

Herstellung von Faserverbundbauteilen in Rapid Tooling Formen

Grünendick, T.; Trenke, D.

Unter dem zunehmenden Druck wirtschaftlicher Gesichtspunkte und kürzer werdenden Entwicklungs- und Produktionszeiten ist es notwendig eine gezielte Kombination von Werkstoffeigenschaften und Fertigungsverfahren zu realisieren.

Unter diesen Voraussetzungen wurden Formen für innovative Faserverbundkonstruktionen mit dem generativen Fertigungsverfahren des Rapid Toolings erzeugt.

Under the view of economic increasing pressure and the reduce of development- and production times it is necessarily to realize an aimed combination of material qualities and production procedures.

Under these prerequisites, forms were generated for innovative fibersystem constructions with the generativen production procedure of Rapid Tooling.

1 Faserverbundbauweisen

Im Flugzeugbau werden seit Jahren sehr erfolgreich hochbeanspruchte faserverstärkte Bauteile gefertigt und eingesetzt. Ein kürzlich abgeschlossenes Programm für den Entwurf und die Auslegung eines Flügels aus Kohlefaser Verbundbauweise (CFK) zeigt dies für einen Megaliner, der alle Erwartungen bzgl. Restfestigkeit und Bruchversuchen erfüllt. In der Triebwerkstechnologie bietet die Anwendung von faserverstärktem Kunststoff (FVK) z. B. als Verdichterschaufel neue aerodynamische Gestaltungsfreiheiten, insbesondere im transsonischen Bereich (Schaufelspitzen Geschwindigkeiten von 400 m/sec). Dabei hat die FVK-Schaukel bei gleicher Festigkeit nur ein Drittel des Gewichts von Titan. Nicht nur diese Beispiele zeigen die hohe Leistungsfähigkeit und Zuverlässigkeit der faserverstärkten Composites, sondern auch andere Bereiche aus der Luft- und Raumfahrt unterstreichen die guten Eigenschaften, wie z. B. die Mittelkonstruktion des Space Shuttle (besteht vorwiegend aus B/Al-Rohren) oder sämtliche Hauptrotorblätter und Höhenleitwerke verschiedener Hubschraubertypen, /1/.

Bei der Umsetzung von Faserverbundbauweisen für umfassende Einsatzgebiete des Maschinenbaus bestehen, abgesehen von wenigen Ausnahmen, jedoch noch erhebliche Vorbehalte. Diese Vorbe-

halte begründen sich hauptsächlich auf Berührungspunkte mit den anisotropen Werkstoffeigenschaften, die erforderliche Kenntnis der Belastungen und den kostenintensiven Aufwand bei Bauteiländerungen. Abgesehen von dem kostenintensiven Änderungsaufwand, lassen sich die erstgenannten Eigenschaften zum Vorteil umkehren. Die Werkstoff- und Bauteileigenschaften können somit, je nach Matrix, Faser und ihrer Anordnung, maßgeschneidert aufeinander abgestimmt werden. Voraussetzung ist natürlich die dementsprechende Kenntnis der Belastung und ihres Zusammenwirkens.

1.1 Konstruktion und Berechnung

Faserverstärkte Kunststoffe sind grundsätzlich wegen der anisotropen Werkstoffeigenschaften sehr attraktiv. Hiermit lassen sich Bauteileigenschaften erstellen, die mit metallischen Werkstoffen nicht möglich, die äußerst Ziel- bzw. Anwendungsorientiert sind und zudem erhebliche Potentiale in der Gewichtseinsparung bereitstellen. Daraus ergeben sich natürlich spezielle Konstruktionsregeln, die beachtet werden müssen. Besonderes Augenmerk muß hier auf die Krafteinleitung, den Kraftfluß (Radien), die Verbindung einzelner Komponenten (vgl. **Bild 1**) und je nach E-Modul des Composites auf Versteifungen gelegt werden. Die VDI 2012 gibt für glasfaserverstärkte Kunststoffe einen umfassenden Überblick, /2/.

