

Carbon-Werkstoff der Zukunft

Eigenschaften, Einsatzbereiche, Verarbeitungsprozesse und Wiederaufbereitung

Julia Boos, Elsa-Brändström Gymnasium

<u>Inhaltsverzeichnis</u>	Seite
1. Aufbau der Arbeit und Vorgehensweise	1
2. Grundlagen des Werkstoffs Carbon	1
2.1 Molekularer Aufbau von Kohlefasern und Zusammenspiel mit Epoxidharzen	2
2.2 Arten und Herstellungsprozesse von Carbonfasern	3
2.2.1 Fasern aus Polyacrylnitril (PAN-Fasern)	4
2.2.2 Fasern aus Pech	5
3. Eigenschaften und Anwendungsbereiche des Werkstoffs Carbon	6
3.1 Physikalische, chemische und technische Eigenschaften	6
3.2 Anwendungsbereiche von Carbon	7
4. Produktionsprozess bei der Herstellung eines Werkstücks aus Carbon	9
4.1 Betriebspraktikum bei den Carbon-Werken Weißgerber GmbH & Co KG	9
4.2 Stufen des Herstellungsprozesses eines Design-Werkstücks	10
5. Wiederverwendung und Recycling von Carbon als wichtige Aufgabe zukünftiger Forschung	17
Danksagung	21
Literaturverzeichnis	22
Abbildungsverzeichnis	25
Praktikumsbestätigung	26
Erklärung zur selbstständigen Arbeit	27

1. Aufbau der Arbeit und Vorgehensweise

In vorliegender Arbeit werden zunächst als Grundlage chemische, physikalische und technische Eigenschaften des Werkstoffs Carbon sowie dessen vielfältige Einsatzbereiche kurz dargestellt.

Im Anschluss daran erfolgt anhand eines praktischen Teils die Beschreibung der einzelnen Prozessschritte bei der Herstellung eines Werkstücks aus Carbonfasern. Dazu absolvierte ich während der Oster- und Sommerferien 2015 mehrere Tage ein Praktikum bei den Carbonwerken Weissgerber GmbH & Co KG in Wallerstein.

Dort lernte ich wie man per CAD-Programmierung das Design für ein Werkstück erstellt. Die CAD-Daten dienen sowohl als Vorgaben für spezielle Maschinen zum Schneiden der Carbonplatten als auch als Vorlage für die Erstellung einer "Holzpressform", die später als Model bzw. Vorlage für die Pressung bzw. endgültige Formgebung der Carbonplatten dient.

Bei der Analyse des Herstellungsprozesses stehen Fragen zur Materialbeschaffenheit, der Materialdicke und der Temperatur bei der Pressung für eine optimale Formgebung des jeweiligen Werkstücks im Mittelpunkt.

Trotz der vielfältigen Vorteile von Carbon, die es als bedeutenden Werkstoff der Zukunft auszeichnen, gilt es aber auch die Wiederverwertbarkeit dieses Werkstoffes zu berücksichtigen. Da Carbon nicht auf natürlichem Wege abbaubar ist, besteht eine wichtige Aufgabe zukünftiger Forscher auch darin, Verfahren zur Wiederverwendung und zum Recycling von Carbon zu finden. Dieser Forschungsbereich steckt derzeit noch in den Kinderschuhen, erste Ansätze dazu werde ich aber zur Abrundung dieser Arbeit kurz skizzieren.

2. Grundlagen des Werkstoffs Carbon

Carbon gehört zu den Faserverbundwerkstoffen, ist also ein faserverstärkter Kunststoff, der aus einer sogenannten Matrix besteht, in der Verstärkungsfasern eingebettet sind.¹ Welche Rolle die einzelnen Bestandteile von Carbon, nämlich Carbonfasern, auch Kohlenstofffasern genannt, und Epoxidharze bei der Herstellung von Carbon haben und wie sich ihr Zusammenspiel auf die Eigenschaften des Endprodukts Carbon auswirken, wird im Folgenden kurz skizziert.

¹ Vgl. Carbon-Components, Faser-Verbundwerkstoffe: www.carbon-components.de/werkstoff.html [11.8.15]

2.1 Molekularer Aufbau von Kohlefasern und Zusammenspiel mit Epoxidharzen

Bei der Herstellung von Carbon handelt es sich bei der Matrix in der Regel um thermoplastische Epoxidharze. Durch entsprechende Kombination von Faser- und Matrixeigenschaften werden synergetische Effekte erzielt, das heißt, das Zusammenwirken dieser Komponenten führt zu verbesserten Verbundeigenschaften was etwa die Zugfestigkeit, Steifigkeit, Widerstandsfähigkeit und das Gewicht betrifft.²

Kohlenstofffasern, auch Carbonfasern genannt, sind Moleküle, die eine Gitterstruktur aufweisen und aus Kohlenstoff bestehen.³

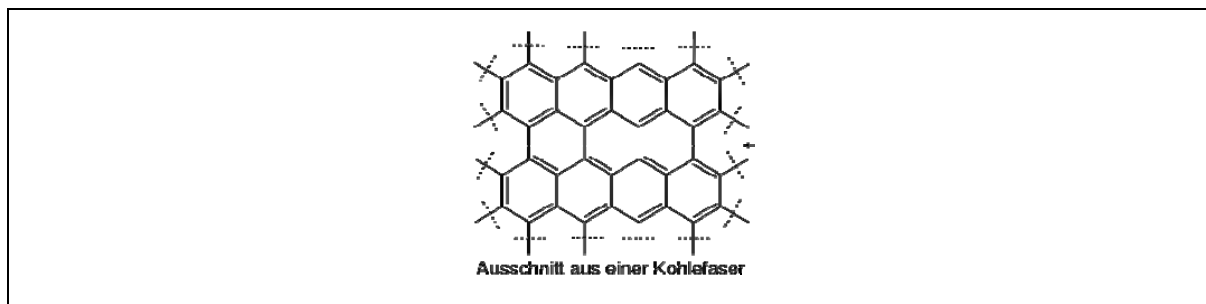


Abb. 1: Ausschnitt aus einer Kohlefaser⁴

Die Carbonfaser selbst wird synthetisch aus kohlenstoffhaltigen Ausgangsmaterial gewonnen, durch Herauslösung der anderen Molekülteile. Dabei entsteht eine sehr biegsame Faser, vergleichbar mit einem stabileren, dünnen Wollfaden. Aus diesen Fasern wird eine Platte oder ein Rohr gewebt; wobei es verschiedene Webarten gibt, die zu unterschiedlichen Eigenschaften, was die Belastbarkeit und Steifigkeit betrifft, führen.^{5, 6}

Um die Carbonfaser-Gewebe zu festigen, werden sie – wie bereits erwähnt – mit Epoxidharzen versetzt, damit man ein stabiles Endprodukt zur Verarbeitung bekommt. Bei Epoxidharzen (EP-Harzen) handelt es sich um Kunstharze, die Epoxidgruppen tragen.⁷

² Vgl. hierzu auch Kap. 3.1/3.2 sowie Carbon-Components, Faser-Verbundwerkstoffe: www.carbon-components.de/werkstoff.html [11.8.15], vgl. auch Jakube, Hans-Dieter, Karcher, Ruth (Hrsg., 2001): Lexikon der Chemie. Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag.

³ Vgl. Wikipedia Kohlenstofffaser: <https://de.wikipedia.org/wiki/Kohlenstofffaser> [13.8.15]

⁴ Abbildung aus Wikipedia Kohlenstofffaser: <https://de.wikipedia.org/wiki/Kohlenstofffaser> [13.8.15]

⁵ Vgl. Carbon-Components Faser-Verbundwerkstoffe: www.carbon-components.de/werkstoff.html [11.8.15]

⁶ Aus: Gespräch mit Herrn Weißgerber, Geschäftsführer von Carbonwerke Weißgerber GmbH & Co KG am 1.4.15

⁷ Vgl. Wikipedia Epoxidharz: <https://de.wikipedia.org/wiki/Epoxidharz> [15.8.15]

Strukturformel:

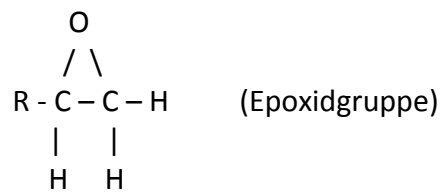


Abb. 2: Strukturformel Epoxidharze

Diese wandeln sich mit Hilfe eines Härterers und -je nach Einzelfall- unter Zugabe anderer Zusatzstoffe in einen duroplastischen Kunststoff.⁸

Bei Epoxidharzen handelt es sich um Polyether, die meist zwei endständige Epoxidgruppen besitzen (siehe Abb.2). Die Gitterstruktur der Duroplaste aus Härter und Epoxidharz weisen sowohl eine sehr hohe Resistenz gegen Chemikalien und Temperaturschwankungen als auch hervorragende mechanische Eigenschaften auf. Diese Eigenschaften verstärken sich noch bei der Verarbeitung von Epoxidharzen mit Kohlestofffasern zu Carbon.

