

# FORMWERKZEUGE IN DER FASERVERBUNDTECHNOLOGIE, MÖGLICHKEITEN UND RISIKEN

M. Kleineberg, Martin Friedrich, Michael Kühn

DLR- Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik, Braunschweig,

## ZUSAMMENFASSUNG

Das Prinzip der Herstellung von Faserverbundbauteilen beruht auf der Füllung einer Kavität die durch starre Formwerkzeugelemente oder durch die Kombination von starren und flexiblen Formwerkzeugelementen gebildet wird. Bei Fertigungsansätzen mit allseitig starren Formwerkzeugen hat sich international der Begriffe „Resin Transfer Moulding“ (RTM) durchgesetzt. In Fachkreisen wird dieses Formwerkzeugkonzept auch als „Closed Mould“ Konzept bezeichnet. Im Fall der teilflexiblen Formwerkzeuge haben sich die Begriffe „Liquid Resin Infusion“ (LRI) und „Liquid Composite Moulding“ (LCM) durchgesetzt. Bezogen auf das Formwerkzeugkonzept spricht man hier von „Open Mould“ Konzepten. Beide Ansätze (Open und Closed Mould) führen zu unterschiedlichen Fertigungsszenarien mit jeweils spezifischen Möglichkeiten und Risiken, da im Fall des „Open Mould“ Fertigungsansatzes ein konstanter Faservolumengehalt bei variabler Geometrie und im Fall des „Closed Mould“ Fertigungsansatzes ein, von der Faserpreform abhängiger, variabler Faservolumengehalt bei konstanter Geometrie priorisiert wird.

Neben dem globalen Fertigungsansatz hat auch die Wahl des Formwerkzeugmaterials einen entscheidenden Einfluss auf das Fertigungsergebnis. Unter Beachtung von Kriterien wie: Standzeit, Abformungsgenauigkeit, Verfügbarkeit, Prozesssicherheit und nicht zuletzt Kosten lassen sich sehr gezielt Formwerkzeugkonzepte auf ein vorgegebenes Fertigungsszenario hin optimieren. Bei Nichtbeachtung oder falscher Einschätzung der oben genannten Kriterien kann andererseits ein ganzes Produktionskonzept in Gefahr geraten.

Über den globalen Fertigungsansatz und die Werkstoffauswahl hinausgehend kann das Formwerkzeugkonzept auch direkt zur Unterstützung des Fertigungsablaufes genutzt werden, indem z.B. die Infiltration einer Faserpreform unterstützt wird. Auch die geometrische Gestaltung des Formwerkzeuges als Positiv oder Negativ kann sich entscheidend auswirken. Zur Reduktion der Formwerkzeugkosten können darüber hinaus flexible oder modulare Strategien genutzt werden, mit denen sich Bauteilfamilien mit geringen Abweichungen effizient herstellen lassen. Die prozessbegleitende Überwachung der Durchtränkung, des Vernetzungsgrades der Formwerkzeugdichtigkeit und auch möglichst der Geometrie können ebenfalls zur Reduzierung von Fehlproduktionen und damit zur Verbesserung der Fertigungsbilanz beitragen.

## 1. OPEN UND CLOSED MOULD KONZEPTE

Das Prinzip der „Open Mould“ Fertigungsverfahren besteht darin, einseitige Basisformwerkzeuge zu nutzen.

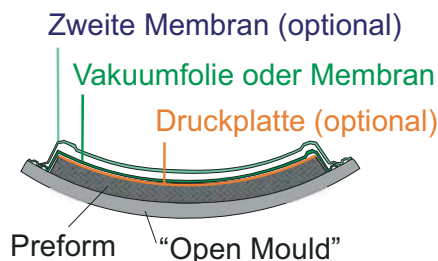


Bild 1: Skizze „Open Mould“ Ansatz

Das Gegenwerkzeug besteht aus einer Membran, die luftdicht mit dem Basisformwerkzeug verbunden wird. In die zwischen der Membran und dem Basisformwerkzeug entstehende, flexible Kavität wird der Fertigungsaufbau in Form einer trockenen Faserpreform oder eines Prepregaufbaus eingebracht. Die Ausdehnung einer trockenen Preform in Dickenrichtung (senkrecht zur Laminebene) bzw. deren Nachgiebigkeit und die dadurch bedingte Menge des eingebrachten Harzes

bestimmen die spätere Wandstärke des Bauteiles. Die Gefahren eines lokalen Überpressens und die Ausbildung von Harznestern sind bei „Open Mould“ Verfahren Prinzip bedingt geringer, da sich die Membran flexibel an den Fertigungsaufbau anpasst. Bei Prepreg Halbzeugen kann die Wandstärke des Bauteils durch ein gesteuertes „Ausbluten“ von Harz, (engl.: Bleeding) im Fertigungsprozess variiert werden. Die Einhaltung enger Toleranzen ist dagegen deutlich schwieriger umzusetzen, da die endgültige Wandstärke von den Parametern des Fertigungsprozesses und den Parametern der Halbzeuge (z.B. Harzviskosität) abhängig ist. Dies gilt in erster Linie für die membranseitige Bauteilkontur, da die basisformseitige Bauteilkontur auch bei „Open Mould“ Fertigungsverfahren durch ein starres Formwerkzeug bestimmt wird. Typische Anwendungen für „Open Mould“ Technologien liegen im Bereich großflächiger Schalenelemente, die vorzugsweise mit integrierten Stringerversteifungen hergestellt werden. Zur Erhöhung der Prozesssicherheit werden häufig zwei übereinander liegende Membranen genutzt, die mit getrennten Vakuumkreisläufen arbeiten. Selbst bei einer geringfügigen Undichtigkeit beider Membranen besteht so eine gute Chance eine Fehlproduktion zu vermeiden, da die eindringende Umgebungsluft in der Drainage zwischen den Membranen abgesaugt werden kann.

