

Rapid Shaping Prozess zur Herstellung von CFK-Bauteilen

Prof. Dr.-Ing. Rüdiger Hornfeck

Georg-Simon-Ohm-Hochschule Nürnberg
Fakultät Maschinenbau und Versorgungstechnik

Zur Herstellung von CFK-Bauteilen sind Laminierformen erforderlich. In der Kleinstserienfertigung und im Prototypenbau müssen demzufolge die Werkzeugkosten auf geringe Stückzahlen umgelegt werden, was eine erhebliche Verteuerung der Stückkosten bedeutet. Darüber hinaus sind ebenfalls die Durchlaufzeiten in der Fertigung entsprechend lang, bis die CFK-Teile abgeformt werden können.

Um Fertigungskosten einzusparen und um vorrangig diesen Fertigungsprozess zu beschleunigen, wurden Laminierformen aus Kunststoff mit einem Rapid Prototyping Prozess nach dem Fused Deposition Modeling Verfahren aufgebaut.

Des Weiteren wurde untersucht, wie sich bei den Kunststoffformteilen die Oberfläche veredeln lässt, damit die herstellbedingten Schichtstufen egalisiert werden können.

Abschließend wurde dieser Rapid Shaping Prozess an zwei ausgewählten CFK-Bauteilen verifiziert.

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln der Paul und Helene Metz Stiftung gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt liegt beim Autor.

1. Einleitung

Erfolgreiche Unternehmen sind stets bestrebt ihre Produktentwicklungsprozesse zu optimieren. Hierzu zählt auch der Einsatz von Simulationswerkzeugen. Das führt dazu, dass vermehrt auf den Einsatz teurer Prototypenhardware verzichtet werden kann und auch längere Fertigungszeiten vermeidbar sind.

Dennoch kann heute nicht ganz auf den Prototypenbau und den Test verzichtet werden, da der haptische Eindruck am Rechner und Bildschirm noch nicht optimal vermittelt werden kann und weniger technisch versierte Entscheider das Teil, die Maschine oder das Fahrzeug als reales Modell betrachten möchten.

Um trotzdem kostengünstig und schnell Prototypenhardware herstellen zu können, wurde 1986 von Charles Hull ein Patent für eine Stereolithographie-Maschine angemeldet und die Firma 3D-Systems gegründet [3DSYSTEM 2011]. In den frühen 90er Jahren fanden diese Maschinen dann ihren kommerziellen Einsatz im Prototypenbau. Zwischenzeitlich haben sich eine Vielzahl weiterer generativer Fertigungsverfahren etabliert, mit denen Teile aus Kunststoff, Wachs, Gips oder Metall hergestellt werden können.

Neben dem Bedarf an der „schnellen“ Herstellung von komplexen Teilen für Prototypen und Kleinstserien aus den oben genannten Materialien steigt die Nachfrage nach Leichtbau-Bauteilen aus kohlenstoffverstärkten Kunststoffen (CFK-Bauteilen), die ebenfalls kostengünstig und in kurzen Durchlaufzeiten produziert werden sollen, an. So nehmen beim Airbus A380 Teile aus CFK bereits ca. 22 % des Strukturgewichts ein [INDUSTRIEANZEIGER 2006]. Fahrradrahmen oder die dazugehörigen Anbauteile aus CFK sind weitere Beispiele für den Einsatz dieser Hochleistungswerkstoffe bei Sportgeräten.

Im Prototypenbau und in der Einzelteil- und Kleinstserienfertigung besteht der Aufwand darin, dass hier vor dem Laminieren der Verbundbauteile üblicherweise Laminierformen gefräst werden müssen. Somit taucht das gleiche Problem auf wie bei der bereits oben erwähnten konventionellen Fertigung von Prototypen und Einzelteilen: es müssen in zeit- und kostenaufwendigen Fertigungsprozessen Formen gebaut werden.

Damit die konventionelle Fertigung des CFK-Formenbaus umgangen wird, wurde das Forschungsprojekt "Entwicklung eines Rapid Shaping Verfahrens zur Herstellung von CFK-Bauteilen auf der Basis von Rapid Prototyping Grundformen", gefördert durch die Paul und Helene Metz Stiftung, bearbeitet. Gegenstand der Untersuchung war die Eignung von Laminierformen aus Kunststoff zur Herstellung von Kohlefaserbauteilen, die nach einem Rapid Prototyping Prozess, dem Fused Deposition Modeling Verfahren, hergestellt sind.

2. Vorbetrachtungen

2.1. CFK-Fertigungsverfahren

Zur Herstellung von Strukturbauteilen aus CFK stehen verschiedene Fertigungsverfahren zur Verfügung.

- | | |
|---------------------------|---------------------------------------|
| ■ Handlaminieren | ■ Autoklav-Verfahren |
| ■ Harz-Faser Spritzen | ■ Injektionsverfahren (RTM-Verfahren) |
| ■ Pressverfahren | ■ Pultrusion (Profilziehen) |
| ○ Nasspressen | ■ Wickeln |
| ○ Heißpressen mit Prepreg | ■ Schleuderverfahren |
| ■ Vakuumpressen | ■ Stempelumformverfahren |

Für alle Fertigungsverfahren sind Formen erforderlich, die die Innen- und/oder Außenkontur des Bauteils wiedergeben. Diese Formen können je nach erforderlicher Standzeit, Verfahrenstemperatur und -druck aus Glasfaserverstärkten Kunststoffen (GFK), aus Kunstharz, aus Aluminium oder aus Stahl bestehen. Hier hängt die Oberflächengüte des fertigen CFK-Bauteils in starkem Maße von der Oberflächenrauheit der Form ab.

Zur Eingrenzung der Variationsmöglichkeiten und Untersuchungsvielfalt wurde das Rapid Shaping Verfahren für das Handlaminieren in Verbindung mit dem Vakuumpressen untersucht. Die Fertigungsprozessbeschreibungen können der einschlägigen Fachliteratur, z.B. [AVK 2010] oder [SCHÜRMAN 2007], entnommen werden.

2.2. Generative Fertigungsverfahren

2.2.1. Prozessablauf und Funktionsprinzipien

Generative Fertigungsverfahren beruhen auf dem Grundprinzip des schichtweisen Aufbaus von Strukturen. 3D-CAD-Daten werden über eine STL-Schnittstelle an die Software der Fertigungsmaschine übergeben. Hier wird das herzustellende Bauteilmodell in Einzelschichten zerlegt. Dieser Datensatz wird an die Fertigungsmaschine übertragen und das Bauteil Schicht für Schicht hergestellt.

Überhängende Strukturen werden durch Stützstrukturen unterbaut, die nach dem RP-Prozess entfernt werden. Die Stützstrukturen werden, je nach RP-Verfahren, mechanisch entfernt oder ausgewaschen. Einen Sonderfall stellen beispielsweise das Direkt Laser Cusing Verfahren und das Selektive Laser Sinterverfahren dar. Das Pulver, das hier als Ausgangswerkstoff vorliegt, dient gleichzeitig als Stützmaterial.

In einem weiteren Nachbearbeitungsprozess können die Bauteile mechanisch geglättet werden oder es wird eine Oberflächenbeschichtung aufgebracht.

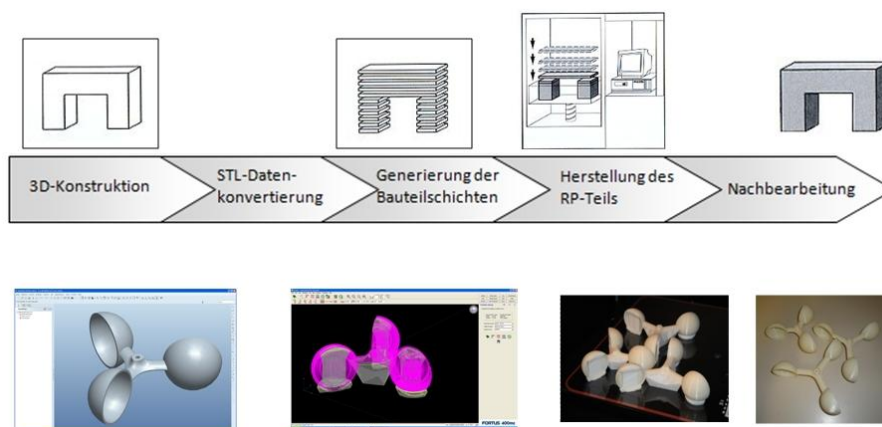


Abbildung 1: Prozessablauf des generativen Fertigungsverfahrens

Die Fertigungsanlagen lassen sich entsprechend dem Ausgangswerkstoff (Draht, Pulver, Folien, etc.) in verschiedene Technologien und Fertigungsprozesse unterteilen. Weitere Einzelheiten können dem Buch „Generative Fertigungsverfahren“ entnommen werden [GEBHARDT 2007].