2.2 Arten und Herstellungsprozesse von Carbonfasern

Carbonfasern gewinnt man über eine Carbonisierungsbehandlung, auch Carbonisierung genannt. Bei der Carbonisierungsbehandlung geht es darum, die Nebengruppen von organischen Verbindungen gasförmig abzuspalten, um einen Kohlenstoffstrang zu erhalten. Dabei spielt die Temperatur eine bedeutende Rolle. Je höher die Temperatur, desto höher die Qualität der gewonnenen Faser.

Die Temperaturzufuhr liegt bei der Carbonisierungsbehandlung meist im Bereich von 1200-3000 Grad Celsius. Dabei unterscheidet man zwischen drei Faserklassen. Fasern, die entstehen bei einer Temperatur:

- zwischen 1200 und 1500 Grad, nennt man hochfeste Fasern (HT-Type),
- zwischen 1500 und 1800 Grad , Zwischenmodulfasern (IM) und
- zwischen 1500 bis 3000 Grad , Hochmodulfasern bzw. Ultrahochmodulfasern (Hm/UHM).^{9, 10}

⁸ Vgl. epoxidharze.net, S.1: www.epoxidharze.net [15.8.15]; vgl. auch Wikipedia: Epoxidharze

⁹ Vgl. Wohlmann, Bernd (2009), Kohlenstoff-Fasern, S. 3: www.r-g.de/w/images/9/94/AVK_Kohlenstoff-Fasern.pdf#page=2&zoom=auto,-107,595, aus: AVK - Industrievereinigung Verstärkte Kunststoffe (2009), Handbuch Faserverbundkunststoffe – Grundlagen, Verarbeitung, Anwendungen. ,3.vollst. überarb. Aufl., Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag. [16.8.15]

Durch verschiedene Ausgangsstoffe bei der Carbonisierung erhält man unterschiedliche Faserarten. Die bekanntesten sind Viskosefasern, Fasern aus Polyacrylnitril (PAN-Fasern) und Fasern aus Pech.

Das Viskoseverfahren beruht darauf, auf Zellulosebasis Viskosefasern herzustellen. Diese weisen allerdings eine schwache Kohlenstoffstruktur auf, was bedeutet, dass sie relativ instabil sind im Vergleich zu anderen Kohlenstofffasern und eine niedrige elektrische und thermische Leitfähigkeit haben. Daher wird im Weiteren v.a. die Herstellung von den wesentlich stabileren PAN- und Pechfasern näher ausgeführt.¹¹

2.2.1 Fasern aus Polyacrylnitril (PAN-Fasern)

Die heute am meisten verwendete Kohlenstofffaser ist die Faser auf Polyacrylnitrilbasis (PAN-Faser). Man erhält diese Fasern, indem man nach einer Stabilisierungsreaktion an der Luft eine Pyrolyse unter einem Schutzgas aus Polyacrylnitril durchführt. Das heißt, dass das thermoplastische Polyacrylnitril zuerst eine Oxidation eingeht, wobei Wasserstoff abgespalten wird und sich die Stränge der PAN-Moleküle zu einer Kette von Pyridin-Sechsringen zusammenschließen, also zu einem Leiterpolymer.¹²

Auf Grund der vorausgegangenen Oxidation lässt sich die Faser nicht mehr schmelzen. Dies ist wichtig für die anschließende Carbonisierung, die mit Hilfe eines Pyrolyseprozesses erfolgt. In diesem Prozess kommt es zu einer Zwangsspaltung der Moleküle durch große Erhitzung. Da der ganze Prozess unter Ausschluss von Sauerstoff, also in einem Vakuum stattfindet, wird eine sauerstoffbedingte Rückreaktion ausgeschlossen.¹³

Während der Carbonisierung lagern sich die Pyridinketten unter Abspaltung von Cyanwasserstoff und Stickstoff zu molekularen Bändern zusammen. Dabei entsteht eine dreidimensionale, graphitartige Struktur, also ein Carbonstrang, der nun weiterverarbeitet werden kann.

¹⁰ Hinweis: Ab einer Temperatur von 1800 Grad Celsius spricht man nicht mehr von einer Carbonisierung, sondern von einer Graphitierung; die Struktur wird mit wachsender Temperatur immer feiner

¹¹ Vgl. Karl Mayer Composite Parts - CFK Herstellung: www.karlmayer-composites.com/impressum/cfk-herstellung [16.8.15]; vgl. auch Wikipedia Kohlefaser: <http://de.wikipedia.org/wiki/Kohlenstofffaser> [13.8.15]

¹² Vgl. Wikipedia Polyacrylnitril: https://de.m.wikipedia.org/wiki/Kohlenstofffaser#Polyacrylnitril_.28PAN.29 [3.11.15]

¹³ Vgl. Wohlmann, Bernd (2009), Kohlenstoff-Fasern, S. 3: www.r-g.de/w/images/9/94/AVK_Kohlenstoff-Fasern.pdf#page=2&zoom=auto,-107,595 [13.8.15]

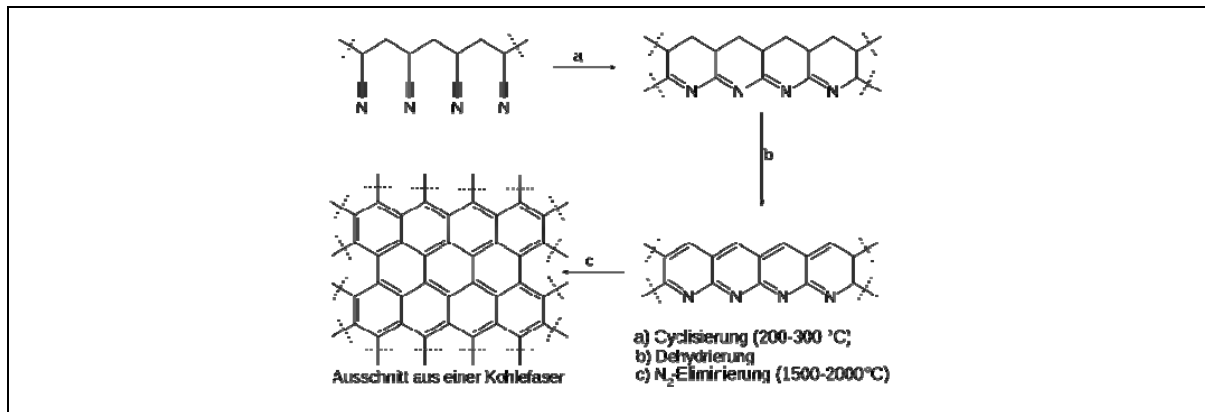


Abb. 3: Prozessschritte in der Herstellung der PAN-Faser¹⁴

Dieser Typus der Kohlenstofffaser zeichnet sich durch eine besonders hohe Zugfestigkeit aus. Der Herstellungsprozess ähnelt dem der „traditionellen“ Fasern in der Textilindustrie. Daher ist diese Methode der Carbonfaserherstellung auch im Vergleich zu Verfahren mit anderen Grundstoffen relativ kostengünstig.¹⁵

2.2.2 Fasern aus Pech

Ein relativ kostengünstiger Ausgangsstoff zur Herstellung von Carbonfasern ist Pech. Da dieses aber in der Regel erst gereinigt und aufbereitet werden muss, steigen die Produktionskosten im Vergleich zur Herstellung von PAN-Fasern allerdings wieder.

Das Pech wird beim Herstellungsvorgang geschmolzen, versponnen und karbonisiert.

Im ersten Schritt wird dabei unter Einwirkung hoher Temperaturen eine Kondensation durchgeführt, um Polyaromaten mit einer Molmasse zwischen 1000 und 2000 zu erhalten.¹⁶

Dieser Typus von Polyaromaten kann bei einer Wärmeeinwirkung von ca. 400 Grad Celsius kugelige oder strahlenförmige Flüssigkristalle, sogenannte Sphärolyten, bilden. Wegen ihrer Oberflächenspannung verbinden sich diese zu einem größeren Flüssigkristall. Dieser wird wiederum durch einen Spinnprozess in Faserrichtung ausgerichtet, so dass sich die Fasern weitgehend in axiale Richtung orientieren.¹⁷

¹⁴ Abbildung aus Wikipedia Kohlenstofffaser: <https://de.wikipedia.org/wiki/Kohlenstofffaser> [13.8.15]

¹⁵ Vgl. Pyrocarbon: http://www.pyrocarbon.de/pageID_2391670.html [3.11.15]

¹⁶ Vgl. Karl Mayer Composite Parts – CFK-Herstellung: www.karlmayer-composites.com/impressum/cfk-herstellung [16.8.15]

¹⁷ Vgl. Wikipedia Kohlefaser: <http://de.wikipedia.org/wiki/Kohlenstofffaser> [13.8.15]; vgl. auch Schult, Katja; Rettig, Karsten, Kohlenstofffasern- Wohin geht es mit den Faserkapazitäten, Produkte und

Ähnlich wie bei der Herstellung von PAN-Fasern kann durch die vorangegangene Oxidation auch die Pechfaser bei der anschließenden Carbonisierung nicht schmelzen.

