

ELASTOMERE FORMWERKZEUGE IN DER FASERVERBUNDTECHNOLOGIE - MÖGLICHKEITEN UND GRENZEN

M. Kühn, M. Hanke, S. Malzahn, T. Wurl

DLR- Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik, Braunschweig,

ZUSAMMENFASSUNG

Die Fertigung von Faserverbundbauteilen beruht auf Fertigungstechnologien, die sich von anderen Herstellungsverfahren aufgrund der Eigenschaften der Faserverbunde abhebt. Dabei spielt die Genauigkeit bzw. die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse eine wesentliche Rolle, mit der direkt die Leistungen der Verbunde zusammenhängen. Für die Fertigung von Bauteilen hat sich, neben verschiedenen Harzinjektionsverfahren und deren Abwandlungen, die Prepreg-Technologie etabliert. Alle Fertigungsverfahren erfordern die Ausfüllung einer Kavität mit einem Harz, das neben den Fasern die zweite obligatorische Komponente eines Verbundwerkstoffs darstellt. Abgesehen von der Prepreg-Technologie, bei der die Halbzeuge bereits die erforderliche Harzmenge enthalten, muss bei den übrigen Verfahren eine Harzinjektion erfolgen. Für die Verwendung von allseitig starren Formwerkzeugen, haben sich die Bezeichnungen „Resin Transfer Moulding“ (RTM) bzw. „Closed Mould“ international durchgesetzt. Wird mit einem teiflexiblen Formwerkzeug gearbeitet, das aus einem starren und flexiblen Element besteht, wird von „Liquid Resin Infusion“ (LRI) und „Liquid Composite Moulding“ (LCM), bzw. den „Open Mould“-Verfahren gesprochen. Bei der Auswahl eines geeigneten Fertigungsverfahrens, ist insbesondere die Gestalt der zu fertigenden Struktur entscheidend. Alle Verfahren erfüllen die Anforderungen an die Fertigung von Faserverbundwerkstoffen mit spezifischen Vor- und Nachteilen.

Ob die Anforderungen an die Qualität erfüllt werden können, hängt auch von der Auswahl eines geeigneten Materials für die Formwerkzeuge ab. Neben gängigen metallischen und nicht-metallischen Materialien, stellen auch verschiedene Kunststoffe eine Möglichkeit für die Formgestaltung dar, womit auch Elastomerwerkstoffe eingeschlossen werden.

Gänzlich neue Bauweisen ermöglichen Elastomere aufgrund ihrer Eigenart, insbesondere der Flexibilität. Auch hier stellt sich die Frage, unter welchen Bedingungen Bauteile gefertigt werden können und damit ob Elastomere mit anderen Materialien bei der Formwerkzeuggestaltung konkurrenzfähig sind. Insbesondere sind, neben der Bauteilqualität, Kosten, Verfügbarkeit, Einsatzspektrum, Abformungen/Standzeit und Prozesssicherheit relevant. Die geeignete Werkzeugauswahl hat gravierenden Einfluss auf den Erfolg eines Fertigungskonzepts. Mit einem Werkzeugkonzept, das die momentanen Grenzen gängiger Methoden überwindet und die an die Bauteilqualität gestellten Anforderungen dennoch erfüllen kann, ermöglicht eine Verbesserung der gesamten Fertigungsbilanz.

1. MOTIVATION

Faserverbundbauteile sind hinsichtlich Störungen im Fertigungsverlauf sehr sensibel. Ursache dafür ist die Verknüpfung zwischen der Faserorientierung mit den mechanischen Kennwerten der anisotropen Werkstoffe. Bereits geringfügige Störungen im Faserverlauf führen zu einer verringerten Festigkeit und Steifigkeit und mindern damit die Leistungsfähigkeit der Werkstoffe. Auch Fremdkörpereinschlüsse im Gefüge (z.B. Luft), wodurch die Anbindung der Fasern an die Matrix gestört wird, sind zu vermeiden. Die Herstellungsmethoden für Faserverbundwerkstoffe tragen diesem Umstand Rechenschaft, d.h. sie sind auf die speziellen Anforderungen zugeschnitten. Beispielsweise erfolgte die Fertigung vieler Bauteile unter erhöhtem Druck, um das erforderliche Verhältnis zwischen Verstärkungsfasern und Matrix eines Verbundes einzustellen. Genauso wichtig ist daher die Auswahl eines Fertigungskonzepts, was die Materialauswahl ebenfalls einschließt.

Aufgrund der Randbedingungen der Fertigung, kommen häufig metallische Werkzeuge zum Einsatz. Neben dem erhöhten Druck, wird um das Bauteil ein angenähert perfektes Vakuum erzeugt. Um dies zu ermöglichen, wird um den Laminatausbau eine abgeschlossene Umgebung

erzeugt, zum Beispiel mit Hilfe einer Polyamidmembran. Zu der Prozessgröße Druck kommt die für das Solidifizieren erforderliche Temperaturerhöhung hinzu. Die Temperaturerhöhung erfolgt in Abhängigkeit von der verwendeten Matrix.

Die Herstellung eines Faserverbundbauteils ist an diese Prozessparameter gebunden, was rückwirkend Voraussetzungen für die Fertigung von Formwerkzeugen schafft. Üblich ist in der Faserverbundtechnologie eine Optimierung hinsichtlich eines Fertigungsverfahrens und einer Anwendung. Entsprechend ausgelegte Werkzeugkonzepte erfüllen die Anforderungen für die Herstellung von Bauteilen unter Berücksichtigung der Qualitätsansprüche, erlauben aber bei komplexen Bauteilen selten eine flexible Nutzung. Dementsprechend muss nahezu für jede Anwendung ein angepasstes Werkzeug angefertigt werden, um die gewünschte Bauteilqualität zu erreichen. Gerade bei komplexen Strukturen, z.B. mit mehrfachen Krümmungen, stellt sich dies als kostspielig dar. Hinzu kommen andere Nachteile der verwendeten Materialien.

Im Kontext der Fertigung von Faserverbundbauteilen im Bereich der Forschung und Entwicklung, aber auch Serienproduktion, mit äußerst hohen Anforderungen, wird

die Frage nach kosteneffizienten Bauweisen für Werkzeuge laut. Diese müssen alle Fertigungsbedingungen erfüllen und dennoch zu höchsten Bauteilqualitäten führen. Eine Weiterentwicklung ermöglichen Formwerkzeugmaterialien, mit denen die Grenzen gängiger Materialien überwunden werden. Die Nutzung von Elastomerwerkstoffen erscheint dabei als vielversprechend. Deren Anwendung bei der Faserverbundfertigung ist nicht neu, wurde aber in der Vergangenheit bei weitem nicht im gleichen Umfang für den Formenbau genutzt. Ein Anwendungsbeispiel sind Strukturen mit Hinterschneidungen. Elastomerwerkstoffe lassen auch auf weitere Vorteile, wie Multifunktionalität und Flexibilität hoffen. Zudem könnten auch niedrigere Herstellungskosten, bei gleichzeitig geringerem Gewicht und besserer Verfügbarkeit der Formwerkzeuge, erreicht werden.

Um die Eignung auf Elastomeren basierender Formwerzeuge zu untersuchen, finden verstärkt am DLR die Entwicklung faserverbundgerechter Bauweisen und werkstoffwissenschaftliche Untersuchungen statt.