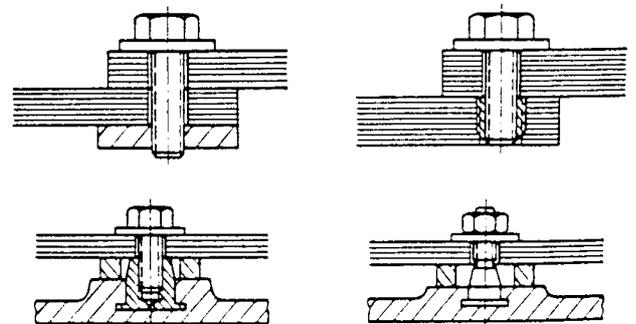


Bild 1: Schraubenverbindungen von FVK, /2/

Bei Gemischtbauweise mit Metallen müssen die Spannungssprünge auf Grund der Differenzen der

E-Module beachtet werden. Bei Wellen beispielsweise werden metallische Krafteinleitungselemente mit integriert, die aber geometrisch so ausgeführt sind, dass sie einen zu starken Steifigkeitssprung und damit einen erhöhten mehrachsigen Spannungszustand vermeiden. **Bild 2** zeigt ein Krafteinleitungselement, bei dem durch abnehmende Wandstärke ein starker Steifigkeitssprung vermieden wird.

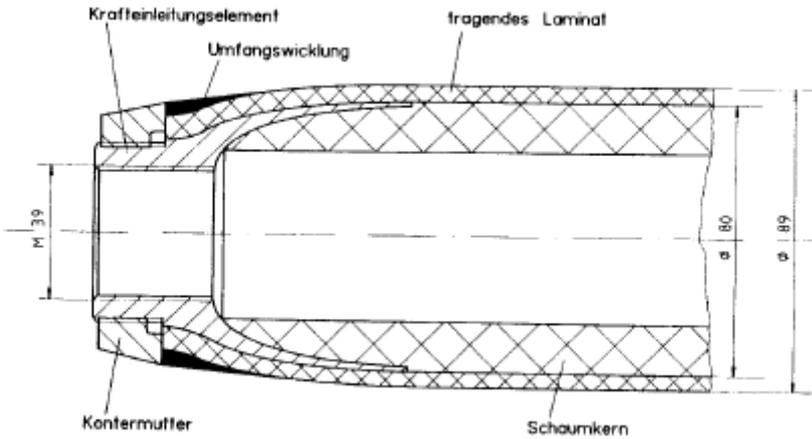


Bild 2: Formschlüssige Krafteinleitung, /3/

Metallische Werkstoffe haben ein isotropes Elastizität- und Festigkeitsverhalten. Damit genügt es die Hauptnormalspannungen zu kennen, um eine äquivalente Spannung, die Vergleichsspannung, zu ermitteln. Diese Vergleichsspannung wird mit der Festigkeit des Werkstoffes (einachsige Beanspruchung) verglichen. Ist die Vergleichsspannung größer, so ist mit einer Schädigung des Bauteils zu rechnen.

Bei FVK liegt ein anisotropes Verhalten der Elastizität und Festigkeit vor. Deshalb hängen die Beanspruchungen nicht nur von der Größe der Hauptnormalspannungen ab, sondern auch von der Faserrichtung. Damit läßt sich keine Vergleichsspannung wie bei isotropen Werkstoffen definieren. Man muß ferner die Beanspruchungen schichtweise auf bestimmte Richtungen beziehen, für die Festigkeitswerte bekannt sind, und miteinander in einem funktionalen Zusammenhang

vergleichen. Dies ermöglicht dann je nach Versagensart – Zwischenfaserbruch oder Faserbruch - das Aufstellen von Bruchbedingungen, die eine Aussage über das Versagen des Bauteils zulassen. Hier existieren Bruchbedingungen von Puck, Tsai Wu und Tresca.

Zur Vorauslegung einer vernünftigen Faseranordnung, bei denen die Kräfte überwiegend von den Fasern aufgenommen werden, eignet sich die Netztheorie. Die Netztheorie eignet sich ebenso zur Ermittlung der erforderlichen Schichtdicken, vernachlässigt aber den Anteil der Matrix an der Tragfähigkeit. Zur schichtweisen Spannungs- und Verformungsanalyse muß jedoch das Mittragen der Matrix berücksichtigt werden. Dies wird mit der klassischen Laminattheorie (CLT) erreicht, die außerdem eine verfeinerte Festigkeitsanalyse unter Berücksichtigung der Lastübertragung durch die Matrix ermöglicht. Mit Hilfe der Finiten-Elemente-Methode (FEM) lassen sich auch komplexe Strukturen auslegen und optimieren. Als Bruchbedingung dient hier vielfach das Tsai Wu Kriterium. **Bild 3** zeigt das Berechnungsvorgehen bei der CLT.

