

VAKUUMKONSOLIDIERUNG UND HEIßPRESSTECHNIK – VERGLEICH DER OPTIMIERUNG DER FERTIGUNGSTECHNOLOGIE AM BEISPIEL VON CF-PEEK

R. Keck, M. Horn, M. Kaden,
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V., Pfaffenwaldring 38-40, 70563 Stuttgart,
Deutschland

Abstract

Bei der Fertigung von Passagierflugzeugen nimmt der Anteil großflächiger, aus Faserverbundwerkstoffen hergestellter Strukturbauteile stetig zu. Auch wenn diese derzeit und in der nahen Zukunft vornehmlich unter Zuhilfenahme duromerer Matrixwerkstoffe gefertigt werden, so ist langfristig betrachtet der Einsatz von Hochleistungsthermoplasten in diesem Bereich sehr wahrscheinlich. Da die momentan verwendeten Herstellverfahren für Großbauteile allerdings nur bedingt auf die Anforderungen der thermoplastischen Werkstoffe übertragbar sind, müssen hier alternative Fertigungsverfahren entwickelt und etabliert werden. Einen Ansatz hierzu bietet das autoklavlos arbeitende Vakuumkonsolidierungsverfahren VCT, welches am DLR Institut für Bauweisen- und Konstruktionsforschung entwickelt wurde [1].

Analog zu den bereits eingeführten, vakuumbasierten Infiltrationsverfahren für Duroplaste bietet es die Möglichkeit der kostengünstigen Herstellung großflächiger Bauteile. Da dieses Verfahren nur bedingt mit den für Thermoplaste etablierten Autoklav- und Pressprozessen vergleichbar ist, sollen Vergleichsmessungen als Bindeglied zwischen den unterschiedlichen Fertigungsstrategien die notwendige Transparenz für den Anwender schaffen. Als Material kommt hierbei, beispielhaft für bereits im Flugzeugbau eingesetzte Werkstoffe, unidirektional verstärktes CF-PEEK zum Einsatz [2,3], welches durch seine notwendigen Prozesstemperaturen für jedes Fertigungsverfahren eine Herausforderung bedeutet.

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich dabei nicht nur mit dem Vergleich der erzielten Festigkeitswerte, sondern beleuchtet auch die Vor- und Nachteile der jeweiligen Fertigungsverfahren und gibt einen Ausblick auf Möglichkeiten zu weiteren Prozessoptimierungen unter Berücksichtigung der Anforderungen der Flugzeughersteller.

1. VAKUUMKONSOLIDIERUNG

Grundlage der autoklavlosen Prozesskette ist das am Institut für Bauweisen- und Konstruktionsforschung entwickelte Vakuumkonsolidierungsverfahren auf einem beheizten Vakuumtisch [4]. Im Gegensatz zu den herkömmlichen Verfahren zur Herstellung von Thermoplastbauteilen ist hierbei der Atmosphärendruck ausreichend um hochwertige, d.h. porenfreie und vollständig konsolidierte, Lamine herstellen zu können. Die Konsolidierung wird in der Regel auf einem beheizbaren Vakuumtisch, wie in BILD 1 dargestellt, durchgeführt (Beispiel: CF/PEEK Lamine mit integrierten Halbrippen für ein thermoplastisches Seitenruder).

Der abgebildete Vakuumtisch ist modular ausgeführt und kann auf diese Weise dem Anwendungsfall angepasst werden. Jedes der Module wird durch elektrische Heizpatronen beheizt und kann durch die eingebaute Regelung separat geschaltet werden. Die Vakuumverteilung auf der Formoberfläche wird durch eine umlaufende Nut am Rand der Vakuumplatte, wie in BILD 2 schematisch dargestellt, gewährleistet.



BILD 1. Beheizbarer Vakuumtisch (300 x 100cm)

Mit Hilfe des in BILD 2 dargestellten, einfachen Aufbaus für das Vakuumkonsolidierungsverfahren können ebene Lamine und, mit Hilfe von zusätzlichen Werkzeugen, ein- oder mehrfach gekrümmte Strukturen hergestellt werden. Ebenso ist es möglich, das Verfahren mit einem Heißluftofen zu kombinieren und auf diese Art komplexere Geometrien mittels gewichtsoptimierter Formwerkzeuge herzustellen [6].

Zur Konsolidierung werden vorkonfektionierte Zuschnitte auf dem Heiztisch positioniert und mit

einem Vlies zur gleichmäßigen Evakuierung abgedeckt. Nach der vakuumdichten Versiegelung mittels einer temperaturstabilen Folie wird der Aufbau evakuiert und mit einer Isolierung abgedeckt.

