



Technischer Abschlussbericht

für das Verbundprojekt **PRO-CFK**,

Laufzeit des Vorhabens: **01.07.2003** bis **31.12.2006**

Zuwendungsempfänger:	Eurocopter Deutschland GmbH
Förderkennzeichen:	20W0303B
Berichtszeitraum:	01.07.2003 bis 31.12.2006

Erstellt von: Dr. Christian Weimer, Marco Göttinger

Name:

Datum: 12.07.2007

i.V. Dr. Marius Bebesel

Rechtsverbindliche Unterschrift



Inhaltsverzeichnis

INHALTSVERZEICHNIS.....	2
1 ZUSAMMENFASSUNG.....	3
2 TECHNISCHER ERGEBNISBERICHT	4
2.1 AP 1 Fehlerspezifikation/ Datenbank	4
2.2 AP 2 Ursachenanalyse im Verarbeitungsprozess	9
2.3 AP 3 Ableitung von Fehlerindikatoren / Messkonzepte	10
2.4 AP 4 Fehlerdetektion im Verarbeitungsprozess	12
2.5 AP 5 Validierung der Fehler.....	22
2.6 AP 6 Auswertung der Ergebnisse	24
2.7 AP 7 Darstellung der „effects of defects“	25



1 Zusammenfassung

Im Rahmen des Fördervorhabens ProCFK/PROSA wurde seitens ECD an der Verknüpfung von prozessbegleitenden Parameter- und Qualitätserfassungssystemen mit den späteren NDT- bzw. Eigenschafts-Ergebnissen gearbeitet.

Zunächst wurden Fehlerspezifikationen aus den vorhandenen Erfahrungen abgeleitet und entsprechende Strategien zu Erfassung derselben erarbeitet. Ein Schwerpunkt der Arbeiten lag auf der reproduzierbaren Herstellung von Versuchs-Preforms und deren Imprägnierung.

Werkstattgerechte Technologien zur Erreichung einer reproduktionsfähigen Preformfertigung und Infiltrationstechnik konnten im Projektzeitraum umgesetzt werden und stehen für weitere Entwicklungstätigkeiten zur Verfügung.

Durch den Einsatz dieser durchgängigen Erfassung und Sicherstellung von definierten Qualitäten ist es in der Projektfolge möglich, die gemeinsam mit dem DLR erarbeitete Wissensdatenbank in einem Entwicklungsumfeld zu testen.

In Zusammenarbeit mit dem Projektpartner FIBRE wurde an einem System zur Erfassung von Preform-Inhomogenitäten gearbeitet und eine entsprechende Versuchssoftware spezifiziert und umgesetzt. Die dazu notwendigen Hardwarekomponenten wurden erfolgreich getestet. Im Rahmen des Vorhabens wurde seitens ECD eine Versuchsanlage zur Anwendung der Technologie in der Bauteilentwicklung umgesetzt. Ein wesentliches Projektziel zur Definition einer Messsystematik für die prozessbegleitende Schadenanalyse konnte somit erreicht werden.

Zur Erfassung von Fehlern unterhalb der optisch sichtbaren Faseroberfläche wurden im Rahmen des Vorhabens grundlegende Versuche zum Einsatz der Röntgentechnologie durchgeführt. Auch hier fand eine Verknüpfung von Erfassung der trockenen Faserarchitektur mit den später erreichbaren Bauteilqualitäten statt.

ECD kam darüber hinaus die Rolle des Teilprojektleiters für ProCFK/PROSA zu. Diese Rolle konnte im Projektkonsortium sowohl hinsichtlich einer optimalen Netzwerkbildung, als auch der Wissensnutzung, ausgefüllt werden. Den Projektpartnern wurde das spezielle Computertomographie-Verfahren von ECD zur Inspektion von Rotorblättern zugänglich gemacht. Gleichzeitig wurden die Einzelaktivitäten in PROSA gezielt zur Wissensschaffung - deutlich über den Stand der Technik hinausgehend – koordiniert, und so ein optimales Ergebnis erzielt.

Es ergaben sich neue Kooperationen zwischen einzelnen Projektpartnern, die ohne die Durchführung des PROSA Projektes nicht entstanden wären. Diese Kooperationen bilden die Grundlage für weitere gemeinsame Aktivitäten.

Die PROSA Ergebnisse wurden gemeinsam mit dem Konsortium in diversen öffentlichen Veranstaltungen präsentiert, womit ein optimaler querschnittlicher, wissenschaftlicher Austausch möglich war.



2 Technischer Ergebnisbericht

2.1 AP 1 Fehlerspezifikation/ Datenbank

Fehlerspezifikation

Ein wesentlicher Inhalt des Arbeitspaketes war die Erfassung von Bauteil- und Prozessfehlern und deren Klassifizierung. Dazu wurden die verschiedenen Unternehmensbereiche, bei denen derzeit Harzinjektionstechniken eingesetzt werden, befragt und diverse Fehlerkataloge erstellt und ausgewertet.

Die Ergebnisse sind folgend repräsentativ für 2 Bauteilfamilien (siehe auch Abbildung 1) zusammengefasst dargestellt.

Fehlerkatalog Longeron:

- Halbzeugfehler / Preformfehler
 - Preform
 - Abmaße der zugeschnittenen Gurte ↑
 - Fehlerbildung im Zwickel ↓
 - Oberflächenprobleme Faden ↑
 - Preform-Gewicht ↓
 - Injektion
 - Verschiebung der Lagen durch WZ-Dichtung ↓
 - Trockene Stellen ↓↓
 - Bauteil
 - Delamination der Schnittkanten ↓

Fehlerkatalog Spant 6/8 „Begleitende Betrachtung- Prepregtechnologie“:

- Arbeitsvorbereitung
 - FiberSIM Abwicklung ↑
- Fertigung
 - Zuschnittsgenauigkeit ↓; „First-time-right“
 - Folien vergessen ↓
- Bauteil:
 - Porosität durch Dreiecksausschnitte im Bogen ↑
 - Porosität und Wellen im Obergurt ↑
 - Doppelabsatz ↓
 - Radien der Interfaceflächen schlecht ausgeformt ↑
 - Anschleifen der CFK Lagen ↓
 - Formprobleme am Übergang Steg Gurt ↓
 - Untermaß und Porosität ↓
 - Delamination der Schnittkanten ↓

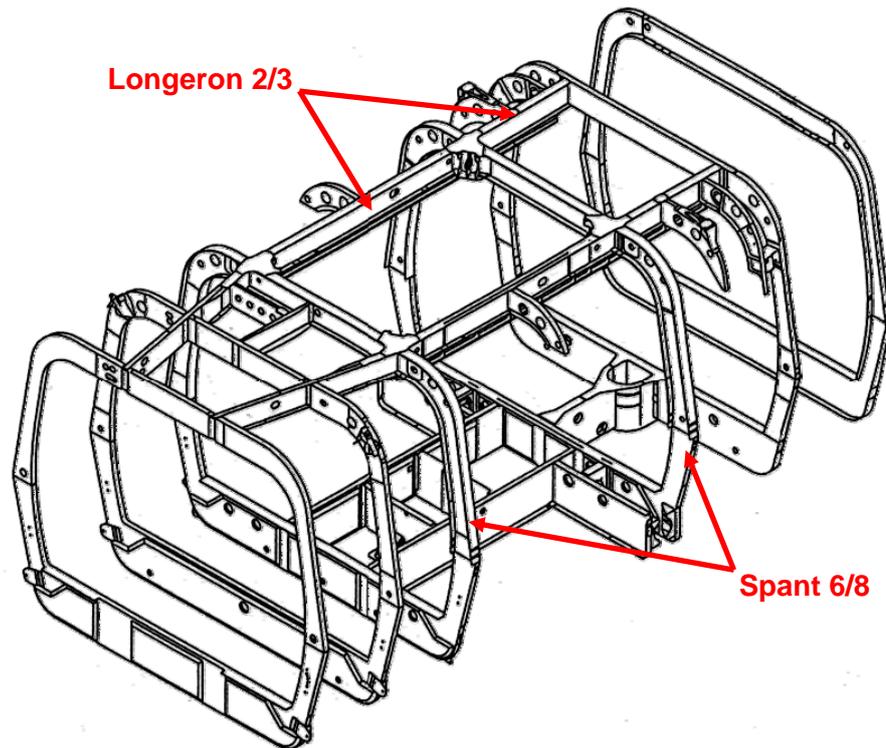


Abbildung 1: NH90 Airframe

Innerhalb des Konsortiums wurden diverse Fehler und deren Häufigkeiten, bzw. Relevanz diskutiert und die Definition der weiteren Schritte abgeschlossen.

Wesentliche, bei ECD auftretende Fehler bei der Serienfertigung von Harzinjektionsbauteilen (RTM), sind (siehe Abbildung 2):

- Halbzeugfehler / Preformfehler
 - Abmaße der zugeschnittenen Gurte
 - Fehlerbildung im Zwickel
 - Oberflächenprobleme Faden
 - Preform-Gewicht
- Injektion
 - Verschiebung der Lagen durch Werkzeug-Dichtung
 - Trockene Stellen
- Bauteil
 - Delamination der Schnittkanten

Makroskopische Fehler:

- Konturabweichungen der Preforms
- Dickenabweichung der Preforms (Lokale Schwankungen im Faservolumengehalt)
- Gewichtsabweichungen (eventuell Folge von Fehler 1 und 2)
- Abweichungen im Nähfadengehalt
- Schädigungen durch unsachgemäße Behandlung

Mikroskopische Fehler:

- Poren (z.B. Einstichlöcher)
- Faserondulation (Nähfadeneinschnürung)

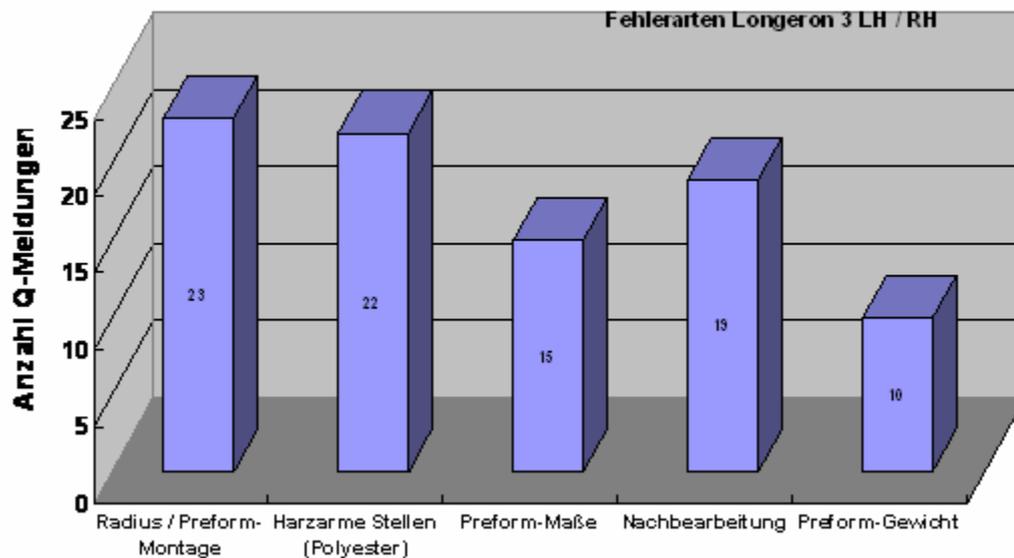


Abbildung 2: Fehlerarten Longeron 3

Als kritischer, qualitätsrelevanter Punkt bei der on-line Begutachtung von Harzinjektionsbauteilen stellt sich die Dokumentation der Preformfertigung, bzw. die genaue Kenntnis der eingesetzten Preform-Hilfsmittel heraus. Innerhalb des Arbeitspaketes 2 „Ursachenanalyse Verarbeitungsprozess“ hat sich eine Analyse der Einflussfaktoren angeschlossen.