Alle generativen Fertigungsverfahren weisen nachfolgende Merkmale auf, woraus auch wiederum die Stärken und Vorteile dieser Fertigungstechnologie abgeleitet werden können.

- Alle auf dem Markt befindlichen Maschinen können mit dem standardisierten (STL)-Datensatz angesteuert werden
 - 3D-CAD-Modelle können mit jeder beliebigen Software modelliert werden
 - die Generierung der Schichtgeometrie erfolgt z.T. automatisch, direkt aus den 3D-CAD-Daten
- Es ist kein Einsatz produktspezifischer Werkzeuge notwendig
 - kein Rüstaufwand erforderlich und eine Vielzahl an Bearbeitungswerkzeugen entfällt
- Die Datensätze können grundsätzlich in jeder beliebigen Orientierung gebaut werden
 - keine Spannproblematik, keine Spannvorrichtungen erforderlich
- Es können verschiedene „Druckjobs“ parallel abgearbeitet werden
 - zeitaufwendige serielle Fertigung ist nicht erforderlich

Das 3D-Visualisierungszentrum der GSO-Hochschule verfügt über eine Fertigungsanlage nach dem Extrusionsverfahren bzw. FDM-Verfahren (**f**used **d**eposition **m**odeling). Die für das Forschungsprojekt erforderlichen Formteile wurden mit einer Anlage FDM 400 mc der Firma Stratasys Inc. hergestellt.

Verarbeitet wird als Baumaterial das Drahtmaterial ABS-30M (Acrylnitril-Butadien-Styrol-Copolymerisat) mit einer Zugfestigkeit von 36 MPa, Zug-E-Modul 2413 MPa und einer Dichte von 1,04 g/cm³ [ALPHACAM 2012]. Als Stützmaterial wird ein wasserlöslicher Kunststoff eingesetzt.

2.2.2. Rapid Prototyping und Rapid Manufacturing

Bezogen auf die Anwendung lassen sich die generativen Fertigungsverfahren nach VDI 3404 in zwei Anwendungsfälle unterteilen. Werden Prototypen, also Bauteile mit eingeschränkter Funktionalität, hergestellt, spricht man von Rapid Prototyping (RP). Dies können sowohl Anschauungsmodelle, z.B. maßstäblich verkleinerte Architekturmodelle (solid imaging, concept modeling) oder aber Funktionsmodelle sein. Mit den Funktionsmodellen lassen sich Funktionsprinzipien verifizieren, ohne dass diese den realen Belastungen ausgesetzt sind (functional prototyping). Sind die mit einem generativen Fertigungsverfahren hergestellten Bauteile bereits in vollem Umfang verwendbar, so spricht man vom Rapid Manufacturing (RM). Unterteilt wird dieser Anwendungsfall in die Bereiche Rapid Tooling und Direct Manufacturing [GEBHARDT 2007].

Bezogen auf das Rapid Shaping Verfahren werden die mit dem FDM-Verfahren hergestellten Formen der Kategorie Rapid Tooling zugeordnet. Einen Sonderfall stellen hier die ABS-Bauteile dar, die nach dem Laminieren im Bauteil verbleiben, siehe hierzu Pkt. 3.3. Je nachdem, ob es sich dann bei dem laminierten Bauteil um einen Prototypen oder um ein voll einsatzfähiges Bauteil handelt, kann man von einem RP-Teil oder von einem RM-Teil sprechen (Direct Manufacturing).

2.2.3. Oberflächenunregelmäßigkeiten

Bedingt durch den schichtweisen Aufbau des Bauteils entstehen zum einen in Abhängigkeit des Bauteilgradienten Treppenstufen. Zum anderen ergeben sich durch die Wiederholungenauigkeit der x-/y-Positionierung Ungleichmäßigkeiten in den senkrechten Bauteilkanten (siehe Abbildung 2). Diese Stufeneffekte sind wiederum abhängig von den einzelnen Schichthöhen. Mit der verfügbaren Anlage FDM 400 mc können in Abhängigkeit der verwendeten Düsen Schichthöhen von 0,127 mm, 0,178 mm, 0,254 mm und 0,330 mm realisiert werden.

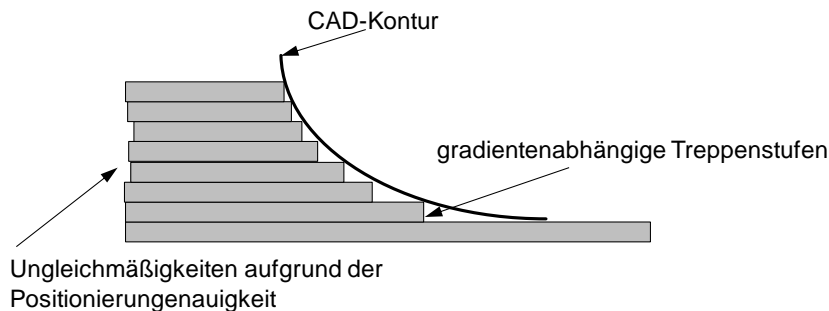


Abbildung 2: Stufeneffekt aufgrund des schichtweisen Bauteilaufbaus

Eine zweite Form der Oberflächenunregelmäßigkeiten entsteht durch die Datenkonvertierung von den nativen CAD-Daten in das standardisierte STL-Datenformat (**S**urface **T**esselation **L**anguage oder **S**tandard **T**riangulation **L**anguage). In diesem Format wird die Oberfläche durch Dreiecke beschrieben. Damit entsteht bei gekrümmten Oberflächen eine facettierte Struktur. (siehe Abbildung 3).

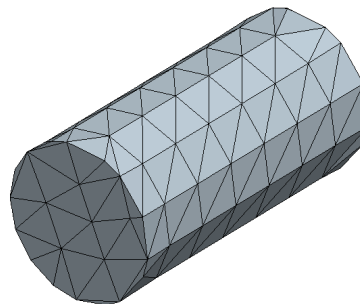


Abbildung 3: Annäherung der runden Zylindergeometrie durch Dreieckflächen

Bezieht man sich nun auf die unter Punkt 2.1 gemachte Aussage: "Die Oberflächengüte des fertigen CFK-Bauteils hängt in starkem Maße von der Oberflächenrauheit der Form ab.", so sind diese beschriebenen Unregelmäßigkeiten und die Oberflächenunebenheiten nachteilig für die Oberflächenqualität des fertigen CFK-Bauteils. Deshalb ist dies ein wesentlicher Punkt, der im Rahmen des Forschungsprojekts bearbeitet wurde.

2.2.4. CFK-Formen

Für das Laminieren von CFK-Bauteilen sind zwei Formentypen möglich. Formkörper, die im Bauteil verbleiben, und Formen, die nach dem Laminieren entfernt werden.

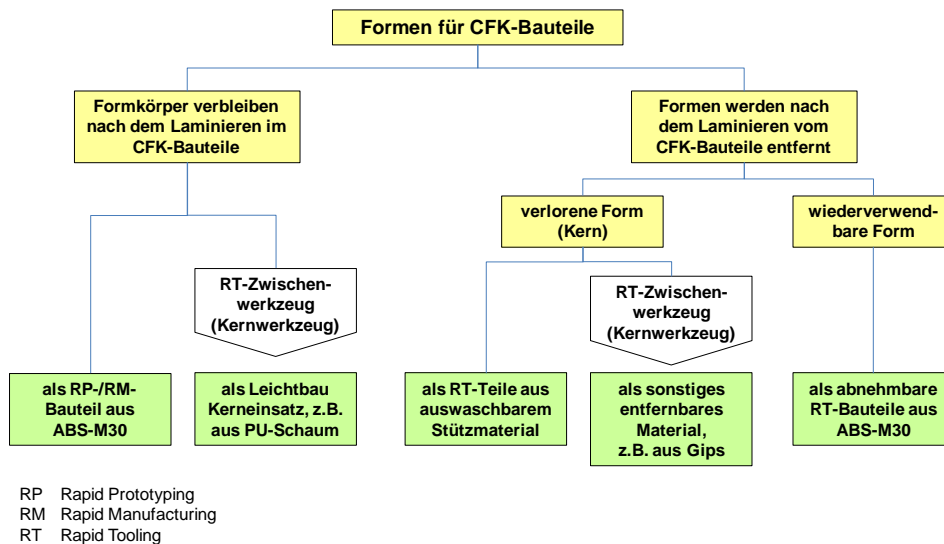


Abbildung 4: Unterteilung der verschiedenen Formtypen für die Herstellung von CFK-Bauteilen bezogen auf den Rapid Shaping Prozess

Formkörper verbleiben nach dem Laminieren im CFK-Bauteil:

Häufig werden im Leichtbau Formkerne aus leichtem PU-Schaum hergestellt. Diese Formkörper haben bereits die Kontur des zu laminierenden Bauteils. Darauf werden mehrere Kohlefaserschichten aufgebracht. Hierdurch entsteht eine sehr leichte und steife Struktur (Beispiel siehe Abbildung 5).