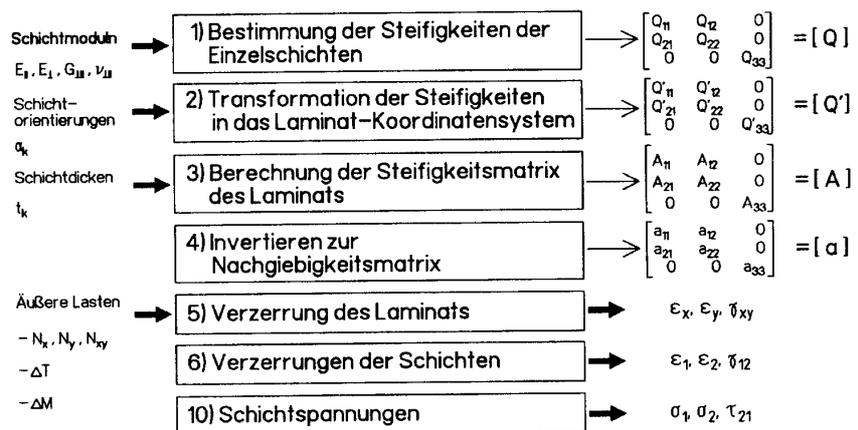


Bild 3: Berechnungsschritte der CLT, /3/

1.2 Fertigungsverfahren

Die Herstellung von faserverstärkten Kunststoffen erfordert kostengünstige und sichere Herstellungsverfahren für die Faseranordnung und das Tränken der Faserstruktur mit dem Harz. In /4/ sind verschiedene Herstellungsverfahren aufgeführt.

Die Wickeltechnik zählt zu den am meisten verwendeten automatisierten Fertigungsverfahren und wird überwiegend für symmetrische Bauteile eingesetzt. Für Bauteile beliebiger Gestalt eignet sich z. B. das RTM-Verfahren (Harzinjektionstechnik). Zwischen zwei Formhälften, die das Negativ des Bauteils darstellen, wird das Fasermaterial, der Kern und gegebenenfalls Metallinserts eingelegt. Nach Schließen der Formhälften erfolgt das Injizieren des Harz-Härter-Systems mit anschließendem Aushärten bei entsprechender Temperatur. Die Injektions- und Abflußbereiche müssen bei diesem Verfahren gezielt plziert werden, damit keine Bereiche entstehen, die nicht mit Harz benetzt sind.

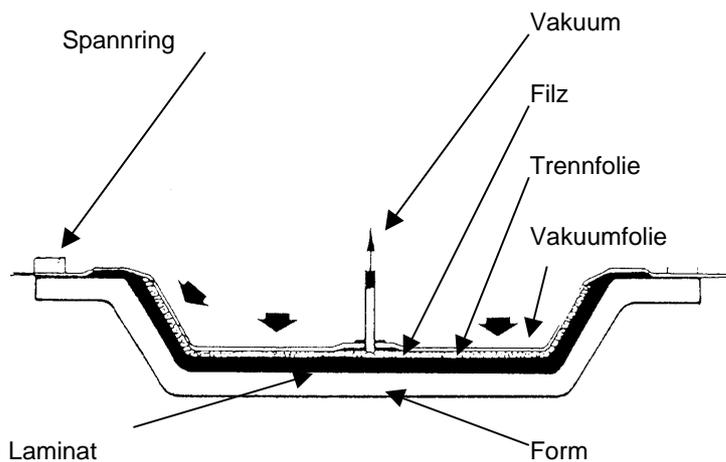


Bild 4: Vakuumsack-Verfahren

Als Alternative zum RTM-Verfahren bietet sich das Vakuumsack-Verfahren an (siehe **Bild 4**). Bei dieser Methode wird eine einteilige Form verwendet, in der das Laminat mit Prepregs oder im Handlaminierverfahren aufgebaut wird. Die Faserverbundprepregs sind mit Harz vorimpregnierete Fasergebilde, wie Gewebe oder unidirektionale Fäden. Das eingelegte Material wird dann mit einer flexiblen, gelochten Folie abgedeckt. Auf diese Folie kommt ein Filz, um ein gleichmäßiges Vakuum zu gewährleisten. Über diesen Verbund wird am Schluß eine Vakuumsackfolie gelegt, abgedichtet und der Zwischenraum evakuiert. Der atmosphärische Druck

bewirkt das gleichmäßige Verdichten des Laminates.

