 1), die den F&E-Aufwand der Leistungsfähigkeit der Technologie gegenüberstellt, befindet sich die generative Fertigung im Bereich „Schrittmachertechnologie“.

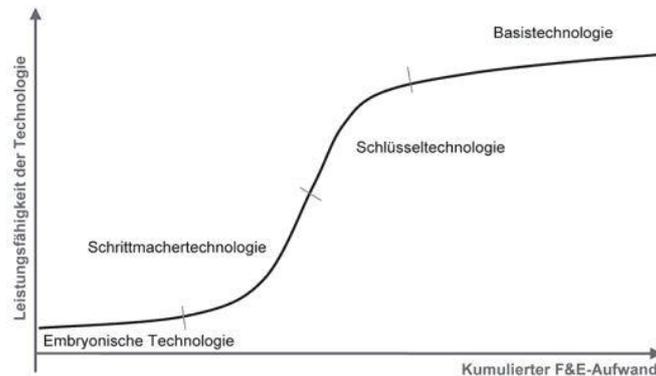


Abb. 1: S-Kurven Modell nach McKinsey (Schuh, Klappert 2011)

3. Anwendung an der FH Campus Wien

Die folgende Aufzählung gibt einen Überblick über die Bereiche, in die sich die generative Fertigung aufteilen lässt, und zeigt, wo diese an der FH Campus Wien bereits eingesetzt wurden:

- **Rapid Prototyping**, Herstellung von Modellen und Prototypenbau
 - Prototypenbau im Bereich Fahrzeugtechnik/Formula Student, Auslegung von Radträgern und Fahrwerkskomponenten
 - Nachbildung von Schädelteilen aus CT-Daten für den Bereich der Radiologietechnologie
 - Bewegliche Komponenten im Bereich Robotik und Bionik.
- **Rapid Manufacturing**, Herstellung von Funktionsmodellen und Kleinserien
 - Funktionsfähige Airbox im Bereich Fahrzeugtechnik/Formula Student, div. Anbauteile und Halterungen
 - Schalelemente für ein Fahrzeuglenkrad
 - Komponenten für ein Spurvermessungssystem
- **Rapid Tooling**, Herstellung von Werkzeugen und Formen
 - Herstellung von Schweißhilfen, Halterungen und Schablonen
 - Auslegung eines Systems zur Herstellung von gewickelten kohlefaserverstärkten Rohren
 - Herstellung und Anwendung von Formen (negativ und positiv) zum laminieren von faserverstärkten Leichtbauteilen im Bereich Fahrzeugtechnik/Formula Student.

4. Ausgangslage und Analyse

Auf Basis einer umfangreichen Analyse zu Beginn der Untersuchungen wurden ein Anforderungsprofil erstellt und Rahmenbedingungen definiert. Die Analyse beinhaltete unter anderem eine Zusammenfassung und auch Gegenüberstellung von Verfahren zur Verarbeitung von faserverstärkten Kunststoffen. Der Fokus wurde hier gezielt auf den Einsatz von Kohlefasern gelegt. Dabei sollte definiert werden, welches Verfahren für die vorliegende Arbeit zur Anwendung kommen sollte und ob dieses mit den zur Verfügung stehenden Ressourcen realisierbar wäre. Um das volle Potential von faserverstärkten Bauteilen ausnutzen zu können, wurde hierfür das „nass in nass“ Handlaminierverfahren mit zusätzlicher Vakuumabsaugung ausgewählt. Mit diesem Verfahren können besonders leichte Bauteile mit Festigkeiten³ im Bereich von $R_m = 1000 \text{ N/mm}^2$ und passendem Verhältnis aus Harz und Fasern (Faseranteil) hergestellt werden. Das Gewebe wird dabei trocken in die Form (Negativ- oder Positivform) gelegt und anschließend händisch mit Harz (Epoxidharz) getränkt. Nach dem Einlegen aller Gewebelagen werden diese mit Folien und Saugvlies abgedeckt und unter Vakuum ausgehärtet. Durch den Unterdruck wird überflüssiges Harz aus dem Gewebe gedrückt und im Absaugvlies gesammelt.