Datenbank

Gleichzeitig wurde eine Struktur für die Gestaltung einer wissensbasierten Datenbank erstellt. Diese Datenbank sollte über die reine Fehlererfassung hinaus Möglichkeiten zur on-line Fehlerbeurteilung liefern. Die Struktur der geplanten Datenbank ist in Abbildung 3 dargestellt.

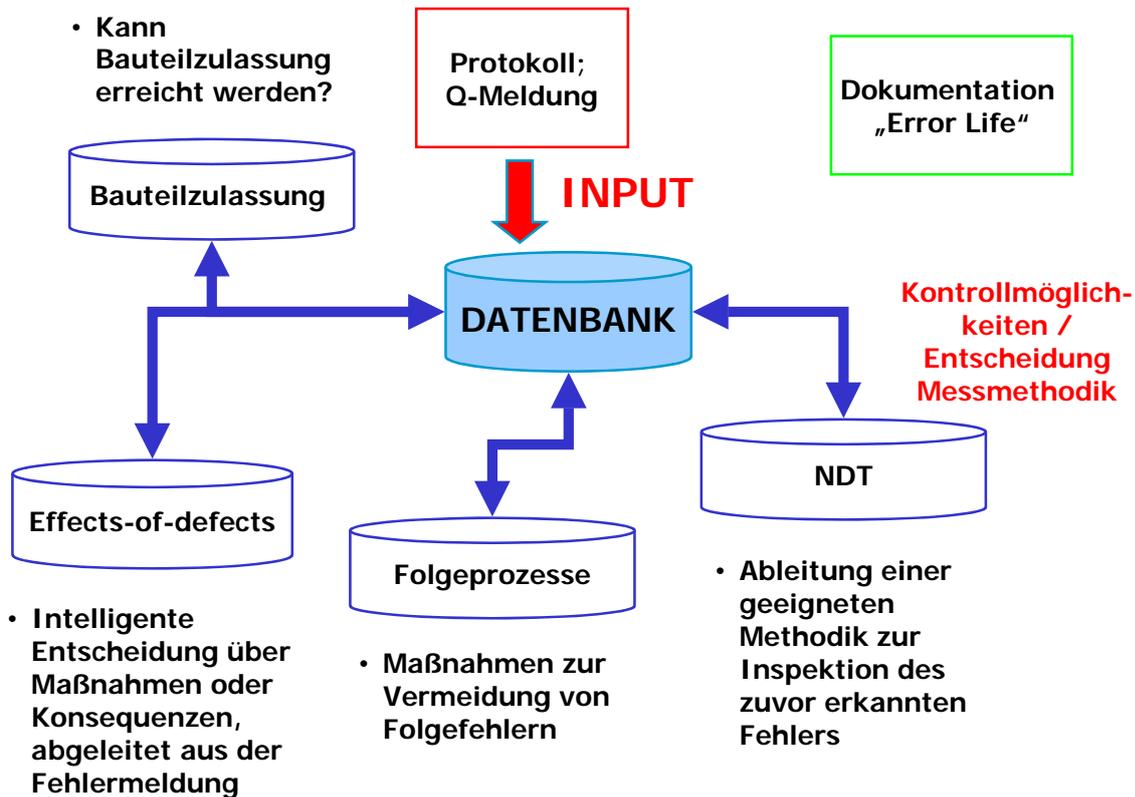


Abbildung 3: Struktur der PROSA-Datenbank

Die zu erarbeitende Datenbank sollte es ermöglichen, bereits in den Vorstufen der Bauteilherstellung (Preformfertigung, Montage- bzw. Ablegeschritte) Fehlerquellen zu finden und deren Folgen zu bewerten. Zusätzlich zu der reinen on-line Prozesskontrolle wurden die Konsequenzen bzgl. der Bauteilzulassung bzw. der zu erwartenden NDT Ergebnisse in das Anforderungsprofil an die Datenbank aufgenommen.

Im Bereich der Datenbank-Erarbeitung wurde eine „Road-Map“ zum Nutzung erstellt. Für ECD liegt der Hauptnutzen in der Absenkung von Fertigungskosten. In Abbildung 4 ist der auf ECD-Bedürfnisse abgestimmte Arbeitsbereich der Prosa DB dargestellt. Key-Decision-Points werden eingerichtet und entscheiden jeweils an einem bestimmten Punkt der Bauteilfertigung über die Freigabe für weitere Fertigungsschritte.

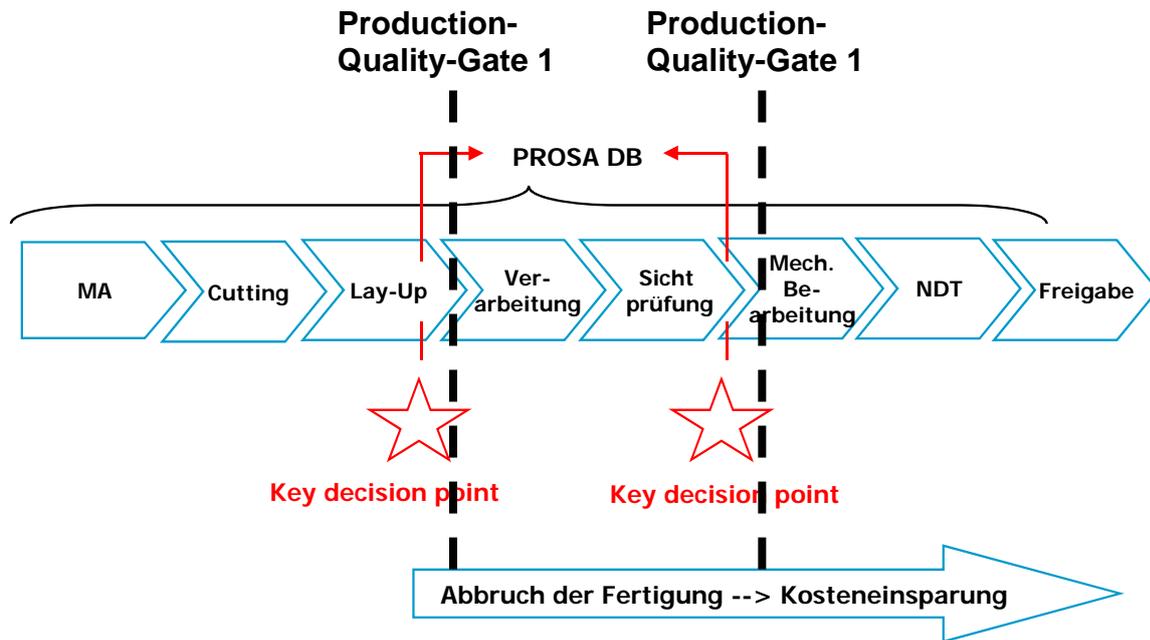


Abbildung 4: Key decision points and production quality gat

2.2 AP 2 Ursachenanalyse im Verarbeitungsprozess

Ursachenanalyse

Bezüglich der Fehlerursachenanalyse wurden folgende Indikatoren erkannt:

- Die Kompaktierungsgrade der eingesetzten Preforms schwanken z.T., was zu veränderlichen Fließbildern und somit zu abweichenden Injektionsergebnissen führt.
- Das Interface zwischen Preform und Werkzeugoberfläche (Trennmittelschicht) variiert durch die veränderten Eintrennzyklen bzw. durch veränderte Preformparameter.

Daraus abgeleitet ergibt sich der Schwerpunkt der zu etablierenden Messtechnik.

Das Thema „Kompaktierungsgrad“ von trockenen Faserpaketen wurde als wesentlicher Faktor bei der Qualitätssicherung / Charakterisierung von Preforms erkannt und bei der Detaillierung die wesentliche Messgröße berücksichtigt.

Eine Richtlinie zur Koordination der Hardware-Aktionen zur optimalen Ausnutzung der zu erstellenden Datenbank wurde generiert. Die Vorgehensweise für das Teilprojekt PROSA ist, wie in Abbildung 5 gezeigt, erstellt worden.