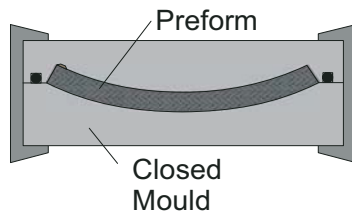


Bild 2: Skizze „Closed Mould“ Ansatz

„Closed Mould“ Formwerkzeuge werden überwiegend eingesetzt, um allseitig exakt definierte (engl.: netshaped) Bauteile mit hoher Oberflächengüte, engen Oberflächentoleranzen und dadurch bedingt geringem Nacharbeitungsaufwand herzustellen. Da die Kavität invariabel ist, wird der für die Bauteilqualität wichtige Faservolumengehalt durch die eingebrachte Faserpreform bzw. durch die Menge an eingebrachten Fasern bestimmt. Sowohl Bereiche mit Harzüberschuss (Harznester) als auch überpresste Bereiche mit einem Faservolumengehalt über 64% mindern die Qualität des Faserverbundbauteils und sollten daher vermieden werden. Die daraus resultierenden hohen Anforderungen an die aus zahlreichen Dicken- und Konturtoleranz behafteten Einzellagen aufgebaute Preform sind dementsprechend charakteristisch für „Closed Mould“ Verfahren. Die meist sehr massive Bauweise der Formwerkzeuge resultiert aus der für RTM-Verfahren typischen Druckinjektion, die für die Herstellung von Bauteilen mit hohem Faservolumengehalt (60%) und entsprechend hoch kompaktierten Faserpreformen zur Anwendung kommt. Die Herstellung von sehr großen, flächigen Bauteilen (>10 m<sup>2</sup>) ist aufgrund der überproportional ansteigenden Formwerkzeugkosten im Allgemeinen nicht wirtschaftlich.

Die Realisierung von membranseitigen, lokalen Funktionsflächen mit hohen Toleranzanforderungen ist auch mit „Open Mould“ Technologien durch den Einsatz von Formstücken möglich, bedingt aber einen nicht zu unterschätzenden Aufwand. Während bei „Closed Mould“ Verfahren insbesondere Schwankungen im „Spring-In“ Effekt Probleme bereiten, sind bei „Open Mould“ Verfahren besonders Variationen der Laminatdicke problematisch. Die Einhaltung von engen Dicktentoleranzen bei „Open Mould“ Verfahren wird häufig ebenfalls durch den Einsatz lokaler, massiver Formstücke oder Druckplatten sichergestellt.

## 2. FORMWERKZEUGMATERIALIEN

Die richtige Wahl des Formwerkzeugmaterials kann entscheidenden Einfluss auf die Qualität des Bauteiles und die Wirtschaftlichkeit des Gesamtprozesses haben. Zurzeit werden in der etablierten Prepregtechnologie und den aktuellen Harzinfusions- bzw. RTM-Verfahren Aluminiumformwerkzeuge, Faserverbundformwerkzeuge, Nickelgalvanoformwerkzeuge und Formwerkzeuge aus zum Teil dehnungskompatiblen Stahllegierungen (z.B. INVAR bzw. Ni36) eingesetzt. Bei den nur einseitig starr ausgeführten „Open Mould“ Formwerkzeugen wird die massive Formwerkzeughälfte durch eine flexible Membran auf Polymerbasis ergänzt. Die Wahl des Formwerkzeugmaterials ist von den geforderten Standzeiten, den einzuhaltenden Maßtoleranzen und der geforderten Dehnungskompatibilität abhängig und beeinflusst insbesondere bei kleinen Produktionslosen die

Kosteneffizienz der herzustellenden Bauteile.

### 2.1. Aluminium Formwerkzeuge

Aluminium wird häufig für integralgefräste „Open und Closed Mould“ Formwerkzeugkonzepte eingesetzt, mit denen eher kleine bis mittelgroße Bauteile mit erhöhtem Komplexitätsgrad und geringer Produktionsrate hergestellt werden. Integralgefräste Formwerkzeugelemente aus Aluminium werden häufig auch als Ergänzungswerkzeug oder Formstück eingesetzt, wenn lokal definierte Anforderungen an Oberflächenqualität oder Form- und Lagetoleranzen gestellt werden. Zum Teil werden auch bewusst Materialpaarungen mit unterschiedlichen Dehnungskoeffizienten (z.B. Stahl und Aluminium) eingesetzt, um gezielt thermische aktivierte Presskräfte (z.B. zum Ausformen exakter Radien) zu erzeugen.



Bild 3: Integralgefrästes Al-Formwerkzeug

#### Vorteil der Aluminium Formwerkzeuge

Integral gefräste Aluminiumwerkzeuge haben den Vorteil, dass sie im CAD-CAM Verfahren ohne große Vorlaufzeit „aus dem Vollen“ herausgearbeitet werden können und damit auch für sehr kurz angesetzte Entwicklungszeiten geeignet sind. Auch ein massiver Aluminiumblock mit größeren Abmaßen ist in der Beschaffung unkritisch. Ein weiterer Vorteil ist die, bei schonender Behandlung, akzeptable Standzeit (mehr als 1000 Abformungen) und die Möglichkeit der Reparatur (Schweißen, Löten). Eine hohe Reproduzierbarkeit der Abformung ist gegeben, wodurch prinzipiell auch enge Fertigungstoleranzen realisierbar sind, wenn das Formwerkzeug auf das Faserverbundbauteil abgestimmt ist. Abzustimmen ist insbesondere die Dehnungsdifferenz zwischen einem CFK-Bauteil und dem Aluminium Formwerkzeug. Die Material- und Bearbeitungskosten sind im Vergleich zu Stahl gering.

#### Nachteil der Aluminium Formwerkzeuge

Der Wärmeausdehnungskoeffizient von Aluminium ( $\alpha_{AL}=23,8 \cdot 10^{-6} \text{ 1/K}$ ) weicht stark von dem Ausdehnungskoeffizienten der CFK-Strukturen (z.B.  $\alpha_{CFK}=\text{ca. } 1,5 \cdot 10^{-6} \text{ 1/K}$ , abhängig vom Laminataufbau) ab, was in einem als Negativ konstruiertem Formwerkzeug zu einem Verkleben des Bauteiles beim Entformen oder

aber zu Maßabweichungen führen kann. Ebenfalls nachteilig wirkt sich bei vielen Anwendungen das zumeist hohe Gewicht integral geformter Werkzeuge aus, da dies zu Handhabungsproblemen und aufgrund der großen spezifischen Wärmekapazität (große thermische Masse) zu ausgedehnten Aufheiz- und Abkühlphasen führt. Bei unsachgemäßer Behandlung kann eine Aluminiumoberfläche im Gegensatz zu einer Stahloberfläche relativ schnell beschädigt werden. Vereinzelt wird auch von Problemen mit der Maßhaltigkeit von Aluminiumformwerkzeugen bei 180°C Zyklen berichtet.