Die Formen für das Vakuumsack-Verfahren können durch alle etablierten Fertigungsverfahren hergestellt werden. Eine interessante Alternative stellt aber das Rapid Tooling dar.

2 Der Rapid Tooling Bauprozess

Ein Hauptthema für eine stärkere Verbreitung der Faserverbundtechnologie ist die immer noch aufwendige Formherstellung. Gerade in der RTM-Technik werden, aufgrund der schwierig vorauszuberechnenden Harzflussfronten, zahlreiche Vorabformen benötigt. Dies verlängert in erheblichen Maße die Zeit, bis das fertige Produkt auf dem Markt eingeführt werden kann.

Abhilfe vermag hier das generative Herstellungsverfahren des Rapid Toolings zu leisten, durch das innerhalb kürzester Zeit einsatzfertige, metallische Formen herstellbar sind.

Da es sich hierbei um ein relativ neues Verfahren handelt, wird in diesem Kapitel zunächst der Rapid Tooling Bauprozess des Direct Metal Laser Sinterings (DMLS) der Firma EOS beschrieben.

2.1 Das DMLS-Verfahren

Der DMLS-Bauprozess beginnt damit, dass die 3D-CAD-Konstruktion des zu generierenden Bauteils in dünne Schichtinformationen von gewöhnlich 0,05 mm zerlegt wird. Dieser Vorgang des „Slicens“ geschieht noch am CAD-Arbeitsplatz, mit einer dafür speziell programmierten Software. Anschließend werden die Schichtinformationen zur

Rapid Tooling Anlage (EOSINT M 250) übertragen, wo dann entsprechend diesen Informationen das stoffliche Modell mittels eines Lasers schichtweise generiert wird.

Die Rapid Tooling Anlage selbst besteht im wesentlichen aus folgenden 4 Komponenten:

- dem Laser, zum Aufschmelzen des Metallpulvers,
- der Trägerplattform mit aufgesetzter Bauplatte,
- der Dosierplattform zur Bevorratung des Metallpulvers,
- dem Abstreifer zum Auftragen des Metallpulvers.

Zu Beginn des Sinterprozesses wird die Bauplattform erstmalig mit einer dünnen Metallpulverschicht (0,05 mm) bedeckt. Diese Schicht wird dann, entsprechend der ersten Schichtinformation über die Geometrie des herzustellenden Bauteils, von einem CO₂-Laser aufgeschmolzen (siehe **Bild 5**). Nachdem so die erste Schicht belichtet ist, wird die Bauplattform um die nächste Schichtdicke (0,05 mm) abgesenkt und der Abstreifer bis zum Anschlag rechts von der Dosierplattform gefahren. Ist er dort angekommen, wird die Dosierplattform soweit angehoben, bis genügend Pulver zur Verfügung steht, um die Bauplattform erneut vollständig zu bedecken.

Jetzt fährt der Abstreifer wieder nach links und trägt so die nächste Pulverschicht auf, die dann entsprechend der zweiten Schichtinformation über das Bauteil vom Laser aufgeschmolzen wird.