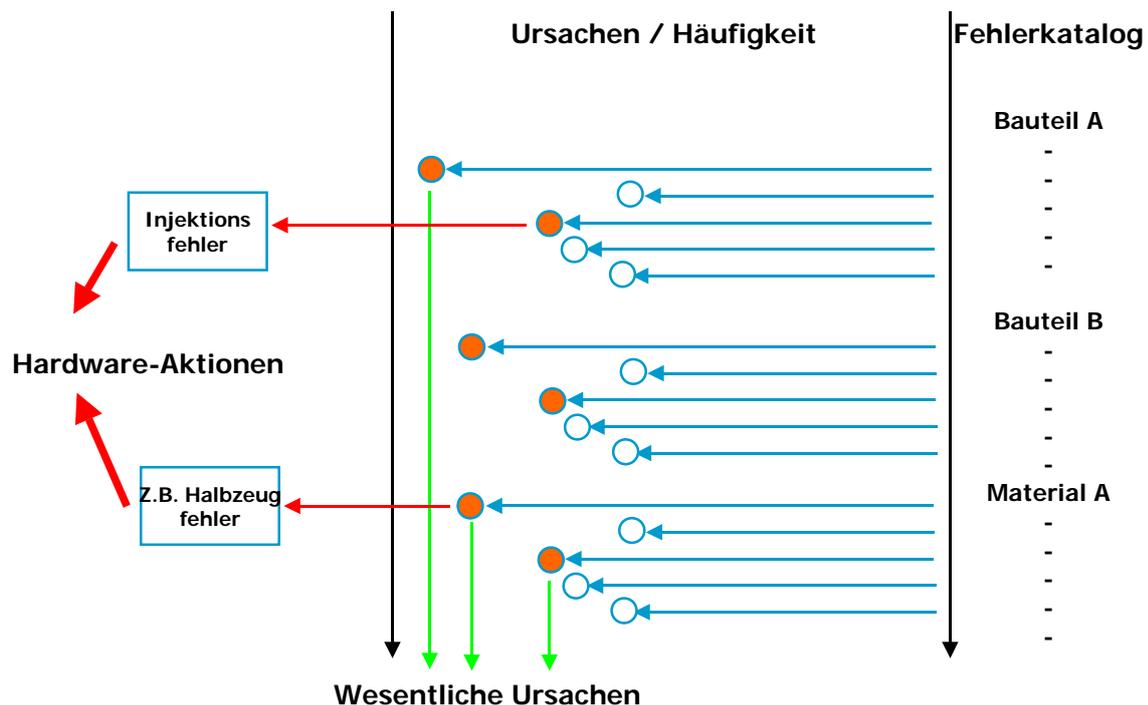


Abbildung 5: Vorgehensweise PROSA



2.3 AP 3 Ableitung von Fehlerindikatoren / Messkonzepte

Bestimmung der Fehlerindikatoren / Messkonzept

Zur Erkennung von Fehlerindikatoren müssen zwei Anwendungen betrachtet werden:

- 1) Möglichkeit, Fehler im fertigen Bauteil erkennen zu können
 - a) Mittels NDT Verfahren, deren Eignung getestet wurde
 - b) „Effects-of-defects“, das durchgeführte Propenprogramm.
- 2) Möglichkeit zur „Preform“-Qualitätskontrolle
 - a) Sicherstellung des Injektionsergebnisses.
 - b) Möglichkeit zur Beurteilung der Preformqualität.

Anwendungsfall Zwei wurde in Zusammenarbeit mit dem FIBRE im Kontext einer geeigneten Bildaufnahme und Bildverarbeitung untersucht.

Untersuchungen zum Anwendungsfall Eins (NDT_Verfahren) wurden im Rahmen eines Unterauftrages beim Fraunhoferinstitut Fürth - Institut für Ultrafeinfokus Röntgentechnik - platziert. Um die eingebrachten Fehler zu detektieren, fanden folgende CT-Aufnahmeverfahren bei den Untersuchungen Verwendung:

- Axiale CT
- Region of Interest CT
- Swinglaminographie
- Digitale Tomosynthese
- Hochauflösende Radioskopie
- TDI Scanner

Axiale CT: Die ACT ermöglicht eine exakte räumliche Rekonstruktion des Objektvolumens. Insbesondere die Tiefeninformation innenliegender Objektstrukturen kann durch die ACT ermittelt werden. Das Objektvolumen wird aus einer Vielzahl von Einzelprojektionen rekonstruiert. Voraussetzung dafür ist jedoch, dass das zu untersuchende Objekt in allen Winkelschritten in seiner gesamten Ausdehnung (senkrecht zur Drehachse) auf den Röntgendetektor abgebildet wird. Der Projektionsdatensatz wird dann im Rekonstruktionsschritt mittels mathematischer Verfahren in ein sog. Voxelvolumen überführt. Hierzu wird in der Regel (aufgrund ihrer Effizienz) die sog. gefilterte Rückprojektion eingesetzt. Durch fehlerhafte oder fehlende Projektionsdaten können in den rekonstruierten Volumendaten sog. Artefakte entstehen, also Strukturen, die keine Entsprechung im gemessenen Objekt haben.

ROI CT (RCT): Die ROI CT (Region of Interest) unterscheidet sich von der ACT dadurch, dass bei der Aufnahme der Projektionsdaten ein Herauswandern des Objektes aus dem Sichtfeld des Detektors zugelassen wird. Dadurch wird eine Reduktion des Datenvolumens und somit eine Beschleunigung des Messvorganges erreicht, allerdings auf Kosten möglicher Artefakte in den Volumenrekonstruktionen, da ein bestimmter Anteil an Projektionsinformation fehlt.

Swinglaminographie (Swing-CT): Die Swinglaminographie ist ebenfalls eine Variante der ACT, bei der nur ein bestimmter Winkelbereich aus den Gesamtprojektionsdaten zur Volumenrekonstruktion herangezogen wird. Speziell bei planaren Objekten wie den vorliegenden Versuchsplatten ermöglicht dies ein näheres Heranrücken des Objektes an die



Röntgenröhre (Höhere Vergrößerung). Das Prüfobjekt wird nur um z.B. 90 Grad gedreht, um eine Kollision mit der Röntgenröhre zu verhindern.

Digitale Tomosynthese (DTS): Die digitale Tomosynthese ist ein Tomographieverfahren speziell für planar ausgedehnte Objekte. Im Gegensatz zur ACT wird das Objekt nicht um eine Drehachse gedreht, sondern es werden Schrägdurchstrahlungen in verschiedenen Winkelpositionen durchgeführt. Bei feststehender Röntgenquelle werden dann z.B. Objekt und Detektor auf konzentrischen Kreisbahnen bewegt.

Hochauflösende Radioskopie (HR): Die HR ermöglicht durch Ausnutzung der geometrischen Vergrößerung im Messaufbau eine gute Auflösung im Ortsbereich, d.h. die Visualisierung auch kleiner Details. Dazu ist das zu messende Objekt möglichst nahe an der Röntgenquelle zu positionieren. Die erreichbare Ortsauflösung hängt dabei insbesondere von der Brennfleckgröße und dem Vergrößerungsverhältnis ab. Es wird angestrebt, bei ca. achtfacher Vergrößerung (400 µm Pixelgröße des Detektors) eine Auflösung im Objekt von ca. 50 µm zu erreichen. Bei solchen Pixelgrößen ist die Verwendung einer Mikrofokus Röntgenröhre notwendig, die mit Brennfleckgrößen von wenigen 10 µm arbeitet. Bedingt durch die hohe Ortsauflösung kann immer nur ein Ausschnitt des Objektes abgebildet werden, d.h. für einen größeren Bereich sind mehrere Prüfpositionen notwendig. Um die vorliegenden Versuchsplatten mit o.g. Genauigkeit abzubilden, wären bei einer Abmessung von 400 x 600 mm² und einem 512² Detektor ca. 384 Messungen notwendig. Aus diesem Grund werden die HR Messungen im Gegensatz zum im Angebot genannten Vorgehen nur an einigen wenigen interessanten Stellen durchgeführt, die anhand einer Übersichts-Radiographie oder –CT ermittelt werden. Nachteil der Radioskopie (Durchstrahlung) ist die Überlagerung sämtlicher Objektstrukturen innerhalb eines Projektionsbildes und der damit einhergehende Verlust der Tiefeninformation.

TDI-Scanner: Zur produktionsintegrierten Untersuchung von Objekten sind Zeilenscanner gut geeignet. Hierbei wird das Prüfobjekt in einer kontinuierlichen Bewegung an einer Zeilenkamera vorbeigeführt. Die Zeilenkamera liefert in schneller Folge linienförmige Schwächungsprofile des Objektes, aus denen sukzessive Bilder zusammengesetzt werden. Hier kann eine ohnehin vorliegende Vorschubbewegung des Objektes zur Datenakquisition genutzt werden. Kennzeichnende und aufeinander abzustimmende Systemparameter sind Vorschubgeschwindigkeit und Auslesefrequenz der Zeilenkamera. Eine besondere Ausprägung von Zeilenkameras sind TDI-Kameras (Time delayed integration). Hierbei wird auf einem Flächensensor eine zur Objektbewegung synchrone Aufintegration der Ladungen in den Zeilen des Sensorchips durchgeführt. Dies zu einer Empfindlichkeitssteigerung des Sensors, da effektiv eine größere Sensorfläche zur Verfügung steht.

2.4 AP 4 Fehlerdetektion im Verarbeitungsprozess

Herstellung und Logistik der Preforms

Nach Erhalt der Preforms von der Firma HIGHTEX wurden diese bei Eurocopter kontrolliert und für die weitere Verarbeitung vorbereitet. Zur Qualitätssicherung in der Prozesskette wurde das Handhaben in der Versuchshalle für diese Preforms als kritisch identifiziert. Im Projektverlauf wurde so ein Zwischenloop eingeführt, der die Lagerung und die Handhabung von vorbereiteten – d.h. TFP genähten – Preforms erlaubt. Ein Folienschweißverfahren zeigte sehr gute Ergebnisse. Die Auswahl des Verfahrens wurde nach folgenden Gesichtspunkten getroffen:

- Kein Faserverzug durch manuelles Handling
- Schutz vor äußeren, d.h. Umwelteinflüssen
- Keine Kontamination der Halbzeuge durch Fremdstoffe

Als weiterer Optimierungsschritt wurden Tablett mit einer Konturkontrolle eingeführt, die gleichzeitig auch eine Überprüfung der konstanten Preformqualität erlauben. Abbildung 6 zeigt von HIGHTEX „fehlerhaft“ (siehe effects-of-defects-Programm) vorbereitete TFP Preforms die bei Eurocopter vor der Verarbeitung „vakuumiert“ und „eingeschweißt“ wurden.



Abbildung 6: Lagerung der TFP Preforms zur Sicherstellung der Bauteilqualität

Preformzuschnitt und Qualitätselemente in der Preformverarbeitung

Zur Imprägnierung wurden die Preforms nochmals auf Endmaß zugeschnitten um die Kavität exakt definiert auszufüllen. Um die Qualität der Injektionen sicherzustellen sind genau definierte Schnittkanten, bzw. die exakte Lage der Nähte im Bauteil sicherzustellen. Um diese zu erreichen wurde bei Eurocopter eine Laser-Referenzierung für den Halbzeugzuschnitt eingeführt. Hierzu wurde ein bei Eurocopter verfügbares, aus der Prepreg-Serienfertigung – zur Projektion von Prepreglagepositionen - bekanntes System verändert und an einen CNC-Cutter adaptiert. Abbildung 7 zeigt die oberhalb des CNC-Cutters angeordnete Projektionsmimik, die aus dem Bestand der Prepregfertigung zur Verfügung gestellt wurde.



Abbildung 7: Qualitätsgesicherter Ausschneidevorgang mit Bezug zu bauteilspezifischen Nähten

Ebenso ist in Abbildung 7 ein auf dem Cutter angebrachter „Referenzpunkt“ zu erkennen, der die Verknüpfung von Laser und Cuttertisch sicherstellt. In der Praxis wurde dies zunächst für die Umsetzung der PROSA Prüfplatten angewendet. Die Anpassung des Zuschnitts an die exakt definierte Preform, zur Sicherstellung des Cutter-Pfades respektive der Nahtanordnungen in der Prüfplatte, erfolgt im ersten Schritt händisch laserunterstützt. Dieser Prozessschritt erfolgte vor der „Einlagerung“ der Preforms.