2. ELASTOMERE – EINE KURZE ÜBERSICHT

Der Begriff Elastomere bezeichnet neben Thermoplasten und Duromeren eine Gruppe künstlicher Stoffe, die sich durch spezielle Eigenschaften auszeichnen und technisch nutzbar sind. Häufig bilden organische Stoffe die Basis für den makromolekularen Aufbau. Die Makromoleküle, entstehen durch die Synthese niedermolekularer Molekülketten, den sogenannten Monomeren. Der Oberbegriff Polymerwerkstoffe umfasst zudem auch modifizierte natürliche Werkstoffe neben den Kunststoffen.

Interessant für die Nutzung zur Formwerkzeuggestaltung, als auch für die Fertigung von Faserverbundwerkstoffen, sind speziell Elastomere, unter anderem aufgrund ihres Leichtbaupotentials und der dauerelastischen Eigenschaften. Die Dichte von Elastomeren bewegt sich zwischen 0,9 und 1,5 g/cm³ und kann bei der zusätzlichen Verwendung von Füllstoffen bis zu 2,2 g/cm³ betragen. Damit liegt die Dichte unterhalb der vieler anorganischer Werkstoffe für den Formenbau, als auch unter dem verbreiteten Leichtbauwerkstoff Aluminium mit 2,7 g/cm³. Kennzeichnend für Elastomerwerkstoffe ist zudem ein relativ kleiner Elastizitätsmodul (E-Modul).

Die weitmaschige Vernetzung (schwache, chemische, Bindung) der Elastomere, zu denen auch Silikone bzw. Silikonkautschuk zählen, ermöglicht ein ausgeprägtes, entropie-elastisches (gummi-elastisches) Verformungsverhalten. Bis zu ihrer Zersetzungstemperatur sind Elastomere nicht schmelzbar. Typische Höchsttemperaturen für den Gebrauch liegen zwischen 90°C und 150°C. Speziell auf hohe Temperaturen ausgelegte Elastomere sind sogar bis zu einer Temperatur von 350°C einsetzbar. Weiterhin zeichnen sich die Elastomere durch ihre hohe chemische und physikalische Widerstandsfähigkeit aus. Insbesondere Korrosion tritt nicht auf, so dass kein Korrosionsschutz vorgesehen werden muss. Elastomere sind außerdem weder löslich, noch weisen sie Quellung auf.

Aufgrund der eingeschränkten Fähigkeit der Moleküle in einem Elastomer zu schwingen, ist hierbei die

Wärmeleitung eher gering ausgeprägt. In der praktischen Anwendung kann dies sowohl als Vor- und Nachteil gewertet werden. Müssten in Abhängigkeit von der Geometrie längere Aufheizzeiten akzeptiert werden, kann die Fähigkeit Wärme länger zu speichern sehr vorteilhaft sein. Die Wärmeleitfähigkeit liegt bei Temperaturen zwischen 20°C und 50°C bei 0,15 bis 0,3 1 / (m*K). Im Vergleich hierzu hat Aluminium 235 W / (m*K). In Hinblick auf die Anwendung bei der Herstellung von Faserverbundbauteilen, spielt auch die Wärmeausdehnung eine wesentliche Rolle, die bei Elastomeren, im Vergleich zu Metallen, stärker ausgeprägt ist. Der Wärmeausdehnungskoeffizient liegt zwischen 100 und 200 * 10^(-6) pro K. Bei Anwendungen mit hoher Genauigkeit muss das Wärmeausdehnungsverhalten kompensiert werden, lässt sich aber auch vorteilhaft ausnutzen.

Aufgrund des makromolekularen Aufbaus, liegt die Festigkeit bei Elastomeren deutlich unter der von Metallen. Die zwischen den Molekülen wirksamen physikalischen Anziehungskräfte sind schwächer als die elektrostatischen Bindungskräfte zwischen Metallatomen. Abhängig von der Materialstärke, ist auch die Formsteifigkeit bei Elastomeren geringer. Das Beanspruchungsverhalten ist außerdem stärker von Beanspruchungsdauer und Geschwindigkeit, sowie der Temperatur geprägt.

Elastomere sind darüber hinaus schlechte elektrische Leiter, wodurch sie sich sehr gut als Isolatoren eignen. Die Neigung zur elektrostatischen Aufladung, durch Reibung mit anderen Stoffen, ist eine weitere typische Eigenschaft.

Zu den Elastomerwerkstoffen zählen auch die Silikone bzw. Silikonkautschuk, die bei der Fertigung von Faserverbundwerkstoffen große Relevanz besitzen. Die exakte Bezeichnung für Silikonkautschuk lautet hochmolekulare, kettenpolymere Polydiorganosiloxane. Die Überführung vom zähflüssigen in den ausgehärteten Zustand erfolgt per Vulkanisieren bzw. Vernetzung. Hierfür werden bei den warmvernetzenden Typen häufig organische Peroxyde verwendet. Bei den kaltvernetzenden Silikonen, d.h. bei Raumtemperatur vernetzend, finden organische Metall-, sowie Siliziumverbindungen Anwendung.

Bei der Vernetzung werden zwei Mechanismen unterschieden, die Polykondensation und Polyaddition. Die Polykondensation oder auch Kondensationsvernetzung erfolgt unter Freisetzung von Spaltprodukten, meistens Wasser. Die Reaktion läuft solange, bis ein Gleichgewichtsverhältnis zwischen den beteiligten Produkten eintritt. Somit kann die Vernetzung auch enden, bevor alle beteiligten Reaktionspartner aufgebraucht sind, d.h. es verbleiben Reststoffe.

Die Polyaddition verläuft ohne die Freisetzung von Spaltprodukten. Hier lagern sich lediglich Wasserstoffatome zwischen den Molekülen der Reaktionspartner um, so dass zwischen den Molekülen Verknüpfungen entstehen. Man spricht hier von einer intramolekularen Umlagerung der Wasserstoffatome. Bei der Polyaddition oder Additionsvernetzung handelt es sich demnach nicht um eine Gleichgewichtsreaktion. Die Reaktion endet, sobald für eine der funktionellen Gruppen der Vernetzung kein Reaktionspartner mehr zur Verfügung steht. Ein

genau abgestimmtes Mischungsverhältnis ist daher notwendig, wobei aus fertigungstechnisch eine geringe Toleranz zulässig ist. Die Vernetzung kann neben dem Reaktionsprinzip weiterhin in raumtemperatur- und hochtemperaturvernetzende Silikone unterteilt werden. Außerdem werden Ein- und Mehrkomponentensystem voneinander unterschieden.

3. FORMWERKZEUGE IN DER FASERVERBUNDTECHNOLOGIE

Die Faserverbundtechnologie erfordert Fertigungsverfahren, die eine möglichst exakte Orientierung der Verstärkungsfasern im Verbundwerkstoff sicherstellen. Im Allgemeinen bestehende Anforderungen sind beispielsweise:

- Hohe Präzision
- Geringes Gewicht
- Dehnungskompatibilität
- Schnelle Verfügbarkeit
- Geringe Kosten
- Dauerhafte Vakuumdichtigkeit
- Höhe Oberflächengüte
- Formtreue unter Prozessbedingungen
- Verschleißfeste Oberflächen
- Geringer Wärmeinhalt für kurze Taktzeiten
- Gutes Entformungsverhalten
- Reparaturmöglichkeit

An Formwerkzeuge werden somit sehr hohe Anforderungen gestellt. Weicht der Faserverlauf um wenige Grad ab, verringern sich die erreichbare Festigkeit und Steifigkeit. In Abhängigkeit der Bauteilrandbedingungen, wie z.B. Geometrie, Stückzahl und geforderter Qualität, werden die relevanten Werkzeuganforderungen ausgewählt.