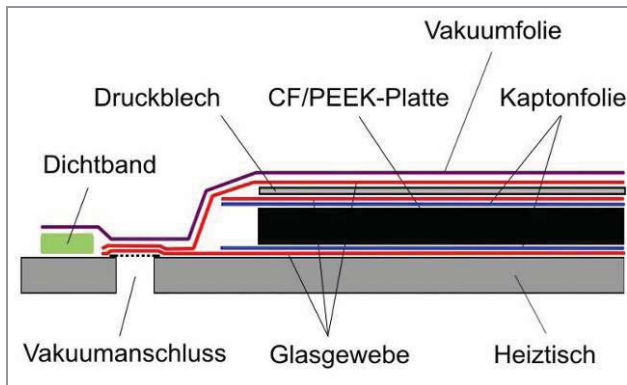


BILD 2. Schematischer Aufbau des Vakuumkonsolidierungsverfahrens

Anschließend wird der komplette Aufbau erwärmt, sodass an jeder Stelle des Laminates die Konsolidierungstemperatur gewährleistet wird. Dadurch kann eine einwandfreie Konsolidierung gewährleistet werden. Nach einer definierten Haltezeit, die in Abhängig der Bauteildicke variieren kann, wird das Bauteil abgekühlt und entformt.

Ein Vorteil ist die Eignung für sehr große Bauteile, welche nicht mit den herkömmlichen Verfahren hergestellt werden können, kombiniert mit vergleichsweise geringen Kosten. In Verbindung mit neuartigen Technologien zur Herstellung von Fertigungshilfsmitteln [5] ist hier auch in der Zukunft ein großes Kostenpotential zu erwarten.

2. HEISSPRESSTECHNIK

Eine weitere Möglichkeit, Thermoplaste außerhalb eines Autoklaven verarbeiten zu können, ist die Verwendung einer Heißpresse. Dieses Verfahren wird in der Regel bei industriellen Anwendungen lang- oder endlosfaser verstärkter Thermoplaste eingesetzt und stellt, neben der hier nicht weiter untersuchten Autoklaventechnik, das Standardverfahren zur Herstellung faserverstärkter Thermoplastbauteile dar. Der prinzipielle Versuchsaufbau, für dünne Lamine und ohne zusätzliche Formwerkzeuge in BILD 3 dargestellt, ist wesentlich einfacher im Vergleich zur Vakuumtechnik. Zusätzlich ist aufgrund des deutlich höheren Konsolidierungsdruckes der Prozess fehlertoleranter bei Verwendung von Halbzeugen von schwankender Qualität (BILD 4). Gleichzeitig ermöglicht der Prozess, eine entsprechende Anlagentechnik vorausgesetzt, jederzeit durch Erhöhung des Konsolidierungsdruckes die Ausbildung von Poren durch Zusammenpressen der Einzellagen weitestgehend zu unterbinden und

somit die geforderten Grenzwerte für Porositäten (in der Regel $\leq 2\%$) einzuhalten.

Da die Presstechnik mit zwei parallel verschiebbaren Heizstempeln arbeitet, werden dementsprechend die Lamine prozessbedingt, analog zum RTM-Prozess, immer die entstandene Kavität zwischen diesen abbilden (closed mould process), während sich beim Vakuumverfahren die kumulierten Dickenunterschiede des Halbzeuges mehr oder weniger ausgeprägt abbilden können (open mould process). Dies kann zwar durch Verwendung eines steifen Druckbleches, wie in BILD 2 dargestellt, weitestgehend unterbunden werden, dennoch muss dieser Effekt berücksichtigt werden, da dies je nach Bauteil nicht so ohne weiteres möglich ist.

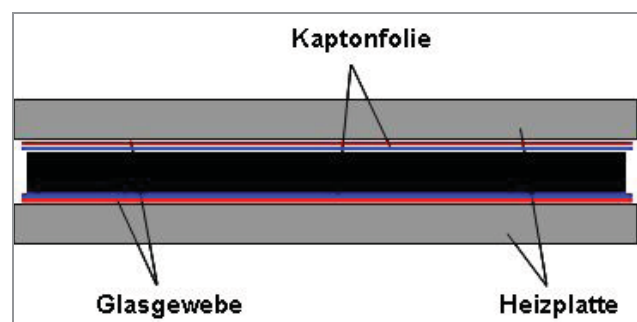


BILD 3. Schematischer Aufbau des Heißpressverfahrens

Die Kontrolle der Konsolidierungstemperatur erfolgt bei beiden Prozessen im Laminat selbst. Da im Gegensatz zur Vakuumkonsolidierung aber die Erwärmung des vorkonfektionierten Halbzeuges von beiden Seiten gleichzeitig erfolgt, erreicht der Prozess bei gleicher flächenbezogener Wärmeleistung eine geringfügig höhere Heizrate als der Vakuumprozess (BILD 4). Dieser Effekt verstärkt sich bei zunehmender Plattendicke aufgrund der geringen Wärmeleitung der PEEK Matrix deutlich.