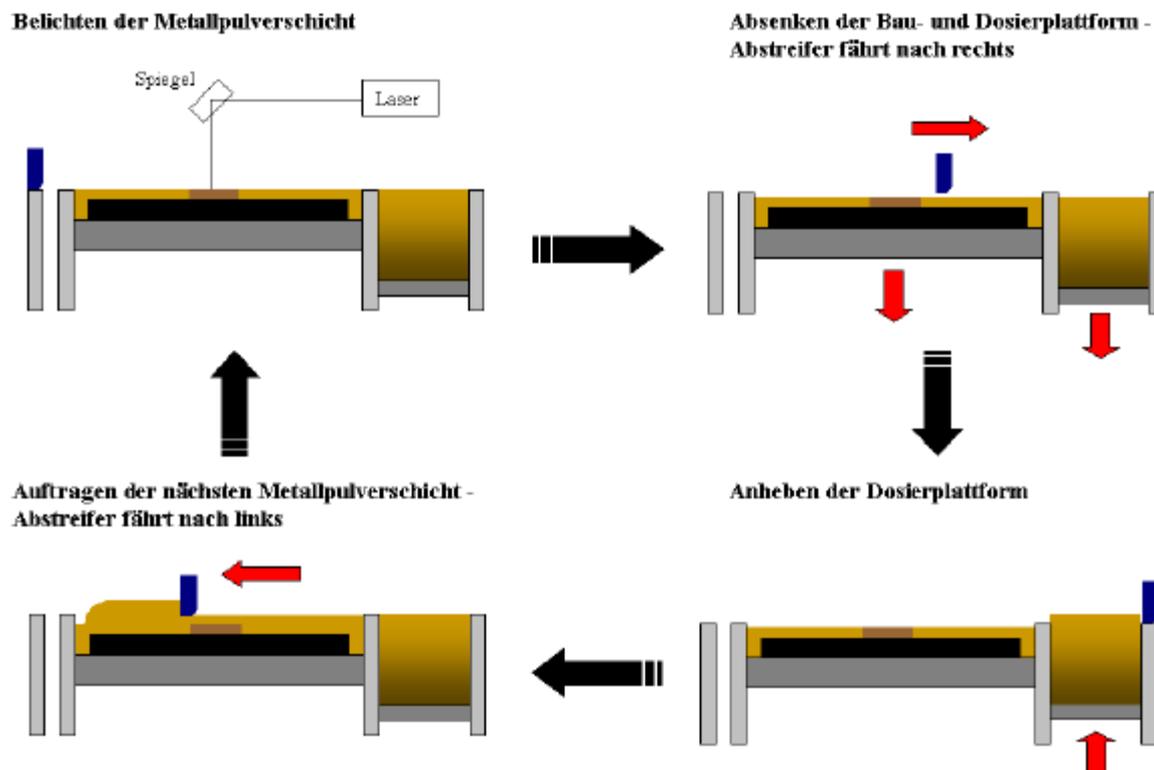


Bild 5: Schichtweiser Aufbau beim Lasersintern

Die Belichtungsparameter werden beim Bauprozess so gewählt, dass sich die neue Schicht mit der darunterliegenden fest verbindet.

Dieser Vorgang wiederholt sich so lange, bis aus den CAD-Informationen ein vollständiges, dreidimensionales, stoffliches Bauteil entstanden ist.

2.2 Gestaltungsregeln für den Formenbau

Neben den Konstruktionsanforderungen für den Rapid Tooling Bauprozess müssen bei der Gestal-

tung der Form auch Besonderheiten der Faserverbundtechnologie berücksichtigt werden. Diese werden im folgenden kurz erläutert.

1. Entformungsschrägen:

Damit das Werkstück leicht und ohne Beschädigungen aus der Form entnommen werden kann, müssen sowohl Formober- als auch Formunterseite ausreichende Entformungsschrägen besitzen. Diese sollten in Abhängigkeit von der Oberflächenrauigkeit der Kavität mindestens 5° betragen.

Des Weiteren sollten Ecken und Kanten verrundet, Hinterschneidungen vermieden und Radien möglichst groß ausgelegt werden.

2. Aufbrechnuten:

Um die Form nach dem Aushärten überhaupt öffnen zu können, sind in den Formhälften Aufbrechnuten vorzusehen. Dies ist besonders bei rauen Teilungsebenen wichtig, da diese durch den verwendeten Harz fest miteinander verkleben.

3. Führungsbolzen:

Um ein Verkannten oder Versatz der Formhälften beim Öffnen und Schließen zu verhindern, müssen Führungsbolzen eingesetzt werden.

4. Dichtungsnuten:

Zwischen den Formhälften befindet sich eine Dichtung, die ein seitliches Austreten von Harz verhindern soll und den Aufbau des Unterdruckes - für die RTM-Technik - ermöglicht. Um ein Verschieben der Dichtung zu vermeiden, werden diese in eine Nut eingelegt.

5. Ansaug- und Angußkanal:

Durch einen rechtwinkligen Verlauf des Angußkanals kann der ausgehärtete Harz leicht ausgebohrt werden. Um einen sicheren Halt der Saug- bzw.-Druckzuleitungen mit der Form zu gewährleisten, sind die Kanäle mit einem entsprechenden Gewinde auszustatten.

6. Ansaug- und Einspritzkammer:

Die Harzansaug- und Einspritzkammern sind so flach wie möglich auszuführen, um eine Gratbildung durch überflüssiges Harz zu vermeiden. Dieser Grat müsste in einer späteren Nachbearbeitung entfernt werden, was zu einer Schädigung des Fasergefüges - und damit der Bauteilfestigkeit - führt.