Die geometrische Lage der Fasern wird durch das ausgehärtete Harz gewährleistet. Im Verbund übernehmen die Fasern die Aufgabe, Kräfte aufzunehmen und weiterzuleiten. Die Matrix hingegen gewährleistet neben der geometrischen Lage den Schutz der Fasern vor Umwelteinflüssen und die Krafteinleitung. Die gezielte Ausbildung des Faserverbunds, wird nur mit einer optimalen Fertigungstechnologie erreicht.

Zu den grundlegenden strukturmechanischen Anforderungen kommen fertigungstechnische Vorgaben hinzu. Hier ist neben einer hohen Temperaturbeständigkeit auch eine hohe Oberflächengüte zu nennen. Für eine exakte Abbildung der Geometrie, ist das Wärmedehnungsverhalten wichtig. Bei übermäßiger Wärmedehnung der Form, weicht das gefertigte Teil schnell von der Sollgeometrie ab. Dieser Effekt lässt sich oft nur schlecht kompensieren, weil eine genaue Prognose in vielen Fällen nicht möglich ist.

Von praktischer Natur sind Anforderungen an das Gewicht, welches aufgrund der Handhabung möglichst gering sein sollte und die zeitliche Verfügbarkeit eines Formwerkzeugs. Durch die Herstellungsmethode der Werkzeuge entstehen nicht selten Bearbeitungszeiten, die eine langfristige Planung erfordern. Eine schnelle Anpassung an geänderte Randbedingungen, welche bei der Forschung und Entwicklung wünschenswert ist, verbindet sich mit großem Aufwand oder ist nicht ohne weiteres möglich. Die benötigte Flexibilität, um sich an

Konstruktionsänderungen anzupassen, können komplexe Formwerkzeuge aus herkömmlichen Werkstoffen nicht gewährleisten. Neben dem Material für Bauteil und Formwerkzeuge, entstehen die Kosten für die Herstellung auch durch den Herstellungsprozess. Die Bearbeitungszeiten sollten möglichst kurz sein, was durch einen niedrigeren Arbeitsaufwand zu geringeren Kosten führt.

Die Fertigung eines Bauteils aus einem Faserverbundwerkstoff erfordert grundlegend, dass die Verstärkungsfasern in die Matrix (Harz) eingebettet werden. Es gibt verschiedene Methoden, um die Formfüllung zu erzeugen. Die grundlegende Unterteilung findet in Halbzeuge statt, die bereits bei der Verarbeitung mit Harz getränkt sind, sogenannte Prepregs (engl. „preimpregnated“ – vorimpregniert), und trockene Halbzeuge, denen Harz zugeführt werden muss z.B. im (RTM – „Resin Transfer Moulding“ – Harztransfer Formgebung).

Bei den Harzinfusionsverfahren für Faserverbundwerkstoffe unterscheiden sich die Werkzeuge dahingehend, ob mit ein- oder zweiseitig festen Formen gearbeitet wird. International haben sich dabei die Begriffe „Open Mould“ für Einseitenwerkzeuge und „Closed Mould“ für zweiseitige, geschlossene Werkzeuge durchgesetzt. Bei den Einseitenwerkzeugen bildet eine dünne Einwegmembran die zweite Werkzeughälfte. Eine abgeschlossene Umgebung um das Bauteil ist erforderlich, da zwecks einer zu erreichenden Bauteilqualität fast ausschließlich vakuumunterstützte Prozesse angewendet werden. Durch das Vorgehen können Fehlstellen durch Lufteinschlüsse im Bauteil reduziert werden, was sich positiv auf die mechanischen Eigenschaften auswirkt. Das „Open Mould“ Fertigungsprinzip zeigt die Abbildung 1.

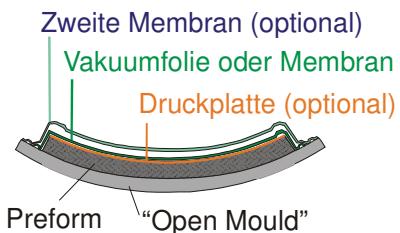


Bild 1: Skizze „Open Mould“ Ansatz

Der Einsatz von „Closed Mould“ – Verfahren ist bei Ansätzen gängig, bei denen z.B. endkonturnah gefertigt werden soll. Dieses Ziel wird dabei zwar mit jedem Fertigungsverfahren angestrebt, wodurch sich der Nachbearbeitungsaufwand reduziert, lässt sich jedoch oft nicht realisieren. Im Gegensatz zu den „Open Mould“ – Verfahren besteht die Gefahr des Überpressens und übermäßiger Harzansammlungen, infolge der mangelnden Flexibilität der zweiten Werkzeughälfte. Bei „Open Mould“ – Ansätzen können in Verbindung mit einer flexiblen Membran als zweite Werkzeugseite deutlich bessere Ergebnisse erzielt werden. Abbildung 2 zeigt das Prinzip der „Closed Mould“ – Fertigung.

Neben den Harzinfusionsverfahren, ist besonders die Prepreg-Technologie im Kontext einer Formwerkzeugherstellung mit Elastomeren relevant. Diese ist

Status quo der Serienfertigung von großflächigen, gekrümmten Bauteilen für den Luftfahrzeugbau. Mittlerweile findet die Prepregtechnologie auch verstärkten Einsatz bei komplexen und mehrfach gekrümmten Bauteilgeometrien. Abgesehen vom Verzicht auf eine Harzinjektion, gelten für Prepreg i.d.R. die gleichen Anforderungen hinsichtlich Prozessabwicklung und Werkzeuggestaltung.

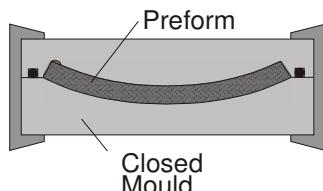


Bild 2: Skizze „Closed Mould“ Ansatz

Bedingt durch alle Anforderungen an den Fertigungsablauf, haben sich verschiedene Werkzeugkonzepte und Materialien für Formwerkzeuge etabliert. Besonders wegen der Beständigkeit, wird in vielen Fällen mit metallischen Formwerkzeugen gearbeitet. Insbesondere Aluminium und Stahl, aber auch Nickel 36 sind als Vertreter zu nennen. Bei den nicht-metallischen Werkzeugen sind Faserverbundwerkstoffe (Kohlestoffsäverstärkte und Glasfaserverstärkte Kunststoffe, sowie andere Kunststoffe [z.B. Ureol]) erwähnenswert. Als weitere, nicht-metallische Werkstoffe, können auf Elastomere, wie Silikonkautschuk oder Polyamid, verwendet werden. Alternative Werkstoffe zur Formwerkzeugherstellung sind z.B. Salze, Keramik, Sand und Schäume. Die Auswahl des Formwerkzeugs bzw. Materials hat großen Einfluss auf die Qualität eines Bauteils und Wirtschaftlichkeit des Herstellungsprozesses.

3.1. Aluminium-Formwerkzeuge

Formwerkzeuge aus Aluminium kennzeichnen insbesondere die hohe Oberflächenqualität, die eine große Anzahl an Abformungen ermöglicht. Die Herstellung per Fräsen ergibt Formwerkzeuge von hoher Genauigkeit und Reproduzierbarkeit, die zudem in begrenztem Umfang zu reparatur- und nachbearbeitungsfähig sind. Gegenüber Stahl sind Material- und Bearbeitungskosten geringer, sowie die Verfügbarkeit insgesamt besser.