Schikanennähmuster für TFP basierend auf Bauteil-Anforderungsprofil:

Die Erarbeitung des TFP Schikanennähmusters zur Simulation von Fertigungsfehlern und deren Effekt auf die Bauteilqualitäten wurden erarbeitet und an HIGHTEX übergeben. In Zusammenarbeit mit HIGHTEX wurden damit diverse mögliche Fehler in einem Preformsatz integriert und als Preform geliefert, die ebenfalls bei ECD im RTM Verfahren imprägniert wurden.

Abbildung 8 zeigt eine Skizze einer derartigen Schikanenpreform. In diesem Beispiel wurden Einzellagenstoßpositionen, die im TFP Prozess eines Bauteils auftreten können, simuliert. Die Ergebnisse nach der Imprägnierung werden Rückschlüsse dieses Preformkonstruktionsmerkmals auf den Bauteilherstellungsprozess zulassen. Hieraus abgeleitet ergeben sich Vorgaben für die spätere Konstruktion und Auslegung von zukünftigen Preform-RTM-Produkten. Variiert wurden beispielsweise die Parameter: Radius, Stichtlänge, Abstand der sich treffenden Programme.

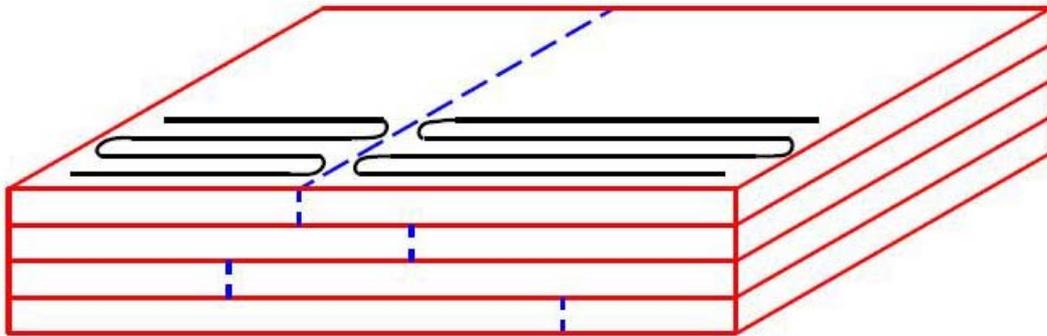


Abbildung 8: Schikanennähmuster zur Generierung typischer TFP Fehler in einem Bauteil

Der Aufbau der Preforms und weitere Informationen zur Fertigung dieser kann dem Hightex Abschlussbericht entnommen werden.

Herstellung der Lamine

Im Berichtszeitraum wurde eine Vielzahl von RTM-Platten gefertigt. Für die verschiedenen Plattendicken (2mm, 3mm, 8mm) wurden entsprechende Werkzeuge umgesetzt. Die nötige Verpressung ermöglicht eine 250 kN 4 Säulen Multilayerpresse (siehe Abbildung 9). Für den Injektionsvorgang stand eine volumengesteuerte Viskotec-Anlage zur Verfügung, die eine Überwachung des Injektionsprozesses ermöglicht.



Abbildung 9: RTM-Presse mit Werkzeug

Eine erfolgte Sichtprüfung der TFP-Lamine zeigte insbesondere bei den Preforms mit Fadenreduktionsprogramm nach der Injektion starke Ondulationen (siehe Abbildung 10). Aufgrund des notwendigen Injektionsdrucks wurden die einzelnen Rovings weggeschwämmt. Die Preforms mit Fadenreduktionsprogramm, bei denen auch kein Trägermaterial mehr vor der Injektion zum Fixieren der Rovings Verwendung fand, scheinen für den derzeitigen RTM-Prozess nicht geeignet zu sein.

Eine Faservolumengehaltsbestimmung beim CRC¹ (Methode TGA und H₂SO₄) ergab im Mittelwert einen Faservolumengehalt von 61%. Dieses Ergebnis lässt auf ein korrektes Verhältnis von Faser und Harz nach dem RTM-Prozess schließen. Eine zerstörende Prüfung dieser Prüfplatten im Rahmen des „effects of defects“ wäre nicht zweckmäßig – d.h. die Sichtprüfung wurde an der Stelle für ausreichend befunden. Die weitere Herstellung der Lamine aus diesen Preforms im RTM-Verfahren wurde gestoppt.

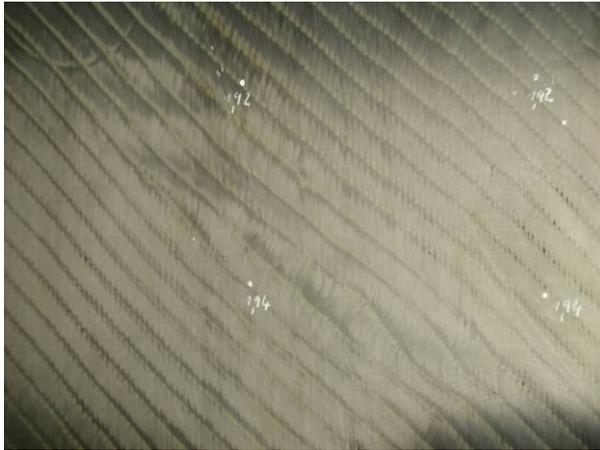


Abbildung 10: TFP-Prüfplatten mit Fadenreduktionsprogramm

¹ CRC = Corporate Research Centre

Fehlerdetektion

Bei der FHG fand eine gemeinsame Auswertung der Aufnahmen statt. Neben den TFP-Laminaten ist auch ein Teil der MAG-Lamine vom CTC untersucht worden. Bei der Sichtung der einzelnen Auswertungen konnten die Fehler „Splice“ und „Fuzz Ball“ (siehe Abbildung 11) eindeutig mit den angewandten CT-Verfahren erkannt werden.

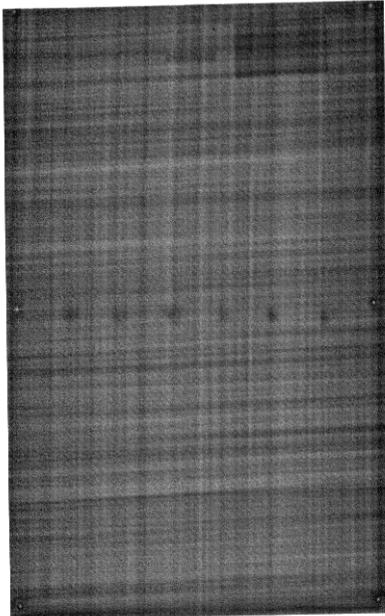


Abbildung 11: TDI-Scanner (Platte 45 F 11-09 1-x)

Das Fehlerbild „Winkel“ ließ sich mit allen Verfahren detektieren. Lediglich das Fehlerbild „Gap“ konnte mit keiner Variante erkannt werden. Eine subjektive Beurteilung der Ergebnisse zu den Messungen der MAG-Lamine kann der folgenden Tabelle entnommen werden (++ = sehr gut zu erkennen, + = gut zu erkennen, 0 = zu erkennen, - = schlecht zu erkennen, -- = nicht zu erkennen, ? = Messbedingungen waren unzureichend, k. M. = keine Messung durchgeführt):

			Aufnahmeverfahren					
			A-CT	ROI-CT	SWING	DTS	HR	TDI
NCF-Platten	90-S-11-08-1-x	Splice	++	++	-	k. M.	k. M.	-
	45 G-11-08 1-x	Gap	?	k. M.	k. M.	k. M.	?	k. M.
	90 S-11-02 1-x	Splice	--	--	o	k. M.	k. M.	k. M.
	45 F 11-09 1-x	Fuzz Ball	+	+	k. M.	k. M.	k. M.	+
	90 O-11-07 1-x	Ondulation	?	?	k. M.	k. M.	k. M.	?
	45 W-11-02 1-x	Winkel	+	+	+	k. M.	k. M.	++

Weitere Erläuterungen zum Aufbau und der Bezeichnungen der MAG-Laminat sind dem CTC Bericht zu entnehmen.

Bei den CT-Messungen wurden Mini- und Makro-Focus Röhren verwendet. Mit beiden Röhren wurden vergleichbare Kontrastaufösungen erzielt. Die Makro-Focus Röhre erzielte ein eindeutig besseres räumliches Auflösungsvermögen. Dies gilt auch für das hochaufgelöste digitale Röntgen (vergleiche Abbildung 12 und Abbildung 13).

Die Aufnahmen der dünneren Prüfplatten (2mm) ließen sich nur sub-optimal auswerten. Sich einstellende Krümmungen bei den dünneren Platten erschweren eine Zuordnung der einzelnen Schichten bei der Rekonstruktion.

Die DTS konnte aufgrund der Plattengröße nicht durchgeführt werden. Der Messraum ließ nur ein Vermessen der TFP-Platten zu.

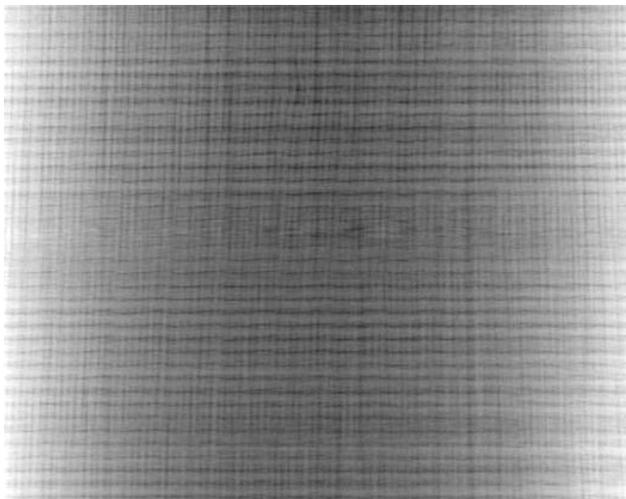


Abbildung 12: ROI mit Mikrofokus Röhre (Platte 90-S-11-08-1-x)

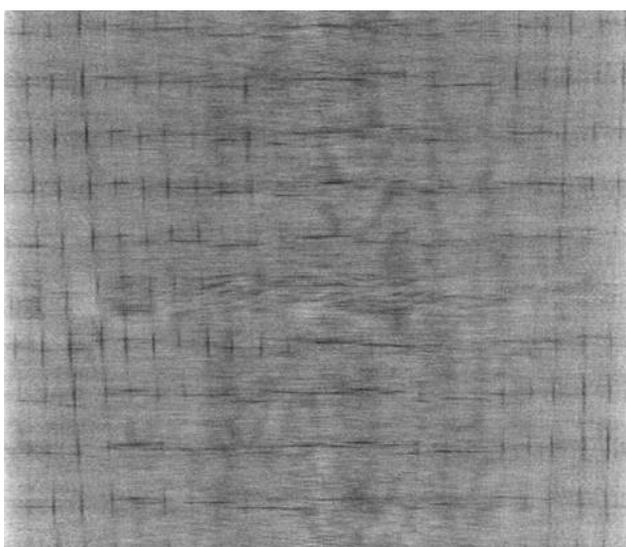


Abbildung 13: hochaufgelöste ROI mit Mikrofokus Röhre (Platte 90-S-11-08-1-x)

Die TFP-Platten wurden mit allen oben aufgeführten NDT-Verfahren untersucht. Bei den TFP-Platten war neben den Faserorientierungen der Rovings auch eine Vielzahl von

Porositäten zu erkennen. Abbildung 13 und Abbildung 14 zeigen die durchgeführten Rekonstruktionen.