7. Oberflächenqualität:

Die Oberfläche der Kavität muss möglichst glatt sein, um zu verhindern, dass sich Harz um Oberflächenspitzen legt und dadurch das spätere Entformen erschwert. Zudem überträgt sich die Oberflächenrauheit der Kavität auf das Werkstück, was gerade bei Faserverbundwerkstücken zu einer Festigkeitsabnahme des Bauteils führt. Die Oberfläche der Kavität ist dementsprechend auf eine mittlere Rauigkeit von ca. 4 µm zu polieren und mit einem geeigneten Trennmittel zu behandeln, welches Oberflächenunebenheiten ausgleicht, sowie Kavität und Werkstück voneinander trennt.

8. Überlaufkammern:

Um austretendes und überflüssiges Harz aufnehmen zu können, sollte die Form über symmetrisch angeordnete Überlaufkammern verfügen, die über dünne Zuläufe mit der Kavität verbunden sind. Die Zuläufe sind erforderlich, um die Gratbildung am Bauteil zu minimieren.

3 Bau einer Rapid Tooling Probeform

Zunächst überlegten wir, wie ein Faserverbundbauteil gestaltet sein müsste, dass sowohl sämtliche konstruktive Gesichtspunkte erfüllt, als auch möglichst viele Fragen in Bezug auf die Verarbei-

tung und die Qualität von FVB-Werkstücken beantwortet. Dazu stellten wir folgenden Anforderungskatalog auf:

I) konstruktive Forderungen:

- gleiche Wandstärken über den gesamten Bauteilquerschnitt
- Vermeidung von Materialanhäufungen
- keine Hinterschneidungen
- verrundete Ecken und Kanten
- keine Durchbrüche
- ausreichende Anzahl und Anordnung von Laminatschichten

II) zu untersuchende Werkstückeigenschaften:

- Detaillierung von Prägungen
- Oberflächenqualität
- Qualität der Ränder
- Biegesteifigkeit
- mechanische Festigkeit

III) Fragen zur Verarbeitung:

- Zuschneidverhalten der Fasern
- Einlegbarkeit der Fasern in die Kavitäten
- Entformbarkeit des Werkstücks
- Qualität und Wahl des Trennmittels
- Durchführung des Aushärteprozesses

Unter Berücksichtigung dieser Anforderungen ergab sich damit folgendes beispielhafte Bauteil (siehe **Bild 6**), für das eine Rapid Tooling Form konstruiert wurde.



Bild 6: Probebauteil aus Faserverbund

Bei der Gestaltung der Form (siehe **Bild 7**) stand insbesondere das Kriterium der leichten Entformbarkeit im Vordergrund. Aufgrund der relativ hohen Oberflächenrauigkeit von lasergesinterten Bauteilen, und der zusätzlichen Haftwirkung durch überschüssiges Harz, wählten wir als Entformungsschrägen 6° .

Zusätzlich befinden sich an den Stirnseiten der Form zwei Schieber, die nach dem Aushärten des Werkstücks zu Seite gezogen werden, um so ein Aushebeln des Bauteils aus der Form zu ermöglichen.

Um die Kavitäten formschlüssig und ohne Verkranten schließen zu können, sind an der oberen Formhälfte Führungsbolzen und an der unteren Hälfte die entsprechenden Bohrungen angebracht. Dieses Führungssystem wurde im Sinterprozess mit erzeugt, wodurch eine nachträgliche Herstellung entfällt.

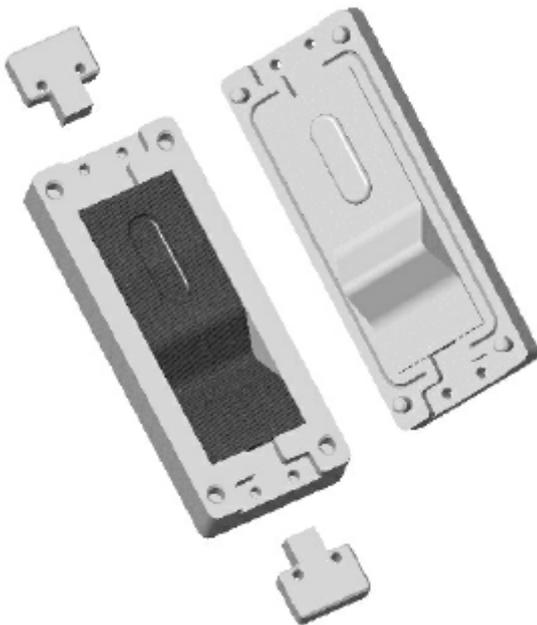


Bild 7: Formhälfen, Schieber und FVB-Werkstück

Zur Ermittlung des Prägeverhalten ist in die untere Formhälfte ein Langloch eingearbeitet. An der oberen Formhälfte befindet sich die entsprechende Erhebung, um eine Stempelwirkung zu erzielen und gleichzeitig die Forderung nach einer gleichbleibenden Laminatdicke zu erfüllen.