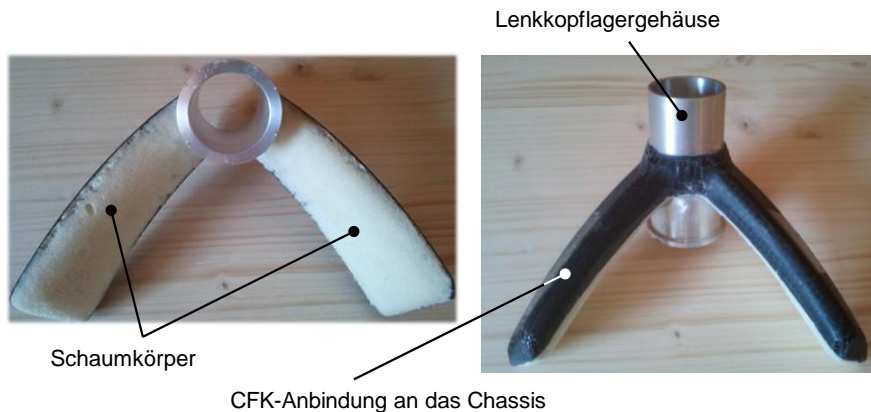


Abbildung 5: Lenkkopflagergehäuse mit CFK-Anbindung an das Chassis [BÖHM 2012]

Diese Formkörper werden entweder aus einem Block gefräst, oder man stellt die Schaumkörper in Spritzformen her. In diesem Fall ist es möglich, die Spritzformen mit dem Rapid Tooling Verfahren herzustellen. Steht bei einer Konstruktion das Thema Leichtbau nicht im Vordergrund, kann auch auf den Zwischenschritt der Herstellung von Schaumkörpern verzichtet werden. In diesem Fall können die RP- oder RM-Kunststoffformkörper im laminierten Bauteil verbleiben.

Formen werden nach dem Laminieren von CFK-Bauteil entfernt:

Bei üblichen Laminierprozessen werden die CFK-Gewebe oder Matten in Formen eingelegt. Nach dem Tränken mit Harz und dem Aushärten werden die Formteile entfernt. Mit dem Rapid Shaping Prozess können die

Formteile schnell mit dem FDM-Verfahren hergestellt werden. In diesem Fall entfällt ein aufwendiger und zeitintensiver Fräsprozess (siehe Abbildung 16 rechts).

Formteile, die nach dem Laminieren nicht mehr als Einzelteile aus der Form genommen werden können, werden beispielsweise ausgeschmolzen oder zertrümmert. Bezogen auf den FDM-Fertigungsprozess für Rapid Tooling Teile wurde hier der Ansatz gewählt, die später zu entfernenden Kernformteile aus dem wasserlöslichen Stützmaterial zu fertigen.



wasserlösliches Kernmaterial, eingelegt in das Kohlefasergewebe



Laminierte CFK-Felge mit noch nicht gelöstem Kernmaterial

Abbildung 6: Fertigung einer CFK-Felge mit einem RT-Kernteil aus wasserlöslichem Kunststoff [SANITHTHER 2011a]

Alternativ hierzu besteht die Möglichkeit Kernteile beispielsweise aus Gips oder Wachs herzustellen. In diesem Fall können diese Kernteile ebenfalls in RT-Formen abgeformt werden.

2.2.5. Untersuchungsschwerpunkte im Rahmen des Forschungsprojekts

Geht man nun von den unter Abbildung 4 dargestellten Ansätzen zum Aufbau von RT-Formen für die Herstellung von CFK-Bauteilen aus und ergänzt hierzu die Anforderungen aus der Sicht des Rapid Shaping Verfahrens, so ergibt sich nachfolgendes Bild:

	als RP-/RM-Bauteil aus ABS-M30	als Leichtbau Kerneinsatz, z.B. aus PU-Schaum	als RT-Teile aus auswaschbarem Stützmaterial	als sonstiges entfernbares Material, z.B. aus Gips	als abnehmbare RT-Bauteile aus ABS-M30
Haftfestigkeit	sehr gut zwischen RP-/RM-Bauteil und CFK-Bauteil	sehr gut zwischen Kerneinsatz und CFK-Bauteil	nicht erforderlich	nicht erforderlich	keine zulässig
Oberflächengüte	keine erhöhten Anforderungen	keine erhöhten Anforderungen	keine besonderen Anforderungen, wenn Kontaktfläche keine Sichtfläche ist	keine besonderen Anforderungen, wenn Kontaktfläche keine Sichtfläche ist	erhöhte Anforderung, wenn Oberfläche eine Sichtfläche ist
Entfernbarkeit			leicht entfernbares Kernmaterial		

Abbildung 7: Erfassung der Untersuchungsschwerpunkte

Entsprechend dieser Matrix lassen sich folgende Untersuchungsschwerpunkte ableiten, die u.a. im Rahmen von studentischen Projektarbeiten abgearbeitet wurden [KLINGL 2012], [SANITHTHER 2011b] und [SANITHTHER 2012]:

- Haftfestigkeitsuntersuchungen zwischen ABS-M30 und CFK-Laminaten
- Maßnahmen zur Reduzierung der Oberflächenunebenheiten, Oberflächenveredelung
- Untersuchungen zur Lösbarkeit des Kernmaterials (wasserlösliches Stützmaterial und wasserlöslicher Gips)

3. Untersuchungen an Probekörpern

3.1. Untersuchungen zur Haftfestigkeit

Grundsätzlich ist die Haftfestigkeit zwischen zwei Stoffen abhängig von der Differenz beider Oberflächenspannungen. Je größer die Differenz ist, desto besser ist die Haftfestigkeit.

Die Oberflächenspannung von ABS liegt bei ca. 35 und 42 mN/m und die von Epoxidharz bei ca. 47 mN/m. Diese Kombination ist sehr nachteilig, da keine große Differenz der Oberflächenspannung gegeben ist.

Zudem ist eine gute Adhäsion zwischen den Teilen anzustreben. Dies wird zum einen durch eine saubere Oberfläche gewährleistet und zum anderen durch eine entsprechende Oberflächenrauheit (formschlüssige Adhäsion).

Untersuchte Varianten:

Wie die Haftfestigkeit zwischen ABS-30 M und laminierten CFK-Platten verändert werden kann, wurde mit Hilfe von vier Maßnahmen untersucht:

- Reinigung der Oberfläche
Die Oberflächen wurden mit Ethanol oder Nitroverdünnung gereinigt, da hier die ABS-Kunststofffläche nicht angegriffen wird.
- Anschleifen
Die Probe wurde mit Nitroverdünnung gereinigt und mit einem Schleifpapier (Körnung 80) angeschliffen.
- Aufbringen einer Grundierung als Haftvermittler
Die Proben wurden angeschliffen, mit Nitroverdünnung gereinigt und anschließend grundiert. Als Grundierung kam ein Zweikomponenten-Klebstoff „Stabilit Express“ der Firma Pattex zum Einsatz. Hierbei handelt es sich um einen Klebstoff auf Methylmetacrylat-Basis, der auf das ABS gepinselt wird. Abschließend erfolgte ein Feinschliff der Grundierung.
- Erhöhung der Oberflächenspannung
Die Oberflächenspannung kann auf drei Arten erhöht werden:
 - Fluorierung (chemisch)
 - Flammbehandlung (chemisch)
 - Plasma- und Coronabehandlung (elektrisch)Das Grundprinzip besteht darin, die unpolare Oberfläche des Kunststoffs so zu verändern, dass sie polare Eigenschaften besitzt.
Ausgewählt wurde die Plasmabehandlung, da in diesem Projekt die Firma Diener Electronic GmbH & Co. KG mitwirkte und die Versuchsproben kostenlos zur Verfügung stellte.

Eine Variation des RP-Materials und des Harzes wurde nicht vorgenommen, da diese Untersuchungen den Projektrahmen überschritten hätten.

Messtechnischer Aufbau:

Zur messtechnischen Bestimmung der Haftfestigkeit wurde als Prüfmethode der Biegeschälversuch nach DIN 54461 angewandt. Dazu wurde ein quaderförmiger ABS-Klotz (50 x 25 x 12 mm) mit dem Rapid Prototyping Verfahren hergestellt, auf den die CFK-Matrix auflaminiert wurde. Das Laminat überlappt den Klotz am schmalen Ende, sodass es in der Prüfmaschine mit einem Stempel 90° zur „Klebefläche“ belastet werden kann (siehe

Abbildung 8). Die erforderliche Kraft für den ersten Anriss wird in einem Schälendiagramm festgehalten und dient zur Berechnung des Biegeschälwiderstandes.