³ Abhängig von der Faserausrichtung

Mit der Analyse wurde weiters untersucht, ob die selektive Lasersinteranlage der FH Campus Wien, mit der schon seit Frühjahr 2014 Forschung & Entwicklung auf dem Gebiet betrieben wird, für die vorliegende Arbeit geeignet ist. Für die Herstellung von Laminierformen waren hauptsächlich die Oberflächenqualität⁴ und die Bauraumgröße relevant. Mit einer Schichtdicke von bis zu 60 µm und einer maximalen Bauteilgröße von 200x250x330 mm, ist die Maschine durchaus für die geplanten Untersuchungen geeignet.

5. Selektives Lasersintern

Selektives Lasersintern hat sich zu einem der wichtigsten generativen Fertigungsverfahren entwickelt. Durch das selektive Aufschmelzen von pulverförmigen Ausgangswerkstoffen⁵ werden dreidimensionale Strukturen erzeugt. Die Dichte und Festigkeit der hergestellten Bauteile erreicht bis zu 90% jener von Spritzgussteilen aus vergleichbaren Werkstoffen (Gebhardt 2013: 184), (EOS 2014), jedoch werden hierbei keine aufwändigen und kostenintensiven Negativformen für die Herstellung benötigt. Durch die Formstabilität und hoch-warmfesten Eigenschaften können nicht nur Prototypen und Funktionsmodelle, sondern auch kundenspezifische Kleinserien mit Einzelteilcharakter hergestellt werden.

6. Forschungsfrage

Die wissenschaftliche Fragestellung konzentriert sich auf das Abformverhalten von gesinterten Bauteilen nach der Aushärtung des Laminats. Der Schwerpunkt sollte dabei auf der Untersuchung der Oberflächen liegen und wie sich diese (behandelt, unbehandelt, beschichtet) auf das Trennverhalten von Negativform und darin hergestellten Bauteilen aus Faserverbund auswirken. Weiters gilt es zu untersuchen, welche nachträglich aufgetragenen Beschichtungen zu einer Verbesserung des Trennungsvorgangs führen. Neben iterativen Versuchsreihen wurden auch Messungen zur Bestimmung der Oberflächenrauheit durchgeführt. Konventionell hergestellte Negativformen werden meist aus vollen Blöcken gefräst, was neben den hohen Kosten auch einen hohen zeitlichen Aufwand mit sich bringt. Durch das neuartige Fertigungsverfahren wäre eine deutliche Reduktion der Fertigungsdauer und Produktentwicklungszeit realisierbar. Ein weiterer Vorteil der generativen Fertigung ist die freie Geometriegestaltung, die eine Umsetzung von nahezu jeder Form zulässt.

7. Methodik

Es wurden iterative Abformversuche mit verschiedenen Oberflächenzuständen und Messungen der Oberflächenrauheiten durchgeführt. Die Untersuchungen erfolgten sowohl an unbearbeiteten als auch an mit Kunstharz beschichteten Formen. Hierfür wurde das Laminat mittels Vakuumverfahren an die Formoberfläche gepresst, um reproduzierbare Versuchsbedingungen zu schaffen. Nach dem Aushärten erfolgte die Trennung des Bauteils von der Form und ein Vergleich mit vorangegangenen Versuchsreihen. Zusätzliche Messungen der Oberflächenrauheiten dienten zur Verdeutlichung der Ergebnisse.

8. Auslegung und Herstellung der Negativform

Mit dem Programm SolidWorks wurde unter Einhaltung von geeigneten Formschrägen und weiteren Anforderungen wie der Berücksichtigung der maximalen Bauraumgröße der Lasersinteranlage eine Negativform konstruiert.

