

Technischer Abschlussbericht SOFT-RoCk

Zuwendungsempfänger:	Airbus Group Innovations
Förderkennzeichen:	20W1110G
Laufzeit des Vorhabens:	01.01.2012 – 31.12.2015
Berichtszeitraum:	01.01.2012 – 31.12.2015

Taufkirchen, 15.07.2016

**Jürgen Filsinger, Christopher Buchmann, Thomas Meer,
Matthias Geistbeck, Alois Friedberger, Andreas Helwig,
Fabien Ferron, Rainer Stößel**

Airbus Group Innovations
Innovation Centre IC1

TX1RP1620201 - Technical Report

Title
Technischer Abschlussbericht SOFT-RoCk

Author
Jürgen Filsinger, Christopher Buchmann, Thomas Meer, Matthias Geistbeck, Alois Friedberger, Andreas Helwig, Fabien Ferron, Rainer Stößel

Phone	E-mail	Team/Work area
+49 89 607 27165	Juergen.Filsinger@airbus.com	TX1CT

Contract or Proposal-No.	Project/ WP-N°	Roadmap Segment	Number of Pages	Date of Publication
FKZ 20W1110G	E.45374.ff	RS1.3.2	126	15.07.16

Customer name
Projekträger Luftfahrtforschung und-technologie des BMWi / Airbus Operations

Abstract:

Within the project framework RoCk Airbus Group Innovations addressed the formulation of an improved process understanding and also the sustainably improved reproducibility and quality of composite component production along the process chain. This involved for instance the methodical analysis and evaluation of the single process steps as well as the development of a sensor system to allow for monitoring and control of process parameters, relevant for the production of composite parts. The objective in this regards was to enable the use of these sensors during the development phase of composite components for the purpose of process optimisation. The signal transmission is carried out by means of wiring. A wireless data transmission and the potential implementation into serial production are conceivable, in general, but not taken into account within the perimeter of the SOFT-RoCk project.

In the field of quality control by means of non-destructive testing reliable characterisation of effects and efficient assurance of manufacturing processes were under consideration. Computer tomography was used as reference and for the characterisation of internal defects. The acquired information served as basis for the evaluation of effects and accordingly the process stability. Furthermore, clustered ultrasonic transducers have been used to monitor the quality of sandwich structures from one side and thus to better cope with the process chain of sandwich production.

Within SOFT-RoCk repair methods for CFRP production have been developed, as well. Based on the analysis of manufacturing processes and resultant potential deviations and defects, processes were implemented to allow for repair within the process chain and hence help to reduce the scrap rate.

The acquired processes were tested and evaluated with respect to feasibility by means of challenging demonstrator parts.

Zusammenfassung:

Airbus Group Innovations befasste sich im Projektverbund RoCk mit der Erarbeitung eines besseren Prozessverständnisses und der nachhaltigen Verbesserung der Reproduzierbarkeit und Qualität bei der Bauteilherstellung entlang der Prozesskette. Dies beinhaltete zum einen die systematische Analyse und Bewertung der Prozessschritte, zum anderen die Entwicklung eines Sensorsystems zur Überwachung und Steuerung wichtiger Parameter bei der Herstellung von CFK Bauteilen. Die Zielsetzung der diesbezüglichen Arbeiten in RoCk war die Schaffung der Möglichkeit, solche Sensoren in der Entwicklungsphase von CFK-Bauteilen zur Prozessoptimierung einzusetzen. Die Signalübertragung erfolgt über Datenleitungen, eine berührungslose Datenübertragung sowie ein potentieller Einsatz in Serienbauteilen sind zwar grundsätzlich denkbar, wurden aber im Rahmen dieses Vorhabens nicht betrachtet.

Im Bereich der Qualitätssicherung mittels zerstörungsfreier Prüfung wurden eine zuverlässige Effektcharakterisierung und eine effiziente Prozesssicherung betrachtet. Dies erfolgte durch den Einsatz von Computertomographie als Referenzmethode und als Technik, innere Defekte zu charakterisieren. Die gewonnenen Informationen dienten als Grundlage zur Bewertung von Effekten bzw. der Prozessstabilität. Weiterhin wurde die Qualität von Sandwichbauteilen mit Hilfe von Ultraschallgruppenwandlern einseitig überwacht, um die Prozesskette der Fertigung besser zu beherrschen.