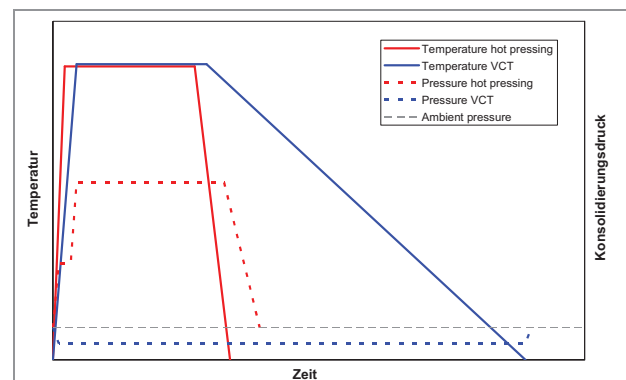


BILD 4. Schematische Darstellung der Prozessparameter

In TAB 1 sind die technischen Parameter der im Rahmen dieser Untersuchung verwendeten Fertigungseinrichtungen tabellarisch aufgelistet.

Wie leicht zu erkennen ist, ist der Pressprozess aufgrund der höheren Aufheizrate sowie der aktiven Kühlung der Presse den möglichen Taktzeiten des Vakuumschens deutlich überlegen. Dies ergibt sich aus der am Institut vorhandenen Anlagentechnik zur Vakuumkonsolidierung, welche zurzeit noch nicht über ein aktives Kühlsystem verfügt.

Dieser Unterschied führt augenscheinlich zu unterschiedlichen Temperaturgradienten im Abkühlvorgang und damit zwangsläufig zu Änderungen im Kristallinitätsgrad der Matrix, was aber nach [9, 11] bei einer Erhöhung von 2°C/min auf 8°C/min keine signifikante Reduktion zur Folge hat. Ein weiterer Effekt, das Einfrieren von zusätzlichen Eigenspannungen im Laminat aufgrund der einseitigen Heizung bzw. Kühlung, wurde aufgrund der gegebenen Verzugsfreiheit der hergestellten Lamine als nur von untergeordneter Bedeutung eingestuft und bisher nicht näher untersucht. Auch ist nach [10, 12] ein Einfluss auf die mechanischen Kennwerte aufgrund dieser Prozessunterschiede vernachlässigbar, so dass explizite Untersuchungen zu diesem Effekt zunächst nicht durchgeführt wurden.

	Vakuumsch h (Labor)	Heißpresse (Labor)
Plattengröße max.	550 x 550 mm	300 x 300 mm
Konsolidierungsdruck Δp	1 bar	10 bar
Konsolidierungstemperatur T_K	390 °C	390 °C
Heizung	elektrisch, ca. 45kW/m ²	elektrisch, ca. 45kW/m ²
Heizrate (Plattendicke 2,0mm)	ca. 7°C/min	ca. 8°C/min
Haltezeit bei T_K	10 min	10 min
Wärmeeintrag	Von unten	Beidseitig
Kühlung	Konvektiv	Luftkühlung
Kühlrate (max.)	ca. 2°C/min	ca. 8°C/min

TAB 1. Vergleich der Fertigungsparameter

Im Gegensatz zum Heitisch ist die Heißpresse mit einer aktiven Luftkühlung ausgestattet. Bei den zur Konsolidierung von CF-PEEK notwendigen Prozesstemperaturen würde lediglich eine

Hochdruck-Ölkühlung dauerhaft funktionieren, wobei diese aufgrund von Sicherheitsaspekten und Leckageproblemen bei trennbaren Anschlüssen bisher nicht realisiert wurde. Für einen industriellen Anwendungsfall ergibt sich hier also noch weitreichendes Optimierungspotential.

Nachteilig im Vergleich zur Vakuumkonsolidierung ist die Größenbegrenzung der herstellbaren Bauteile durch die Anlagentechnik, da diese in der Regel eine spätere Erweiterung nicht zulässt. Weiterhin sind bei der Herstellung komplexer Bauteile durch die hohen Verarbeitungsdrücke sehr steife Formwerkzeuge mit einer entsprechenden Wärmekapazität notwendig, was bei dem einseitig offenen Vakuumverfahren nicht in diesem Ausmaß notwendig ist. Analogien hierzu finden sich beim RTM- bzw. Harzinfusions-verfahren in der Duromertechnologie. Wobei die zu berücksichtigenden Verarbeitungstemperaturen der untersuchten Hochleistungsthermoplaste (bis ca. 400°C) im Vergleich zu denen duromerer Hochtemperatur-Harzsysteme (bis ca. 250°C) nur bedingt eine Übertragung der Formkonstruktion bzw. der verwendeten Formmaterialien zulassen.