Da der Herstellungsprozess aber immer noch sehr teuer ist, werden Pechfasern zur Herstellung von Carbon nur selten eingesetzt.

3. Eigenschaften und Anwendungsbereiche des Werkstoffs Carbon

3.1 Physikalische, chemische und technische Eigenschaften

Ähnlich wie Diamanten, die ebenfalls eine hohe Kohlenstoffdichte aufweisen, ist Carbon ein sehr widerstandsfähiges und starkes Material. So bietet Carbon – was die Stabilität betrifft – die gleichen Möglichkeiten wie Stahl bei einem weitaus geringeren Gewicht. Die mechanischen und thermischen Eigenschaften der Verbunde werden u.a. zugleich von Faserwinkel, Fasern/mm³ und der Schichtenreihenfolge beeinflusst.¹⁸

Nicht nur durch seine enorme gewichtsspezifische Festigkeit zeichnet sich Carbon aus, sondern auch durch:

- weitgehende Beständigkeit gegen Korrosion, Temperatur- (geringe Wärmedehnung) und Witterungsschwankungen sowie gegenüber Chemikalien (Säuren, Alkalien und Lösungsmittel)
- gute elektrische Leitfähigkeit
- gute Schwingungs- und Dämpfungseigenschaften
- hohe Beständigkeit auch bei dynamischer Beanspruchung
- nicht von Magnetismus beeinträchtigt
- Durchlässigkeit von elektromagnetischen Wellen/ Röntgenstrahlen
- eine hohe Energieabsorption
- einfache Verarbeitung (ähnlich Glasfasern)¹⁹

Entwicklungstrends?: http://www.tohotenax-eu.com/uploads/media/2010-03_Kohlenstofffasern_lw.pdf [3.11.15]

¹⁸ Aus: Gespräch mit Herrn Weißgerber am 1.4.15

¹⁹ Vgl. R&G Wiki: [www.r-g.de/wiki/Kohlefasern_\(Carbon\)](http://www.r-g.de/wiki/Kohlefasern_(Carbon)) [15.8.15]; vgl. auch Carbon Components: www.carbon-components.de/werkstoff.html

3.2 Anwendungsbereiche von Carbon

Auf Grund dieser außerordentlichen Eigenschaften und seiner vielseitigen Variationsmöglichkeiten, eröffnet der Werkstoff Carbon zahlreichen Branchen neuartige Einsatzmöglichkeiten. Die Nutzung von Carbonkomponenten bietet sich an, wenn durch eine Erhöhung der Festigkeitswerte und/oder die Verringerung des Gewichts eines einzelnen Bauteils, eine Verbesserung einer gesamten Baugruppe eines Systems erreicht wird. Dadurch ergeben sich zusätzliche Fortschritte wie höhere Effektivität in der Produktion sowie eine Erhöhung der Sicherheit, der Geschwindigkeit und der Genauigkeit bei den Endprodukten.²⁰

Die wichtigsten Einsatzfelder werden im Folgenden kurz skizziert.²¹

Medizintechnik:

Eigenschaften, die Carbon für den Einsatz in der Medizintechnik prädestinieren, sind neben der Durchlässigkeit von Röntgen- bzw. elektromagnetischen Strahlen, hochwertige Oberflächen sowie wie die Sterilisierbarkeit des Materials mit Hilfe von Dampf. Hervorragende Anwendungsmöglichkeiten in diesem Bereich sind Kohlefaserabdeckungen für Röntgeneinrichtungen, Carbonprothesen, Bauteile aus kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffen (kurz CFK) für Rollstühle, Rollatoren und andere Hilfsmitteln für Behinderte.²²

Fahrzeugtechnik und Modellbau:

Vor allem im Motorsport lassen sich Effizienzsteigerungen durch maximale Gewichtsreduzierung erzielen. Durch die Korrosionsbeständigkeit und guten Dämpfungseigenschaften sowie durch die hohe Energieabsorption bei Unfällen und durch die Festigkeit und Steifigkeit der Bauteile können Sicherheit und Langlebigkeit von Fahrzeugen gesteigert werden. Zum Einsatz kommt Carbon in diesen Bereichen z.B. bei Abdeckungen und Verkleidungen aus Kohlefaser und als Komponenten für den Bau von Rennwagen, Rahmenteile aus Kohlefaser, von Carbon-Bremsscheiben sowie für Komponenten für Flugdrohnen und Ultraleichtflugzeuge.²³

²⁰ Aus Gespräch mit Herrn Weißgerber am 1.4.15

²¹ Vgl. Carbon Components: www.carbon-components.de/anwendungen.html [14.8.15]

²² Vgl. CrossLink Fibertech Carbon in der Medizintechnik: www.crosslink-fibertech.de/de/medizintechnik.php [14.8.15]

²³ Weißenborn, Stefan (2014), Wie sich Carbon im Auto fest etabliert, in: „Die Welt, PS - Das Automagazin der Welt“, 10.6.14, S. 4: www.welt.de/motor/article128914187/Wie-sich-Carbon-im-Auto-fest-etabliert.html

Maschinenbau:

Im Maschinenbau ermöglicht der Einsatz von Carbon eine präzise und direkte Kraftübertragung, hohe Dauerfestigkeit bei dynamischen Belastungen, hohe Druckbeständigkeit sowie eine Optimierung der Steifigkeit bei hohen Beschleunigungen. Außerdem profitiert dieser Bereich von der geringen Massenträgheit bei sich bewegenden Bauteilen. Beispiele in diesem Bereich sind Greifarme für Roboter, die Bestückung von Beschichtungsanlagen sowie Hebewerkzeuge (z.B. Krane) und Maschinenteile in der Hochgeschwindigkeitsbearbeitung.²⁴

Messtechnik:

Ein Vorteil Carbons für die Messtechnik ist, dass Feuchtigkeit und Temperatur keinen Einfluss auf Lage und Formstabilität des Materials haben und auch die Messergebnisse durch magnetische Remanenz nicht beeinflusst werden.

Zu finden ist Carbon in Hybridbauteilen, als Träger optischer Messeinrichtungen, in der Lasermesstechnik sowie bei Grundplatten für Prüfadapter in der Elektronikfertigung.²⁵

Sonstige Anwendungsbereiche:

Sonstige Einsatzbereiche finden sich in der Herstellung von Sportgeräten (z.B. Ski und Skistöcke, Rennräder, Skate- und Snowboards, Tennisschläger, Wettkampfspeere etc.).²⁶

Auf Grund seiner akustischen Eigenschaften lässt sich Carbon auch sowohl sehr gut beim Bau von Musikinstrumenten (Gitarren, Panflöten, Streichinstrumenten wie z.B. Geigen etc.) als auch als Schallverstärker (z.B. Designobjekt Klangstuhl)²⁷ einsetzen.²⁸

[14.8.15]; vgl. auch DMAX (2013), Video „Die Modellbauer: Carbon-Rakete“: www.dmax.de/programme/die-modellbauer/videos/die-modellbauer-carbon-rakete [11.9.15]

²⁴ Vgl. CrossLink Fibertech, Carbon im Maschinenbau: www.crosslink-fibertech.de/de/maschinenbau.php [14.8.15], sowie aus: Gespräch mit Franz Weißgerber, Geschäftsführer der Carbonwerke Weißgerber GmbH & Co KG

²⁵ Vgl. SGL Group, Anwendungen: www.sglgroup.com/cms/international/applicationsmeasuring-technology-and-optics/applications/accessories_made_from_cfrp_for_measuring_technology_and_optics.html?__locale=de&market=/internatinal/applications/measuring-technology-and-optics/index.html [14.8.15]

²⁶ Kraus, Josef-Martin (2012), Schneller, höher, weiter: CFK hat sich als Champion im Hochleistungssport etabliert, in „Maschinen Markt - Das Industrieportal“, 5.12.12: www.maschinenmarkt.vogel.de/themenkanale/konstruktion/werkstoffe/articles/388027 [14.8.15]

²⁷ Das Designobjekt Klangstuhl war ein Exponat in der Sonderausstellung „Harter Stoff– Carbon, das Material der Zukunft“ im Deutschen Museum München vom 16.5-12.7.15, das im Rahmen einer Studie am Institut für Flugzeugbau in Stuttgart entstand. Siehe hierzu auch: www.deutsches-museum.de/ausstellungen/sonderausstellungen/rueckblick/2014/carbon [12.9.15]

²⁸ Lederbauer, Klaus, Finus, Frauke (2014), Stradivari wäre begeistert: Streichinstrumente aus Carbon, in: „Maschinen Markt – Das Industrieportal“, 12.11.14: www.maschinenmarkt.vogel.de/compositesworld/articles/466310 [14.8.15]

Die ansprechenden Hochganzoberflächen sowie die Exklusivität und Leichtigkeit des Materials bieten Designern neue Möglichkeiten hochwertige Designobjekte aus Carbon herzustellen (Ziffernblätter, Möbelstücke, Kugelschreiber, Schmuck etc.).²⁹

Diese Auflistung erhebt natürlich keinen Anspruch auf Vollständigkeit und man darf gespannt sein, welche innovativen Anwendungen kreative Designer, Forscher und Entwickler zukünftig noch finden werden.