⁴ Bedingt durch die Schichtdicke

⁵ Teilkristalline thermoplastische Kunststoffe

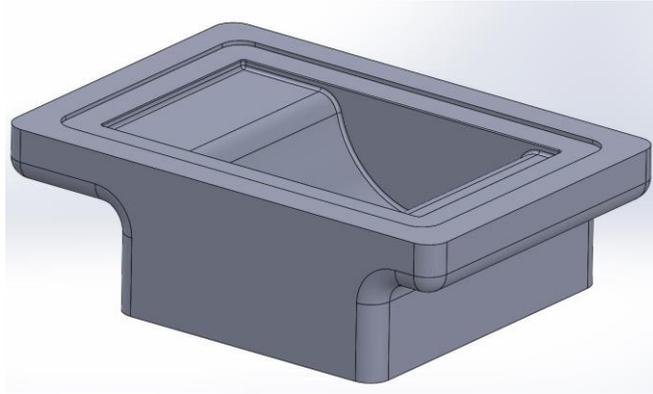


Abb. 2: Konstruierte Negativform

Die Form, die in Abbildung 2 zu sehen ist, dient der Herstellung von Halbschalen für die Pedalerie eines Formula Student Fahrzeugs. Durch diese werden die Füße der Fahrerin/des Fahrers auf den Pedalen positioniert und können während des Rennbetriebs nicht verrutschen. Gut zu erkennen sind die Rundungen, die das Abformen des ausgehärteten Laminats vereinfachen sollen.



Abb. 3: Gesinterte Negativform

Auf der Abbildung 3 ist die gesinterte und fertig gestrahlte Negativform zu sehen. Für die Fertigung der Form wurde eine Schichtdicke von 100 μm festgelegt. Diese könnte weiter auf 0,06 mm herabgesenkt werden, was aber wiederum zu einer deutlichen Verlängerung der Herstellungsdauer und folgend auch Produktentwicklungszeit führen würde. Die Form wurde im Bauraum der Anlage passend positioniert, sodass das Aufbringen der einzelnen Schichten parallel zur Grundfläche⁶ der Form erfolgte. Dadurch sollte die Oberfläche der Halbschale überall gleiche Eigenschaften aufweisen. In den folgenden Schritten wurden Messungen der Oberflächenrauheit der Form durchgeführt und erste Teile laminiert, um das Abformverhalten in Abhängigkeit zur Beschaffenheit der Oberfläche zu untersuchen.

9. Messung der Oberflächenrauheit und Beurteilung des Abformverhaltens

Die Messung der Oberflächenrauheit der gesinterten Negativform ergab einen durchschnittlichen Mittenrauheitswert von $R_a = 10,8 \mu\text{m}$ (vgl. Abb. 4)

⁶ Horizontale Bodenfläche der Form

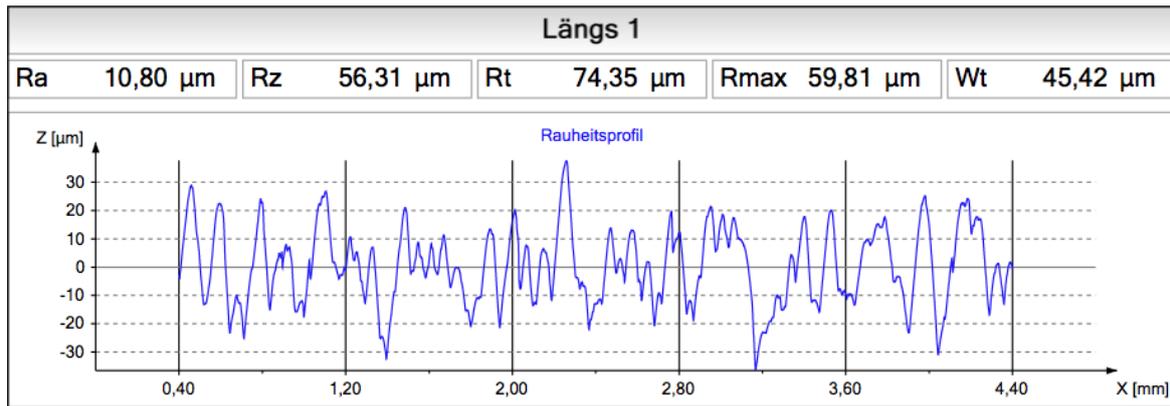


Abb. 4: Mittenrauheitswert der Formoberfläche

Die Trennung des ersten laminierten Bauteils (vgl. Abb. 5) von der unbehandelten Negativform war nur mit großem Kraftaufwand möglich und führte beinahe zur Zerstörung des Laminats



Abb. 5: Abgeformter Bauteil aus der unbehandelten Form

Die Messung der Oberflächenrauheit am Bauteil ergab einen durchschnittlichen Mittenrauheitswert von $R_a = 10,4 \mu\text{m}$ (vgl. Abb. 6)