Ein weiterer Nachteil der Presstechnik ist der, analog zur Autoklavtechnik, Engpass, den die benötigten Fertigungseinrichtungen zwangsweise darstellen. Sowohl bei der Autoklav- als auch der Presstechnik ist ein Transport der vorbereiteten Gesenke vom Rüstplatz zur Anlage zwingend erforderlich, während bei der Vakuumtechnologie alternative Lösungen wie z.B. ortsveränderliche Infrarot- oder Heiluftöfen diesen Transport umgehen können und somit die Möglichkeit fest eingerichteter Arbeitsstationen mit ortsfesten Formwerkzeugen eröffnen.

Dieser Effekt wird auch durch den Einsatz beheizter Formwerkzeuge, wie es in der Vakuumtechnik sinnvoll wäre, nicht signifikant abgemindert, da in diesem Fall die Anschlüsse für Formheizung und aktive Formkühlung bei jedem Werkzeugwechsel getrennt und wieder verbunden werden müssen. Besonders in Kombination mit flüssigen Wärmeübertragungsmedien (z.B. Öltemperierung) führt dies bei den hohen Prozesstemperaturen langfristig zu Leckageproblemen, wobei in jedem Fall ein direkter Kontakt dieser Stoffe mit den Bauteilen vermieden werden muss.

3. VERSUCHSDURCHFÜHRUNG

Sämtliche hier vorgestellten Versuche wurden aus unidirektional verstärkten Thermoplasttapes TPUD PEEK-HTS40 [8] mit einer Matrix aus PolyEtherEtherKeton (PEEK) durchgeführt, wobei hierbei als Matrixmaterial VESTAKEEP 2000 [7] von Evonik-Industries und als Fasermaterial P-Yarn

(Kohlenstoff-HTS-Faser) der Firma TohoTenax verarbeitet sind. Dieses Material wurde aufgrund der für thermoplastische Matrixmaterialien optimierten Faserschichte ausgewählt.

Zur Ermittlung der Materialeigenschaften wurde eine Reihe von grundlegenden statischen Versuchen durchgeführt. Hierzu zählen neben dem Zugversuch in 0°-Richtung (in Faserlängsrichtung) nach *DIN EN 2561A* und dem Zugversuch in 90°-Richtung (quer zur Faserorientierung) nach *DIN EN 2597B* auch die Ermittlung der Schubkennwerte (bei Faserorientierung $\pm 45^\circ$) nach *EN ISO 14129*. Die interlaminae Scherfestigkeit (Lap-Shear) wurde nach *DIN 65148* geprüft, die Bestimmung der scheinbaren interlaminae Scherfestigkeit (ILSS) erfolgte nach *DIN EN ISO 14130*. Verglichen werden jeweils identische Proben gleichen Ausgangsmaterials und Lagenaufbaus, wobei explizit auf die Verwendung gleicher Batch- und sogar Rollennummern für die Probenserien einer Prüfnorm geachtet wurde. Den einzigen Unterschied bei Herstellung der Prüfkörper stellt dementsprechend der Konsolidierungsprozess für die Prüfplatten-rohlinge dar. Die Auswertung der Messergebnisse erfolgte gemäß Norm mittels der gemessenen (tatsächlichen) Probenabmessungen.

Die Klassifizierung der ermittelten Daten kann hierbei in faserdominierte und interfacedominierte Kennwerte erfolgen, wobei zu erwarten ist, dass faserdominierte Kennwerte, wie Zugfestigkeit in Faserrichtung, unabhängig vom Herstellungsverfahren sind. Auf Grund des erwarteten Einflusses auf die Faser-Matrix-Bindung wurde mit Auswirkungen der Herstellungstechnik auf interface dominierte Kennwerte mit Querkzug-, Schub- und Scherbelastung gerechnet.

Als Referenzverfahren wurde bei den Untersuchungen das in Kapitel 3 bereits beschriebene Heißpressverfahren verwendet. Der in BILD 4 dargestellte zeitliche Verlauf des Konsolidierungsprozesses der beiden Technologien kann dabei lediglich als schematische Gegenüberstellung angesehen werden, da aus Gründen der Übersichtlichkeit die Zeiten für Aufheizung und Abkühlung im Vergleich zur Haltezeit bei Konsolidierungstemperatur gerafft dargestellt sind. Die notwendigen Informationen zum Fertigungsverfahren finden sich in TAB 1.