Abbildung 8: laminierter Prüfkörper

Ergebnisse:

Das Reinigen der Oberflächen und das Anschleifen ist eine Grundvoraussetzung für gute „Klebeverbindungen“ und muss grundsätzlich angewandt werden. Die hier gemessenen Biegeschälwiderstände dienen als Referenzwerte für die weiteren Untersuchungen.

Bei den grundierten Proben hat sich gegenüber den nicht grundierten Proben eine Verbesserung der Haftfestigkeit um ca. den Faktor 1,4 ergeben. Hier kann man allerdings noch nicht von einer signifikanten Verbesserung sprechen.

Bei den plasmabehandelten Teilen hat sich der Biegeschälwiderstand um den Faktor 5,7 gegenüber den unbehandelten Bauteilen erhöht. Hier zeigt sich, dass ein CFK-Schichtaufbau auf ABS-Kunststoff durchaus höhere Kräfte übertragen kann. Jedoch ist dazu eine relativ aufwendige Plasmabehandlung notwendig, hat aber auch entsprechende Vorteile:

- Das Material wird keinen mechanischen oder thermischen Belastungen ausgesetzt und es wird auch im Kern in keinsten Weise verändert.
- Das mit Plasma behandelte Material kann im Bedarfsfall einige Zeit zwischengelagert werden, bevor die Oberflächenspannung wieder zurückgeht.
- Bei entsprechender Investition in eine Inline-Plasma-Behandlungsanlage kann auch eine "schnelle" Prozesskette umgesetzt werden.

Einschränkend ist hier noch zu erwähnen, dass die gemessenen Werte in diesem Projekt durch weitere Versuche noch manifestiert werden müssen, da nur eine geringe Anzahl an Probekörpern hergestellt und getestet wurde. Somit fehlen statistisch belegbare Zahlen.

3.2. Untersuchungen zur Oberflächenveredelung

Wie bereits erwähnt, ist ein großer Nachteil der generativen Fertigungsverfahren die oft mangelhafte Oberflächenqualität. Der Grund liegt v.a. im schichtweisen Aufbau der Strukturen.

Da sich beim Laminieren nicht nur die Makrogeometrie des Bauteils abformt, sondern auch die Mikrostruktur der Formoberfläche auf das Bauteil übertragen wird, ist eine glatte Oberfläche der Form aus überwiegend optischen Gründen notwendig.

In der Literatur sind zahlreiche Oberflächentechniken bekannt [MÜLLER 2003].

Untersuchte Varianten:

Zur Eigrenzung der Untersuchungsvarianten wurden Oberflächenveredelungsprozesse im Hinblick auf die Eignung für den Rapid Shaping Prozess ausgewählt und untersucht, die den Kriterien anwendbar auf ABS-Kunststoff, geringe Bearbeitungszeit und -kosten, hohe Haftung der Oberflächenschicht und durchführbar auch an komplexen Teilen entsprechen:

- Strahlen
Beim Strahlen wird durch das Strahlmittel Material abgetragen und somit die Oberflächenstruktur verändert. Als Strahlmittel wurde grober Strahlsand eingesetzt und das Bauteil ca. 20s bestrahlt.
- Metallisieren
Von der Firma 3DDC wurde speziell ein Metallisierungsverfahren für RP-Teile entwickelt. Mit diesem Galvanikverfahren sind insbesondere die Kunststoffe ABS, PEEK, PVC und A-PET metallisierbar. Für die Probekörper wurde eine Schichtdicke von 300µm gewählt.
Generell ist hier festzuhalten, dass mit dem Metallisierungsverfahren mit keiner Verbesserung der Oberflächenqualität zu rechnen ist, da dieses Verfahren meist die Oberfläche des unbehandelten Teils reproduziert.

- **Basislack und Klarlack, bzw. aktivierte Oberflächen, Basislack und Klarlack**

Aufgrund der unpolaren Oberflächeneigenschaften ist es schwierig, Kunststoffe zu lackieren. Aus diesem Grund wurden jeweils nicht vorbehandelte Proben und mit Sauerstoffplasma aktivierte Proben lackiert. Als Basislack fand ein Wasserlack der Reihe 90 der Firma Glasurit Verwendung. Der Klarlack ist ein Zweikomponentenlack auf Acrylbasis. Es wurde jeweils nur eine Basislackschicht und eine Klarlackschicht aufgebracht.
- **Haftvermittler und Füller**

Um auch die Unebenheiten und die Fehler in der Werkstückoberfläche auszugleichen, wurde ein Haftvermittler (HS-Sealer 285-0, Firma Glasurit) und ein Füller (HS-Grundfüller 285-655, Firma Glasurit) getestet. Hier wurden wieder jeweils Proben mit der Düse T10 und der Düse T20 hergestellt und in einem Fall wurden die Proben vor der Oberflächenbehandlung aktiviert.
- **Spritzspachtel, Schleifen und Klarlack, bzw. aktivierte Oberfläche, Spritzspachtel, Schleifen und Klarlack**

Ein weiteres untersuchtes Verfahren zur Oberflächenveredelung ist der zweischichtige Aufbau durch Spritzspachtel (DUPLI-COLOR Acryl-Spritzspachtel) und Acryl-Lack (schwarz, Fa. DUPLI-COLOR). Hier wurde der Probekörper geschliffen und anschließend die Spritzspachtelschicht aufgebracht. Nach dem Trocknungsprozess wurde die Oberfläche erneut angeschliffen, es wurde eine zweite Spritzspachtelschicht aufgesprüht und die Oberfläche wurde nochmals angeschliffen. Abschließend wurde der Klarlack aufgebracht. Dieser Prozess ist vor allem durch die Schleifarbeiten sehr zeitintensiv, wird aber häufig bei RP-Teilen angewandt. Aus diesem Grund wurde dieser Oberflächenveredelungsprozess mit untersucht. Um auch eine vergleichende Aussage über die Haftfestigkeit machen zu können, wurde zusätzlich ein Probekörper vor der Beschichtung aktiviert.
- **mit Lösungsmittel angelierte Oberfläche**

Lösungsmittel haben die Eigenschaft, Festkörper aufzulösen, ohne dass dabei eine chemische Reaktion stattfindet. Der Grundgedanke bei der Oberflächenveredelung von ABS-Bauteilen besteht darin, dass die Oberflächenrauheiten durch ein Lösungsmittel "aufgeweicht" werden und dann "verschwimmen". Für die Versuche wurden als Lösungsmittel Aceton (Dimethylketon) und Butanon (Methyletylketon) ausgewählt. Hierzu gibt es schon einige Untersuchungen [AHN 2009] [GALANTUCCI 2009] [GALANTUCCI 2010], die durch weitere Untersuchungen im Rahmen dieses Projekts ergänzt wurden.

Prüfkörper:

Es wurden Prüfkörper entsprechend Abbildung 9 aus ABS-M30 mit dem FDM-Verfahren hergestellt. Bei der Wahl der Geometrie dieser Prüfkörper wurde darauf geachtet, dass sich viele unterschiedliche Konturen in einem kleinen Gesamtvolumen widerspiegeln, um die konturabhängigen Treppeneffekte zu erkennen. Darüber hinaus wurden die Prüfkörper jeweils mit einer Düse T10 und einer Düse T20 gefertigt. Mit der Düse T10 kann eine minimale Schichtdicke von 0,127 mm und mit der Düse T20 kann eine minimale Schichtdicke von 0,330 mm gefertigt werden (siehe auch Punkt 2.2.3). Somit lassen sich auch die Treppenstufeneffekte in Abhängigkeit der Schichtdicke untersuchen.

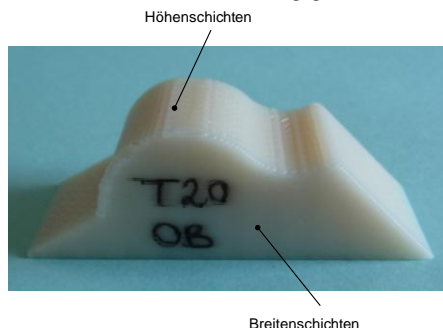


Abbildung 9: Geometrie des Prüfkörpers und Definition der Höhen- und Breitenschichten

Messtechnischer Aufbau:

Rauheitsmessung:

Zur Messung der Rauheit R_z wurde ein Konfokalmikroskop der Fa. NanoFocus AG verwendet.

Haftung:

Der Haftwiderstand einer Beschichtung gegen die Trennung vom Substrat wurde gemäß DIN EN ISO 2409 ermittelt.