4. Produktionsprozess bei der Herstellung eines Werkstücks aus Carbon

4.1 Betriebspraktikum bei den Carbon-Werken Weißgerber GmbH & Co KG

Um den Werkstoff Carbon und die Möglichkeiten und Fertigungsprozesse dieses Werkstoffs näher kennenzulernen, entschied ich mich während der Oster- und der Sommerferien 2015 jeweils für einige Tage bei den Carbon-Werken-Weißgerber,³⁰ einem Unternehmen in Wallerstein, das zum Teil Carbon in sehr innovativer und kreativer Weise verarbeitet, ein Praktikum³¹ zu machen.

Die Carbon-Werke Weißgerber GmbH & Co KG ist Mitglied der „M.A.I Carbon – Die Spitzen Cluster-Initiative“,³² die u.a. vom Bundesministerium für Bildung und Forschung sowie vom Bayerischen Staatsministerium für Wirtschaft und Medien, Energie und Technologie gefördert wird. Außerdem wurden die Carbon-Werke Weißgerber bereits 2006 mit dem schwäbischen Innovationspreis der IHK Schwaben ausgezeichnet. Der Physiker und Maschinenbauingenieur Franz Weißgerber ist Geschäftsführer der Carbon-Werke Weißgerber und stellvertretender Vorsitzender des Carbon Composites e.V. (CCe.V.).³³ Dieser Verein betreut federführend die Projekte der MAI- Carbon-Initiative.³⁴

²⁹ Vortrag Dipl.-Des. Falk, Gerd, Designobjekte aus Carbonstrukturen, 5.11.14, im Rahmen der Ausstellung im Deutschen Museum in München „Harter Stoff- Carbon, das Material der Zukunft vom 16.5.-12.7.15, siehe hierzu auch www.deutsches-museum.de/fileadmin/Content/010_DM/010_Information/040_Vortrag/010_Jedermann/2014_15/PDF/5_11_2014.pdf [14.8.15]

³⁰ Vgl. Carbon-Werke Weißgerber GmbH & Co. KG: www.carbon-vertrieb.com [15.8.15]

³¹ Siehe Praktikumsbestätigung [S.26]

³² Vgl. MAI-Carbon - Die Spitzencluster-Initiative: www.mai-carbon.de/index.php/de [16.8.15]

³³ Carbon Composites e.V.: www.carbon-composites.eu [12.9.15]

³⁴ MAI-Carbon ist ein Projekt des Carbon Composites e.V. (CCe.V.) und wurde im Rahmen des Cluster-Wettbewerbs des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) im Jahr 2012 als Spitzencluster ausgewählt. Ziel dieses Clusters ist es, flächendeckend in der MAI-Region (Großraum: München, Augsburg, Ingolstadt) Hochleistungs-Faserverbundwerkstoffe - insbesondere CFK in den Branchen Automobilbau, Luft- und Raumfahrt sowie im Maschinen- und Anlagenbau zu etablieren. Dadurch soll der Wirtschaftsstandort

4.2 Stufen des Herstellungsprozess eines Design-Werkstücks

Ich entschloss mich, selbst zwei Werkstücke herzustellen und zwar zwei Weinflaschenhalter unterschiedlichen Designs, die durch ihr ausbalanciertes Design eine Flasche scheinbar schwerlos schweben lassen und aufgrund ihrer Oberfläche ein hochwertiges, exklusives Erscheinungsbild liefern.³⁵

Zuerst musste ich hierfür einen Entwurf erstellen. Dieser sollte dann in einzelne Teile zerlegt werden, um entsprechende Carbonplatten, die zur Fertigung benötigt werden, schneiden zu können.

Nachdem ich mich für einen Entwurf entschieden hatte, bekam ich eine Einführung in das CAD-Programm Master CAM,³⁶ so dass ich mit Hilfe dieses Programms die Formen der Einzelteile für die Schneidemaschine entwerfen konnte (siehe Abb. 4).

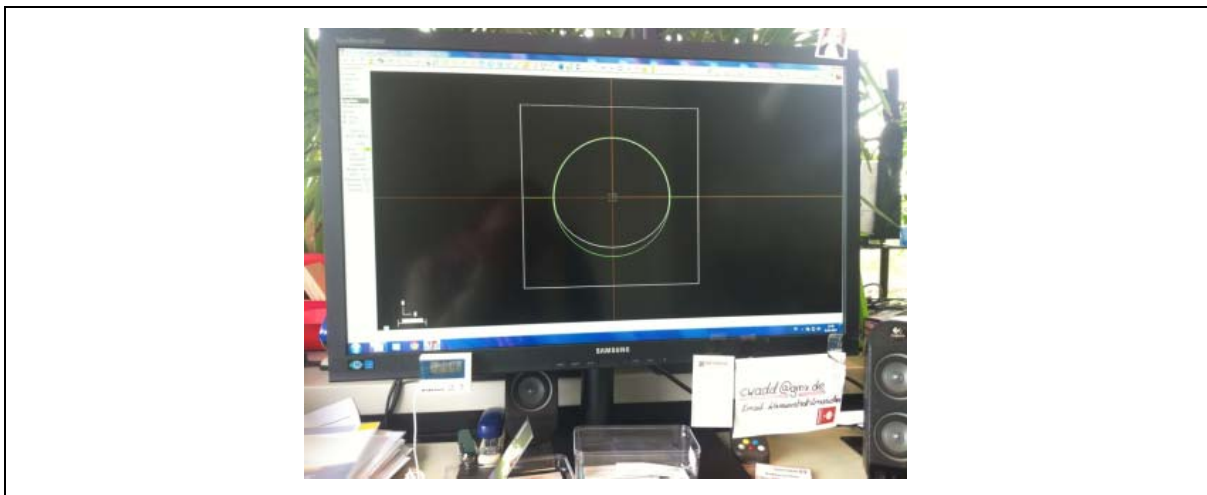


Abb. 4: CAD-Programmierung Seitenstück³⁷

Über dieses Programm ist auch eine direkte Programmierung der Maschinensteuerung möglich, was für die Erstellung meines Werkstücks sehr hilfreich war.

Da ich zwei verschiedene Flaschenhalter herstellen wollte, entschied ich mich bei einem der beiden für eine einfache runde Öffnung für den Flaschenhals, bei dem anderen versuchte ich mich an einer Sternform.

Deutschland/Bayern gestärkt und ein wertvoller Beitrag zur Ressourceneffizienz geleistet werden: www.mai-carbon.de

³⁵ Siehe hierzu auch Fotos von den fertigen Werkstücken, Abb. 14 (S. 15) und Abb. 17 (S. 16)

³⁶ Vgl. Mastercam X9: www.mastercam.com/en-us [16.8.15]

³⁷ Bei den Abbildungen 4-17 handelt es sich um selbsterstellte Fotos, aufgenommen während eines Praktikums bei den Carbon-Werken Weißgerber GmbH & Co KG

Schließlich musste noch die später benötigte Pressform zugeschnitten werden, wofür ich ebenfalls die Vorlage für die Maschine über CAD programmierte.

Nachdem die Programmierung abgeschlossen war, suchte ich die für das Endprodukt zu verwendenden Platten heraus, wobei ich bei dem ersten Weinflaschenhalter zunächst verschiedene Plattendicken prüfte, um deren Handhabung, Dehnbarkeit und Stabilität zu testen.

Zum Schneiden der Carbonplatten wurde eine abrasive Schneidmethode eingesetzt, das heißt, es wird ein extrem starker, mit Granitsand versetzter Wasserstrahl genutzt, der einen Druck von 3800 bar aufweist.³⁸



Abb. 5: Wasserstrahlschneidegerät 1

Abb. 6: Wasserstrahlschneidegerät 2

Dieser Wasserstrahl vereinfacht es, nicht nur durch sehr dicke Materialien oder mehrere Schichten präzise zu schneiden, sondern schleift zugleich auch durch den zugefügten Sand die Schneidkanten. Bei diesem Schneidprozess muss man die gewählten Platten präzise in die Maschine einspannen und befestigen. Dies macht man mit Hilfe von Metallgewichten, die sich allerdings nach einiger Zeit stark abnutzen, da sie ebenfalls von dem Wasserstrahlschneider getroffen werden.

³⁸ Das Wasser-Sand-Gemisch enthält 1-3 Prozent Sand. Dieses wird an der Düse bis zu 3-facher Schallgeschwindigkeit beschleunigt. Die Steuerung dieser Wasserstrahlschneide läuft über das Programm ICam.



Abb. 7: Kontrollstation Wasserstrahlschneidegerät

Daraufhin muss man die CAD-Programmvorlage in den Steuercomputer übertragen, um dem Wasserstrahlschneidegerät die gewünschte Schneidform vorzugeben.