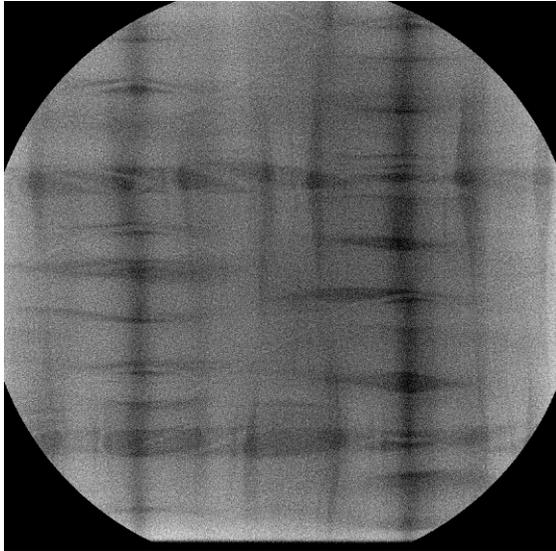


Abbildung 14: DTS (Variation 1.2 [+45,-45,-45,+45]sym)

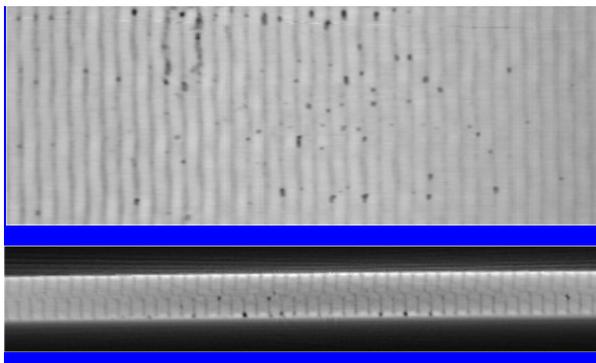


Abbildung 15: ROI-CT (Variation 1.2 24 x 0°)

Ziel weiterer Untersuchungen war es, Wendestellen (Platte P2519², Variation 4.1 mit [+45, 0, -45, 90]_{sym}, hergestellt im RTM-Verfahren bei ECD) und Faserorientierungen (Platte P2258 (K5/K7), Variation 2.1 mit 6 x 90° Lagen, hergestellt im VAP-Verfahren bei EADS-M), mit möglichen Porositäten zu detektieren.

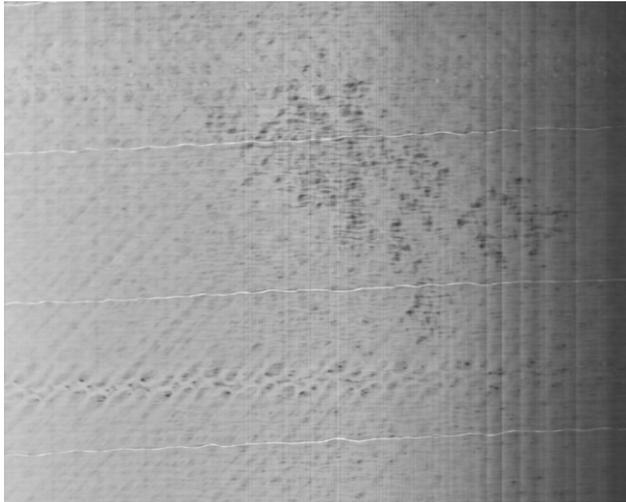


Abbildung 16: P2519, ROI-CT

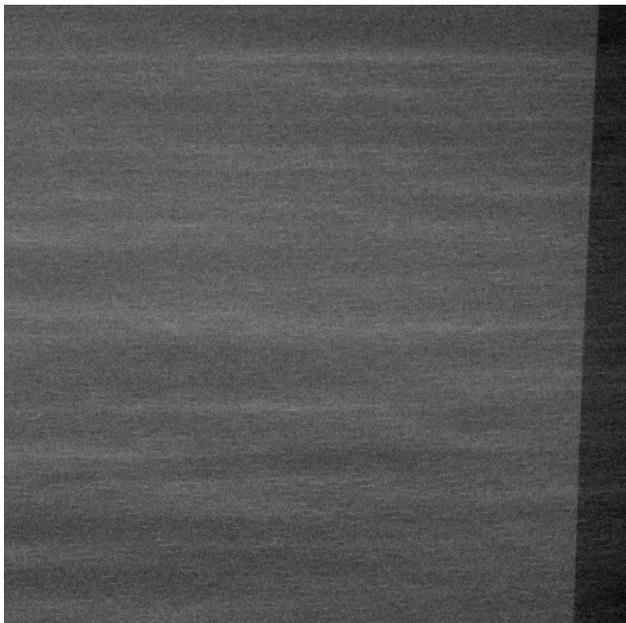


Abbildung 17: P2258 (K5/K7), ROI CT

Abbildung 16 und Abbildung 17 zeigen die Ergebnisse der erfolgten ROI-CT. Die von der Fa. Hightex in die Preforms bewusst „auf Lücke“ eingebrachten Wendestellen sind deutlich in Abbildung 16 – neben Porositäten – zu erkennen. Das Ergebnis der ROI-CT mit der Platte P2258, in Abbildung 17 zu erkennen, ist nicht zufrieden stellend. Es lassen sich keine Faserorientierungen bestimmen.

Bei den angewendeten Durchstrahlungsverfahren zeigten die Ergebnisse der Platte P2258 ein ähnliches Resultat wie in der vorangegangenen ROI-CT. Abbildung 18 zeigt exemplarisch das Ergebnis der Radioskopie. In dem homogen verlaufenden Bild sind keinerlei Faserstrukturen zu erkennen. Gründe hierfür sind einerseits die ungünstige Geometrie (Dicke) für die Fixierung der Platte vor der Vermessung in der Messkammer und die unidirektionale Faserausrichtung.

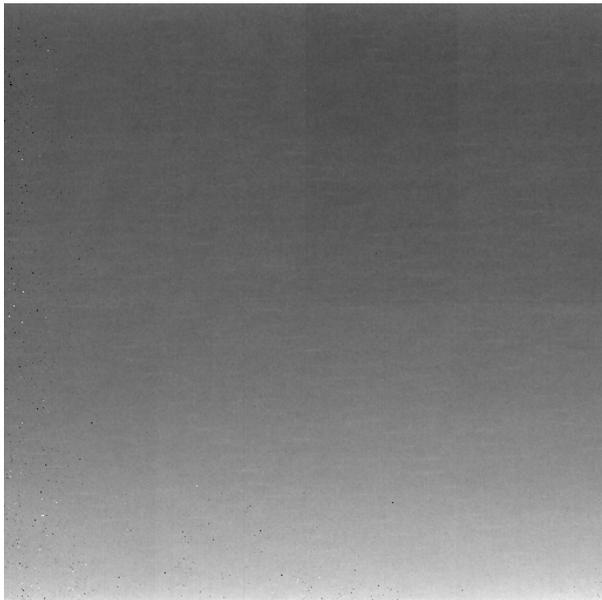


Abbildung 18: P2258 (K5/K7), Hochauflösende Radioskopie

Das erzielte Resultat mit der hochauflösenden Radioskopie bei der Platte P2519 ist für einen Teilbereich in Abbildung 19 zu erkennen. Abbildung 20 zeigt eine Aufnahme der identischen Platte mit einem TDI-Scanner. In beiden Aufnahmen lassen sich die Faserverläufe segmentieren und entsprechend auswerten. In Abbildung 20 sind zusätzlich die Wendestellen und Porositäten zu erkennen.

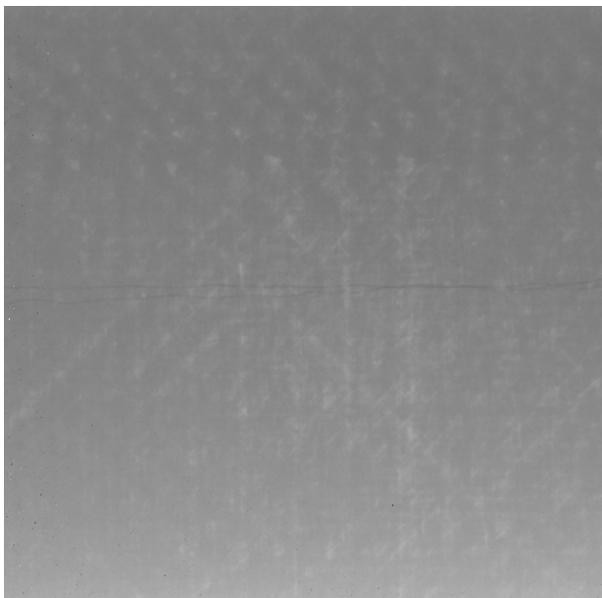


Abbildung 19: P2519, Hochauflösende Radioskopie

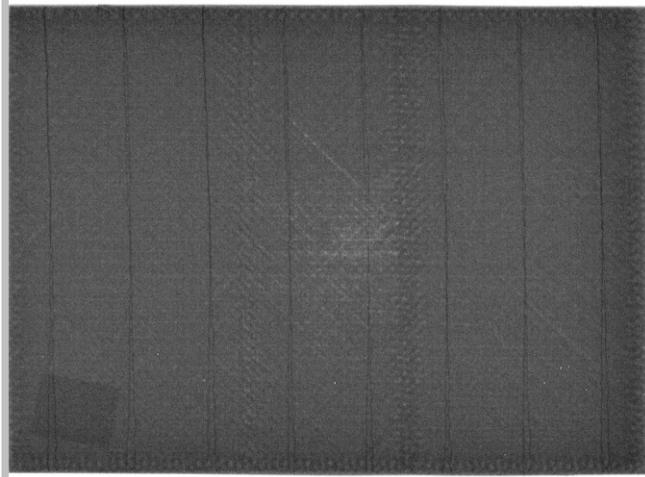


Abbildung 20: P2519, TDI-Scanner



2.5 AP 5 Validierung der Fehler

Anschließend an ein umfangreiches Fehlerhäufigkeits- und –Ursachen Programm, wurde ein Plan zur Validierung der „effects-defects“ erarbeitet. Das effects-of-defects Programm innerhalb des PROSA Projektes konzentrierte sich dabei auf drei wesentliche Säulen:

1. Validierung geeigneter Messmethodik zur Beurteilung von trockenen Preforms. Für ECD bedeutet dies, die Vermessung von TFP-Preforms, die nach ECD Vorgabe durch die Firma HIGHTEX hergestellt und geprüft werden.
 - a) Effekte, die durch die Nähtechnik beim Aufbau der TFP Strukturen entstehen, sind hinsichtlich ihrer Auswirkung auf:
 - die Geometrietoleranz der Bauteilpreform
 - das Kompaktierungsverhalten der Preforms im Werkzeug und
 - mögliche Ondulation der Faserbündelzu untersuchen.