## 2.2. Faserverbund-Formwerkzeuge

Formwerkzeuge aus Faserverbundmaterialien werden bevorzugt für „Open Mould“ Konzepte und mittlere sowie große Bauteile mit erhöhtem geometrischen Komplexitätsgrad (Leitwerksschalen, Bootsrümpfe) eingesetzt. Die Herstellung erfolgt durch die Abformung eines Urmodells, welches in der Kostenkalkulation und beim Toleranzmanagement zu berücksichtigen ist. Üblich ist, bei Formwerkzeugen im Bereich des kommerziellen Großflugzeugbaus, der Einsatz von speziellen Prepreg-Halbzeugen, die eine besonders niedrige Gellertemperatur (ca. 80°C) aufweisen. Auf diese Weise können die Kosten für das Urmodell niedrig gehalten werden. Die später benötigte Wärmeformbeständigkeit des Formwerkzeuges von mindestens 180°C bei Primärbauteilen wird durch einen nachgeschalteten Temperzyklus sichergestellt.



Bild 4: CFK-Formwerkzeug

### Vorteil der Faserverbund-Formwerkzeuge

Faserverbund-Formwerkzeuge sind im Vergleich zu Metallformwerkzeugen sehr leicht und verfügen über eine sehr geringe Wärmekapazität. Dieser Vorteil äußert sich aufgrund kurzer Aufheiz- und Abkühlzeiten in kurzen Autoklav-Zykluszeiten und vereinfacht die Handhabung des Formwerkzeugs. Positiv ist darüber hinaus der auf die zu fertigenden Bauteile abstimmbare Wärmeausdehnungskoeffizient. Die Kosten für Faserverbund-Formwerkzeuge fallen im Vergleich zu integral geformten Aluminiumwerkzeugen im Allgemeinen geringer aus.

### Nachteil der Faserverbund-Formwerkzeuge

Nachteilig wirkt sich bei Faserverbund-Formwerkzeugen die im Vergleich zu Metall-Formwerkzeugen geringere Standzeit aus (ca. 50-300 Abformungen), da mit zunehmender Alterung auch mit einer steigenden Porosität im Formwerkzeug zu rechnen ist und der Oberflächenverschleiß beim Entformen zunimmt. Reparaturen sind oft nur mit hohem Aufwand möglich, da die Vakuumdichtigkeit wieder hergestellt werden muss. Die Herstellung von Faserverbund-Formwerkzeugen erfolgt überwiegend durch die Abformung eines Urmodells, welches, in Abhängigkeit zur geforderten Wärmeformbeständigkeit, weitere Kosten erzeugt. Da beim Abformungsprozess vielfach Urmodelle aus gefülltem Kunststoff eingesetzt werden (Ureol, Cibatool etc.), sind auch bei den niedrigen Abformtemperaturen Dehnungsinkompatibilitäten zu berücksichtigen. Durch „Spring In“ Effekte und das Tempern des Faserverbund-Formwerkzeuges entstehen weitere Formabweichungen, die beim Toleranzmanagement nicht zu vernachlässigen sind. Im Gegensatz zu metallischen Formwerkzeugen lassen sich Faserverbund-Formwerkzeuge nicht ohne weiteres maschinell nacharbeiten, da bei einem Eingriff in die Faserarchitektur innere Spannungen frei werden, die wiederum zu einem kaum vorhersagbaren Verformungsverhalten führen.

### Forschungsaktivitäten im Bereich der Faserverbund-Formwerkzeuge

Neben Ansätzen zur Reduktion der Kosten durch die Nutzung von Harzinfusionsverfahren und neuartigen Halbzeugen auf Basis geschnittener Faserpatches ist besonders die Beschichtung von Faserverbund-Formwerkzeugen mit metallischen Verschleißschichten erwähnenswert. Untersuchungen haben hier gezeigt, dass bei Ni36 beschichteten Formwerkzeugen aus CFK eine Kostenreduktion um ca. 60% möglich ist.

## 2.3. Nickel-Galvano-Formwerkzeuge

Ein weniger bekanntes Verfahren zur Herstellung von metallischen Formwerkzeugen (überwiegend „Open Mould“ Konzepte) ist das Nickel-Galvano-Verfahren, bei dem eine spezielle Nickellegierung elektrochemisch auf einer metallisierten Urform abgeschieden wird. Der Vorgang findet bei moderaten Temperaturen (60-70°C) in einer Elektrolytlösung statt. Da das Abscheiden der Metallschichten auf der Urform spannungsfrei erfolgt, ist auch das Nickel-Formwerkzeug nach dem Entformen spannungsfrei und somit formtreu. Die Genauigkeit der Abformung liegt im Mikrometerbereich. Die Oberflächenhärte ist mit der einer Stahloberfläche vergleichbar. Die typische Wandstärke eines Nickel-Galvano-Formwerkzeuges liegt bei ca. 3-6 mm. Etwaige Unterschiede in der Wandstärke resultieren aus einer ungleichmäßigen Feldstärkenverteilung bei der Abscheidung des Nickels. Bei hoher Feldstärke ist die Abscheidungsrate groß und bei niedriger Feldstärke klein. Bei kritischen Geometrien kann die Feldstärke lokal sogar so gering sein, dass eine Abscheidung stabiler Nickelschichten nicht mehr möglich ist. Hier ist die Erfahrung des Formwerkzeugherstellers gefragt, der über spezielle Elektroden und Abschirmungen ein gleichmäßiges Abscheiden sicherstellen muss. Bei der



mechanischen Bearbeitung von Nickellegierungen sind besondere Vorsichtsmaßnahmen zu treffen, da eine gesundheitliche Gefährdung durch Allergien und die Toxizität des Nickelstaubes nicht ausgeschlossen werden kann.