Mit einem Cuttermesser werden mit einer Schneidschablone im Schnittabstand von ca. 2,5 mm Gitterlinien in die Oberfläche geritzt. Anschließend wird ein Klebeband auf das eingeschnittene Gitter geklebt und nach einer Verweilzeit von ca. 5 Minuten wird dieses unter einem Winkel von ca. 60° innerhalb von 0,5 s bis 1 s abgezogen. Für die Einstufung der Prüfergebnisse wurde die Referenztablelle nach DIN EN ISO 2409 herangezogen.

Ergebnisse:

Rauheitsmessung:

Als Referenzteile wurden zwei unbehandelte Probekörper vermessen, die jeweils mit den Düsen T10 und T20 hergestellt wurden. Zudem wurden beim Referenz-Probekörper die Höhenschichten und die Breitenschichten vermessen (siehe Abbildung 9), damit auch der Einfluss der Bauteillage beim FDM-Herstellungsprozess mit erfasst werden kann. Die Ergebnisse sind in Abbildung 10 zusammengefasst.

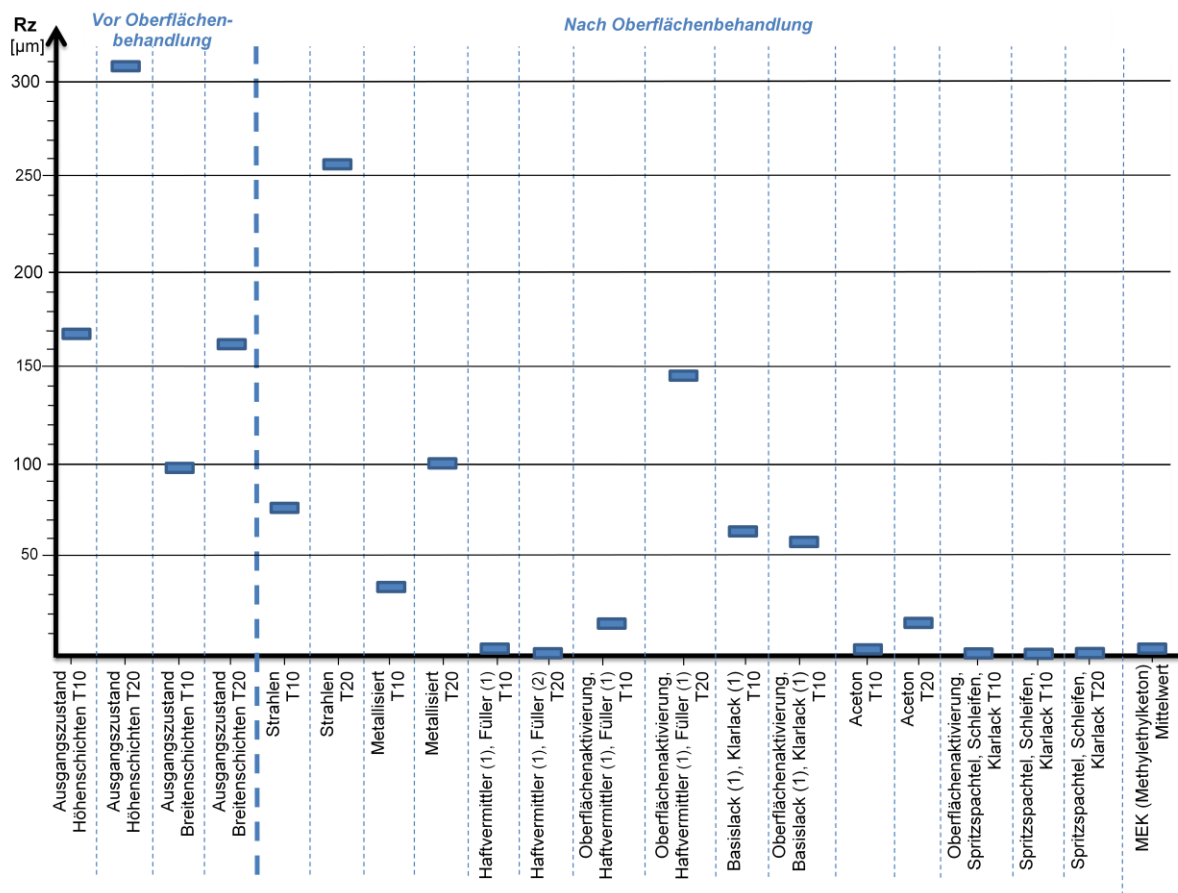


Abbildung 10: Rauheitswerte Rz in µm aller Oberflächenveredelungsverfahren



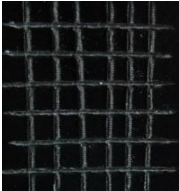
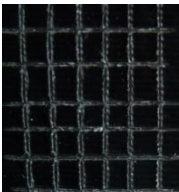
Haftung:

Die Ergebnisse der Versuche zur Haftung sind in Tabelle 1 zusammengefasst. Die Beurteilung der Haftung, bzw. die Einstufung der Gitterschnittkennwerte erfolgte nach der Tabelle aus der DIN EN ISO 2409.

(Die Einteilung der Gitterschnittkennwerte erfolgt von 0 – 5:

0 entspricht „Die Schnittländer sind vollkommen glatt, keines der Quadrate des Gitters ist abgeplatzt.“

5 entspricht „Das Abplatzen ist größer 65% der Gitterschnittfläche.“)

Lfd. Nr.	Oberflächenverfahren	Merkmale	Gitterschnittkennwert nach DIN EN ISO 2409
1	Haftvermittler, Füller, T10 	<ul style="list-style-type: none"> • Seitlich der Schnittkontur leichte Aufplatzer erkennbar • Kein Lösen ganzer Gitterschnittquadrate • Gute Haftung der Beschichtung 	0
2	Haftvermittler, Füller, T20 	<ul style="list-style-type: none"> • Sehr große Beschichtungsdicke • Aufplatzer bzw. Lösen von kleinen Partikeln während des Schneidens an den Schneidkanten 	1
3	Oberflächenaktivierung Haftvermittler, Füller, T10 	<ul style="list-style-type: none"> • Kein Lösen von vollständigen Feldern der Gitterschnittfläche • Minimaler Wegfall von sehr kleinen Partikeln während des Schneidvorgangs 	0
4	Oberflächenaktivierung, Haftvermittler, Füller, T20 	<ul style="list-style-type: none"> • Alle Felder sind nach dem Klebebandabzug noch vorhanden • Minimales Lösen von Feldecken • Im Vergleich zu identischer Oberflächenbehandlung an T10-Teil geringfügig mehr Partikelabtrag 	1

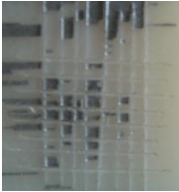
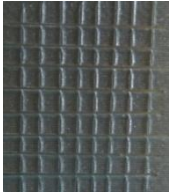

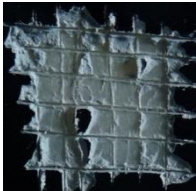
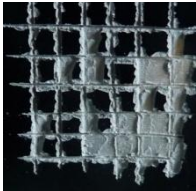
Lfd. Nr.	Oberflächenverfahren	Merkmale	Gitterschnittkennwert nach DIN EN ISO 2409
5	<p>Basislack, Klarlack, T10</p> 	<ul style="list-style-type: none"> • Aufplatzen bzw. erstes Lösen von Partikeln während dem Anfertigen des Gitterschnitts • Fast vollständige Entfernung der Beschichtung durch Klebeband 	5
6	<p>Oberflächenaktivierung, Basislack, Klarlack, T10</p> 	<ul style="list-style-type: none"> • Saubere, glatte Schnittfläche • Nahezu keine „Aufplatzer“ • Kein Lösen von Beschichtungspartikel nach dem Auftrag des Klebebandes 	0
7	<p>Spritzspachtel, Schleifen, Klarlack, T10</p> 	<ul style="list-style-type: none"> • Entfernung von den meisten Feldern des Gitterschnittmusters • Bereits während und unmittelbar nach dem Schneidevorgang kommt es zum Entfernen von großen Partikeln • Klebeband entfernt nochmals große Partikel 	5
8	<p>Spritzspachtel, Schleifen, Klarlack, T20</p> 	<ul style="list-style-type: none"> • Nahezu alle Partikel sind entfernt • Bindung von Klarlack zu Spritzspachtel größer als von Spritzspachtel zu Kunststoffoberfläche 	5
9	<p>Oberflächenaktivierung, Spritzspachtel, Schleifen, Klarlack, T10</p> 	<ul style="list-style-type: none"> • Ca. 1/3 der Felder sind entfernt • Auch hier bereits im und nach dem Schneidevorgang Abtrag erster Partikel • I. Vgl. zu beiden vorherigen Verfahren deutlich besseres Ergebnis 	4

Tabelle 1: Einstufung der Oberflächenverfahren bezüglich Haftung nach DIN EN ISO 2409

Diskussion der Ergebnisse:

Im Sinne des Rapid Shaping Verfahrens sollten die Oberflächenveredelungsprozesse die zwei Forderungen nach einer geringen Oberflächenrauheit und einer sehr guten Haftung erfüllen. Trägt man nun alle Ergebnisse in ein Diagramm ein, so erkennt man, dass der Lackaufbau mit Haftvermittler und Füller (lfd. Nr. 1 aus Tabelle 1) und die Oberflächenbehandlung mit Lösungsmittel (Dimethylketon und Methyletylketon) am besten die Anforderungen erfüllen. (Der Korrektheit ist hier anzumerken, dass sich die Frage der Haftung bei der Verwendung von Lösungsmitteln nicht stellt.)