3.1. Faserdominierte Kennwerte

Sämtliche der hier vorgestellten Prüfkörper sind mit verklebten Aufleimern zur Krafteinleitung versehen, die gemäß Norm aus Glasfaser verstärktem Epoxy hergestellt wurden. Aufgrund mangelnder Affinität der Werkstoffe von Testlaminat und Aufleimer muss diese Verklebung besonders sorgfältig hergestellt

werden, um ein Versagen der Verbindung während der Prüfung zu verhindern. Hier geschah dies durch eine Kombination von mechanischer (Sandstrahlen) und thermischer (Flammaktivierung) Oberflächenvorbehandlung.

DIN EN 2561 – 0° Zugversuch

Der in der Norm beschriebene Zugversuch an unidirektional faserverstärkten Laminaten dient der Bestimmung der Zugfestigkeit längs zur Faser. Die Norm lässt die Verwendung von drei alternativen Geometrien für Prüfkörper zu, wobei aufgrund guter Ergebnisse aus der Vergangenheit der in BILD 5 dargestellte Typ A mit einer Breite von 10,0mm und einer Dicke von 2,0mm verwendet wurde.

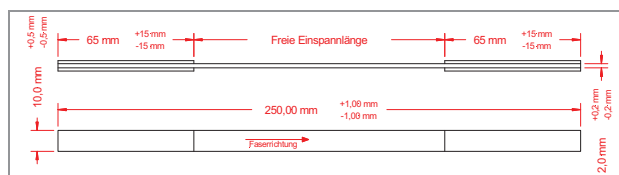


BILD 5. Prüfkörper nach DIN EN 2561 TYP A

Bei dieser Prüfung wurden insgesamt 9 Prüfkörper in Presstechnik und 9 Prüfkörper, die mittels Vakuumverfahren hergestellt wurden, getestet. Wobei jeweils der beste und der schlechteste Wert einer jeweiligen Prüfreihe zur arithmetischen Mittelwertbildung nicht herangezogen wurden.

3.2. Interfacedominierte Kennwerte

Einige der hier vorgestellten Prüfkörper sind ebenfalls mit Aufleimern zur Krafteinleitung versehen, die ebenfalls durch eine mit Sandstrahlen und Flammaktivierung vorbehandelte Klebung aufgebracht wurden.

DIN EN 2597 – 90° Zugversuch

Der in der Norm beschriebene Zugversuch an unidirektional faserverstärkten Laminaten dient der Bestimmung der Zugfestigkeit quer zur Faser. Dieser Versuch wird üblicherweise nicht bei einfachen Materialuntersuchungen durchgeführt, dient aber hier der Ermittlung der Faser-Matrix Anbindung. Die Norm lässt die Verwendung von zwei alternativen Geometrien für Prüfkörper zu, wobei aufgrund guter Ergebnisse aus der Vergangenheit der in BILD 6 dargestellte Typ B mit einer Breite von 25,0mm und einer Dicke von 2,0mm verwendet wurde.

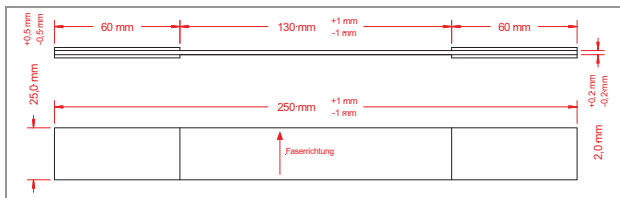


BILD 6. Prüfkörper nach DIN EN 2597 TYP B

In diesem Fall wurden insgesamt 10 Prüfkörper (Presstechnik) bzw. 6 Prüfkörper (Vakuumverfahren) getestet. Die Auswertung erfolgte analog zur vorher erwähnten Probenserie.

EN ISO 14129 - $\pm 45^\circ$ Zugversuch

Der in der Norm beschriebene Zugversuch an diagonal faserverstärkten Laminaten dient der Bestimmung der Schubfestigkeit sowie der Schubspannungs-Schubverformungs-Kurve.

Abweichend zur Prüfnorm wurden in diesem Fall nur 8 Lagen UD-Tape verwendet, um die Vergleichbarkeit zu früheren Probenserien, die nach einer Industrienorm getestet wurden, zu gewährleisten. Hierbei konnte die in BILD 7 dargestellte Dicke von 2,0mm nicht eingehalten werden, was aber in nachfolgenden Untersuchungen der Fall sein wird.

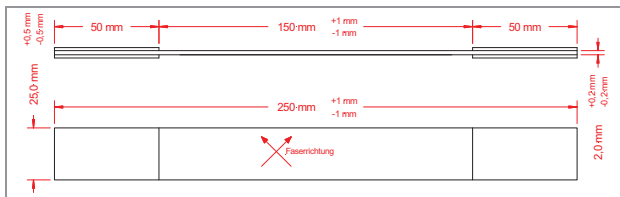


BILD 7. Prüfkörper nach EN ISO 14129

In diesem Fall wurden insgesamt 8 Prüfkörper (Presstechnik) bzw. 7 Prüfkörper (Vakuumverfahren) mit einer nominellen Dicke von 1,1mm getestet. Die Auswertung erfolgte gemäß 4.1.