Der gesinterte „Berg“ diente zur Bestimmung des Spannungsumlenkungsverhaltens innerhalb der Faserverbundstruktur. An ihm kann insbesondere das Knick- und Biegeverhalten ermittelt werden.

Sämtliche innen liegenden Kanten sind mit einem Radius von min. 2 mm versehen. Die äußere Kon-

tur wurde nicht verrundet, um die Qualität der Stirn- und Seitenränder besser kontrollieren zu können. Zudem würden Radien hier zu einer Stauchung von einzelnen Fasern führen.

In der oberen Formhälfte befinden sich Nuten, um ein Abfließen von überschüssigen Harz zu gewährleisten.

Die nachfolgenden Bilder zeigen noch einmal die geschlossene Form mit eingelegtem FVB-Bauteil als Computermodell (siehe **Bild 8**) und die auf der Rapid Tooling Anlage gesinterte Formhälfen und Schieber (siehe **Bild 9**).

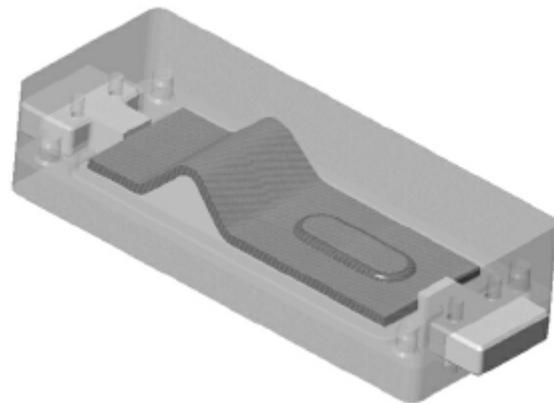


Bild 8: geschlossene Form mit eingelegtem Laminat

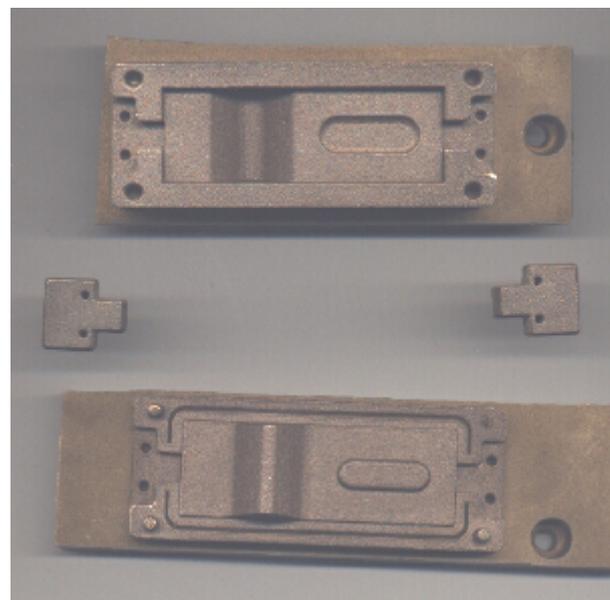


Bild 9: lasergesinterte Bauteile

4 Herstellung des FVB-Werkstücks

Die praktische Herstellung eines Faserverbundbauteils beginnt mit dem sorgfältigen Zuschneiden der einzelnen Laminatschichten. Hierbei müssen

zum einen die Ausrichtungen der Fasern, als auch Änderungen in der Bauteilgeometrie (z.B. durch Entformungsschrägen) berücksichtigt werden.

Da wir als Laminat Fasergewebe mit einer Ausrichtung von 0° und 90° verwendet haben, wurden die einzelnen Schichten um jeweils 45° versetzt eingelegt.

Um die erforderliche Bauteilhöhe und einen angemessenen Stempeldruck - durch die obere Formhälfte - zu erreichen, waren insgesamt 10 Faserlagen erforderlich.

Zur Vorbehandlung der Formhälften verwendeten wir eine Trennmittel-Versiegler Kombination.

Neben der guten Trennwirkung und Temperaturbeständigkeit zeigte diese keine Reaktionen mit der Form oder dem Werkstück.

Nach dem Einbetten des Laminats wurde die Form verschlossen, mit Hilfe eines Vakuumsackes evakuiert und in diesem Zustand für eine Stunde bei 160°C ausgehärtet.