Bild 5: Nickel-Galvano-Formwerkzeug

#### Vorteil der Nickel-Galvano-Formwerkzeuge

Nickel-Galvanowerkzeuge zeichnen sich durch höchste Oberflächengüte und lange Standzeiten aus. Die elektrochemisch abgeschiedenen Metallschalenwerkzeuge weisen außerdem ein geringes Gewicht auf, da keine Materialanhäufungen wie bei integral gefrästen Werkzeugen entstehen. In Folge der geringen Massenansammlung können die Aufheiz- und Abkühlzeiten kurz gehalten werden, was sich wiederum positiv auf die Zykluszeiten auswirkt. Bewährt haben sich Nickel-Galvano-Formwerkzeuge auch in Anwendungen, bei denen höchste Präzision benötigt wird, da die Möglichkeit besteht, die Werkzeuge über spezielle Einstellschrauben zwischen Rahmen und Formschale nachjustieren. Nickel-Galvanowerkzeuge lassen sich löten und schweißen und sind somit gegebenenfalls zu reparieren bzw. zu modifizieren.

#### Nachteil der Nickel-Galvano-Formwerkzeug

Der größte Nachteil von Nickel-Galvanowerkzeugen liegt im Preis und der langwierigen Herstellung. Da der Abscheidungsprozess nur sehr langsam abläuft, muss mit einer Herstellungszeit von 1 bis 3 Monaten gerechnet werden, um eine tragfähige Wandstärke zu erreichen. Der Wärmeausdehnungskoeffizient liegt mit  $\alpha_{\text{Ni}} = 13 \cdot 10^{-6} \text{ 1/K}$  (Nickel) in der Größenordnung von Stahl und ist somit akzeptabel aber nicht optimal. Auch bei der Kalkulation von Nickel-Galvano-Formwerkzeugen muss die Herstellung der Urform und deren Metallisierung (meist Versilbern) berücksichtigt werden.

## 2.4. Stahl-Formwerkzeuge

Durch die große Vielfalt der verfügbaren Stahllegierungen lassen sich Formwerkzeuge mit besonderen Eigenschaften realisieren. Im kommerziellen Großflugzeugbau werden Stahl-Formwerkzeuge aus Gründen der thermischen Dehnungskompatibilität zumeist

aus Ni36 Stahlplatten zusammengeschweißt und anschließend im Abformbereich überarbeitet oder aber „aus dem Vollen“ herausgearbeitet. Da die Schweißnähte zum Teil auch im Abformbereich liegen, müssen sie hohe Anforderungen an die Vakuumdichtigkeit erfüllen. Die guten Erfahrungen mit der Standzeit und der Maßhaltigkeit von Ni36 Werkzeugen im Serieneinsatz führen dazu, dass der Einsatz dieser Formwerkzeuge stetig steigt. Formwerkzeuge aus normalem, nicht dehnungskompatiblen Stahl sind im Bereich der „Open Mould“ Konzepte eher auf den Forschungs- und Entwicklungsbereich begrenzt. Bei „Closed Mould“ Konzepten sind Stahlwerkzeuge aus konventionellem Baustahl relativ weit verbreitet, da sie sich bei verschleißkritischen Produktionen als standfeste Alternative zu Aluminiumformwerkzeugen anbieten.

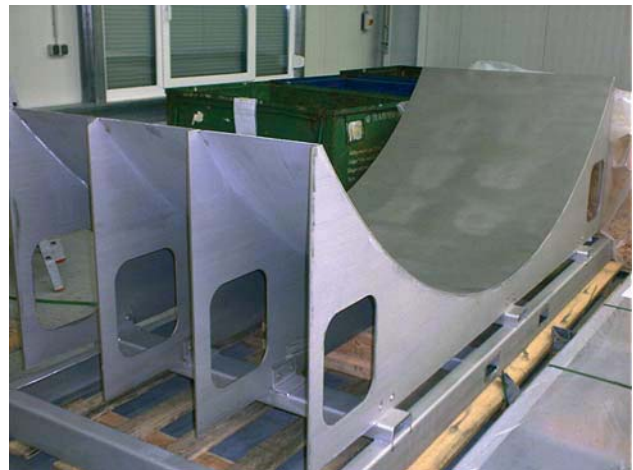


Bild 6: Schalenwerkzeug aus Edelstahl

#### Vorteile der Stahl-Formwerkzeuge

Aufgrund der guten Schweißbarkeit sind auch sehr große Formwerkzeuge problemlos zu realisieren. Die Stahl-Formwerkzeuge selbst weisen dabei eine sehr hohe Verschleißfestigkeit auf und halten zumeist eine gesamte Produktionsserie (ca. 10.000 Abformungen). Die für Ni36 Stahl geltende Dehnungskompatibilität zum Faserverbundbauteil wirkt sich entscheidend auf die Bauteilqualität und Maßhaltigkeit aus und ist damit der Hauptgrund für den Erfolg dieses Formwerkzeugmaterials.

#### Nachteil der Stahl Formwerkzeuge

Die langen Lieferzeiten für Ni36 Rohmaterialien (bis zu 6 Monate), der aufgrund der stark variierenden Nachfrage extrem schwankende Preis von 15-35 €/kg und die schwierige Bearbeitbarkeit des zähen Ni36 Stahls machen die Formwerkzeuge entsprechend teuer. Darüber hinaus ist auch bei den geschweißten Formwerkzeugen das Massenverhältnis von Formwerkzeug zu Bauteil üblicherweise 50:1 und höher, was bei der energetischen Prozessbilanzierung zu berücksichtigen ist. Die Dichtigkeit der Schweißnähte ist sehr von der Erfahrung der ausführenden Personen abhängig und damit eine potentielle Schwachstelle insbesondere für Vakuumleckagen. Bei unsachgemäßer Lagerung von Ni36 Formwerkzeugen besteht Korrosionsgefahr.

## Forschungsaktivitäten im Bereich der Stahl-Formwerkzeuge

Ferromagnetische Stahllegierungen bieten die Möglichkeit einer höchst effizienten induktiven Erwärmung, die sich zur Verkürzung von Aufheizphasen nutzen lässt. Darüber hinaus gibt es Ansätze zur Reduktion der Kosten für Ni36 Formwerkzeuge durch die Nutzung von gänzlich metallgespritzten Formwerkzeugen.