Von Nachteil für die Handhabung ist das relativ hohe Gewicht. Das inkompatible thermische Verhalten gegenüber Faserverbundwerkstoffen ist ebenfalls zu berücksichtigen, das sowohl zu einer Maßabweichung, als auch zu Problemen bei der Entformung führen kann. Die relativ hohe spezifische Wärmekapazität bzw. hohe thermische Masse führt zu verlängerten Aufheiz- und Abkühlraten, in Folge längerer Prozesszeiten. Bei unsachgemäßer Handhabung können außerdem schnell Beschädigungen auf der Werkzeugoberfläche entstehen, die zu einer schlechteren Oberflächenqualität der Bauteile führen.

Aluminiumformwerkzeuge eignen sich sowohl für „Open Mould“-, als auch „Closed Mould“-Konzepte. Die Anwendungsmöglichkeiten reichen bis zu hoher

Komplexität und liegen vornehmlich bei kleinen bis mittelgroßen Bauteilen, die in geringerer Stückzahl hergestellt werden. Ein typisches Aluminiumformwerkzeug zeigt die Abbildung 3.



Bild 3: Integralgefrästes Al-Formwerkzeug

3.2. Formwerkzeuge aus Faserverbundwerkstoffen

Formwerkzeuge aus Faserverbundwerkstoffen werden bevorzugt in der „Open Mould“ - Fertigung, d.h. mit einseitig starren Formwerkzeugen angewendet. Dabei liegen die Hauptanwendungen bei mittleren bis großen Bauteilgeometrien, mit einer erhöhten Komplexität. Die Bauweise erfordert zwangsläufig einen Urformling, was insbesondere bei der Einstellung der Fertigungstoleranzen zu berücksichtigen ist.



Bild 4: CFK-Formwerkzeug

Die Nutzung von Faserverbundwerkstoffen zur Herstellung von Formwerkzeugen bietet sich, sowohl aufgrund des gegenüber Metallen niedrigeren Gewichts, also auch der thermischen Kompatibilität an. Das relativ geringe Gewicht der Formen lässt eine einfachere Handhabung zu. Daher können beispielsweise große Eisenbahn Triebwerkssäfte bzw. Schiffsrümpfe in montierten Faserverbundwerkzeugen gut abgeformt werden. Die geringe Wärmekapazität von CFK (Carbonfaser verstärkter Kunststoff) führt zu niedrigeren Aufheiz- und Abkühlzeiten, das heißt einer verbesserten Wirtschaftlichkeit der Prozessierung. Abgesehen von den hohen Halbzeugkosten, hängt vom Einzelfall ab, ob Faserverbundformen gegenüber integral geprägte Formen zu bevorzugen sind, zumal ebenfalls ein Urformling erforderlich ist. Ein Beispiel für eine Faserverbundform zeigt die Abbildung 4, in der zwei Negativformen zu sehen sind.

Ein Nachteil von CFK-Formen ist die Standzeit, die in Abhängigkeit der Werkzeughandhabung, zwischen 50

und 300 Abformungen variieren kann. Besonders bei der Entformung muss darauf geachtet werden, das Formwerkzeug nicht zu beschädigen. Außerdem ist das Reparaturvermögen der CFK-Formen relativ schlecht. Bei Faserverbundwerkstoffen kommt die Spring-In-Problematik hinzu, die zu einer Maßabweichung der Formen bzw. Bauteile führt. Faserverbundformen sind oft auch aufgrund der Dichtigkeit problematisch. Die Verfügbarkeit der Formen verlängert sich durch den höheren Aufwand bei der Fertigung, als auch die erforderliche Nachbearbeitung. Eine automatisierte Herstellung ist, wie bei Faserverbundbauteilen im Allgemeinen, problematisch.

3.3. Nickel-Galvano-Formwerkzeuge

Ein anderes Verfahren zur Herstellung metallischer Formwerkzeuge basiert darauf, dass eine Nickellegierung elektrochemisch auf eine Urform abgetragen wird. Das Auftragen in dem sogenannten Nickel-Galvano-Verfahren erfolgt ohne Zwangskräfte (Spannungen) in der Form, so dass entstehende Werkzeuge frei von inneren Spannungen und damit formtreu sind. Die Genauigkeit der Werkzeuge liegt im Mikrometerbereich und die Oberflächengüte gleicht der von integral gefertigten Formen. Die Abbildung 5 zeigt eine Nickel-Galvano-Form.



Bild 5: Nickel-Galvano-Formwerkzeug für Verkleidungsteil

Ein Vorteil der Nickel-Galvano-Werkzeuge ist die geringe Wandstärke, die zwischen 3 und 6 mm liegt. Besonders wichtig ist beim Herstellungsprozess eine ausgewogene Stärke der elektrischen Felder. Die Anordnung der Elektroden und Abschirmungen erfordert viel Erfahrung, um ungleichmäßige Wandstärken, infolge einer nicht ausgewogenen Ablagerung, zu vermeiden. Ist die Feldstärke zu niedrig, kann an kritischen Geometrien, sogar der Aufbau einer stabilen Schicht, infolge unzureichender Abscheidung, unmöglich werden. Die Fertigung muss zudem unter besonderer Sicherheit erfolgen, da die Fertigungsmittel ein hohes Gesundheitsrisiko darstellen.

Mit der Nickel-Galvano-Methode können höchste Oberflächengüten für Formwerkzeuge erreicht werden. Die Werkzeuge zeichnen sich entsprechend auch durch eine äußerst hohe Standzeit aus. Das geringe Gewicht infolge der geringen Wandstärken macht die Handhabung einfacher, da hier im Gegensatz zu integralen Metallwerkzeugen keine Materialanhäufungen entstehen. Ein weiterer Vorteil infolge der geringen Materialstärke, sind verkürzte Aufheiz- und Abkühlraten (thermische Masse). Es ist zudem möglich, die Form durch Stellschrauben nachzusteuern, was besonders bei Anwendungen mit hoher Präzision von Vorteil ist.

Außerdem lassen sich Nickel-Galvano-Formwerkzeuge mittels Schweißen oder Löten reparieren, sowie bedingt nachträglich modifizieren.

Den Vorteilen stehen insbesondere der hohe Preis und die langwierige Herstellung gegenüber. Der Abscheidungsprozess, der zur Formbildung führt, erfordert Herstellungszeiten zwischen 1 und 3 Monaten, die für den Aufbau einer tragfähigen Wandstärke erforderlich sind. Da der Wärmeausdehnungskoeffizient mit dem von Stahl vergleichbar ist, besteht hier eine Inkompatibilität gegenüber Faserverbundwerkstoffen. Es entsteht weiterhin zusätzlicher Aufwand zur Herstellung der Urform und für die Oberflächenausbildung (Versilbern).

3.4. Kunststoff-Formwerkzeuge

Eine weitere Möglichkeit zur Herstellung von Formwerkzeugen, sind Kunststoffe. Diese werden ausgehend von einem Urformling als dünnwandige Form oder integral aus einem Kunststoffblock gefertigt. Der Vorteil der Kunststoffformen liegt in dem niedrigeren Preis und dem geringeren Gewicht gegenüber anderen Formwerkzeugmaterialien, insbesondere Metallen. Aufgrund der für viele Anwendungen zu geringen thermischen Beständigkeit, der geringeren Widerstandsfähigkeit gegen mechanische Beschädigungen und inkompatiblen Wärmedehnung, sind Kunststoffformen nicht bei allen Bauweisen in der Faserverbundtechnologie anwendbar. Abbildung 6 zeigt eine Kunststoff-Negativform.