Abb. 8: Prototyp Weinflaschenalter

Nachdem alle Teile verschiedener Dicken in einem einzigen Arbeitsgang mit dem Wasserstrahlschneidegerät geschnitten wurden, konnte ich in einer Testreihe die Zusammensetzung und die benötigte Dicke der jeweiligen Platten testen. Hierbei prüfte ich zuerst bei den verschiedenen geschnittenen Teststücken, wie geeignet sie auf Grund ihrer Biegsamkeit sind, sich der gewünschten Form anzupassen. Ich stellte fest, dass nur die Platten mit maximal einem Millimeter Dicke für die benötigte Biegung nutzbar sind, da sie als einzige in diesem Größenbereich einen dreiviertelten, sichelförmigen Kreis bilden konnten. Nach diesen Tests entschied ich mich bei der Ober- und Unterseite meines Werkstücks Platten der Dicke 0,5 mm und bei den Seitenteilen Platten der Dicke 4mm zu verwenden, um eine möglichst hohe Stabilität zu erreichen.

Im Anschluss an den Biegsamkeitstest und die Wahl geeigneter Platten, prüfte ich die Passform der einzelnen Teile, indem ich sie erst mit Schraubzwingen und schließlich mit Tape in die gewünschte Form brachte.



Abb. 9: Pressform Anpassung

Nachdem das Tape entfernt wurde, markierte ich auf der vorher erwähnten Pressform, wie die Teile später darin klemmen sollten. Dies ist wichtig, um die Biegung später an der richtigen Stelle zu haben, damit alle Teile wirklich zusammenpassen.

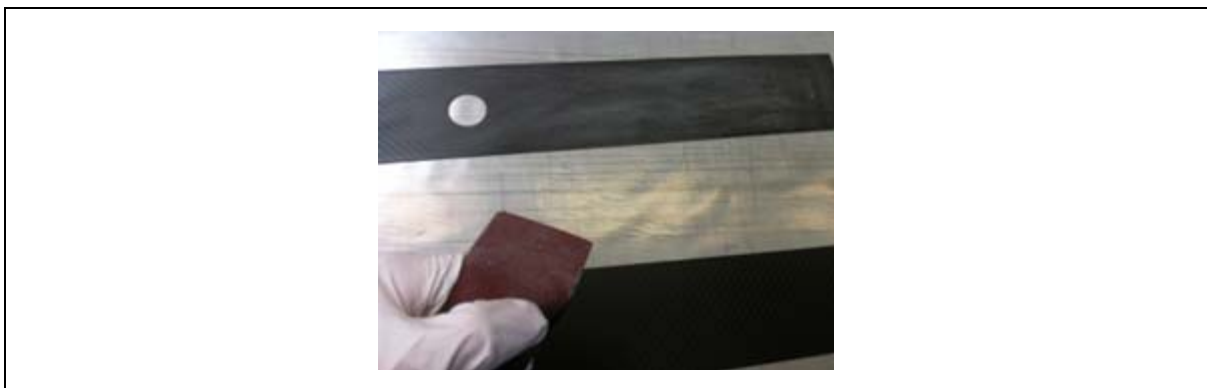


Abb. 10: Schleifen der Teile

Im nächsten Schritt musste ich die Einzelteile für das Kleben vorbereiten. Hierfür raute ich die zu verklebende Seite mit Sandpapier auf. Außerdem mussten die Teile mit Aceton gut gereinigt werden, um eine höhere Haftung zu gewährleisten. Dabei war darauf zu achten, die später sichtbare Oberfläche des Werkstücks nicht zu beschädigen.

Im nächsten Schritt wurde der Kleber auf die zuvor geschliffenen Stellen aufgetragen. Bei diesem handelte es sich um den Kleber DB490 vom Hersteller 3M mit einer Härtung bei 30° C/24h. Dieser Kleber besteht aus einem Epoxidharz und Polyamin (Härter). Da Harz und Härter erst beim Auftragen auf der Platte vermischt werden, bedeutet das, dass sich die für

Duroplasten typischen Verbindungen erst langsam auf der Platte verknüpfen und somit eine leichte Handhabung im flüssigen Zustand zulassen. Nachdem das Gemisch jedoch in einer späteren Prozessphase (siehe Abb.12) in einer Presse zum Härten gebracht wird, bildet sich ein fester Klebstoff, der das Werkstück nun untrennbar zusammenhält.³⁹

Während das Verkleben der oberen und unteren Teilstücke außerhalb der Pressform möglich war, mussten die Seitenteile in der Pressform hinzugefügt werden. Dafür müssen zuerst Ober- und Unterseite in der Pressform angepasst und dann die Seitenteile in den Zwischenraum eingedrückt werden.

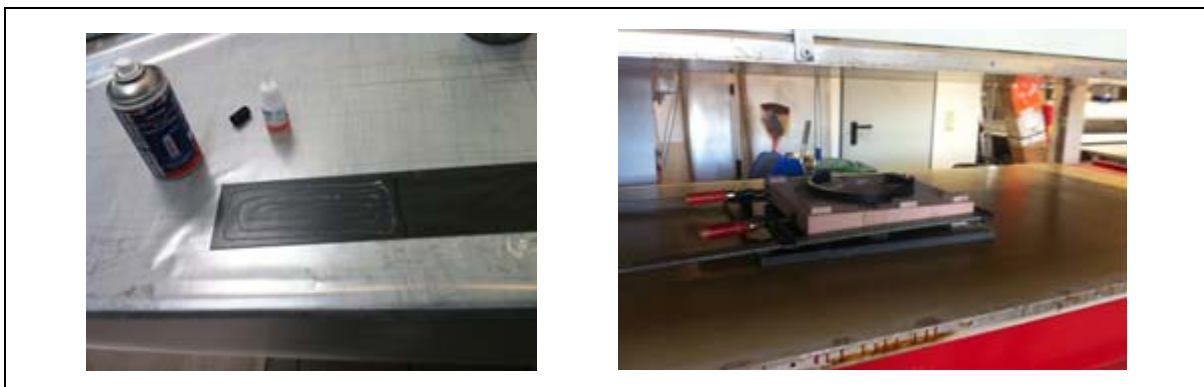


Abb. 11: Kleben der Teile

Abb. 12: Presse

Die Pressform mit den verklebten Einzelteilen wurde, wie oben bereits beschrieben, dann über Nacht in die Presse geschoben. Diese Presse wurde auf eine Temperatur von 130 Grad Celsius zum Schmelzen des Harz-Leim-Gemisches erhitzt und übte einen Druck von 40t/m^3 auf das Werkstück aus.

Am nächsten Tag holte ich das Werkstück, nun untrennbar verklebt, aus der Presse und löste es vorsichtig aus der Pressform, um die Oberfläche nicht zu beschädigen.

Darauf folgte das Schleifen der Kanten, wobei überstehende Teile abgeschnitten werden mussten. Dazu kamen wieder Testreihen, um zu prüfen, ob die Löcher für den Flaschenhals im richtigen Winkel zu einander stehen und diese – falls nötig – auszubessern.

³⁹ Suter Kunststoffe AG, Schweiz: www.swiss-composite.ch/pdf/t-Scotch-DP490-schwarz.pdf [16.8.15]

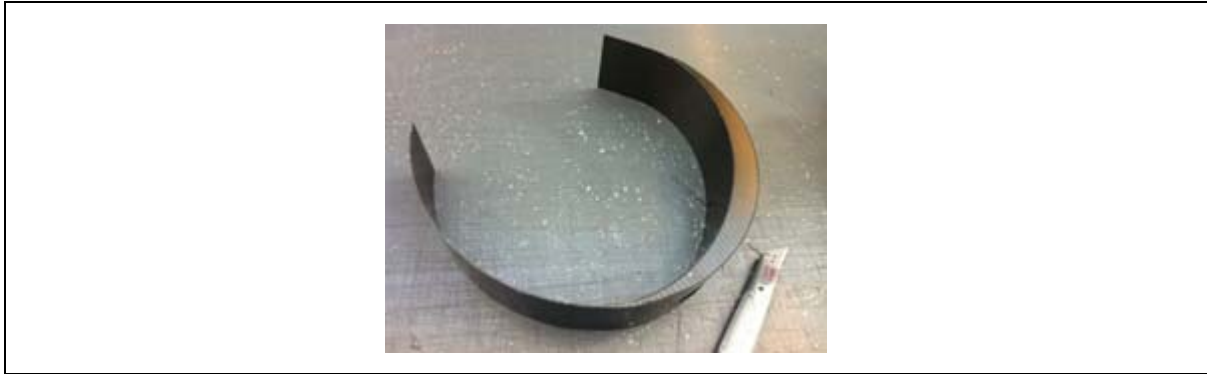


Abb. 13: Entfernen der Klebereste

Nachdem all dies abgeschlossen war, wurden schließlich letzte Verschönerungen durchgeführt, wie das Entfernen von überschüssigen Kleberresten und das Auftragen einer Politur auf der Oberfläche des Werkstücks.