### 2.5. Einweg-Formwerkzeugmembrane

Für die vakuumdichte Abdeckung des Formwerkzeuges bei „Open Mould“ Konzepten werden hauptsächlich dünne Polyamidfolien verwendet, die über ein Elastomer-Dichtband mit dem Formwerkzeug verbunden werden.



Bild 7: Gesiegelte Einweg-Vakuumfolie

Nach dem manuellen Aufbringen des Dichtbandes am Rand der Vakuumfolie wird die Abdeckung manuell über dem 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. Durch die Membran kann ein zum Beispiel im Autoklaven aufgebracht Überdruck zur Kompaktierung des Laminates genutzt werden.

#### Vorteil Einweg-Formwerkzeugmembrane

Vorteilhaft ist bei den Einweg Formwerkzeugmembranen, dass auch eine begrenzte Standzeit unter Prozessbedingungen für die erforderliche Prozesssicherheit ausreichend ist. Zusätzlich entfallen Reinigungsarbeiten, und die sehr dünne Membran (0,1-0,2 mm) passt sich sehr flexibel jeder Kontur an

#### Nachteil Einweg-Formwerkzeugmembranen

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.

## Forschungsaktivitäten im Bereich Einweg Formwerkzeugmembranen

Derzeit gibt es Untersuchungen, die Nachteile der Vakuumfolie durch ein automatisiertes und damit reproduzierbares Aufbringen zu minimieren.

### 2.6. Wiederverwendbare Formwerkzeugmembrane

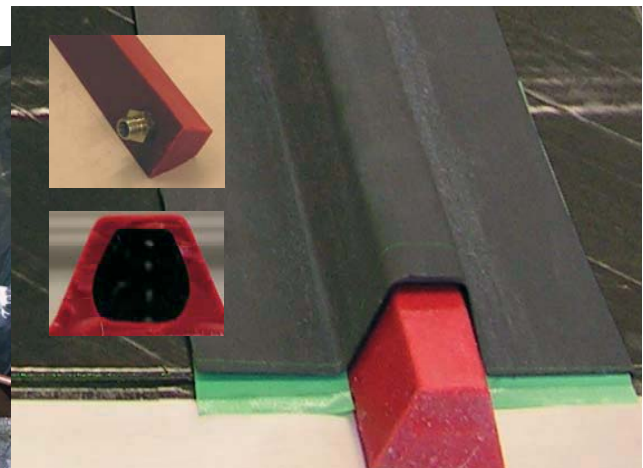


Bild 8: Mehrweg-Elastomer-Formwerkzeugelemente

Der Einsatz von Elastomer-Vakuummembranen auf Silikon- oder Kautschukbasis wurde im Bereich der konventionellen Prepregverarbeitung bereits für diverse Fertigungsvorhaben serientechnisch umgesetzt. Die Abdichtung der Elastomer-Vakuummembranen erfolgt üblicherweise über spezielle, formschlüssige Randprofile an der Membran. Zum Schutz der Membran vor den aggressiven Harzsystemen und zur Verbesserung der Trennwirkung kann auf der Innenseite eine dünne Teflonfolie aufgebracht werden. Für Kautschuk basierte Membranen ist diese Trennfolie zwingend erforderlich, da Kautschuk im Gegensatz zu Silikon keine selbsttrennenden Eigenschaften besitzen.

#### Vorteil wiederverwendbarer Formwerkzeugmembrane

Vorteilhaft ist insbesondere die relativ einfache Automatisierbarkeit der Membranaufbringung, da die geometrisch vorgeformte Membran mit einfachen kinematischen Aktionen aufgebracht und abgedichtet werden kann. Auch der reduzierte Abfall und die höhere Widerstandsfähigkeit gegenüber äußeren Einflüssen sind als Vorteil herauszustellen.

#### Nachteil wiederverwendbarer Formwerkzeugmembrane

Probleme mit hohen Kosten, niedrigen Standzeiten und insbesondere mit verstärktem Schrumpfen bei zyklischer Temperierung stellen die Wirtschaftlichkeit der Elastomer-

Vakuummembranen häufig in Frage. In der Nasstechnologie stellen die gegenüber Silikon sehr aggressiven Harzsysteme ein weiteres bisher nur unzureichend gelöstes Problem dar. Bei Silikon-Membranen besteht darüber hinaus eine potentielle Gefahr durch das Ausgasen von Silikonölen, die insbesondere bei trockenen Faserhalbzeugen, wie sie im Bereich der Harzinfusionsverfahren eingesetzt werden, nicht zu unterschätzen ist. Hier können die Ausgasungen zu einer Verschlechterung der Werkstoffeigenschaften führen, da sich die Silikonöle direkt auf der Faser ablagern und so die Anbindung der Matrix nachhaltig verschlechtern. Auch die bei Hochtemperatur-epoxidharzen zumeist geringe Standzeit (je nach Anwendung 5-20 Zyklen) der teuren Elastomermembranen steht einem verstärkten Einsatz in der Serienfertigung entgegen. Silikon und Teflon gelten außerdem als kritisch für Anwendungen, bei denen eine Lackierung oder Verklebung vorgesehen ist, da nach dem Entfernen der Elemente störende, trennmittelartige Rückstände auf der Bauteiloberfläche zurückbleiben können.

Forschungsaktivitäten im Bereich wiederverwendbare Formwerkzeugmembranen

Die Aktivitäten in der Forschung konzentrieren sich auf die Entwicklung und Erprobung neuer Elastomer-Materialien mit prozesskompatiblen Eigenschaften, höherer Standzeit und gleichzeitig geringeren Kosten.

### 3. FUNKTIONSDIAGRAMM

Zur Unterstützung des Fertigungsprozesses haben sich diverse Detaillösungen im Bereich der Formwerkzeuge etabliert. Neben der geometrischen Gestaltung können weitere Maßnahmen ergriffen werden, die insbesondere die Reproduzierbarkeit der Produktion verbessern.