Bild 6: Kunststoffschale als Negativform

3.5. Differentielle Stahl-Formwerkzeuge

Um dem Problem des hohen Gewichts aus Vollmaterial gefräster Formen entgegenzuwirken, können Stahl-Formwerkzeuge auch aus dünnwandigen Komponenten aufgebaut werden. Die Einzelteile werden zum Beispiel miteinander verschweißt und die Werkzeugoberfläche für eine hinreichende Oberflächengüte nachbearbeitet. Aufgrund der thermischen Dehnungskompatibilität wird vielfach mit Nickel 36-Stahlplatten (Invar-Stahl) gearbeitet, dessen Vorteil einer geringen Wärmedehnung zu Ungunsten der Kosten ausfällt.

Bei geschweißten Formwerkzeugen entstehen erhöhte Anforderungen an die Vakuumdichtigkeit der Nähte, sofern diese innerhalb der Siegelfläche liegen. Bei geringeren Anforderungen an die Präzision, zum Beispiel außerhalb einer Serienproduktion, bieten sich auch andere Stahltypen für die Formgestaltung an. Im „Open Mould“ – Verfahren, in Kombination mit flexiblen Einweg-

Formwerkzeugmembranen, hat sich diese Bauweise gegenüber integralen Formwerkzeugen etabliert. Auch bei Großbauteilen, lassen sich geschweißte Formwerkzeuge aus Stahl gut realisieren. Toleranzen durch das Schweißen müssen jedoch berücksichtigt werden. Die hohe Verschleißfestigkeit führt zu Anwendungsmöglichkeiten bis hin zu Großserien (10.000 Abformungen). Wird Nickel 36–Stahl verwendet, können diese Formwerkzeuge problemlos mit der Qualität und Maßhaltigkeit anderer, hochpräziser Formentypen konkurrieren.

Ein bereits angedeuteter Nachteil ergibt sich ebenfalls aus der Verwendung von Nickel 36 – Stahl, nämlich der hohe Preis, der marktabhängigen Schwankungen unterliegt. Hinzu kommen die, durch starke Nachfrage bedingten, Lieferzeiten, die bis zu mehrere Monate betragen können. Trotz der Leichtbauweise dieser Formwerkzeuge, müssen verlängerte Aufheiz- und Abkühlzeiten in der energetischen Bilanzierung berücksichtigt werden. Außerdem kann infolge von Korrosion an Nickel 36 – Werkzeugen eine Schädigung entstehen. Korrosionsschutzmaßnahmen müssen in Einklang mit der Faserverbundtechnologie umgesetzt werden. Abbildung 7 zeigt ein Formwerkzeug für Faserverbundhalbschalen.



Bild 7: Schalenwerkzeug aus Edelstahl

3.6. Einweg-Formwerkzeugmembranen

Für die Fertigung von Faserverbundbauteilen im „Open Mould“ – Verfahren, erfolgt die vakuumdichte Abdeckung der festen Formhälfte, überwiegend durch dünne Polyamidfolien, die sich durch ihre Flexibilität und Dehnfähigkeit, über ein Elastomer-Dichtband, vakuumdicht mit dem Werkzeug verbinden lassen. Dazu wird das Dichtband umlaufend am Folienrand manuell auf geklebt. Die so vorbereitete Folie wird über dem Lagenaufbau und Fertigungsmittel platziert und durch gezielte Faltung an den Fertigungsaufbau angepasst. Dieser dichtigkeitskritische und damit für das Gelingen des Bauteiles entscheidende Fertigungsabschnitt erfordert große Sorgfalt und erfahrenes Fachpersonal. Abbildung 8 zeigt den gesiegelten Vakuumaufbau eines Flugzeugrumpfsegmentes mit eingebetteten Stringern.

Zu den Vorteilen der Einweg-Formwerkzeugmembranen zählt die Flexibilität der sehr dünnen Folien (0,1-0,2 mm). Hierdurch passen sich diese nahezu beliebigen Konturen an und sparen das Mehrgewicht einer zweiten festen Formhälfte ein, die zusätzlich erhöhte Kosten zu Folge hätte. Vorteilhaft ist bei den Einweg-Formwerkzeugmembranen, dass auch eine begrenzte Standzeit unter Prozessbedingungen für die erforderliche Prozesssicherheit ausreichend ist.



Bild 8: Gesiegelte Einweg-Vakuumfolie

Als Nachteil gelten der sehr hohe manuelle Arbeitsanteil bei der Aufbringung der Vakuumfolie und die stark von der ausführenden Person abhängige Güte der, für die Vakuumdichtigkeit entscheidenden, Siegelung. Darüber hinaus ist auch die große Abfallmenge logistisch zu bewältigen. Die Empfindlichkeit der dünnen Folien gegenüber mechanischen Beschädigungen und die insbesondere bei Polyamidfolien vorhandene Tendenz zum Austrocknen sind weitere typische Nachteile.

3.7. Wiederverwendbare Formwerkzeugmembranen

Elastomerwerkstoffe lassen sich auch zur Herstellung von Formwerkzeugmembranen und Hilfsmitteln nutzen. Diese bieten gegenüber den Einweg-Formwerkzeugmembranen den Vorteil, wiederverwendet werden zu können. Anstelle von Polyamidfolien, lassen sich aus verschiedenen Silikonen Vakuumhauben herstellen, die sich ebenfalls komplexen Geometrien anpassen können, aber nicht mehr dieselbe Flexibilität bieten. Weitere Vorteile ergeben sich aus den dauerelastischen Eigenschaften der Elastomere. Die damit verbundene hohe Reißdehnung und Weiterreißfestigkeit, in Verbindung mit einer hohen Reißfestigkeit, führt zu einem ausgezeichneten Entformungsverhalten, besonders bei integraler Bauweise und schlecht zugänglichen Bauteilen. Im Vergleich zu Polyamidfolien können Silikonmembranen nicht durch geringfügige mechanische Einwirkung penetriert werden und damit die Bauteilherstellung gefährden.



Bild 9: Mehrweg-Elastomer-Formwerkzeugelement

Als Nachteil der Elastomer-Formwerkzeugmembrane sind die Kosten gegenüber Polyamidfolien zu nennen. Die Stückzahl der mit einer Membran hergestellten Bauteile entscheidet letztlich darüber, ob die Verwendung sinnvoll ist. Weiterhin besteht auch eine Gefahr durch aggressive Harzsysteme, durch die Silikonmembranen unbrauchbar werden können oder zu einer gestörten Fertigung führen. Zudem ist eine Verwendung von Silikonen ausgeschlossen, die flüchtige Bestandteile während der

Fertigung absondern. Durch diese kann, insbesondere bei der Infusionstechnologie, die Anbindung zwischen Matrix und Fasern gestört werden. Die Standzeit der Membranen hängt stark von der Temperaturbelastung bei der Bauteilfertigung ab. Besonders bei der Anwendung an Klebeflächen, haben Rückstände, die zu einer Trennwirkung führen, erhebliche Auswirkungen. Ein Beispiel für die Anwendung eines Silikonschlauchs bei der Bauteilherstellung zeigt die Abbildung 9.