DIN 65148 – Interlaminare Scherfestigkeit

Der in der Norm beschriebene Zugversuch dient der Bestimmung der interlaminaren Scherfestigkeit. Da in der Prüfnorm die Geometrie frei von der gewählten Faserorientierung angegeben ist, wurden in diesem Fall 28 Lagen UD-Tape in einem unidirektionalen Lagenaufbau. Besonders sorgfältig müssen bei der Prüfkörperherstellung die in BILD 8 nur skizzenhaft dargestellten Nuten herausgearbeitet werden, da sowohl die Tiefe der Nuten als auch die Wahl der Bearbeitungswerkzeuge einen Einfluss auf die mechanischen Kennwerte haben können. In diesem Fall wurde ein Hartmetall-Sägeblatt mit reduzierter Drehzahl bei geringem Vorschub verwendet, um ein Aufschmelzen der Matrix in der Kontaktzone zu vermeiden. Die Tiefe der Nuten betrug der Norm

entsprechend 55% der Bauteildicke, was eine einwandfreie Belastung der Prüfebene garantiert.

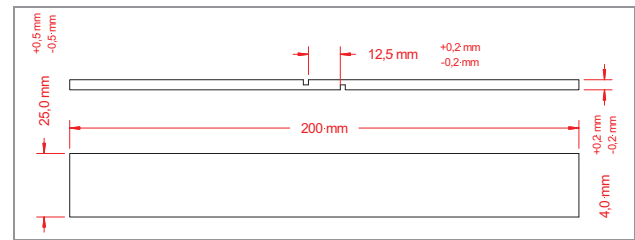


BILD 8. Prüfkörper nach DIN 65148

Auch bei der Bestimmung der interlaminaren Scherfestigkeit wurden insgesamt 10 Prüfkörper in Presstechnik bzw. 21 Prüfkörper im Vakuumverfahren getestet. Die Auswertung erfolgte ebenfalls analog zu 4.1.

EN ISO 14130 – Dreipunkt-Biegeversuch

Der Dreipunkt-Biegeversuch dient zur Bestimmung der scheinbaren interlaminaren Schubfestigkeit (ILSS). Da aufgrund der stark unterschiedlichen Pressdrücke Dickenunterschiede zwischen den Prüflaminaten erwartet wurden, musste eine Prüfnorm gefunden werden, die bei Anpassung des Abstandes der Auflager diese nach oben offen lässt. Für die Untersuchungen wurden Standard-Probekörper der Maße 20 x 10mm bei einer Nominaldicke von 2,0mm verwendet. Insgesamt wurden 23 Prüfkörper in Presstechnik bzw. 8 Prüfkörper im Vakuumverfahren hergestellt und getestet. Die Auswertung erfolgte wie bei den zuvor beschriebenen Prüfverfahren

4. VERGLEICH DER ERGEBNISSE

Die ermittelten Kennwerte für die Festigkeiten sind in BILD 9 gegenübergestellt, wobei hier die auf 100% normierten Kennwerte aus dem Pressverfahren rot, die des vergleichenden Vakuumverfahrens blau dargestellt sind. Deutlich zu erkennen ist, dass die Festigkeiten der vakuumkonsolidierten Proben allgemein leicht über denen aus dem Pressverfahren liegen, unabhängig davon ob die gemessenen Kennwerte faserdominiert oder interfacebestimmt sind.

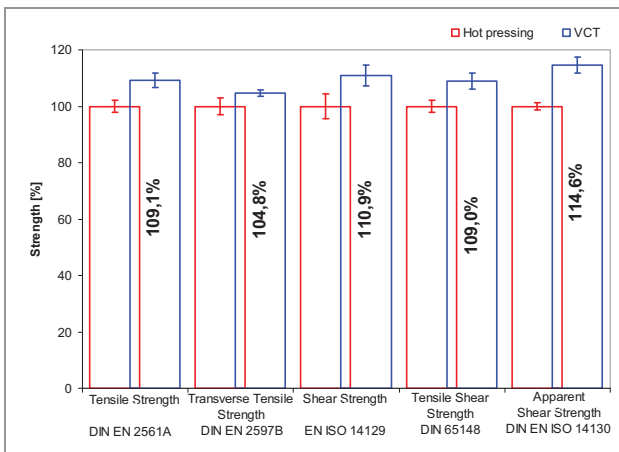


BILD 9. Vergleich der Festigkeitswerte (normiert auf Ergebnisse aus Heißpressverfahren)