Es zeigt sich, dass abhängig von den Nähparametern (Stichlänge, Stichbreite, Fadenspannung) eine Oberflächentopologie entsteht, die zu Oberflächenungleichmäßigkeit führt. Dieser Effekt kann somit als eine Ursache für ungleichmäßige Imprägnierung an der Oberfläche der TFP-Bauteile genannt werden. Weiterhin ist durch die Variation der oben genannten Parameter ein Verzug der Preforms (Nahtverzug) festzustellen, der die Kantenstabilität einer trockenen Preform nur in groben Grenzen tolerierbar macht.

- b) Aus diesen Ergebnissen werden Vorschriften zum optimalen Preformaufbau hinsichtlich der späteren Bauteilqualität gegeben:
 - Reduktion der Nähfadenmenge wo möglich → Z.B. durch freie Wegstrecken der Rovingpositionierung und ausschließliche Endvernähung der Preforms
 - Spannungsfreies Ablegen der Rovings und leichte Fixierung bei gleichzeitiger Vermeidung von Ondulationen (→ Info aus Protex)
 - Definition von Drapierprozessen. Die eingestellten Nähparameter haben einen direkten Einfluss auf die Drapierbarkeit von TFP-Einzelpreforms
2. Erarbeitung von Prüfmethoden zur eindeutigen Zuordnung von „on-line“ erfassten Fehlern zur Bauteilqualität. Hierzu wurden diverse NDT Verfahren eingesetzt.

Die von ECD eingesetzten NDT Verfahren wurden parallel zur Untersuchung von TFP Bauteilen auch auf die MAG-Technologien (Saertex, CTC) übertragen. Es fand in der Durchführung der NDT-Prüfungen zunächst keine Kalibrierung der Systeme statt. Definiertes Hauptziel war es, geeignete Verfahren zu etablieren, mit denen lokale Fehler eindeutig erkannt werden können.

3. Projektplan „effects-of-defects“

Das effects-of-defects Programm wurde parallel zur trockenen Untersuchung der TFP-Preforms durchgeführt. Im Rahmen des PROSA-TFP-effects-of-defects Programms wurden verschiedene Preformparameter untersucht. Ziel war es, für die definierten Parameter entsprechende Back-Ups für die PROSA Datenbank zu etablieren.



Über die Untersuchung der TFP-Parameter hinausgehend, wurde parallel – in Zusammenarbeit mit EADS-M – der Einfluß des Imprägnierverfahrens auf die Bauteilqualität untersucht. Für einzelne Referenzproben wurden jeweils VAP und RTM-Platten hergestellt und gleichermaßen geprüft. Das Ergebnis wird einen Rückschluß auf den Einfluß der Preformparameter „defects“ auf das jeweils eingesetzte Imprägnierverfahren zulassen.



2.6 AP 6 Auswertung der Ergebnisse

NDT-Untersuchungen

Wird die Gesamtheit der durchgeführten Untersuchungen ausgewertet, kommt man zu folgendem Fazit:

Die ROI-CT liefert gegenüber der axialen CT bei den vorliegenden plattenförmigen Prüfobjekten ebenbürtige Rekonstruktionsergebnisse.

Die Swing CT ist im Allgemeinen für eine zuverlässige Dateninterpretation (noch) nicht geeignet. Ebenso wie die Digitale Tomosynthese (oder Planare CT) vermag sie nur bei hinreichend kontrastreichen Strukturen aussagekräftige Ergebnisse zu liefern. In diesem Zusammenhang wäre eine weitergehende Untersuchung interessant, welcher Winkelbereich (abhängig von der zu untersuchenden Objektgeometrie) die brauchbarsten Rekonstruktionsergebnisse liefert.

Eine große Schwierigkeit liegt in der Ausrichtung der Platten, da mit den vorliegenden Hilfsmitteln beim FHI nur zu den Volumenachsen orthogonal liegende Schichten dargestellt werden konnten. Eine zusätzliche Komplikation entsteht durch die Verwölbung dünner Platten durch Vorspannen zur Befestigung. Hier würde sich eine softwaretechnische Extraktion von Ebenen parallel zur Plattenoberfläche anbieten, um die innere Struktur der Prüfobjekte vernünftig darzustellen. Eine geeignete Software war bei der Durchführung nicht verfügbar.

Eine pauschale Bewertung oder Bevorzugung bestimmter Röntgenmethoden ist schwierig. Vielmehr hat jede Methode seine Vor- und Nachteile. So erwiesen sich z.B. die Scanner Messungen als sehr effizient, da sie einen schnellen Überblick über das gesamte Bauteil geben. Das trifft auch bei sehr kontrastschwachen, aber dafür großflächigen Details zu, da man u. U. bei „zu genauer“ Betrachtung keinerlei Struktur mehr erkennt.

Folgende eingebrachte Fehler ließen sich – neben Porositäten – bei den Untersuchungen der MAG-Laminare detektieren:

- Splice (ACT, ROI-CT)
- Fuzz Ball (ACT, ROI-CT, TDI)
- Ondulationen (ACT, ROI-CT, TDI)
- Winkel (ACT, ROI-CT, SWING, TDI)

Der Fehler „Gap“ konnte mit keiner Variante detektiert werden. Es wird vermutet, dass der Fehler sich evtl. bei der Injektion in seiner Ausprägung verändert hat. Das CTC hat für eine entsprechende Auswertung Schlifffbilder angefertigt.

Im Hinblick auf die Prüfung „echter“ Bauteile, die nicht plattenförmig, sondern dreidimensional und wesentlich größer als die betrachteten Platten sein dürften, scheinen die ROI CT sowie die Swing CT als die sinnvollsten der volumengebenden Verfahren. Allerdings erlaubt der hohe Messaufwand nur den Einsatz für eine Prozessanalyse und stellt keine Möglichkeit der online Prozesskontrolle dar. Die Anwendung von scannenden Systemen dürfte nur bei relativ flachen Objektgeometrien sinnvoll sein. Wobei gerade der TDI-Scanner aufgrund seiner enormen Scann- und Auswertegeschwindigkeit (wenige Sekunden) für eine Methode zur prozessbegleitenden Schadensanalyse in Form einer online Überwachung dienen könnte.



2.7 AP 7 Darstellung der „effects of defects“

Ergebnisse des durchgeführten Probenprogramms

Das im Hause ECD durchgeführte Probenprogramm kann in einer Übersicht der Tabelle 1 und Tabelle 2 entnommen werden. Alle Prüfungen wurden bei RT durchgeführt.

RTM	Druck (0°-Richtung) ISO 14126	Druck (90°-Richtung) ISO 14126	Zug (0°-Richtung) EN 2561	Zug (90°-Richtung) DIN 65378	ILSS (0°) DIN 53398	IPS (45°) DIN 65466
Lagenaufbau	6 x 0° Lagen	6 x 90° Lagen	6 x 0° Lagen	6 x 90° Lagen	24 x 0° Lagen	[+45,-45,-45,+45] _{sym}
Variation						
1,2	6	6	6	6	6	6
2,1	-	-	-	-	6	6
2,2	-	-	-	-	6	6

Tabelle 1: Probenprogramm: TFP-Prüfplatten in RTM hergestellt

Für das Prüfprogramm wurden insgesamt 132 Probenkörper aus den TFP-Prüfplatten nach den entsprechenden Normen hergestellt. Für jede Prüfung wurden 6 Probenkörper vorgesehen.

VAP	Druck (0°-Richtung) ISO 14126	Druck (90°-Richtung) ISO 14126	Zug (0°-Richtung) EN 2561	Zug (90°-Richtung) DIN 65378	ILSS (0°) DIN 53398	IPS (45°) DIN 65466
Lagenaufbau	6 x 0° Lagen	6 x 90° Lagen	6 x 0° Lagen	6 x 90° Lagen	24 x 0° Lagen	[+45,-45,-45,+45] _{sym}
Variation						
1,2	6	6	6	6	6	6
2,1	6	6	6	6	6	6
2,2	-	-	-	-	-	-

Tabelle 2: Probenprogramm: TFP-Prüfplatten in VAP hergestellt

Die Auswertung der Prüfungen ermöglicht einen Vergleich zwischen:

- erhöhte Fadenspannung <-> normale Fadenspannung
- fadenreduzierte Vernähung <-> normale Vernähung
- gefertigt in VAP <-> gefertigt in RTM

Druck-Proben:

Die Druckeigenschaften der unterschiedlich gefertigten Laminare sind jeweils in Längs- und Querrichtung zur Faserorientierung nach DIN EN 141216 ermittelt worden. In Diagramm 1 und Diagramm 2 sind im Vergleich die maximalen Druckspannungen, die die Probekörper standgehalten haben, mit dem jeweiligen Mittelwert aufgetragen. Wie in Kapitel 2.4 begründet, wurden die Variationen 2,1 und 2,2 in RTM gefertigt nicht geprüft.

In beiden Diagrammen ist deutlich der negative Einfluss der erhöhten Fadenspannung zu erkennen. Bei den in RTM gefertigten Platten verringert sich die maximale Druckbelastung in 0°-Richtung um 20,65%. In 90°-Richtung verringert sich die maximale Druckbelastung um 6,92 %.

Ein Vergleich der Variante 1,2 in RTM und VAP gefertigt zeigt, dass die Laminare in VAP in 0°-Richtung 0,86% und in 90°-Richtung um 2,74% mehr Druckspannung stand halten. Die größte Standhaltigkeit bei den durchgeführten Druckprüfungen zeigte die Variante 2,1 in VAP gefertigt. Gegenüber der Variante 1,1 in RTM gefertigt zeigt sich eine höhere Druckbelastung um 18% in 0° bzw. 2,29% in 90°.