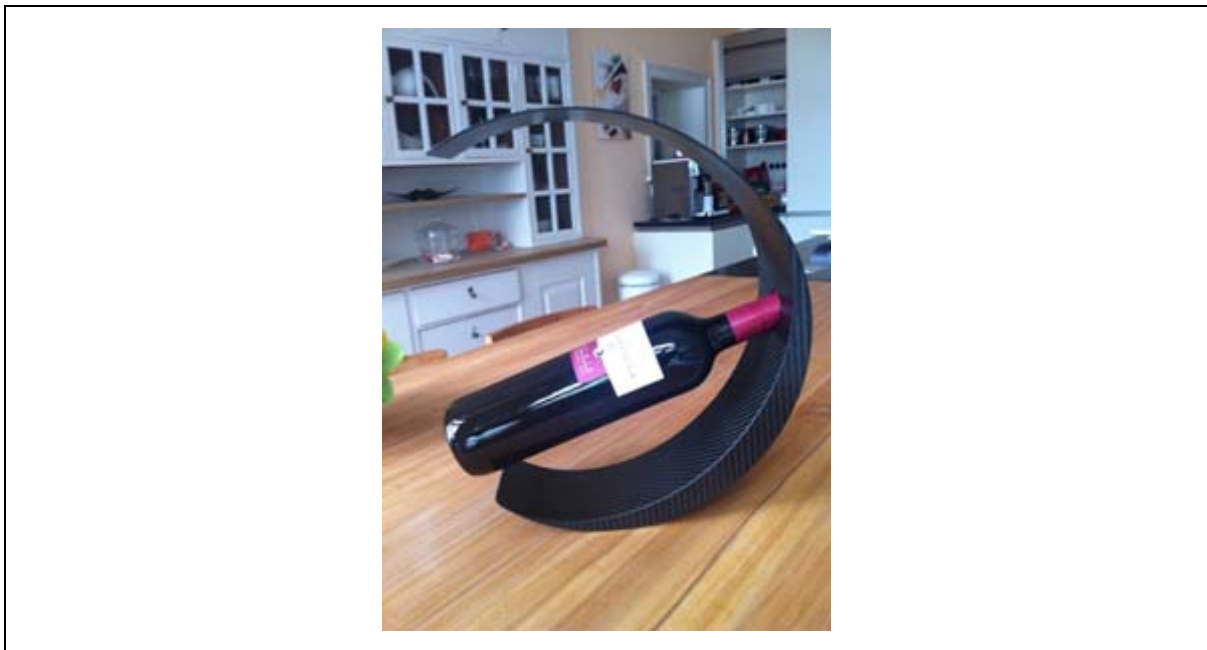


Abb. 14: Fertiges Werkstück 1

Bei meinem zweiten Werkstück nahm ich leichte Veränderungen in Bau und Design vor. Dabei handelt es sich designtechnisch um ein sternförmiges statt um ein rundes Loch für den Flaschenhals und die Verwendung von Hochglanzplatten.

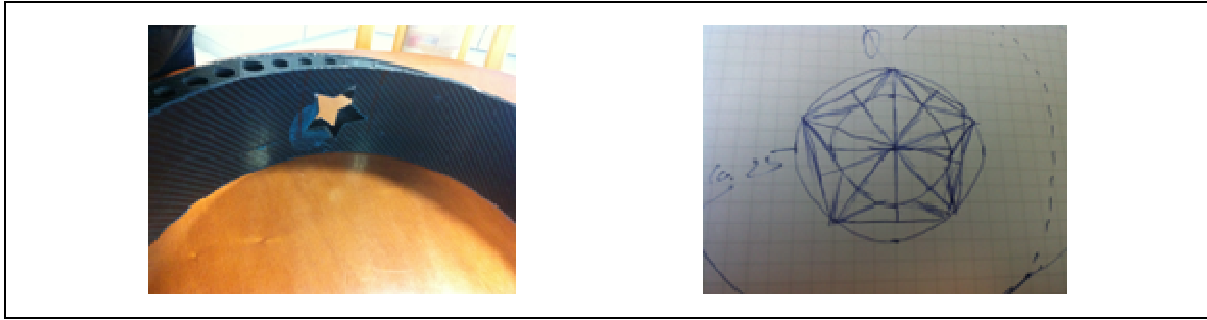


Abb. 15: Sternförmiges Loch

Abb. 16: Entwurf Stern

Für das sternförmige Loch musste ich, wie vorher bereits erwähnt, die CAD-Programmierung für die Schneidemaschine verändern, wobei die Schwierigkeit darin lag, den Stern durch einfache Formen in der richtigen Position, Größe und Ausrichtung zu gestalten. Die Hochglanzplatten unterscheiden sich in ihrer Handhabung von normalen Carbonplatten darin, dass die Oberflächenschutzfolie nicht nach dem Schneiden beim Reinigen der Platten entfernt werden muss, sondern erst nach der Zeit in der Presse, wenn keine Gefahr mehr besteht, die Oberfläche zu beschädigen. Bautechnisch verdoppelte ich die Anzahl der genutzten Bauteile für die Ober- und Unterseite des Werkstücks (0,5 mm Hochglanzplatten oben und unten sowie 0,6 mm normale Carbonplatten in der Mitte). Dies führte dazu, dass die Stabilität vergrößert und die Handhabung der Einzelteile erleichtert wurde. Um eine bessere Stabilität zu erzielen verdickte ich ebenfalls die Seitenteile.

Die beiden Werkstücke (siehe Abb. 14 und Abb. 17) zeigen wie der Werkstoff Carbon Eigenschaften wie hohe Festigkeit, hochwertige Anmutung und geringes Gewicht bei starker Zugfestigkeit in sich vereint.



Abb. 17: Fertiges Werkstück 2

Fazit: Das Experimentieren mit Carbonplatten verschiedener Dicke, Dichte (Fasern/mm³) und Menge während des Herstellungsprozesses meiner Werkstücke hat gezeigt, dass:

-dünnere Platten einfacher in der Handhabung sind (z.B. bezüglich ihrer Anpassbarkeit an die Pressform)

-miteinander verklebte dünnere Platten (z.B. 2 Platten à 0.5mm) stabiler sind als eine dicke Platte (z.B. hier 1,0mm). Die Durchbiegung der verklebten Platten ist insgesamt wesentlich geringer. Es ergibt sich eine bessere Formstabilität. Das bedeutet im Umkehrschluss bei gleicher Formstabilität kann durch Verklebung Gewicht und Material gespart werden.

5. Wiederverwendung und Recycling von Carbon als wichtige Aufgabe zukünftiger Forschung

Zweifelsohne wird sich Carbon aufgrund seiner besonderen Eigenschaften und vielfältigen Einsatzmöglichkeiten⁴⁰ als Werkstoff der Zukunft in weiten Teilen der industriellen Fertigung immer mehr durchsetzen. Damit wird jedoch auch die Frage der Nachhaltigkeit immer bedeutsamer. Schätzungen gehen davon aus, dass die Weltjahresproduktion von Carbonfasern im Jahr 2015 etwa bei 65.000 t liegen wird. 10-30 Prozent davon landen derzeit früher oder später als ausgediente Produkte auf dem Müll.⁴¹

In diesem Zusammenhang muss darauf hingewiesen werden, dass Carbon nicht auf natürlichem (biologischem) Wege abbaubar ist. Daher besteht eine wichtige Aufgabe zukünftiger Carbonforschung darin, Verfahren zur Wiederverwendung bzw. zum Recycling dieses Werkstoffes zu finden.

Das Recycling von Carbonfasern wird durch intensive Materialverbunde bzw. -integration und komplexe Aufbauten etwa in Leichtbauanwendungen deutlich erschwert. Die Herausforderung beim Recycling von Carbonfasern besteht darin, die Fasern freizulegen, ohne sie zu schädigen und die Carbonfasern in einer Qualität aufzubereiten, die der ursprünglichen Carbonfaser nahe kommt. Eine solche Wiederaufbereitung erlaubt es, die recycelten Carbonfasern, wieder bei der Herstellung neuer Produkte einzusetzen.⁴²

⁴⁰ Vgl. Kap. 3.1 und 3.2

⁴¹ MTEC-Akademie (2015), Seminar: Recycling von Carbonfasern senkt Produktionskosten, siehe hierzu: www.mtec-akademie.de/seminare/leichtbau-composites-carbon/recycling-von-carbonfasern.html [12.9.15]

⁴² Recycling Technologies Bayern, Carbonfaser CFK: www.recycling-technologies-bayern.de/index.php/rtb/Recycling-Loesungen/Carbonfaser-CFK [16.8.15]

Derzeit steckt der Forschungsbereich zu einem derartigen Recycling jedoch noch in den Kinderschuhen. Es müssen ganz neue Konzepte und Techniken gefunden werden. Angefangen von einer sinnvollen Sammellogistik für industrielle Carbonabfälle, über geeignete umweltschonende und wirtschaftlich effiziente Zerlegungs- und Trennverfahren bis hin zu Recyclingfasern oder dem sogenannten Halbzeug, also einer Produktvorstufe, die später wieder bei der Herstellung neuer Produkte eingesetzt werden können.⁴³

Dabei wird derzeit im Rahmen des Leitprojekts „MAI Recycling“ innerhalb des Spitzenclusters Carbon⁴⁴ an drei verschiedenen Verfahren zur Freilegung, also dem Herauslösen der Carbonfaser aus dem Verbundwerkstoff geforscht.⁴⁵