Hierbei ist jedoch zu beachten, dass sich die auftretenden Unterschiede auf einem geringen Niveau bewegen. Die Zahl an getesteten Probekörpern liegt zwar teilweise deutlich über der Norm-Anforderung, jedoch ist sie noch bei weitem nicht ausreichend, um die statistische Absicherung zu gewährleisten. Ähnliche Effekte sind auch in der Literatur [9, 10, 12] zu finden, wobei hierbei stets Proben innerhalb eines Herstellverfahrens, lediglich unter Variation der Fertigungsparameter verglichen wurden. Um die Qualität der getesteten Proben zu verdeutlichen wurden, beispielhaft anhand von getesteten Prüflingen nach EN ISO 14129 (Zugversuch bei $\pm 45^\circ$ Faserorientierung), zwei typische Proben gegenüber gestellt (BILD 10, 11).



BILD 10. Zerstörter $\pm 45^\circ$ Prüfkörper in Presstechnik

Hierbei zeigt BILD 10 das Bruchbild einer in Presstechnik, BILD 11 hingegen das einer in Vakuumtechnik konsolidierten Probe. Wie deutlich zu erkennen ist, versagten beide Probekörper jeweils auf Faserbruch. Was wiederum als Indiz für eine (in beiden Fällen) sehr gute Faser-Matrix-Bindung angesehen werden kann. Obwohl die Festigkeitswerte zwischen beiden Probekörpern um ca. 10% differieren.

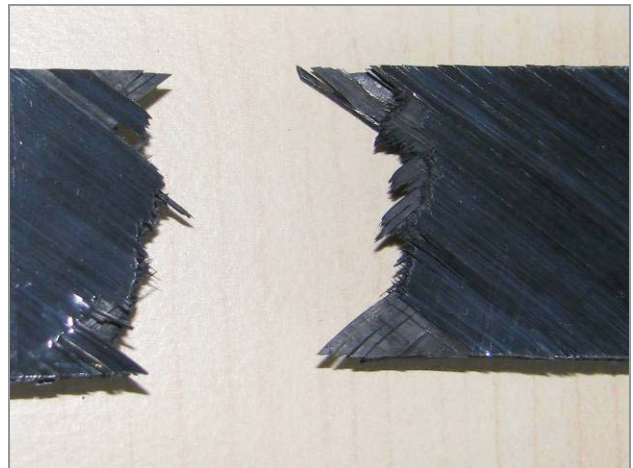


BILD 11. Zerstörter $\pm 45^\circ$ Prüfkörper in Vakuumtechnik

Die Oberflächenstruktur der in BILD 10 dargestellten Probe, die in abgeschwächter Form auch bei den in Vakuumtechnik hergestellten Probekörpern vorhanden ist, findet ihre Ursache im Versuchsaufbau gemäß BILD 2 bzw. BILD 3 und wird durch das zur Entlüftung eingebrachte Glasgewebe erzeugt, welches beim Vakuumverfahren zwingend erforderlich ist. Es wurde hier auch in der Presstechnik eingesetzt, um eine möglichst gute Vergleichbarkeit der beiden Verfahren zu ermöglichen. Ein Zusammenhang zwischen der Oberflächenstruktur und der Bruchzone konnte bei Betrachtung unter einem Lichtmikroskop nicht festgestellt werden.

Vergleichend dazu ist in BILD 12 das Bruchbild einer ebenfalls nach EN ISO 14129 auf Schub belasteten Probe eines Vergleichsmaterials zu sehen, welches mit einem Fasermaterial hergestellt wurde, dessen Schlichte nicht an die thermoplastische Matrix angepasst wurde. Wie unschwer zu erkennen ist, überwiegen in diesem Fall die Zwischenfaserbrüche deutlich und auch die erreichten Festigkeiten unterscheiden sich signifikant von dem in dieser Untersuchung verwendeten Material.



BILD 12. Bruchbild Vergleichsmaterial ohne angepasste Thermoplastschicht

Sämtliche Prüfkörper wurden mit dem in Kap. 3 erwähnten Material unter Verwendung der in Tab. 1 dargestellten Fertigungsparameter hergestellt, so dass eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse gegeben ist. Vergleicht man die Ergebnisse sämtlicher

durchgeführter Untersuchungen, so zeigt sich das Vakuumkonsolidierungsverfahren (VCT - Vacuum Consolidation Technique) dem konventionellen Pressverfahren im Bezug auf die erreichbaren mechanischen Kennwerte als gleichwertig.