Das anschließende Entformen mußte im noch heißen Zustand erfolgen.

Die Entnahme des Bauteils stellte sich als sehr schwierig heraus. Ursache hierfür ist die hohe Oberflächenrauigkeit der Rapid Tooling Form und das teilweise Einfließen des Harzes in die poröse Form. Zu Überprüfen ist, ob größere Entformungsschrägen die Entnahme erleichtern, bzw. andere Trennmittelsysteme eine adhäsionspassivere Oberflächenbeschaffenheit bewirken.

Um den Harz vollständig auszuhärten, muß das Bauteil abschließend noch für 10 Stunden bei 100°C getempert werden.

Das fertige Werkstück (siehe **Bild 10 u. Bild 11**) weist eine überwiegend glatte Oberfläche auf und läßt deutlich die Struktur des Gewebes erkennen.



Bild 10: Faserverbundbauteil

Dies bedeutet, dass durch den richtig gewählten Stempeldruck keine Fasern gequetscht oder beschädigt wurden. Hierfür spricht auch der glatte und

gleichmäßige Bauteilrand und das sichtbar ausgeprägte Langloch.

Trotz der geringen Anzahl von Schichten ist die Gesamtfestigkeit des Bauteils recht hoch. Im Bereich des Berges machen sich aber unter Belastung Biegeerscheinungen bemerkbar.

Abhilfe könnte hier ein kleinerer Winkel, oder die Einarbeitung von Versteifungen schaffen.

Der Verzug des Werkstückes durch Eigenspannungen ist minimal. Eine leichte Krümmung der Grundfläche ist bei der Entnahme aus der Form entstanden.

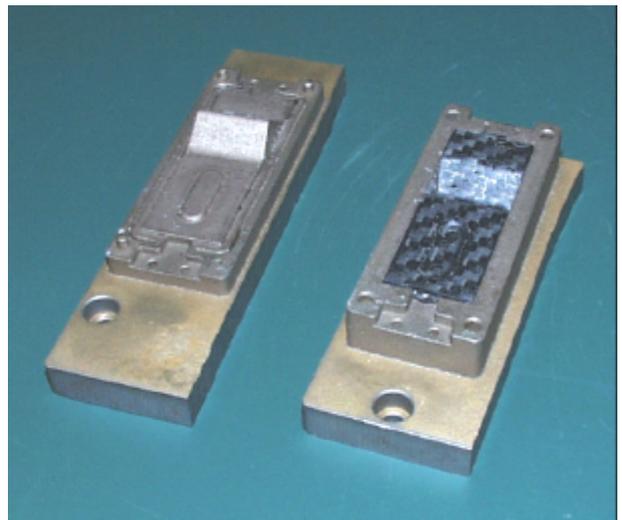


Bild 11: gesinterte Formen mit FVB-Bauteil

5 Zusammenfassung

Kombiniert man nun das Vakuumsack-Verfahren mit Formhälften, die im Rapid Tooling Verfahren hergestellt werden, so ergeben sich für die Fertigung von Faserverbundbauteilen spezielle Vorteile:

- ▶ zwei Formhälften
- ▶ gleichmäßiges Vakuum durch porösen gesinterten Werkstoff

Bei dieser Kombination übernimmt die Rapid Tooling Form durch ihre porösen Eigenschaften die Aufgaben des bei dem klassischen Vakuumsack-Verfahren verwendeten Filzes. Voraussetzung ist natürlich eine adhäsionspassive Oberflächenbeschaffenheit der Rapid Tooling Form, also eine Oberfläche mit semipermeablen Eigenschaften. Durch eine entsprechende Beschichtung (Versiegler-Trennmittel-System) läßt sich so diese Funktionsschicht erreichen.

6 Literatur

- /1/ N., N.: Nicht nur in der Flugzeugindustrie, Ingenieur Werkstoffe 7/8-93, 24-25
- /2/ N., N.: Gestalten von Werkstücken aus GFK, Verein Deutscher Ingenieure, VDI 2012, Juni 1969
- /3/ Michaeli, W.; Huybrecht, D.; Wegener, M.: Dimensionieren mit Faserverbundkunststoffen, Hanser Verlag, München, 1995
- /4/ Flemming, M.; Ziegmann, G.; Roth, S.: Faserverbundbauweisen, Fertigungsverfahren mit duroplastischer Matrix, Springer Verlag, 1998