Zwei Forschergruppen, das bifa Umweltinstitut in Augsburg⁴⁶ und SGL Group in Meitingen⁴⁷, versuchen **Verfahren der Pyrolyse**, also der Erwärmung der Carbonfasern, unter Sauerstoffausschluss (Vakuum) auf ca. 600 Grad Celsius, zu optimieren. Dabei verdampft die Kunststoffmatrix, wohingegen die immer noch stabilen Carbonfasern zurückbleiben.⁴⁸

Am Fraunhofer-Institut in Holzkirchen dagegen werden Methoden der sogenannten **elektrodynamischen Fragmentierung** erprobt. Hierbei legt man eine elektrische Spannung U an die Carbonplatte an, die als Energieschub Fasern und Matrix voneinander trennt, indem sie deren Zwischenraum für ihre Ausbreitung nutzt.⁴⁹

Ein weiterer Ansatz zum Recycling von Carbonfasern, nämlich die sogenannte **hydrothermale Solvolyse**, wird von einer Forschergruppe von Siemens in Erlangen⁵⁰ verfolgt. Mit

⁴³ aus Gespräch mit Herrn Weißgerber am 1.4.15

⁴⁴ Sechs Industriepartner und zwei Forschungsinstitute arbeiten derzeit im Projekt MAI Recycling an innovativen Konzepten zu Wiederverwertung von Carbonfasern; siehe hierzu auch Fußnote 33 sowie www.mai-carbon.de/index.php/de/cluster-organisation/projekte/effizienz-und-nachhaltigkeit/mai-recycling [15.8.15]

⁴⁵ Vgl. MAI-Carbon, Vom Verschnitt zur Wiederverwertung: MAI-Recycling nimmt Fahrt auf: www.mai-carbon.de/index.php/de/presse-news/pressemeldung/mai-projekte/130-mai-recycling-nimmt-fahrt-auf [15.8.15]

⁴⁶ Bifa-Umweltinstitut, CFK-Recycling in der Kompetenzregion Augsburg: www.bifa.de/projekte/projektetails/news/cfk-recycling-in-der-kompetenzregion-augsburg [16.8.15]

⁴⁷ Burkert, Andreas (2012), Zwei neue Projekte gestartet, in „Lightweightdesign - Die Fachzeitschrift für Leichtbau bewegter Massen“, 27.8.12: www.lightweight-design.de/index.php;do=show/site=lwd/sid=132434650355d108322ffa0451185889/alloc=135/id=16516 [12.9.15]

⁴⁸ MAI-Carbon: www.mai-carbon.de/index.php/de/presse-news/pressemeldung/mai-projekte [15.8.15]

⁴⁹ Fraunhofer-Institut für Bauphysik (Hrsg., 2012), Energiegeladene Recyclingtechnologie für Kohlenstoffverstärkte Kunststoffe, Presseinformation vom 20.9.12: www.ibp.fraunhofer.de/de/Presse_und_Medien/Presseinformationen/pm-20-09-2012_energiegeladenerecyclingtechnologie.html [11.9.15]

⁵⁰ Siehe hierzu auch Heintl, Dieter, Kapitza, Heinrich, Zeininger, Heinrich (2014), Patentanmeldung „Verfahren zur Wiedergewinnung von Verstärkungsfasern aus faserverstärkten Kunststoffen“, Veröffentlichungsdatum

dieser Methode wird das CFK in einer wässrigen Lösung unter Druck und hoher Temperatur in seine Bestandteile aufgetrennt. Dadurch ist es möglich, ganze Teile des textilen Halbzeugs aus Carbonfasern zurückzugewinnen und diese dann wieder bei der Herstellung neuer Produkte zu verwenden.⁵¹

Bei der Entwicklung all dieser Recyclingmethoden stehen die Forscher bisher immer noch am Anfang bzw. in der Testphase. Langfristig wird nach Aussagen von Bernhard Hartleitner vom Umweltinstitut bifa in Augsburg, der sich seit mehr als 15 Jahren mit Recyclingprozessen beschäftigt, bei Carbonfasern eine Recyclingquote von 85 Prozent angestrebt. Diese wäre dann vergleichbar mit den Recyclingquoten von Glas, Papier oder eisenhaltigen Metallen.⁵²

Bis es jedoch soweit ist, dass recycelte Carbonfasern den Einsatz von Primärfasern substituieren, versuchen viele Unternehmen, den Verschnitt bzw. den Ausschuss in der Fertigung möglichst gering zu halten und – soweit möglich – wiederzuverwenden.⁵³

In diesem Zusammenhang wird zunehmend auch über eine Weiterverwendung von carbonhaltigen Produkten nach Ende ihrer Produktlebensdauer nachgedacht. Ein Beispiel hierfür ist die Wiederverwertung von nicht mehr benutzten Carbonteilen von Windradblättern beim Bau des Visioneums Energie+⁵⁴, einem Haus, das nach innovativen Konzepten mit modernsten Materialien und Technologien in Königsbrunn bei Augsburg errichtet wird.

Allerdings liegt darin natürlich nicht die vollständige Lösung des Problems. Diese ist nämlich nach wie vor Recycling, mit dem Ziel einer möglichst zu 100 Prozent geschlossenen Lebenszykluskette der eingesetzten Rohmaterialien. Dieses "Cradle to Cradle"-Prinzip zur Sicherung einer nachhaltigen Carbonverarbeitung stellt **die** große Herausforderung der Zukunft dar.⁵⁵

17.7.14, Veröffentlichungsnummer DE102013200482A1: www.google.de/patents/DE102013200482A1?cl=de;https://register.dpma.de/DPMAregister/pat/PatSchrifteneinsicht?docId=DE102013200482A1 [11.9.15]

⁵¹ Voith Composites GmbH (<http://voith.com>) in Garching arbeitet gerade daran sowie MAI-Carbon: www.mai-carbon.de/index.php/de/presse-news/pressemeldungen/mai-projekte [12.9.15]

⁵² Vgl. MAI-Carbon, Vom Verschnitt zur Wiederverwertung: MAI Recycling nimmt Fahrt auf: www.mai-carbon.de/index.php/de/presse-news/pressemeldung/mai-projekte/130-mai-recycling-nimmt-fahrt-auf [11.9.15]

⁵³ Aus dem Gespräch mit Franz Weißgerber vom 1.4.15

⁵⁴ Thiel, Andreas (2015), Energiezukunft erleben – In Königsbrunn entsteht mit dem Visioneum Energie+ ein Leuchtturmprojekt", in: Augsburger Allgemeine, Ausgabe Nr. 175, 1. August 2015, S. V25; siehe auch: Visioneum Energie+, Stadt Königsbrunn: www.visioneum.de [12.9.15]

⁵⁵ Vgl. Dransfeld, Clemens, u.a., "Thermoplastic carbon fibre-reinforced polymer recycling with electrodynamic fragmentation-from cradle to cradle"(26.8.15): <http://jtc.sagepub.com/content/early/2015/08/25/0892705715599431.abstract> [3.11.15]

Insgesamt lässt sich als Fazit festhalten, dass Carbon zweifelsohne einer der bedeutendsten Werkstoffe der Zukunft ist. Man darf gespannt sein, welche Wege Forscher, Entwickler und Designer gehen werden und welche innovativen Ideen letztlich umgesetzt werden, bei der Generierung und Verarbeitung, aber auch bei der Wiederaufbereitung und -verarbeitung dieses außergewöhnlichen Werkstoffs.

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei all denjenigen bedanken, die mich während der Anfertigung dieser Seminararbeit unterstützt und motiviert haben.

Ganz besonderer Dank gilt in diesem Zusammenhang Herrn Franz Weißgerber, der nicht nur Geschäftsführer der iii-Carbon Weißgerber GmbH & Co KG, Wallerstein, ist, sondern auch stellvertretender Vorsitzender des Carbon Composites e.V. und sich schon mehr als 40 Jahre mit dem Thema Carbon intensiv beschäftigt.

Herr Weißgerber gab mir die Gelegenheit während zweier Praktika in seinem Unternehmen in den Oster- und Sommerferien 2015 meine Arbeit mit praktischen Versuchen zu belegen und eigene Werkstücke zu erstellen.

Herr Weißgerber war für mich nicht nur ein Ideengeber und Motivator, sondern auch ein geduldiger Mentor, der mir bei den ersten Schritten in die spannende Welt des Carbons half und für meine Ideen immer ein offenes Ohr hatte.

Daneben gilt mein Dank auch Frau Annemarie Weißgerber, Geschäftsleiterin der Carbon-Werke Weißgerber GmbH & Co KG, sowie allen anderen Mitarbeitern des Unternehmens, die mir stets mit Rat und Tat zur Seite standen.