#### 3.1. Formwerkzeug Positiv

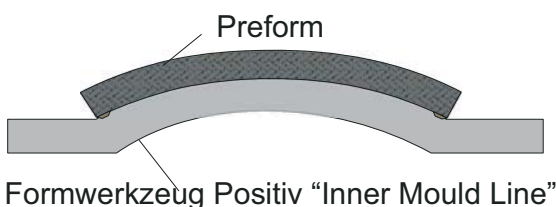


Bild 9: Prinzip Formwerkzeug Positiv

Die Priorisierung bei diesem Formwerkzeugansatz liegt in der exakten Abformung der Innenseite eines Bauteiles. Bei Leichtbauschalen ist dies typischerweise die funktionelle Seite ("Inner Mould Line"), an der weitere Elemente wie z.B. Stringer oder Spante montiert werden.

Vorteil Formwerkzeug Positiv

Das Ablegen auf einem Formwerkzeug Positiv ist einfacher, da die Zugänglichkeit von allen Seiten besser ist. Darüber hinaus ist eine präzise Abformung der funktionellen Innenseite für die nachfolgenden Montageschritte von Vorteil, da Passungsprobleme vermieden werden. Auch die Vermeidung von Harznestern im Bereich von Kanten ist bei einem Formwerkzeug

Positiv einfacher.

Nachteil Formwerkzeug Positiv

Bei einem Formwerkzeug Positiv wird die Faserpreform im Fertigungsprozess gestaucht, wodurch sich in den membranseitigen Faserlagen Falten und Ondulationen bilden können. Die geringere Abformpräzision auf der formwerkzeugabgewandten Seite kann sich z.B. negativ auf die aerodynamische Güte einer Bauteiloberfläche auswirken. Bei der Abformung von Kanten besteht die Gefahr einer Überpressung des Laminates mit entsprechend unzulässig hohen Faservolumengehalten.

#### 3.2. Formwerkzeug Negativ

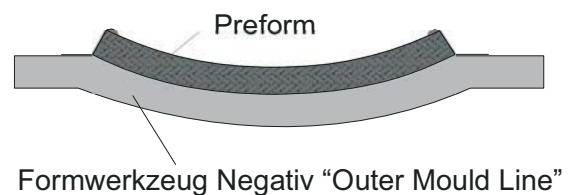


Bild 10: Prinzip Formwerkzeug Negativ

Die Priorität bei diesem Formwerkzeugkonzept liegt auf einer exakten Abformung der Bauteilaußenseite ("Outer Mould Line"). Bei Leichtbauschalen ist dies die aerodynamisch geprägte Bauteilseite.

Vorteil Formwerkzeug Negativ

Während des Fertigungsprozesses wird die Faserpreform gestreckt und damit die Gefahr von Ondulationen verringert. Die Güte der Abformung entspricht bei optimaler Prozessierung der Güte des Formwerkzeuges und erfüllt damit höchste Anforderungen.

Nachteil Formwerkzeug Negativ

Beim Drapieren von Faserlagen in ein Formwerkzeug Negativ kann die beschränkte Zugänglichkeit problematisch sein. Bei der Abformung von Kanten kann es zu Harzanreicherungen (Harznestern) kommen. Da es schwierig ist die Faserlagen in eine Hohlkehle zu drapieren. Bei Leichtbauschalen können aufgrund der geringeren Maßhaltigkeit der membranseitigen Bauteilseite Montageprobleme entstehen.

#### 3.3. Fließhilfe

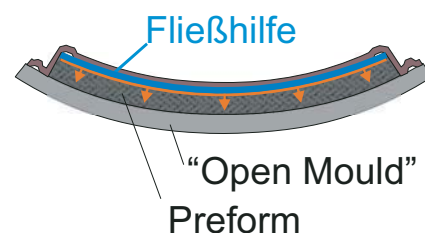


Bild 11: Prinzip der Fließhilfe



Die Fließhilfe dient in einem Infusionsprozess dazu, das Harz über die Bauteilfläche zu verteilen und damit die Infusionszeit zu verkürzen oder aber den Einsatz von höherviskosen Harzen zu ermöglichen. Die Fließhilfe besteht zumeist aus einem groben, textilen Gewirk mit hoher Permeabilität welches auf der formwerkzeugabgewandten Seite auf dem Fertigungsaufbau platziert wird. Es besteht auch die Möglichkeit, die Formwerkzeugoberfläche durch das Einfügen von Rillenmustern im Sinne einer Fließhilfe zu gestalten

#### Vorteil Fließhilfe

Die Fließhilfe ist eine sehr einfache und kostengünstige Methode den Infusionsprozess zu beschleunigen und Bauteile mit sehr großer Ausdehnung zu fertigen.

#### Nachteil Fließhilfe

Zur Vermeidung von Gaseinschlüssen welche die Bauteilqualität erheblich mindern ist es vorteilhaft die Fließfronten gezielt zu steuern. Beim Einsatz einer Fließhilfe wird das Harz sehr schnell über die Bauteilfläche verteilt und durchtränkt dann das Bauteil in Dickenrichtung. Eine Steuerung der Fließfront ist damit deutlich schwieriger und die potentielle Gefahr von Gaseinschlüssen größer. Die Fließhilfe verursacht außerdem eine im Vergleich zur normalen, starren Formwerkzeughälfte deutlich reduzierte Oberflächenqualität mit einer leichten Welligkeit. Der Einsatz einer Druckplatte zur Verbesserung der Oberflächengüte ist nur bedingt mit einer Fließhilfe kombinierbar. Bei komplexen Oberflächen z.B. mit integrierter Stringerverstärkung ist das Aufbringen einer Fließhilfe mit erhöhtem Aufwand verbunden. Auch das entfernen der Fließhilfe nach der Aushärtung des Bauteiles kann mit erheblichem Aufwand verbunden sein. Das in der entfernten Fließhilfe verbleibende Harz wirkt sich darüber hinaus bei hochwertigen Matrixsystemen negativ auf die wiederkehrenden Kosten (engl.: Recuring Costs) aus.

### 3.4. Überdruck

Die Nutzung eines Überdruckes bei der Herstellung von Faserverbundbauteilen ist sowohl bei „Open Mould“ als auch bei „Closed Mould“ Fertigungskonzepten möglich.