4. FORMWERKZEUGGESTALTUNG MIT ELASTOMEREN

Die Verwendung von Elastomeren in der Faserverbundtechnologie ist nicht vollkommen neu. Im Bereich der Integralbauweisen und beim Co-Bonding konnten Silikohilfskerne bereits erfolgreich verwendet werden. Ein neuer Ansatz ist jedoch die Nutzung von Elastomeren als Material für die Formwerkzeuge selbst. Der Werkstoff lässt auf eine Vielzahl von Möglichkeiten und Vorteilen hoffen. Unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten, drängt sich natürlich die Frage nach der Konkurrenzfähigkeit gegenüber gängigen Werkzeugkonzepten auf. Eine Qualifizierung der Werkstoffeigenschaften muss dabei, für die Anwendung in der Faserverbundtechnologie für die Luft- und Raumfahrt, erfolgen.

4.1. Verarbeitungsformen für Silikone

Von besonderer Bedeutung im Bereich der Formwerkzeugherstellung mit Elastomerwerkstoffen sind die Silikone. Typische Kennwerte sind Temperaturfestigkeit, Reißfestigkeit, Weiterreißfestigkeit und Reißdehnung, sowie Shore-A-Härte, Schrumpf und Topfzeit. Die relevanten Eigenschaften werden durch ein spezifisches Bauteil bestimmt. Entsprechend der Kategorien und Kenngrößen, existiert ein breites Spektrum an Silikonen mit zu verschiedenen Anwendungen passenden Eigenschaften. Die Verarbeitung von Silikonen erfolgt durch Gießen/Spritzguss, Extrusion oder Injektion. Von der Bauteilgeometrie hängt ab, welches der Verfahren die beste Eignung besitzt. Ein Anwendungsbeispiel einer Silikonform zeigt die Abbildung 10.



Bild 10: Zweiseitenwerkzeug aus Silikon

Das mit dem geringsten Aufwand verbundene Gießen erfordert keine speziellen Anlagen, auch wenn zum Erzeugen einer möglichst homogenen, porenfreien Oberfläche entgast werden sollte und entsprechendes Equipment erforderlich ist. Bereits das Spritzgussverfahren, dessen Anwendung deutlich im Bereich der Serienproduktion liegt, erfordert größere

Anlagen. Per Extrusion lassen sich in Längsrichtung ausgedehnte Erzeugnisse aus Silikon unkompliziert in großer Stückzahl herstellen („Meterware“). Hierbei wird zähflüssiges Silikon durch eine Matrix gepresst, die gleichzeitig erwärmt wird, wodurch das Silikon innerhalb kürzester Zeit vernetzt. Allerdings sind die Extrudate hinsichtlich der Wandstärken eingeschränkt, da bei zu geringer, ungleichmäßiger Wandstärke (weniger als 1 mm) das Material durch die Erwärmung verbrennt und bei zu großer Wandstärke (>30 mm) eine durchgängige Aushärtung nicht sichergestellt werden kann. Neben der Beschränkung auf längs ausgedehnte Erzeugnisse, ist auch die Komplexität eingeschränkt.

Die Silikoninjektion stellt eine Weiterentwicklung des gewöhnlichen Gießens dar. Zwecks einer porenfreien Ausbildung des Silikongefüges, die auch bei gründlichem Entgasen nicht erreicht werden kann, wird mittels eines Unterdrucks das Silikon einer evakuierten Bauteilform zugeführt. Beim Gießen entstehen häufig Lufteinschlüsse, weil eingeschlossene Gasblasen, aufgrund der zähflüssigen Konsistenz, nicht schnell genug aus dem Silikon entweichen können. Bei der Silikoninjektion hingegen, kann während der Verarbeitung, innerhalb der Topfzeit, durch den dauerhaft anliegenden Unterdruck, fortlaufend entgast werden. Entsprechend zeichnen sich per Injektion erzeugte Silikonkomponenten, durch ein äußerst porenfreies Gefüge aus. Insbesondere bei Anwendungen, die hohe Anforderungen an die Dichtigkeit stellen, kommt dieser Vorteil zur Geltung.

Die Verarbeitungsformen haben unterschiedliche Vor- und Nachteile. Auch hier muss ein Kompromiss zwischen Qualität und Investitionskosten gemacht werden. Im Bereich der Forschung und Entwicklung bietet sich zu Anfang die Anwendung eines auf simplen Hilfsmitteln basierenden Toolings (engl., Formwerkzeuggestaltung) an. Gerade hier werden geringe Stückzahlen benötigt, zumal die Geometrie eines Bauteils meist noch nicht endgültig feststeht. Wenn die Ansprüche an die Qualität oder die Stückzahlen steigen, ist ein Übergang zu Extrusion, Injektion oder Spritzguss sinnvoll, wodurch sich eine Anwendung in der Serienproduktion erschließt.

4.2. Einsatz von Silikonformen in der Faserverbundtechnologie

Wie zu Anfang bereits angeführt wurde, spielt die Formwerkzeuggestaltung nicht nur für die Wirtschaftlichkeit von Faserverbundbauteilen eine entscheidende Rolle, sondern auch für die Eigenschaften. Faserverbundwerkstoffe unterscheiden sich von anderen typischen Werkstoffen, insbesondere von den Metallen, dadurch, dass der Werkstoff erst bei der Bauteilherstellung entsteht. Entsprechend ergeben sich hohe Anforderungen an die Präzision der Formwerkzeuge.

Im Bereich Faserverbundtechnologie können Silikone als Fertigungshilfsmittel eingesetzt werden, aber auch in Kombination mit anderen Werkstoffen (Hybridwerkzeuge) oder ausschließlich als Formwerkstoff. Bei der Anwendung als Fertigungshilfsmittel, liegt der größte Vorteil in der Anpassungsfähigkeit und Flexibilität, wobei letztere ein Entfernen aus einer Struktur, im Anschluss an die Fertigung, ermöglicht. Besonders bei Hinterschneidungen und schwer zugänglichen Bauteilbereichen, bietet sich so ein Vorteil, z.B. bei der

Fertigung von hohlstringerversteiften CFK-Rumpfschalen. Durch die Verwendung von schlauchförmigen Silikonkernen, wird dabei eine definierte Ausbildung der CFK-Rumpfhaut sichergestellt. Die Silikonkerne geben den erhöhten Umgebungsdruck im Autoklav, während der Aushärtung an die Haut weiter, da ansonsten Ondulationen in der Haut entstehen. Eine Anwendung bei der Fertigung von Stringern mit Prepreg-Technologie zeigt Abbildung 11.



Bild 11: Preforming mit Silikonwerkzeug

Bei der Leichtbauweise von Luftfahrzeugkomponenten, hat sich die Schalenbauweise bewährt. Eine Begründung hierfür, ist die erforderliche aerodynamische Oberflächengüte der konvexen Schalenseite. Hierbei werden mindestens einfach gekrümmte Schalen belastungsgerecht durch andere Elemente, z.B. Spante oder Stringer, versteift. Dadurch ist auch bei konventionellen Werkstoffen eine erheblich Gewichtseinsparung möglich, die sich durch die Anwendung der anisotropen Faserverbundwerkstoffe weiter steigern lässt. Gegenüberzustellen sind dabei integrale und differentielle Bauweise. Alternativ zur Abformung mit metallischen Werkzeugen, können komplexe Geometrien unter geringem Zeitaufwand mit Silikonen abgeformt werden. Einfache Versteifungen, wie z.B. I-, T- oder Omega-Stringer lassen sich, mit Blechformen oder per Rapid Prototyping hergestellten Urformlingen, ein- oder mehrteilige Elastomer-Formwerkzeuge überführen. Modifikationen für die Prozessabwicklung, z.B. ein Angusskanal, können leicht vorgesehen werden. Das Formwerkzeug steht innerhalb weniger Tage zur Verfügung.