5. ZUSAMMENFASSUNG

Wie die durchgeführten Versuche zeigen, kann bei der Verwendung von unidirektional endlosfaser verstärkten Hochleistungsthermoplasten die Vakuumkonsolidierung durchaus als Alternative zur konventionellen Heißpresstechnik angesehen werden. Die erzielten Festigkeitswerte liegen bei beiden Verfahren im Bereich der Herstellerangaben [8], wobei die Vakuumkonsolidierung bei sämtlichen durchgeführten Versuchen um ca. 10% höhere Absolutwerte im Vergleich zur Presstechnik aufwies.

Für die strukturelle Auslegung von Bauteilen berücksichtigt man bisher lediglich die unterschiedlichen Randbedingungen von Fertigungs-verfahren, die direkten Einfluss auf eine Prozess-auswahl zur Bauteilherstellung haben. Hier können die gewonnenen Erkenntnisse langfristig dazu beitragen, dass bereits bei der Bauteilauslegung die Herstellungseinflüsse berücksichtigt werden. Ebenso kann die gezeigte Interaktion von Fertigung und mechanischen Kennwerten dazu führen, dass auch im Hinblick auf stetig weiter optimierte Simulationsmethoden die Materialkennwerte faser-verstärkter Kunststoffe in Zukunft in Abhängigkeit der Fertigungsparameter dargestellt werden.

6. AUSBLICK

Die Effekte, die zu den Differenzen der Festigkeitswerte führen, konnten bisher noch nicht vollständig isoliert dargestellt und grundsätzlich untersucht werden. Dies wird daher in kommenden Arbeiten eine der zentralen Aufgaben darstellen, wobei hier auch die Verwendung alternativer, nicht normgerechter Prüfkörper Angedacht ist. Weiterhin wird die Erweiterung auf dynamische und zyklische Belastungen ebenso Gegenstand weiterer Untersuchungen sein wie die Auswirkungen der Konsolidierungsmethode auf die Faser-Matrix Anbindung. Ebenso ist die Erweiterung der Untersuchungen unter Berücksichtigung der Variation möglicher Prozessparameter, auch im Falle eines thermoplastischen Reparaturverfahrens, angedacht.

Im Einzelnen sollen als nächste Schritte zunächst die gezeigten statischen Versuche mit weiteren Versuchsreihen statistisch abgesichert sowie mit den entsprechenden Druckversuchen ergänzt werden. Daran anschließend wird die Auswirkung des Pressdrucks, der üblicherweise bis 30bar oder

mehr betragen kann, auf die Interaktion von Faserschlichte und Matrixsystem untersucht werden.

7. LITERATUR

- [1] Feiler, M., Häberle, L., Hetzel, Th., Steinheber, R.: Kosteneffiziente Herstellung eines Seitenruders aus faserverstärktem Thermoplast, DGLR, 2002
- [2] Dudenhausen, W., Kocian, F., Kempe, G., Keck, R.: Continuous Fibre reinforced Thermoplastic Material as an Alternative in High Performance Lightweight Structures, TRANFAC, 2006
- [3] Kocian, F., Kempe, G., Keck, R., Dudenhausen, W.: Application of alternative thermoplastic technologies in aircraft structures, SAMPE, 2006
- [4] Keck, R.: Cost effective manufacturing techniques for fiber reinforced thermoplastic materials, Airtec, 2007
- [5] Dudenhausen, W., Kocian, F., Keck, R.: Thermoplastic Technologies – An Alternative for Aircraft Structures, EUCOMAS, 2008
- [6] Keck, R., Machunze, W., Dudenhausen, W., Middendorf, P.: Design, Analysis and Manufacturing of a CF-PEEK Slat, Proc. IMechE Vol. 223 Part G, Journal of Aerospace Engineering, ISSN 0954-4100, S. 1115 – 1123, 2009
- [7] Datenblatt VESTAKEEP – PEEK, EVONIK Industries, <http://www.vestakeep.com>, 2009
- [8] Datenblatt Tenax® TPUD PEEK-HTS40, TohoTenax Europe GmbH, <http://www.tohotenax-eu.com>, 2010
- [9] Kadi, H., Denault, J.: Effects of Processing Conditions on the Mechanical Behavior of Carbon-Fiber-Reinforced PEEK, Journal of Thermoplastic Composite Materials, Vol. 14, Januar 2001
- [10] Vu-Khanh, T., Frikha, S.: Influence of Processing on Morphology, Interface and Delamination in PEEK/Carbon Composites, Journal of Thermoplastic Composite Materials, Vol. 12, März 1999
- [11] Gao, S.-L., Kim, J.-K.: Cooling rate influences in carbon fibre/PEEK composites. Part 1. Crystallinity and interface adhesion, Composites: Part A, Vol. 31, S. 517 – 530, 2000
- [12] Gao, S.-L., Kim, J.-K.: Cooling rate influences in carbon fibre/PEEK composites. Part 2. Interlaminar Fracture Toughness, Composites: Part A, Vol. 31, S. 517 – 530, 2000