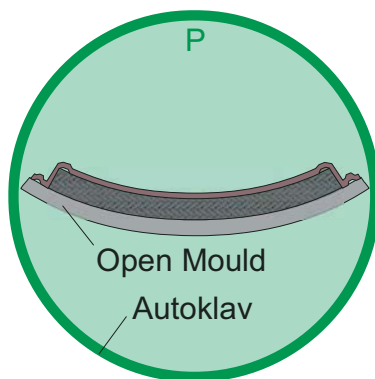


Bild 12: Überdruck im Autoklaven

#### Vorteil Überdruck „Open Mould“

Die Einhaltung eines Faservolumengehalts von 60% ist bei sehr offen gefertigten Faserhalbzeugen mit hoher Rückfederung nur durch die Aufbringung einer entsprechenden Pressung z.B. im Autoklaven möglich. Qualitätsmindernde Gasblasen werden dabei auf den Brauchteil ihres Volumens reduziert. Zusätzlich können unter Druck stehende Harze größere Mengen an Gas absorbieren. Der Infusionsprozess selbst wird durch die höhere aktiv treibende Druckdifferenz begünstigt.

#### Nachteil Überdruck „Open Mould“

Typisches Problem des Überdruckes bei „Open Mould“ Prozessen ist die erhöhte Belastung der Vakuummembran mit einer entsprechend erhöhten Perforationsgefahr bei unsachgemäß aufgebracht bzw. nicht am Fertigungsaufbau anliegenden Membranen. Durch die Komprimierung des noch nicht durchtränkten Teils der Preform wird dessen Permeabilität reduziert was eine Durchtränkung erschwert.

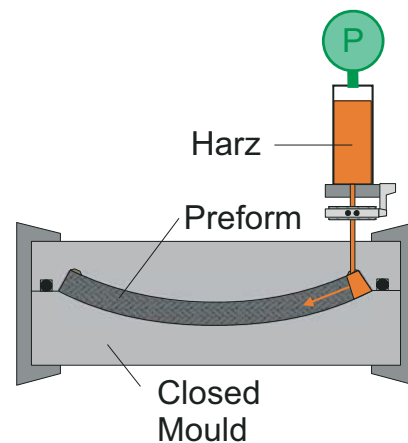


Bild13: Überdruck im RTM

#### Vorteil Überdruck „Closed Mould“

Vorteilhaft ist hier, dass es bei einer konstanten Kavität zu keiner Verringerung der Halbzeugpermeabilität kommt. Die Vorteile zur Reduktion von Gaseinschlüssen sind vergleichbar zum „Open Mould“ Ansatz.

#### Nachteil Überdruck „Closed Mould“

Potentiell besteht die Gefahr, dass die Preform durch den Infusionsdruck in der Kavität verschoben wird, da sie nicht mit einer äquivalenten flächigen Kraft in ihrer Position gehalten wird wie beim „Open Mould“ Ansatz. Die Auslegung des Formwerkzeuges gegen den Innendruck führt zu sehr massiven Konstruktionen mit entsprechenden Problemen bei der Temperierung und der Handhabung.

### 3.5. Modulare Sekundärformwerkzeuge

Bei modularen Formwerkzeugen wird ein Basisformwerkzeug mit Sekundärformwerkzeugelementen kombiniert. Die strukturelle Auslegung, die

Temperierung und das Dichtungskonzept werden zumeist im Basisformwerkzeug integriert, während die passiven Sekundärelemente den Abformbereich bilden. Wenn möglich wird das Angusskonzept mit den Trennebenen der einzelnen Formmodule kombiniert da dies die Reinigung vereinfacht.

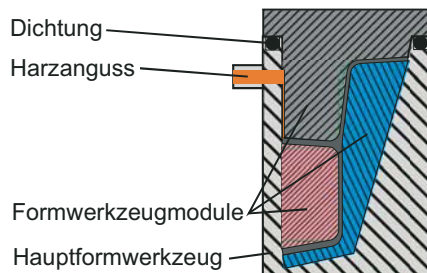


Bild14: Modulares Formwerkzeugkonzept

Vorteil modularer Formwerkzeugkonzepte

Der größte Vorteil ist die Möglichkeit der Bildung von Bauteilfamilien mit geringen Abweichungen, die sich mit vertretbarem Investitionsaufwand herstellen lassen. Die kostengünstigen passiven Formmodule werden entsprechend passend zu den Varianten der Bauteilfamilie angefertigt. Änderungen der Konstruktion können so schnell in die Produktion übernommen werden und es können Verschleißteile im Abformbereich kostengünstig ausgetauscht werden.

Nachteil modularer Formwerkzeugkonzepte

Neben dem erhöhten logistischen Aufwand und der Gefahr von fehlerhaft eingelegten Formmodulen ist besonders die Problematik des unkontrolliert voreilenden Harzes an den inneren Grenzflächen zu beachten, da geringe Spalte zwischen den einzelnen Elementen nicht zu vermeiden sind. Auch der Reinigungsaufwand kann mit der vergrößerten, harzbenetzten Fläche erheblich steigen.

### 3.6. Formvariable Formwerkzeuge

Bei sehr großen Faserverbundbauteilen lassen sich durch die mechanische Deformation von „Open Mould“ Formwerkzeugen Bauteilfamilien auf einer einzigen Vorrichtung realisieren. Die Deformation kann z.B. über Aktuatoren oder einfache Stellglieder erfolgen.



Bild 15: Formvariables Stringerformwerkzeug

Vorteil formvariabler Formwerkzeuge

Durch die Reduktion der Anzahl der Formwerkzeuge können erhebliche Kosteneinsparungen erzielt werden. Zusätzlich vereinfacht sich der Logistikaufwand und es können Konstruktionsänderungen flexibel abgefangen werden.

Nachteil formvariabler Formwerkzeuge

Bei mehrfach gekrümmten Schalenelementen erhöhen sich die Verformungskräfte stark, was wiederum zur Problematik der Krafteinleitung führt. Aufgrund einer endlichen Anzahl von Stellgliedern ist auch die Abformpräzision eingeschränkt. Je nach Ausführung der Fertigungsstrategie müssen die Stellglieder für Autoklavbedingungen ausgelegt werden.

### 3.7. Prozessbegleitende Qualitätssicherung

Zur Sicherstellung der Qualität eines Bauteiles ist es sinnvoll schon währen der Produktion alle qualitätsrelevanten Prozessparameter zu erfassen. Neben den Parametern die für die chemische Vernetzung relevant sind gibt es Parameter die den Durchtränkungsvorgang charakterisieren und Parameter die in direktem Zusammenhang mit der Bauteilgeometrie (insbesondere Bauteildicke) stehen.