Ein typisches Bauelement zur Versteifung einer gekrümmten CFK-Schale ist ein Stringer. Diese erhöhen die Stabilität unter Biegebelastung, insbesondere die Beulfestigkeit einer Schale. Moderne Bauweisen für Stringer gehen von einem sogenannten Omega-Profil aus, welches aus einem offenen Trapez mit einem Flansch auf jeder Seite besteht (siehe Abbildung 12). Zur Fertigung dieses Profils könnte ein integrales Aluminiumwerkzeug oder auch die Pulltrusion angewendet werden. Zur Herstellung desselben Bauteils mit einem Silikonwerkzeug, könnte die Bauteilform mit einem Aluminiumblech oder einem Rapid-Prototyping-Teil nachgebildet werden. Eingesetzt in eine Gießform, wird das Bauteil abgeformt und ist innerhalb kürzester Zeit verfügbar. Alternativ lässt sich dasselbe Silikonprofil auch Extrudieren. Bei einer mehrfach oder zu stark gekrümmten Form, kann die Pulltrusion bereits nichts mehr angewendet werden. Ändert sich die Krümmung

hingegen, erfordert ein Aluminium-Tooling eine neue Form. Das Silikonwerkzeug hingegen könnte in Kombination mit einem justierbaren Schalenwerkzeug oder einer angepassten Schale wiederverwendet werden.

Weitere Unterschiede werden auch bei der Fertigung eines Bauteils deutlich. Aluminium und Silikonwerkzeug lassen sich bei entsprechenden Vorkehrungen, sowohl für Infusionsverfahren, als auch Prepreg-Technologie verwenden. In beiden Fällen ist eine Anpassung des Fasermaterials an die Form erforderlich. Im Falle des Aluminiumwerkzeugs, müsste dieses mittels Bindertechnologie drapiert werden, ggf. mit einem zwischenzeitlich erzeugten Vakuum gearbeitet werden. Das Silikonwerkzeug hingegen, lässt sich aktiv für kaltes oder warmes Preforming nutzen. Fasermaterial oder Prepreg können in der Ebene zu einem Lagenaufbau abgelegt und anschließend, nach Einlegen in das Silikonwerkzeug, in kürzester Zeit drapiert werden. Ist das Silikonwerkzeug mit einem Nutensystem versehen, muss dieses lediglich an eine Evakuierungspumpe angeschlossen werden und der Autoklavprozess kann ohne weitere Arbeiten beginnen. Das Aluminiumwerkzeug käme im Vergleich dazu nicht ohne eine Siegelung mit einer Formwerkzeugmembran aus. Die Flexibilität des Silikons ermöglicht auch bei geschlossenen Formwerkzeugen eine bessere Anpassung an eine Kontur, wodurch die Problematik einer schlechten Dickenverteilung, durch ungleichmäßige Flächenpressung, wie bei massiven Zweiseitenwerkzeugen aus metallischen Werkzeugen, nicht auftritt. Ein weiteres Beispiel zeigt die Abbildung 12.



Bild 12: Flexibles Formwerkzeug für Omega-Stringer

Besonders bei der Forschung und Entwicklung, ändert sich die Geometrie der Elemente im Konstruktionsprozess oft erheblich. Dies betrifft sowohl die Parameter von Strukturelementen, wie Höhe und Breite, Wandstärken, Radien, Winkel, etc., als auch die Gestalt selbst (I-, T-, LZ-, Omega-Profil). Bei der Metallbauweise von Formwerkzeugen, müsste stets ein neues Formwerkzeug gefertigt werden, was mit erhöhten Kosten und erhöhtem Zeitaufwand verbunden ist. Durch die Nutzung des Tooling (engl., Formwerkzeuggestaltung) mit Elastomeren, können die Zusatzkosten in Grenzen gehalten, sowie deutlich schneller neue Formen zur Verfügung gestellt werden. Einerseits kann sich die Form variablen Krümmungen anpassen. Ändert sich zum Beispiel die Rumpfkrümmung (z.B. Sektion 18/19, Hecksektion eines Verkehrsflugzeugs), so genügt es mit einem entsprechend gekrümmten Schalenwerkzeug und

einer ebenen Silikonform zu arbeiten, die sich der Krümmung, bei gleich bleibendem Querschnitt der Versteifung, anpasst.

Aus wirtschaftlicher Sicht kann nicht bis zur vollständigen Festlegung der Geometrie gewartet werden, um Fertigungstechnologien zu entwickeln und zu verifizieren. Zudem haben Konstruktionen in der Vergangenheit gezeigt, dass Fehler oder Verbesserungspotential erst nach Produktion einer gewissen Anzahl von Bauteilen entdeckt werden. Mit der Flexibilität, die Silikonwerkzeuge durch ihre Dauerelastizität ermöglichen, und den Vorteilen im punktuellen Kosten und Verfügbarkeit, kann effizienter mit erforderlichen Anpassungen an geänderte Rahmenbedingungen umgegangen werden.

Bei hoch präzisen Anwendungen, sollte mit entsprechend genaueren Formen für die Silikonelemente gearbeitet werden. Hierbei muss nicht notwendigerweise auf metallische Werkstoffe zurückgegriffen werden. Es bietet sich auch eine Reihe von Kunststoffen an, die Vorteile bei der Verarbeitung und den Herstellungskosten haben. Ist eine größere Anzahl an Abformungen vorgesehen, kann der Übergang zu metallischen Formwerkzeugen für die Elastomerkomponenten sinnvoll sein.

Zu den Vorteilen der Elastomerformwerkzeuge zählt besonders deren Flexibilität. Die damit verbundene Anpassungsfähigkeit an wechselnde Bedingungen, sowie andere typische Eigenschaften, wie hohe Reißfestigkeit, Reißdehnung und Weiterreißfestigkeit, ermöglicht einfache Bauweisen für komplexe Strukturen (siehe Abbildung 13). Die Verfügbarkeit der Formen ist mit wenigen Tagen deutlich besser, als bei Aluminiumformen, die gegenüber anderen Bauweisen (Kunststoffformen, CFK-Formen, Stahl-Formen) die am besten etablierte Lösung im Faserverbundbereich darstellen. Durch die um den Faktor 2-2,5 geringere Dichte, ist zudem die Handhabung der Formen deutlich besser zu bewerkstelligen. Die Silikonwerkzeuge können außerdem wiederverwendet werden. Die Material- und Fertigungskosten hängen stark vom verwendeten Silikon bzw. Verfahren ab. Tendenziell liegen die Fertigungskosten deutlich unter denen integraler Aluminiumwerkzeuge.