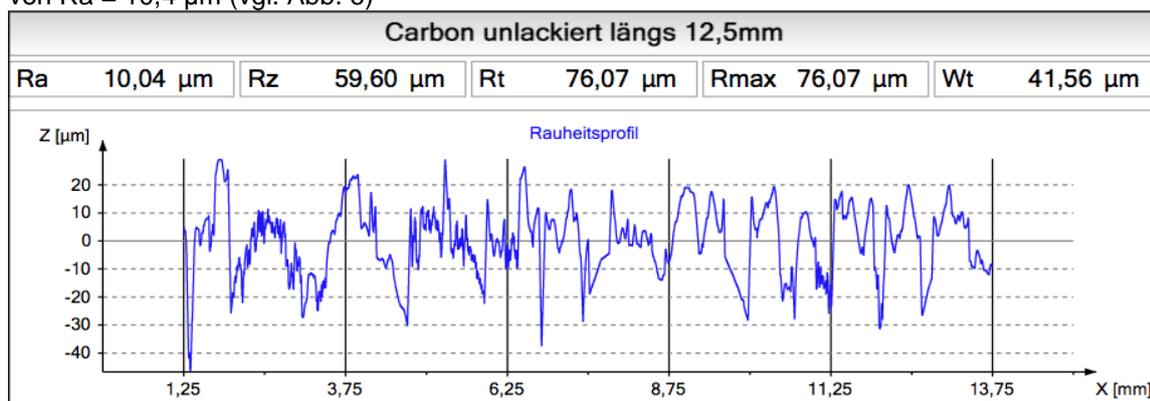


Abb. 6: Messung an der Bauteiloberfläche

Die Eigenschaften der Formoberfläche und der des laminierten Bauteils wurden aufgrund der Untersuchungen als vergleichbar betrachtet. Die folgenden Messungen wurden aus diesem Grund nur noch an der Oberfläche des abgeformten Bauteils durchgeführt.

Um eine Senkung der Oberflächenrauheit, eine Verbesserung des Trennverhaltens und eine optische Aufwertung der laminierten Bauteile hervorzurufen, wurden weitere idente Formen gesintert und

diese mit diversen Flüssigfüllern und Kunstharzen beschichtet. Die besten Ergebnisse wurden dabei mit einer Kunstharzbeschichtung erzielt (vgl. Abb. 7)

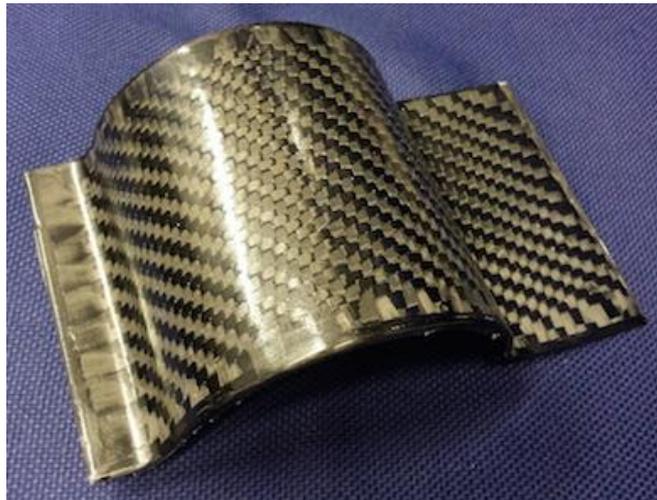


Abb. 7: Abgeformter Bauteil / mit Kunstharz beschichtete Negativform

Das Bauteil auf der Abbildung 7 konnte leicht und ohne viel Kraftaufwand von der Form getrennt werden. Die Messung der Oberflächenrauheit ergab einen Wert von $R_a = 0,88 \mu\text{m}$ (vgl. Abb. 8).