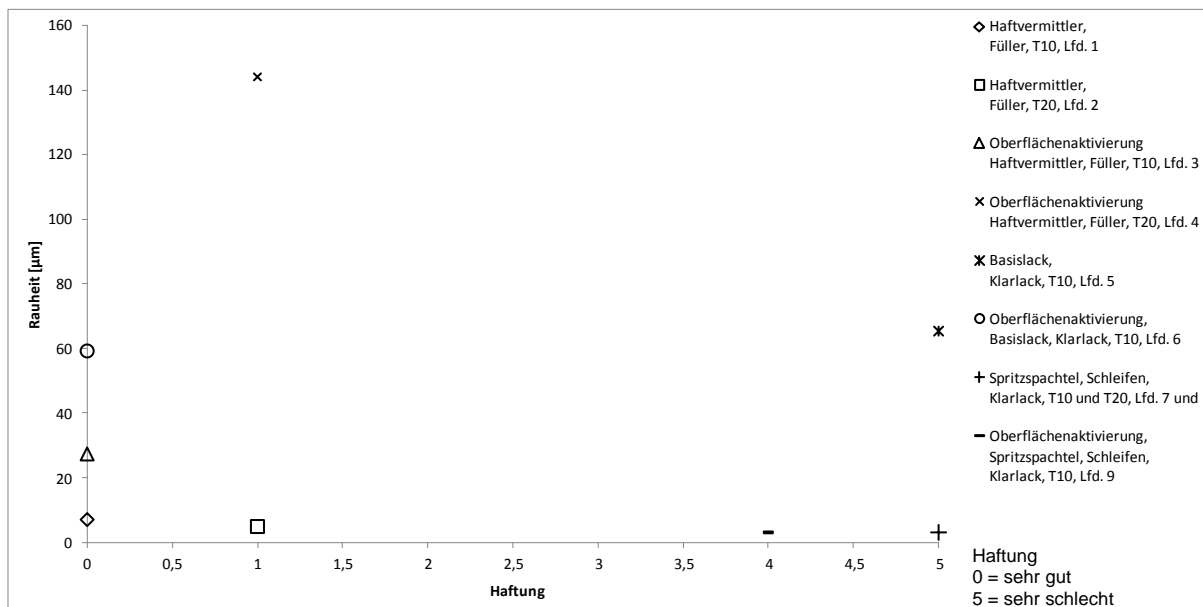


Abbildung 11: Zusammenhang der Oberflächenrauheit und der Haftung auf den Oberflächenveredelungsprozess

Werden diese Oberflächenveredelungsprozesse angewandt, ist aber auch die Maßhaltigkeit der FDM-Bauteile zu berücksichtigen. In einem Fall wird durch den Füller Material aufgetragen (Abbildung 12) und im anderen Fall wird durch das Angelieren der Oberfläche aufgrund der Lösungsmittel und das "Verschwimmen" der Rauheiten das Bauteilvolumen reduziert (Abbildung 13).

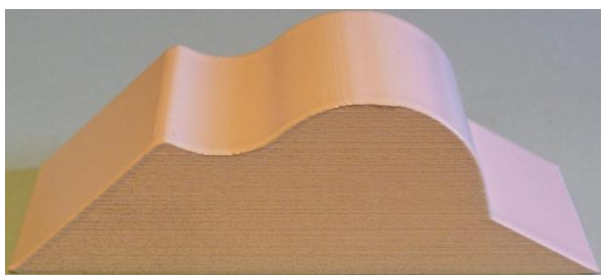


Abbildung 12: Mit Füller beschichteter Prüfkörper



Abbildung 13: Mit Dimethylketon behandelter ABS-Prüfkörper

Diese Effekte liegen zwar nur im zehntel und hundertstel Millimeterbereich und sind in vielen Fällen für den Prototypenbau vernachlässigbar, könnten aber bei der CAD Modellierung berücksichtigt werden. Letztendlich müssen im Umgang mit Lacken und Lösungsmittel die einschlägigen Sicherheitsvorschriften beachtet werden. Dies verbietet natürlich den sorglosen Umgang mit diesen Materialien und kann u.U. die Rapid-Shaping Prozesskette verlangsamen.

3.3. Herstellung des Kernmaterials

Aus Abbildung 4 ist ersichtlich, dass Kernbauteile entweder im Modell verbleiben oder nachträglich entfernt werden. Im ersten Fall werden die Kernbauteile aus einem sehr leichten Material wie beispielsweise einem PU-Schaum hergestellt (siehe Abbildung 5). Bezogen auf das Rapid-Shaping Verfahren kann die Herstellung der Schaumkerne ebenfalls in Formen erfolgen, die mit dem FDM-Verfahren hergestellt sind. Hier ist vor allem darauf zu achten, dass sich der eingespritzte Schaum gleichmäßig in der Form verteilt und sich der ausgehärtete Schaumkörper wieder leicht aus der Form lösen lässt.

Die zweite Möglichkeit besteht darin, dass das Kernmaterial nach dem Laminieren wieder entfernt wird. Für die Herstellung des wieder zu entfernenden Kernmaterials gibt es wiederum drei Möglichkeiten:

1. Das Kernmaterial wird mit dem FDM-Verfahren aus dem wasserlöslichen Stützmaterial hergestellt. Bei diesem Prozess sind keine Zwischenformen nötig.
2. Die Kerne werden aus einem anderen wasserlöslichen Material (z.B. wasserlöslichen Gips) in ABS-Kunststoffformen abgeformt und anschließend uumlaminieren.
3. Das Kernmaterial wird mit einem generativen Fertigungsverfahren aus Wachs hergestellt und nach dem Laminieren ausgeschmolzen. Dieses Verfahren wurde nicht untersucht, da im 3D-Visualisierungszentrum kein „Wachsdrucker“ zur Verfügung stand.

Die erste Variante wurde bereits vor dem Start des Forschungsprojekts im Rahmen einer Bachelor-Abschlussarbeit im 3D-Visualisierungszentrum erfolgreich nachgewiesen [SANITHTER 2011a] (siehe Abbildung 7).

Die zweite Variante wurde im Rahmen einer Masterprojektarbeit für dieses Forschungsprojekt untersucht [KLINGL 2012]. Als wasserlösliches Material wurde ein Gips (Aquapuur™ der Firma R&G) ausgewählt. Untersuchungsschwerpunkte waren hier die Trennbarkeit der ABS-Kunststoffform vom Gipskern und die Löslichkeit des Gipses aus dem CFK-Bauteil.

Verarbeitungsprozess des Kernmaterials Aquapuur™

1. Herstellung einer Form aus ABS mit dem FDM-Verfahren
2. Beschichten der Form mit Trennmittel
3. Einspritzen des zähflüssigen Materials mit einer Spritze in die Form: Laut Datenblatt beträgt die Verarbeitungszeit 5 bis 10 Minuten.
Um Lufteinschlüsse zu vermeiden, sollte der Einfüllvorgang auf einem Schwingtisch erfolgen.
4. Kernmaterial in der Form vortrocknen, d.h. das Kernmaterial muss bei der Entnahme eine Restfeuchtigkeit haben: Aufgrund der Tatsache, dass die verwendete Form nur eine Öffnung von 7 mm hatte, lag die Verweildauer in der Form bei ca. 12 Stunden.
5. Kern im Konvektionsofen laut Datenblatt bei 135°C aushärten lassen: Je 2,5 mm Materialdicke beträgt die Trocknungszeit ca. 1,5 Stunden.
6. Kern versiegeln. Empfohlen wird Aquafill™ der Firma R&G.
7. Laminat auf Kernmaterial aufbringen und aushärten lassen.
8. Kernmaterial auswaschen.

Trennbarkeit des Kernmaterials aus der Kunststoffform

Bei den Untersuchungen hat sich gezeigt, dass die beste Trennbarkeit mit Rapsöl erreicht wird.