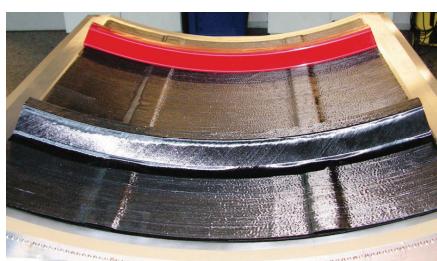


Bild 13: Mehrfach gekrümmte, integral versteifte Struktur

Ein Nachteil gegenüber metallischen Formen ist die Anzahl möglicher Abformungen. Bei Silikonwerkzeugen liegt diese unter 100 Bauteilen, wobei eine Abhängigkeit von der Temperaturbelastung besteht. Mit dieser verbindet sich auch eine weitere Einschränkung, die in der Faserverbundtechnologie relevant werden kann, wenn man das Spektrum verfügbarer Harzsysteme betrachtet. Die Einsatztemperatur vieler Silikone liegt unter 200°C.

Da einer Vielzahl von Anwendungen in der Faserverbundtechnologie jedoch niedrigere Temperaturen genügen, wird dieser Aspekt ggf. nicht zum Nachteil.

Ein weiteres sehr relevantes Thema ist eine mögliche Wechselwirkung zwischen Silikonen und Faserverbundwerkstoffen. Um ein Silikon für den Einsatz in der Strukturherstellung für Luftfahrzeuge zu qualifizieren, muss diese unbedingt ausgeschlossen oder eine Unbedenklichkeit nachgewiesen werden. Vorzuziehen sind hier die Additionsvernetzenden Silikon, bei denen keine Reaktionsprodukte austreten und eine Störung des Faserverbunds verursachen können.

Eine gute Kombination bietet die Verwendung von flexiblen Grundformen und Silikonwerkzeugen. Mit diesen kann die Krümmung einer Struktur definiert vorgegeben werden. Die Anpassung des Profils ist durch die Flexibilität des Silikons problemlos möglich, wodurch sich die Kosten für Formwerkzeuge nochmals verringern. Auf Konstruktionsänderungen kann sehr gut reagiert werden. Die Abformpräzision ist jedoch nicht unbegrenzt, da nur eine endliche Anzahl an Stellgliedern vorhanden ist. Außerdem muss eine Auslegung auf die Bedingungen im Autoklav erfolgen, so dass es in Folge der Temperaturerhöhung nicht zu einer Maßabweichung kommt. Es ist zusätzlich ein Kontrollmechanismus erforderlich, mit dem einerseits die Krümmung definiert und andererseits die Geometrievorgabe nachgeprüft werden kann. Ein Beispiel für ein flexibles Formwerkzeug zeigt die Abbildung 14.



Bild 14: Formvariables Stringerformwerkzeug

5. AUSBLICK

Elastomere Formwerkzeuge eröffnen der Faserverbundtechnologie eine Vielzahl neuer Möglichkeiten. Deren Vorteile liegen nicht nur im Bereich der Wirtschaftlichkeit, sondern auch bei der Entwicklung von Bauweisen. Die Vorteile und Beschränkungen werden besonders gegenüber metallischen Formwerkzeugen deutlich, wobei heute Aluminiumwerkzeuge den Schwerpunkt bilden. Besonders Kunststoffformen, Nickel-Galvano-Werkzeuge oder auch CFK-Formen können oft aufgrund der Kosten, Beständigkeit oder Kompatibilität nicht mit Metallwerkzeugen konkurrieren. Steigt die Komplexität der Bauteile, ist auch die Realisierung von geschweißten „Leichtbau-Formen“ aus Stahlblech nicht mehr probat. Die erforderlichen integral geprägten Formen haben sich zwar bewährt, sind aber auch mit Kompromissen verbunden.

Gerade bei der Forschung und Entwicklung von

Bauweisen können derartige Formen ihre größten Vorteile, die Beständigkeit und Genauigkeit, nicht ausspielen. Oft ist hier die Anzahl der Anwendungen begrenzt. Zudem können Aluminiumformen wechselnden Rahmenbedingungen, wie Bauteilkrümmungen oder Geometrie, nicht gerecht werden. Die Fertigung eines zusätzlichen Werkzeugs ist unweigerlich nötig. Die somit bestehende „Nische“ kann durch die flexiblen, elastomeren Formwerkzeuge geschlossen werden. Neben den Vorzügen im Bereich der Forschung und Entwicklung, ist deren Anwendung im Bereich einer Serienproduktion möglich.

Voraussetzung hierfür ist jedoch die Untersuchung der Werkstoffeigenschaften in Bezug auf Faserverbundwerkstoffe. Durch verschiedene mechanische Prüfungen, wie z.B. Zugprüfungen (T-Pull, T-Pull-Fatigue), aber auch Werkstoffprüfungen (IR-Spektroskopie, TMA, TGA,...) wird ein möglicher Einfluss auf die mechanischen Kennwerte der Faserverbunde untersucht bzw. ein möglicher Stoffübergang zwischen Elastomer und Faserverbund.

Bei der Gestaltung der Formwerkzeuge mit Elastomeren lassen sich sehr einfach auch weitere, zukunftsträchtige Modifikationen umsetzen. Das Spektrum reicht hier von der Realisierung ohne Hilfsstoffe abdichtender Mehrwegformen, über die Integration von Hilfen für die Nachbearbeitung oder die Funktionsintegration, z.B. in Form von Harzkanälen, bis hin zur Einbettung von Sensorik zur „Online-Qualitätssicherung“. Letztere in Form von Temperaturmesstechnik, für die Kontrolle einer gleichmäßigen Temperaturverteilung oder Ultraschall-sensorik für Dickenmessung (Faservolumengehalt) und Bestimmung des Aushärtegrads.

Im Zuge der zügig voranschreitenden Entwicklung der Faserverbundtechnologie, bekommt die Qualitätssicherung eine immer größere Bedeutung. Das Mittel der „Online-Qualitätssicherung“ ermöglicht den Nachweis einer einwandfreien Fertigung bereits im Prozess und schafft zudem eine Möglichkeit, auf den Herstellungsprozess Einfluss zu nehmen. Aufgrund der Fertigungsbedingungen im Autoklaven (Temperatur, Druck), ist dies bisher nur eingeschränkt möglich. Letztlich können mit diesem Mittel auch die Produktionskosten, reduziert werden.

Bei erfolgreicher Qualifizierung von Elastomeren, speziell Silikonen, ist deren Anwendung in der Faserverbundtechnologie vielversprechend. Die Fertigungstechnologie bietet großes Potential, um zukünftige Herausforderungen zu meistern und erweitert das Spektrum etablierter faserverbundgerechter Bauweisen. Vielmehr ermöglichen auf Elastomeren basierende Formwerkzeuge nicht nur eine wirtschaftlichere Fertigung, sondern erschließen neue Möglichkeiten zur Herstellung von Faserverbundbauteilen.

LITERATUR

- [1] Kleineberg, M.; Formwerkzeuge in der Faserverbundtechnologie – Möglichkeiten und Risiken; Paper DLRK 2009; DLR Braunschweig; 2009
- [2] Ströhlein, T.; Faserverbundleichtbau und Design; VL; TU Berlin, DLR; 2008
- [3] Malzahn, S.; Integration von trapezförmigen Stringern zur Versteifung von Faserverbundrumpfschalen im Co-Bonding-Verfahren; DA; TU Berlin, DLR; 2010
- [4] Röthemeyer, Sommer; Kautschuktechnologie, Hanser-Verlag, 2006
- [5] Kleineberg M., Schradick M., Sperlich E.; ALCAS Centre Wing Box – Lower Cover Low Cost Resin Infusion Stringer Manufacturing; CEAS Conference, Berlin
- [6] Klautzsch M.; Intelligentes Tooling für die CFK-Produktion mittels thermischen Metallspritzen; Composites, München, Oktober 2007