Die chemische Vernetzung wird wesentlich durch die Temperatur beeinflusst. Zur Messung werden überwiegend konventionelle Thermoelemente und vereinzelt auch Pyrometer eingesetzt, die an verschiedenen Stellen in das Formwerkzeug integriert werden. Auch eine ganzheitliche Betrachtung der Infrarotsignatur des Formwerkzeuges kann aufschlussreich sein.

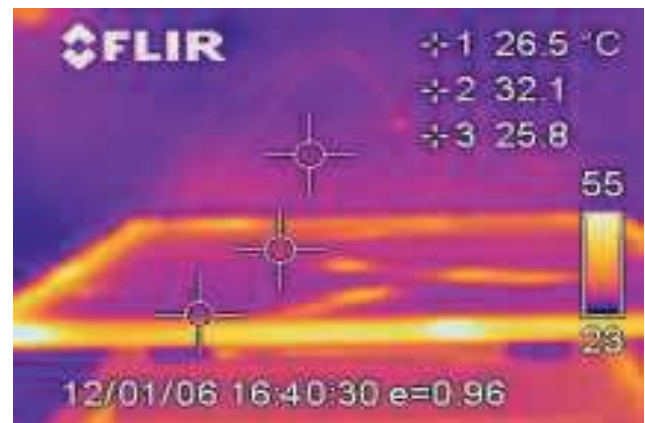


Bild 16: Infrarotsignatur eines Fertigungsaufbaus

Zur Analyse der Fließfrontausbreitung können im Formwerkzeug verteilte Sensoren eingesetzt werden, die Änderungen der Dielektrizität oder der Leitfähigkeit analysieren. Die gleichen Sensoren lassen sich auch zu Analyse des Vernetzungsgrades nutzen. Auch eine direkte, optische Analyse des Durchtränkungsprozesses kann zur Qualitätssicherung genutzt werden.

Zur Messung der variablen Bauteildicke bei „Open Mould“



Prozessen sind derzeit formwerkzeugintegrierte Ultraschallsensoren in der Entwicklung. In Kombination mit einer präzisen Injektionsdrucksteuerung können so auch dickwandige Bauteile mit hoher Präzision hergestellt werden. Auch hier kann parallel zur Dickenmessung der Vernetzungsgrad aufgezeichnet werden.

#### 4. RESÜMEE

Die Vielzahl der Variationsmöglichkeiten im Bereich der Formwerkzeuge können nur dann vorteilhaft genutzt werden, wenn das Einsatzszenario zuvor genau analysiert wird. Neben der geforderten Bauteilpräzision sind insbesondere die Kosten und die damit eng verbundenen geplanten Stückzahlen zu beachten. Sehr stark unterscheiden sich extrem kostensensitive Formwerkzeugkonzepte für einzelne Prototypen und Konzepte für eine Serienproduktion, bei denen man die Formwerkzeugkosten auf eine Vielzahl von Bauteilen umlegen kann. Generell lässt sich sagen, dass sich ein erfolgreiches Formwerkzeugkonzept oft durch die Kombination innovativer Ideen und fundierter Erfahrungen auszeichnet.

Besonders auf der Materialebene lassen sich durch die Kombination von verschiedenen Metall- und Elastomerwerkstoffen gezielt Effekte zur Verbesserung des Infusionsprozesses generieren. Zusätzlich lassen sich diese hybriden Ansätze mit modularen oder formvariablen Formwerkzeugkonzepten kombinieren, wodurch ein weites Spektrum an Anwendungen abgedeckt werden kann.

Wenn zusätzlich alle qualitätsrelevanten Prozessparameter während der Produktion überwacht werden, kann ein weiterer wichtiger Schritt in Richtung einer industrialisierten Produktion gemacht werden. Die dazu notwendigen Sensoren sind zum Teil bereits Stand der Technik. Andere Sensoren, wie die prozessintegrierte Bauteildickenmessung sind derzeit in der Entwicklung und in Kürze verfügbar.

#### LITERATUR

[1] Brosinger A.; Zu CFK-Produktionsformen aus Faserverbunden mit Oberflächen-schutz aus thermisch gespritzter Metallschicht; Dissertation, TU Braunschweig, 2007

[2] Guichard; the Cage System® for RTM; 5th International Symposium - Composites RTM, Saint-Avold, Februar 2007

[3] Klautzsch M.; Intelligentes Tooling für die CFK-Produktion mittels thermischen Metallspritzen; Composites, München, Oktober 2007

[4] Dressler G. u.a.; Grenzen der Manufaktur überschreiten- Halbzeit im Verbundprojekt PRO-CFK. Am Beispiel 'AutomatisierterVakuumaufbau' und 'Effects of Defects / Korrekturmanagement', DGLR, Friedrichshafen, September 2005

[5] Podkorytov M.Meyer. M, Herbeck L.; Produktion von Faserverbunden mittels Mikrowellenerwärmung; DGLR, Berlin 2007

[6] S. Pansart, A Comprehensive Explanation of Compression Strength Differences between Composite Materials made from Non-crimp Fabric and from Prepreg, using a Novel Micro-meso-mechanical Model, Dissertation, Magdeburg 2007

[7] Herrmann A. S., Pabsch A., Kleineberg M.; Kostengünstige Faserverbundstrukturen eine Frage neuer Produktionsansätze; 3rd international AVK-TV Congress, Baden Baden, September 2000

[8] Herrmann A. S, Pabsch A., Kleineberg M., SLI-RTM Fairings For Fairchild Dornier DO 328 JET; Sampe Europe Conference, Paris, 2001

[9] Herrmann A.S., Friedrich M., Eberth U.; AUTO-RTM – Concept for a high-automated process chain for the production of RTM-compound-components in large series ISCM 2006, ISCM Conference, Marknesse, Netherlands, Mai 2006

[10] Kleineberg M., Schradick M., Sperlich E.; ALCAS Centre Wing Box – Lower Cover Low Cost Resin Infusion Stringer Manufacturing; CEAS Conference, Berlin,