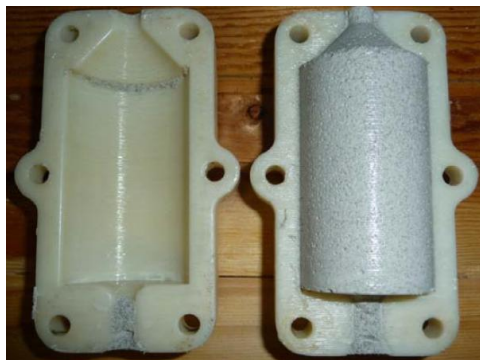


Abbildung 14: Entformtes Kernmaterial

Die Form ließ sich leicht öffnen und auch ein vollständiges Entfernen der Gipsform von der Kunststoffform war nahezu ohne Kraftaufwand möglich. Der Anteil an Abbröckelungen an der Gipsform war sehr gering.

Lösbarkeit des Kernmaterials aus dem CFK-Bauteil

Vorversuche zeigten, dass eine Auflösung des wasserlöslichen Gipses durch Tauchen nicht möglich ist. Das bereits angelöste Gipsmaterial muss entfernt werden, damit "frisches" Wasser an die tieferen Bereiche gelangen kann. Zu diesem Zweck wurde an einem Nasssauger ein dünner Saugrüssel angebracht, mit dem das aufgelöste Gipsmaterial aus der Einspritzöffnung gesaugt werden konnte. Nach einer Saugzeit von ca. 9 min war das Kernmaterial nahezu aus der Form entfernt.

4. Verifikation an zwei ausgewählten Konstruktionsbeispielen

4.1. Chassis für den OHM-Racer

Im Rahmen des Forschungsprojekts "Rapid Shaping Verfahren" wurde auf der Basis der erforschten Erkenntnisse das Chassis des OHM-Racers in Verbindung mit einer Bachelorarbeit konstruiert und gebaut [BÖHM 2012].



Abbildung 15: Ohm-Racer Designstudie

Die erforderlichen Formteile wurden mit dem FDM-Verfahren aus ABS-Kunststoff hergestellt (Abbildung 16) und die Oberflächenveredelung erfolgte mit einem Lösungsmittel.



Abbildung 16: Im FDM-Verfahren hergestellte Laminierform und Laminieren der Chassishälfte [BÖHM 2012]

Anschließend wurden die CFK-Bauteile im Handlaminierverfahren laminiert und mit dem Vakuumverfahren ausgehärtet. Nach dem Einbringen von Alu-Einsätzen und Wabenstrukturen wurden die einzelnen CFK-Bauteile zu einem gesamten Chassis zusammengeklebt.

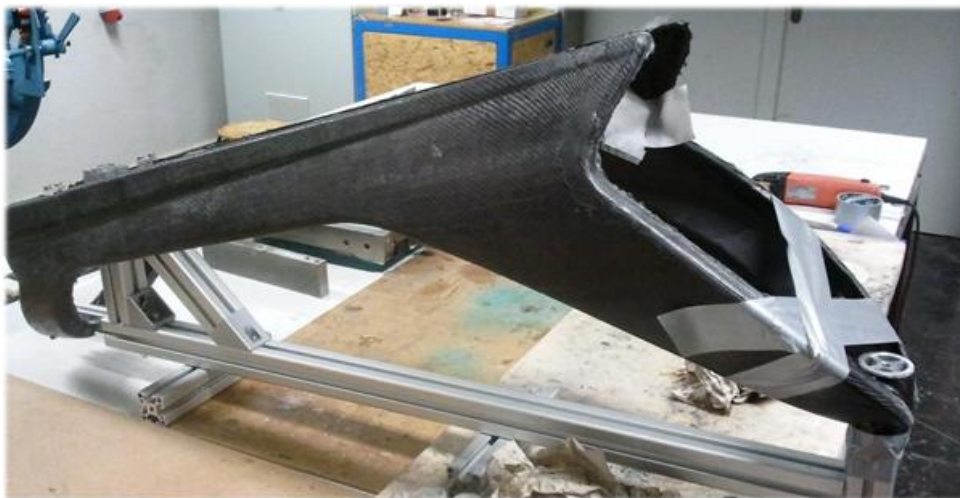


Abbildung 17: Chassis komplett

Durch das Rapid Shaping Verfahren konnte nun kostengünstig und in einem überschaubaren Zeitrahmen ein CFK-Chassis-Prototyp hergestellt werden.

Die Materialkosten der Kunststoffformteile lagen bei ca. 3000.- Euro und die Maschinenlaufzeit für die Formteile betrug ca. 123 Stunden (ca. 5 Tage).

Es wurde abgeschätzt, dass bei einem konventionellen Fräsprozess zur Herstellung der Laminierformen die Herstellkosten ca. das Doppelte betragen und dass sich die Durchlaufzeit in der Werkstatt, bei sofortiger freier Fertigungskapazität, auf ca. 1,5 Wochen belaufen.

4.2. Lawinenschaufel

Das Schaufelblatt einer am Markt verfügbaren Lawinenschaufel besteht aus Aluminium. Der Rapid Shaping Prozess wurde anhand eines CFK-Schaufelblattes verifiziert.

Der Fertigungsprozess des CFK-Schaufelblattes unterscheidet sich gegenüber dem Fertigungsprozess für das Chassis dadurch, dass aus optischen Gründen eine höhere Oberflächenqualität des CFK-Schaufelblattes erreicht werden sollte. Deshalb wurden die ABS-Formteile geschliffen und mit Lösungsmittel geglättet (Abbildung 18). Zudem wurde eine Gegenform angefertigt, damit beide Schaufelseiten eine ansprechende Oberflächenqualität aufweisen.



Abbildung 18: Fertig bearbeitete Negativformen für das innere Schaufelblatt (links) und der Halterung (rechts)



Abbildung 19: Laminieren der Schaufelstielhalterung und laminiertes CFK-Schaufelblatt

Durch das Rapid Shaping Verfahren konnte nun ebenfalls kostengünstig und in einem überschaubaren Zeitrahmen ein CFK-Schaufelblatt hergestellt werden.

Die Materialkosten der Kunststoffformteile lagen bei ca. 950.- Euro und die Maschinenlaufzeit für die Formteile betrug ca. 60 Stunden (entspricht 2,5 Tage).

Es wurde abgeschätzt, dass bei einem konventionellen Fräsprozess, zur Herstellung der Laminierformen, die Herstellkosten um etwa den Faktor 2,5 höher sind und die Durchlaufzeit in der Werkstatt, bei sofortiger freier Fertigungskapazität, ca. zwei Wochen beträgt.

5. Rapid Shaping Prozessbeschreibung

Der entwickelte Rapid Shaping Prozess ist im nachfolgenden Flussdiagramm (Abbildung 20) zusammengefasst. Abhängig vom konstruktiven Aufbau des CFK-Bauteils wird entschieden, welche "Formteile" erforderlich sind. Je nach Konstruktion, Anforderungen an das Produkt und CFK-Fertigungsprozess können nur Außenformen, nur Kernformen oder Außen- und Kernformen notwendig sein. Danach orientiert sich der Bau der Formteile mit einem generativen Fertigungsverfahren - im Rahmen des vorliegenden Forschungsprojekts erfolgte der Bau der Formteile mit dem FDM-Verfahren.