Literaturverzeichnis

- Bifa-Umweltinstitut, CFK-Recycling in der Kompetenzregion Augsburg:
www.bifa.de/projekte/projektetails/news/cfk-recycling-in-der-kompetenzregion-augsburg [16.8.15]
- Burkert, Andreas (2012), Zwei neue Projekte gestartet, in „Lightweightdesign - Die Fachzeitschrift für Leichtbau bewegter Massen“, 27.8.12: www.lightweightdesign.de/index.php;do=show/site=lwd/sid=132434650355d108322ffa0451185889/alloc=135/id=16516 [12.9.15]
- Carbon Composites e.V.: www.carbon-composites.eu [12.9.15]
- Carbon-Components: Faser-Verbundwerkstoffe: www.carbon-components.de/werkstoff.html [11.9.15]
- Carbon-Werke Weißgerber GmbH & Co. KG: www.carbon-vertrieb.com [15.8.15]
- CrossLink Fibertech Carbon in der Medizintechnik: www.crosslink-fibertech.de/de/medizintechnik.php [14.8.15]
- CrossLink Fibertech, Carbon im Maschinenbau: www.crosslink-fibertech.de/de/maschinenbau.php [14.8.15]
- DMAX (2013), Video „Die Modellbauer: Carbon-Rakete“: www.dmax.de/programme/die-modellbauer/videos/die-modellbauer-carbon-rakete [11.9.15]
- Dransfeld, Clemens, u.a. , Thermoplastic carbon fibre- reinforced polymer recycling with electrodynamical fragmentation-from cradle to cradle (26.8.15):
<http://jtc.sagepub.com/content/early/2015/08/25/0892705715599431.abstract> [3.11.15]
- Epoxidharze.net: www.epoxidharze.net [15.8.15]
- Falk, Gerd (2014), Designobjekte aus Carbonstrukturen, Vortrag am 5.11.14 im Rahmen der Ausstellung im Deutschen Museum in München: „Harter Stoff- Carbon, das Material der Zukunft vom 16.5.-12.7.15: www.deutsches-museum.de/fileadmin/Content/010_DM/010_Information/040_Vortrag/010_Jedermann/2014_15/PDF/5_11_2014.pdf [14.8.15]
- Fraunhofer-Institut für Bauphysik (Hrsg., 2012), Energiegeladene Recyclingtechnologie für Kohlenstoffverstärkte Kunststoffe, Presseinformation vom 20.9.12:
www.ibp.fraunhofer.de/de/Presse_und_Medien/Presseinformationen/pm-20-09-2012_energiegeladenerecyclingtechnologie.html [11.9.15]
- Heinl, Dieter, Kapitza, Heinrich, Zeininger, Heinrich (2014), Patentanmeldung „Verfahren zur Wiedergewinnung von Verstärkungsfasern aus faserverstärkten Kunststoffen“, Veröffentlichungsdatum 17.7.14, Veröffentlichungsnummer DE102013200482A1:
www.google.de/patents/DE102013200482A1?cl=de;
<https://register.dpma.de/DPMAREgister/pat/PatSchrifteneinsicht?docId=DE102013200482A1> [11.9.15]
- Jakube, Hans-Dieter & Karcher, Ruth (Hrsg.) (2001): Lexikon der Chemie. Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag.

Karl Mayer Composite Parts, CFK Herstellung: www.karlmayer-composites.com/impressum/cfk-herstellung [16.8.15]

Kraus, Josef-Martin (2012), Schneller, höher, weiter: CFK hat sich als Champion im Hochleistungssport etabliert, in „Maschinen Markt - Das Industrieportal“, 5.12.12: www.maschinenmarkt.vogel.de/themenkanale/konstruktion/werkstoffe/articles/388027 [14.8.15]

Lederbauer, Klaus und Finus, Frauke (2014), Stradivari wäre begeistert: Streichinstrumente aus Carbon, in “Maschinen Markt – Das Industrieportal“, 12.11.14: www.maschinenmarkt.vogel.de/compositesworld/articles/466310 [14.8.15]

MAI-Carbon, Die Spitzenclusterinitiative: www.mai-carbon.de/index.php/de [16.8.15]

MAI-Carbon, Effizienz und Nachhaltigkeit: www.mai-carbon.de/index.php/de/cluster-organisation/projekte/effizienz-und-nachhaltigkeit/mai-recycling [15.8.15]

MAI-Carbon, Vom Verschnitt zur Wiederverwertung: MAI-Recycling nimmt Fahrt auf: www.mai-carbon.de/index.php/de/presse-news/pressemeldung/mai-projekte/130-mai-recycling-nimmt-fahrt-auf [15.8.15]

MAI-Carbon: www.mai-carbon.de/index.php/de/presse-news/pressemeldungen/mai-projekte [12.9.15]

Mastercam X9: www.mastercam.com/en-us [16.8.15]

MTEC-Akademie (2015), Seminar: Recycling von Carbonfasern senkt Produktionskosten, siehe hierzu: www.mtec-akademie.de/seminare/leichtbau-composites-carbon/recycling-von-carbonfasern.html [12.9.15]

R&G Wiki: [www.r-g.de/wiki/Kohlefasern_\(Carbon\)](http://www.r-g.de/wiki/Kohlefasern_(Carbon)) [15.8.15]

Recycling Technologies Bayern, Carbonfaser CFK: www.recycling-technologies-bayern.de/index.php/rtb/Recycling-Loesungen/Carbonfaser-CFK [16.8.15]

Schult, Katja; Rettig, Karsten, Kohlenstofffasern- Wohin geht es mit den Faserkapazitäten, Produkte und Entwicklungstrends?: http://www.tohotenax.eu.com/uploads/media/2010-03_Kohlenstofffasern_lw.pdf [3.11.15]

SGL Group, Anwendungen: www.sglgroup.com/cms/international/applicationsmeasuring-technology-and-optics/applications/accessories_made_from_cfrp_for_measuring_technology_and_optics.html?__locale=de&market=/internatinal/applications/measuring-technology-and-optics/index.html [14.8.15]

Thiel, Andreas (2015), Energiezukunft erleben – In Königsbrunn entsteht mit dem Visioneum Energie+ ein Leuchtturmprojekt“, in: Augsburgener Allgemeine, Ausgabe Nr. 175, 1. August 2015, S. V25.

Visioneum Energie+, Stadt Königsbrunn: www.visioneum.de [12.9.15]

Voith Composites GmbH, Garching: <http://voith.com> [12.9.15]

Weißborn, Stefan (2014), Wie sich Carbon im Auto fest etabliert, in: „Die Welt, PS - Das Automagazin der Welt“, 10.6.14, S. 4: www.welt.de/motor/article128914187/Wie-sich-Carbon-im-Auto-fest-etabliert.html [14.8.15]

Wikipedia Epoxidharz: <https://de.wikipedia.org/wiki/Epoxidharz> [15.8.15]

Wikipedia Kohlenstofffaser: <https://de.wikipedia.org/wiki/Kohlenstofffaser> [13.8.15]

Wikipedia Polyacrylnitril:

https://de.m.wikipedia.org/wiki/Kohlenstofffaser#Polyacrylnitril_.28PAN.29 [3.11.15]

Wohlmann, Bernd (2009), Kohlenstoff-Fasern, S. 3: [www.r-](http://www.r-g.de/w/images/9/94/AVK_Kohlenstoff-Fasern.pdf#page=2&zoom=auto,-107,595)

[g.de/w/images/9/94/AVK_Kohlenstoff-Fasern.pdf#page=2&zoom=auto,-107,595](http://www.r-g.de/w/images/9/94/AVK_Kohlenstoff-Fasern.pdf#page=2&zoom=auto,-107,595), aus:

AVK - Industrievereinigung Verstärkte Kunststoffe (2009), Handbuch

Faserverbundkunststoffe – Grundlagen, Verarbeitung, Anwendungen. 3., vollst.

überarb. Aufl., Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag. [16.8.15]

Abbildungsverzeichnis

	<i>Seite</i>
Abb. 1: Ausschnitt aus einer Kohlefaser	2
Abb. 2: Strukturformel Epoxidharze	3
Abb. 3: Prozessschritte in der Herstellung der PAN-Faser	5
Abb. 4: CAD-Programmierung Seitenstück	10
Abb. 5: Wasserstrahlschneidegerät 1	11
Abb. 6: Wasserstrahlschneidegerät 2	11
Abb. 7: Kontrollstation Wasserschneidegerät	12
Abb. 8: Prototyp Weinflaschenhalter	12
Abb. 9: Pressform Anpassung	13
Abb. 10: Schleifen der Teile	13
Abb. 11: Kleben der Teile	14
Abb. 12: Presse	14
Abb. 13: Entfernen der Klebereste	15
Abb. 14: Fertiges Werkstück 1	15
Abb. 15: Sternförmiges Loch	16
Abb. 16: Entwurf Stern	16
Abb. 17: Fertiges Werkstück 2	16

Erklärung zur Seminararbeit

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und ohne fremde Hilfe verfasst und keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel verwendet habe.

Insbesondere versichere ich, dass ich alle wörtlichen und sinngemäßen Übernahmen aus anderen Werken als solche kenntlich gemacht habe.

Mir ist bekannt, dass die vorliegende Arbeit mit 0 Punkten bewertet werden kann, wenn gegen diese Grundsätze verstoßen wurde, und dass in diesem Fall eine Zulassung zum Abitur nicht möglich ist.

Ort/ Datum:

Unterschrift:

München, den