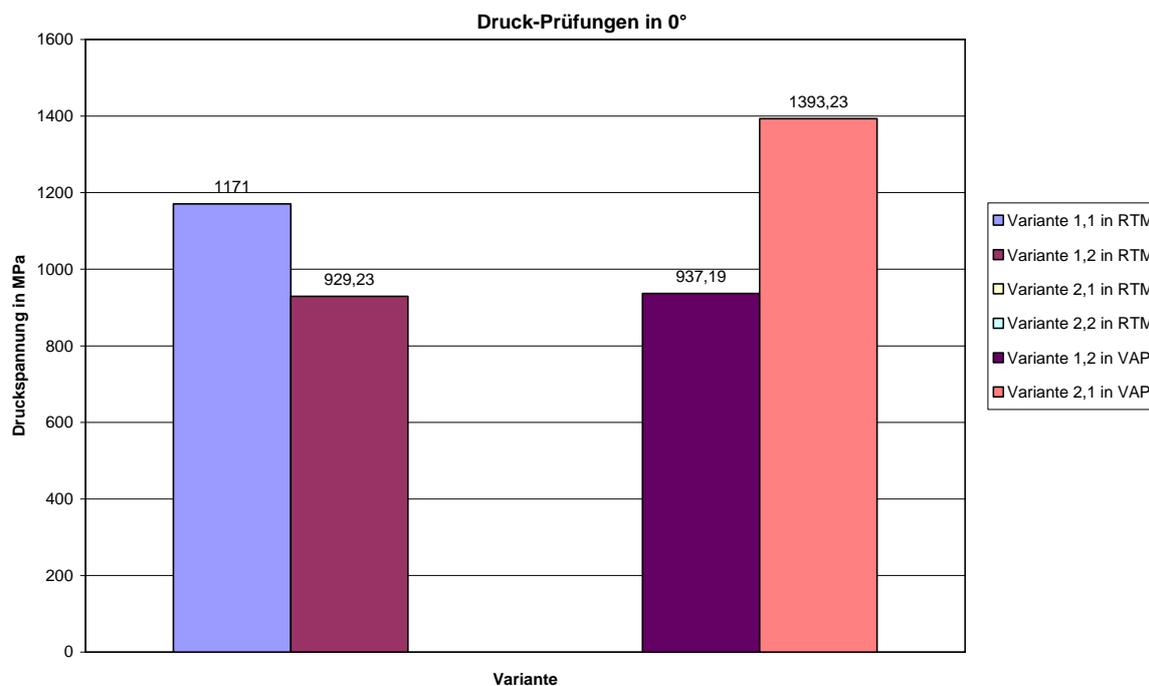


Diagramm 1: Druck-Proben in 0°

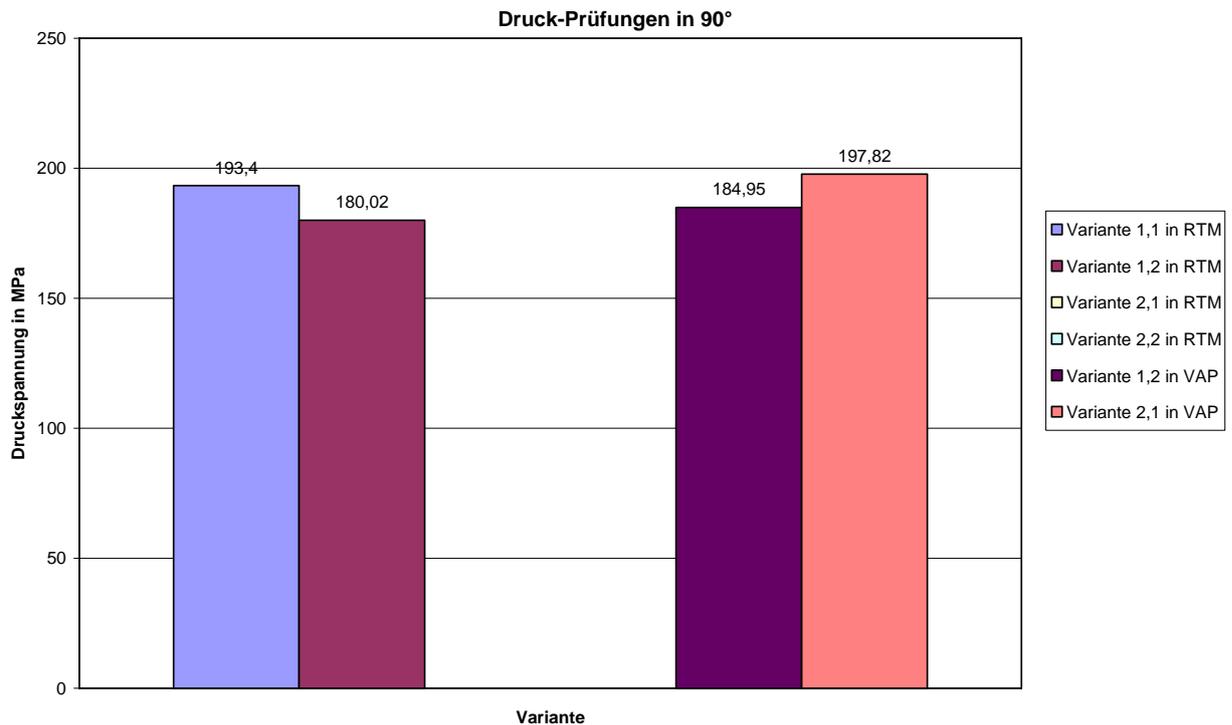


Diagramm 2: Druck-Proben in 90°

Zug-Proben:

Die Zugeigenschaften der unterschiedlich gefertigten Lamine sind jeweils in Längs- und Querrichtung zur Faserorientierung nach DIN EN 2561 und DIN EN 65378 ermittelt worden. In Diagramm 3 und Diagramm 4 sind im Vergleich die maximalen Zugspannungen, die die Probekörper standgehalten haben, mit dem jeweiligen Mittelwert aufgetragen. Wie in Kapitel 1.4 begründet, wurden die Variationen 2,1 und 2,2 in RTM gefertigt nicht geprüft.

In beiden Diagrammen ist deutlich der negative Einfluss erhöhter Fadenspannung zu erkennen. Bei den in RTM gefertigten Platten verringert sich die maximale Zugbelastung in 0°-Richtung um 19,28%. In 90°-Richtung verringert sich die maximale Zugbelastung um 20,44%.

Ein Vergleich der Variante 1,2 in RTM und VAP gefertigt zeigt, dass die Lamine in VAP in 0°-Richtung 6,42% mehr und in 90°-Richtung um 6,23% weniger Zugspannung standhalten.

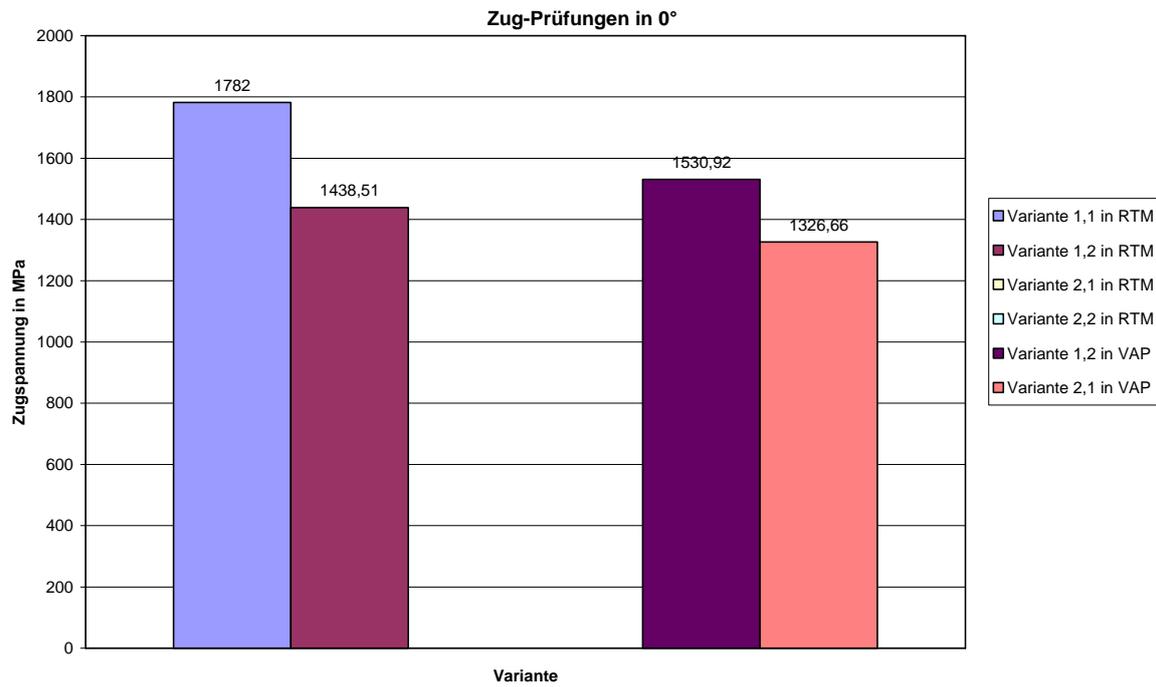


Diagramm 3: Zug-Proben in 0°

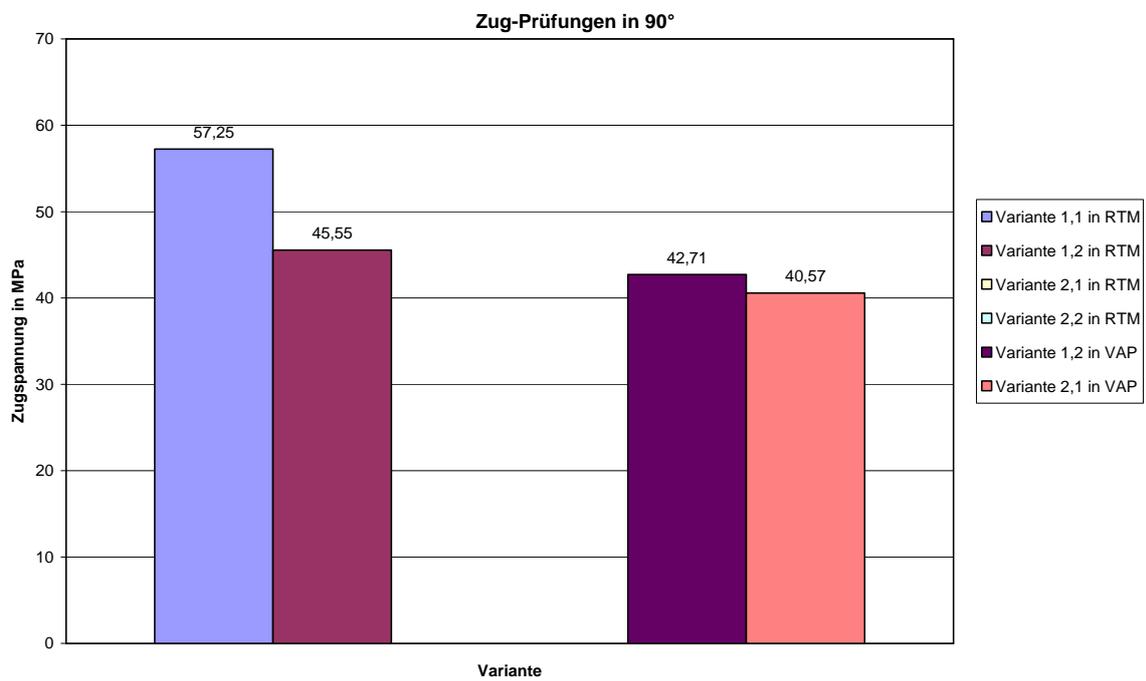


Diagramm 4: Zug-Proben in 90°



ILSS³-Proben:

Die Scherfestigkeit der unterschiedlich gefertigten Laminats wurde nach DIN 53398 bestimmt. Im Diagramm 5 ist im Vergleich die Scherfestigkeit, die mittels Biegeschwellbeanspruchung ermittelt wurde, aufgetragen.