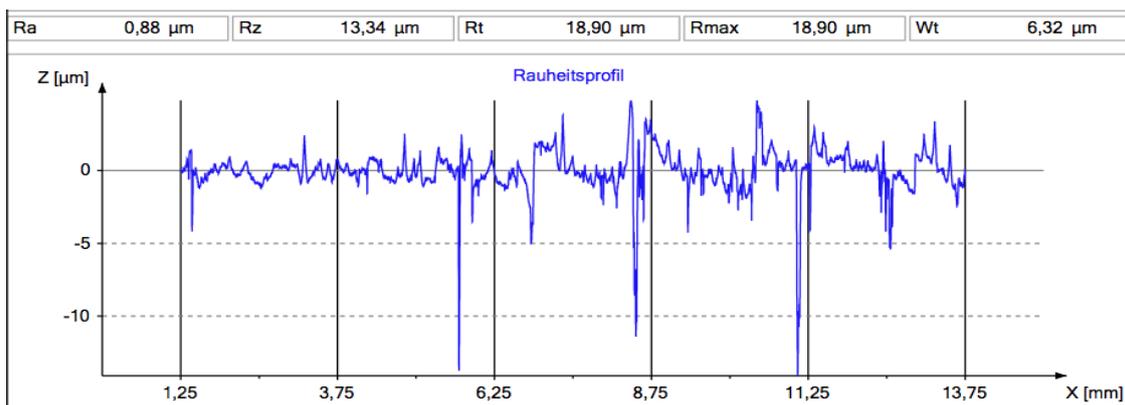


Abb. 8: Messung an der Bauteiloberfläche

Durch eine zusätzliche Beschichtung des Bauteils mit Kunstharz konnte der Mittenrauheitswert weiter auf $R_a = 0,3 \mu\text{m}$ (vgl. Abb. 9) reduziert werden.

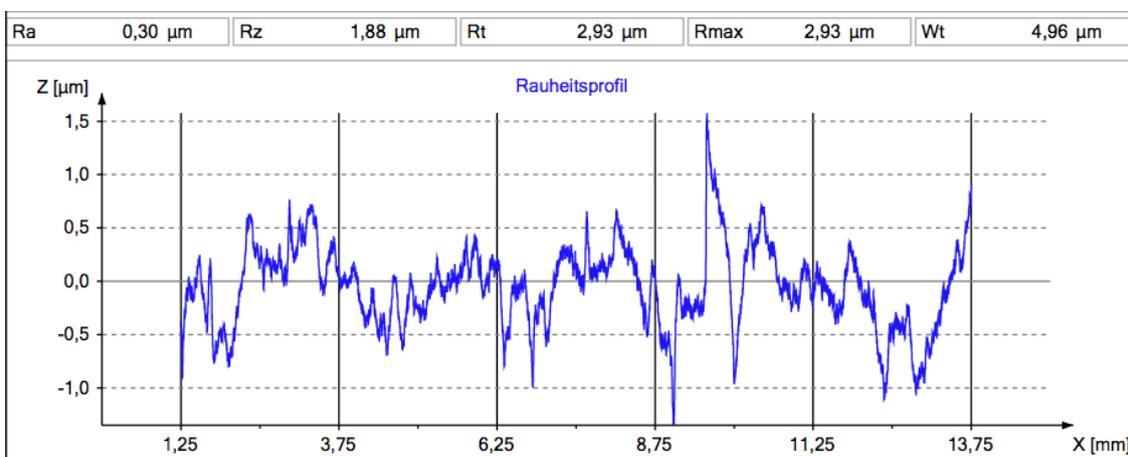


Abb. 9: Messung an der Bauteiloberfläche mit Kunstharzbeschichtung

10. Anwendung

Mit der beschriebenen Fertigungstechnik wurden bereits Leichtbauteile mit Einzelteilcharakter für Formula Student Fahrzeuge hergestellt. Die Herstellung der Teile erfolgte nur mittels beschichteter Formen, um eine zerstörungsfreie Trennung von Form und Bauteil zu garantieren. Die Herstellungskosten liegen deutlich unter jenen gefräster Formen. Die Limitierung liegt bei der beschränkten Bauraumgröße der Laser-Sintermaschine. Formen, die größer als der maximal nutzbare Bauraum der Sinteranlage sind, werden konstruktiv geteilt und nach der Anfertigung mittels Schraub- oder anderer Verbindungen zusammengesetzt.

Folgende Teile konnten bereits gefertigt werden:

- Halbschalen für die Pedalerie
- Treibstofftank aus zwei miteinander verklebten Hälften
- Luftleitsysteme für einen Diffusor
- Luftleitsystem zwischen Motorkühler und Lüfter.