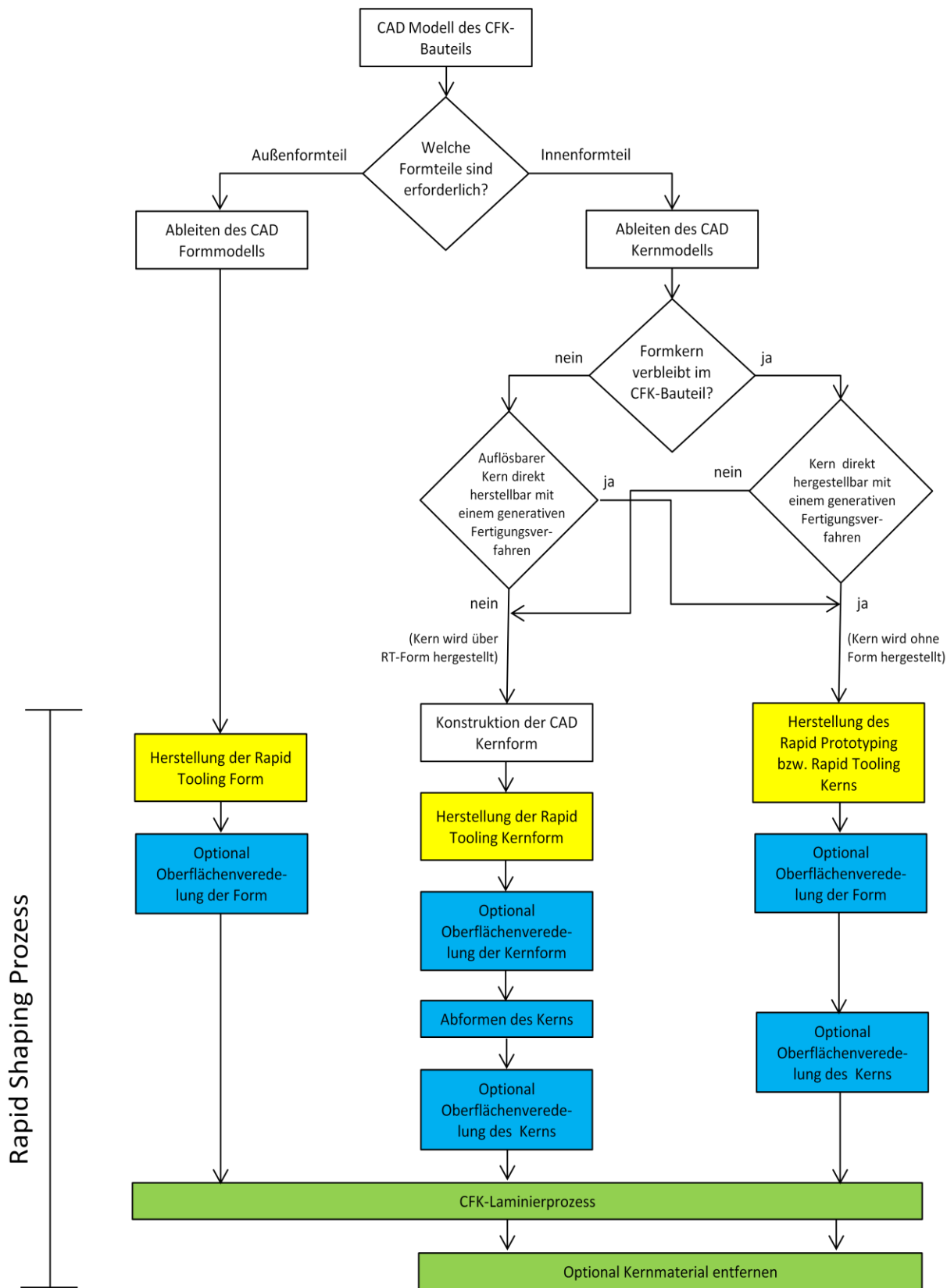


Abbildung 20: Rapid Shaping Prozessablaufplan

6. Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Forschungsprojekt wurde gezeigt, dass mit Laminierformen aus ABS-Kunststoff, aufgebaut mit dem FDM-Verfahren, wirtschaftlich und zeitsparend CFK-Bauteile hergestellt werden können.

Dazu wurden die verschiedenen Einsatzfälle der Formen analysiert und Grundsatzversuche mit den ABS-Formteilen durchgeführt. Im Einzelnen wurden hier die Haftfestigkeit des Laminats, Oberflächenveredelungsuntersuchungen und die Herstellung von Kernmaterial untersucht.

Nachdem Grundsatzversuche positive Ergebnisse erbrachten, wurden mit dem Rapid Shaping Prozess ein Chassis für den OHM-Racer und ein Schaufelblatt für eine Lawinenschneeschaufel erfolgreich hergestellt.

Nach Abschluss des Forschungsprojekts sind einige Fragen noch offen geblieben:

- wie ist die Maßhaltigkeit der ABS-Formen bei längerer Lagerung
- wie verhalten sich die Formen unter Druck und Temperatur im Autoklav
- wie verändern sich die ABS-Bauteiltoleranzen durch den Oberflächenveredelungsprozess
- welche Alternativen gibt es zu den untersuchten Kernmaterialien (wasserlösliches Stützmaterial und wasserlöslichen Gips). Hier liegt nahe auch Wachs oder PU-Schaum als Kernmaterial zu verwenden
- welche Werkstoffalternativen gibt es zu ABS-Kunststoffen und welche Vorteile resultieren hieraus
- welche Vorteile ergeben sich mit alternativen generativen Fertigungsverfahren

Danksagung

Die vorgestellten Ergebnisse wurden im Rahmen des Forschungsprojekts „Entwicklung eines Rapid Shaping Verfahrens zur Herstellung von CFK-Bauteilen auf der Basis von Rapid Prototyping Grundformen“ erarbeitet, das die Paul und Helene Metz Stiftung förderte.

Hier gilt unser besonderer Dank der Metz-Stiftung für die Genehmigung und die Finanzierung des Projektes und im Besonderen Frau Helene Metz.

Überdies wurden wir im Projekt von folgenden Firmen unterstützt, die entweder kostenlose Materialien zur Verfügung stellten oder die Proben präparierten.

- Diener Electronic GmbH & Co. KG in Ebhausen
- Akemi GmbH in Nürnberg
- Nometa Nordbayerische Metall-Spritzwerkstätten GmbH in Nürnberg
- 3DDC Ltd. in Buckinghamshire UK

7. Literaturverzeichnis

- [3DSYSTEM 2011]
3D-Systems Corporation: 25 Years Of Innovation — the journey of a lifetime. In: the tct magazine 19/1, Rapid News Publications Ltd, Tattenhall UK, 2011
- [AHN 2009]
Ahn, D.; Kweon, J.-H.; Kwon, S.; Song, J.; Lee, S.: Representation of surface roughness in fused deposition modeling. In: Journal of Materials Processing Technology, Jg. 2009, Heft 209, S. 5593-5600
- [ALPHACAM 2012]
alphacam GmbH: Materialdatenblatt. Schorndorf
<http://www.alphacam.de/rpd/material/beschreibung>
- [AVK 2010]
Industrievereinigung verstärkte Kunststoffe e.V. (Hrsg.): Handbuch Faserverbund-Kunststoffe. 3. Auflage Wiesbaden, Vieweg + Teubner Verlag, 2010
- [BÖHM 2012]
Böhm, A.: Konstruktion, Berechnung und Bau eines CFK-Chassis. Bachelorarbeit in der Fakultät Maschinenbau und Versorgungstechnik, GSO-Hochschule, 2012 (interner Bericht)
- [GALANTUCCI 2009]
Galantucci, L.M.; Lavencchia, F.; Percoco, G.: Experimental study aiming to enhance the surface finish of fused deposition modeled parts. In: CIRP Annals – Manufacturing Technology, Jg. 2009, Heft 58, S.189-192
- [GALANTUCCI 2010]
Galantucci, L.M.; Lavencchia, F.; Percoco, G.: Quantitative analysis of a chemical treatment to reduce roughness of parts fabricated using fused deposition modeling. In: CIRP Annals – Manufacturing Technology, Jg. 2010, Heft 59, S.247-250
- [GEBHARD 2007]
Gebhardt, A.: Generative Fertigungsverfahren: 3. Auflage. München Wien, Hanser-Verlag, 2007.
- [INDUSTRIEANZEIGER 2006]
Kohlenstofffaserverstärkte Kunststoffe (CFK): Unschlagbar leicht und stabil. Im CFK-Valley Stade stricken Spezialisten am Super-Leichtbau. Internetveröffentlichung:
<http://www.industrieanzeiger.de/home/-/article/32571342/33787629/>
- [KLINGL 2012]
Klingl, A.; Scheiblecker, S.: Das OHM forscht Leichtbau - Rapid Shaping. Master Projektarbeit in der Fakultät Maschinenbau und Versorgungstechnik, GSO-Hochschule, 2012 (interner Bericht)
- [MÜLLER 2003]
Müller, K.-P.: Praktische Oberflächentechnik - Vorbehandlung, Beschichtung, Beschichtungsfehler, Umweltschutz. 4. Auflage Wiesbaden: Vieweg Verlag, 2003
- [SANITHTER 2011a]
Sanitther, B.: Konstruktion einer Felge eines Elektrorollers aus Faser-Kunststoff-Verbunden. Bachelorarbeit in der Fakultät Maschinenbau und Versorgungstechnik, GSO-Hochschule, 2011 (interner Bericht)
- [SANITHTER 2011b]
Sanitther, B.: Oberflächenbehandlung mit MEK. Vortrag zur studentischen Projektarbeit in der Fakultät Maschinenbau und Versorgungstechnik, GSO-Hochschule, 2011 (interne Präsentation)
- [SANITHTER 2012]
Sanitther, B.: Fertigung einer Lawinenschaufel aus Kohlefaser-Kunststoff-Verbund mit dem Rapid Shaping Verfahren. Master Projektarbeit in der Fakultät Maschinenbau und Versorgungstechnik, GSO-Hochschule, 2011 (interner Bericht)
- [SCHÜRMANN 2007]
Schürmann, H.: Konstruieren mit Faser-Kunststoff-Verbunden. 2. Auflage Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2007.