Eine Erhöhung der Fadenspannung lässt bei einem Vergleich der Variante 2,1 in RTM und der Variante 2,2 in RTM keinen Einfluss auf die Scherfestigkeit erkennen.

Es ist zu erkennen, dass das Fadenreduktionsprogramm die Scherfestigkeit des Laminats erhöht. Die Erhöhung der Scherfestigkeit zwischen Variante 1,2 in RTM und der Variante 2,2 in RTM beträgt 3,7%. Dieselbe Tendenz zeigt ein Vergleich der Variante 1,2 in VAP und Variante 2,1 in VAP mit einer sich ergebenden Differenz von 3,25%.

Die in VAP gefertigten Platten zeigen eine erhöhte Scherfestigkeit. Die Variante 1,2 in VAP zeigt gegenüber der Variante 1,2 in RTM eine um 3,86% erhöhte Scherfestigkeit. Die Variante 2,1 in RTM zeigt gegenüber der der Variante 2,1 in VAP eine um 3,43% erhöhte Scherfestigkeit.

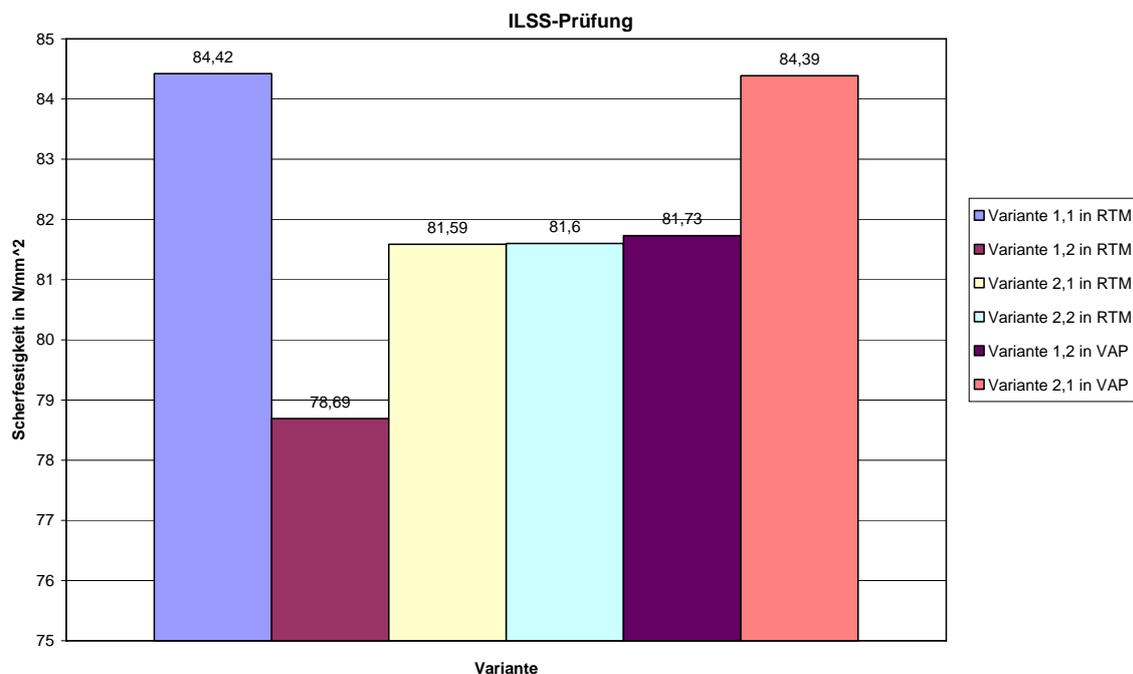


Diagramm 5: ILSS-Proben

³ ILSS = Interlaminar shear strength



IPS⁴-Proben:

Über Zugversuche ist nach DIN 65466 das Schubmodul - das eine Maß für die Steifigkeit unter Schubbelastung in der Lagenebene eines Laminates darstellt - ermittelt und für die unterschiedlichen Laminare in Diagramm 6 dargestellt.

Eine erhöhte Fadenspannung zeigt bei den Laminaten in RTM und VAP als Resultat eine geringere Steifigkeit. Die Differenz zur Variante 1,1 in RTM und Variante 1,2 in RTM beträgt 7,46%. Die Differenz zur Variante 2,1 in RTM und Variante 2,2 in RTM beträgt 2,4%.

Der Einfluss des Fadenreduktionsprogramms zeigt bei einem Vergleich der Variante 1,1 in RTM und Variante 2,1 in RTM eine Reduktion der Steifigkeit um 12,85%. Die Steifigkeit ist im Vergleich zwischen Variante 1,2 in RTM und Variante 2,2 in RTM um 8,08% reduziert.

Die in VAP gefertigten Platten zeigen in der Tendenz eine höhere Steifigkeit. Ein Vergleich der Variante 1,2 in RTM und der Variante 1,2 in VAP ergibt eine Differenz von 6,44 %. Ein Vergleich der Variante 2,1 in RTM und der Variante 2,1 in VAP ergibt eine Differenz von 9,28%.

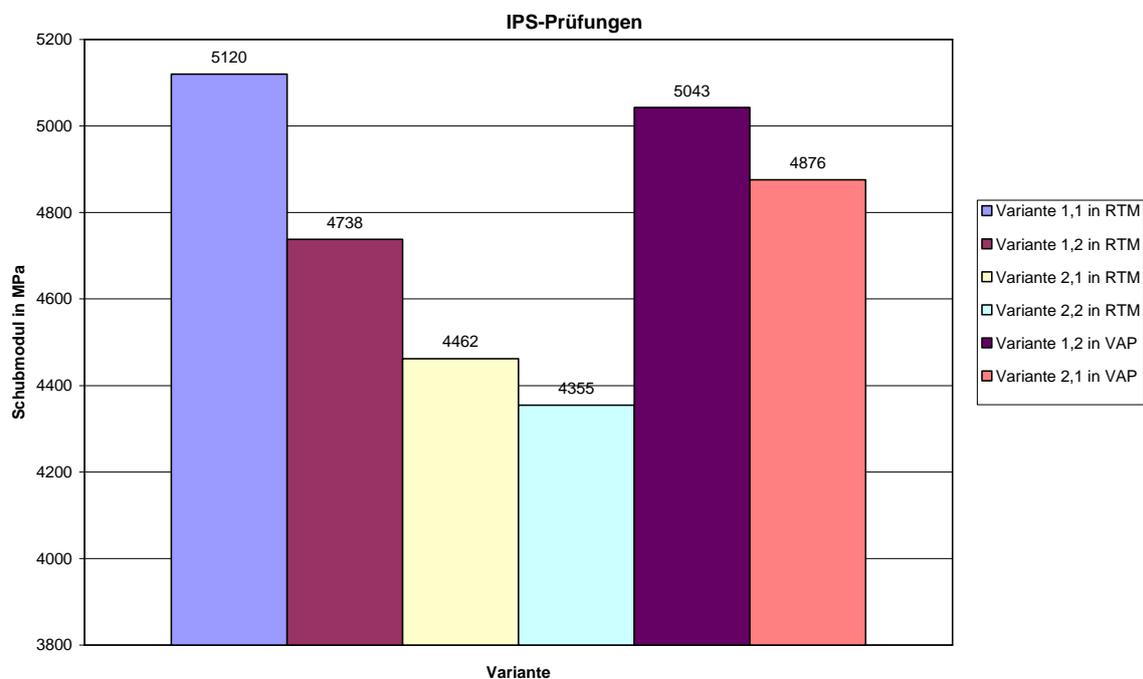


Diagramm 6: IPS-Proben

⁴ IPS = In plane shear



Das durchgeführte Probenprogramm lässt eine Aussage über die Tendenz der Auswirkungen („effects“) auf veränderten Fertigungsparameter („defects“: Fadenspannung, Fadenreduktion) und Imprägnierungsverfahren bei der Herstellung der TFP-Lamine zu.

Es ist zu erkennen, dass eine erhöhte Fadenspannung und die daraus resultierenden Ondulationen der Rovings das Kraftniveau bei Druck- oder Zugbelastung – insbesondere in Längsrichtung der Fasern – verringert. Ein Einfluss der erhöhten Fadenspannung auf die Scherfestigkeit ist nicht zu erkennen. Die Steifigkeit der Lamine nimmt bei erhöhter Fadenspannung in der Tendenz ab.

Die ILSS Proben haben gezeigt, dass sich das Fadenreduktionsprogramm auf die Scherfestigkeit des Laminats positiv auswirkt (Indiz für eine bessere Faser-Matrix-Haftung durch die Fadenreduktion). Die Steifigkeit der Lamine nimmt in der Tendenz mit dem Fadenreduktionsprogramm ab.

Insgesamt ist festzustellen, dass die in VAP gefertigten Lamine bessere Werte bei erhöhter Fadenspannung und Fadenreduktionsprogramm zeigen, als die in RTM gefertigten. Insbesondere das Fadenreduktionsprogramm scheint für den RTM-Prozess ungeeignet. Aufgrund der geringeren Fixierung der Rovings kann ein stärkerer Faserverzug bei einer durchgeführten Injektion auftreten.