11. Ergebnisse und Ausblick

Die Ergebnisse zeigen, dass die Abtrennung der Bauteile von nicht beschichteten Formoberflächen nur mit großem Aufwand möglich war. Die resultierende Oberflächenqualität ist ähnlich der der Negativform und somit nicht ausreichend für einen zielführenden Abformprozess. Eine merkbare Verbesserung wird mit einer Kunstharzbeschichtung erreicht. Auch der Vergleich von gemessenen Rauheitswerten zeigt eine deutliche Senkung der Werte bei der beschichteten Oberfläche (vgl. Tab. 1).

Gesinterte Negativform	Ra = 10,8 µm
Abgeformter Bauteil ohne Formbeschichtung	Ra = 10,04 µm
Abgeformter Bauteil mit Formbeschichtung	Ra = 0,88 µm
Abgeformter Bauteil mit Beschichtung	Ra = 0,3 µm

Tabelle 1: Vergleich der Rauheitswerte

Als Vergleichswert kann der Mittenrauheitswert von Aluminium⁷, der im Durchschnitt bei Ra = 0,6 µm liegt (Almet 2016) herangezogen werden.

Die Fertigungsdauer könnte durch Verbesserungen der Bauteilqualität und Senkung der Oberflächenrauheitswerte weiter reduziert werden. Somit könnte das Laminat direkt, ohne weitere Bearbeitungsschritte in die Form eingebracht werden. Die Anwendung eines alternativen generativen Herstellungsverfahrens wäre hier denkbar. Auch eine Vergrößerung⁸ des Bauraums der Sintermaschine würde die Weiterverarbeitung erleichtern, da die Form in einem Stück gefertigt werden könnte.

⁷ Aluminiumlegierungen, die zur Herstellung von Werkzeugen eingesetzt werden, nach der Fräsbearbeitung

⁸ Was aber die Anschaffung einer neuen Maschine voraussetzt

Literaturliste/Quellenverzeichnis:

- Hauke, T./Jäger, H. (2010): Carbonfasern und ihre Verbundwerkstoffe. Süddeutscher Verlag, München, 2010.
- Baschin, E./Buck, V./Pröm, M./Roller, R./Rödter, H. (2012): Fachkunde Modellbau – Technologie des Modell- und Formenbaus. Verlag Europa Lehrmittel, Haan-Gruiten, 6. Auflage, 2012.
- Schuh, G., Klappert, S. (2011): Technologiemanagement. Springer, Wiesbaden, 2. Auflage, 2010
- Industrievereinigung Verstärkter Kunststoffe (2014): Handbuch
- Gebhardt, A.: Generative Fertigungsverfahren (2013): Additive Manufacturing und 3D Drucken für Prototyping - Tooling – Produktion, Hanser, München, 4. Auflage, 2013.
- Trzesniowski M. (2010): Rennwagentechnik – Grundlagen, Konstruktion, Komponenten, Systeme. Vieweg + Teubner / Springer Fachmedien GmbH, Wiesbaden, 2. Auflage, 2010.
- Klamert V. (2015): Entwicklung eines Fertigungsprozesses zur Verarbeitung von kohlenstoffverstärkten Faserverbundwerkstoffen durch generativ gefertigte Formgebung, Masterarbeit, High Tech Manufacturing, FH Campus Wien, 2014
- Die Karl Meyer Gruppe (2014): CFK Recycling Center. Online im Internet: <http://www.cfkrecycling.com/index.php?id=6> (Stand 19.03.2014)
- Almet Aluminium (2016): Produktdatenblatt Fortal 7075 / Alumold (AlZnMg Cu 1,5). Online in Internet unter http://www.almetamb.de/hosting/almet/website_de.nsf/urlnames/service_alumold
- Aka Modell, Technische Hochschule München (2014): Projekt AM10 „Climax“. Online im Internet: <http://www.akamodell.vo.tum.de/projekte/am10/> (Stand 2009)
- R&G Faserverbundwerkstoffe GmbH (2015): Materialeigenschaften Köpergewebe 93g/m². Online im Internet: <http://shop1.r-g.de/art/190223-T> (Stand 2015)
- R&G Faserverbundwerkstoffe GmbH: Gebrauchsanweisung Grundierwachs. Online im Internet: <http://www.r-g.de/wiki/Trennmittel> (Stand 2015)
- Firma Hoerbiger Ventilwerke GmbH C0 & KG (2014), Werkstofflabor, 2014
- EOS GmbH (2014): Produktinformationen EOSINT P/ PA2200-Pulver. EOS GmbH, Krailing. S. 2, 2014