Schließlich wurden im Projekt Konzepte für Reparaturverfahren in der CFK Fertigung entwickelt. Basierend auf einer Analyse des Fertigungsprozesses und daraus ggf. resultierenden möglichen Bauteilabweichungen und -fehlern wurden Prozesse entwickelt, die eine Reparatur der selbigen in der Fertigungskette erlauben und so Ausschussteile verringern helfen.

Die erarbeiteten Prozesse wurden im Hinblick auf ihre Umsetzbarkeit evaluiert und anhand von Schikanteilen getestet.

Keywords for database

composite, monitoring, non-destructive testing, process chain, process control, quality, repair, robustness, sensor

1 Classification

- 1 Public Dissemination
- 2 Airbus Group Internal/Project Partner Use
- 3 Airbus Group Confidential
- 4 Airbus Group Secret

2 National Government Classification

- 1 Yes
- 2 No

Acceptance



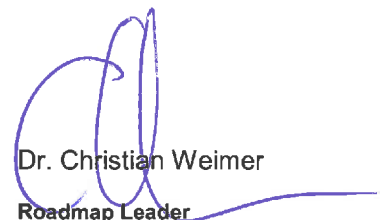
Jürgen Filsinger

Author



Dr. Matthias Geistbeck

Head of Team



Dr. Christian Weimer

Roadmap Leader
(local representative)

Distribution List:

Report distribution:

- Kuhn, Thomas (DLR PT Luftfahrtforschung)
- Hein, Björn (DLR PT Luftfahrtforschung)

- Technische Informationsbibliothek (TIB) –
Deutsche Forschungsberichte

Email:

t.kuhn@dlr.de
bjoern.hein@dlr.de

Welfengarten 1b
30167 Hannover

Inhalt

1	Aufgabestellung.....	11
1.1	Gesamtziel des Vorhabens	11
1.2	Beiträge von Airbus Group Innovations	11
1.3	Bezug des Vorhabens zu den förderpolitischen Zielen.....	11
1.4	Wissenschaftliche und technische Arbeitsziele des Vorhabens	12
2	Projektvoraussetzungen	13
2.1.1	Composite Technologies	13
2.1.2	TCC3 – Structure Engineering, Production & Aeromechanics	13
2.1.3	TCC4 – Sensors, Electronics & Systems Integration	14
3	Projektplanung und –ablauf.....	14
3.1	Geplante Beiträge zu den RoCk Arbeitspaketen	15
3.1.1	Geplante Beiträge zu RoCk AP 1.3 Reparatur großer Schalen	16
3.1.2	Geplante Beiträge zu RoCk AP 2.4 Reparaturverfahren für Stringer und Spante 16	
3.1.3	Geplante Beiträge zu RoCk AP 4.1 Anforderungen an effiziente Qualitätssicherung.....	16
3.1.4	Geplante Beiträge zu RoCk AP 4.2 Sensoren für effiziente Prozeßüberwachung	16
3.1.5	Geplante Beiträge zu RoCk AP 4.3 Anforderungen an die Prozeßsteuerung 17	
3.1.6	Geplante Beiträge zu RoCk AP 4.4 Extended NDT für Klebungen	18
3.1.7	Geplante Beiträge zu RoCk AP 4.5 Validierung der Prozeßüberwachung & -steuerung	18
3.1.8	Geplante Beiträge zu RoCk AP 5.1 Methoden für die Prozeßbeschreibung 18	
3.1.9	Geplante Beiträge zu RoCk AP 5.2 Analysemethoden für Einflußfaktoren 18	
3.1.10	Geplante Beiträge zu RoCk AP 5.4 Prozeßbewertung & Beeinflussung 19	
3.2	Projektablauf	19
4	Stand der Technik zu Projektbeginn.....	21
5	Zusammenarbeit mit anderen Stellen.....	21
5.1	Projektpartner	21
5.2	Unterauftragnehmer	22
6	Wissenschaftlich-technische Ergebnisse.....	23
6.1	AP 1.3 Reparatur großer Schalen	23
6.1.1	Ausarbeitung von Konzepten für “semi-cured repair patches”	23
6.1.2	Ermittlung TG-Wert und Aushärtegrad von M21-E	23
6.1.3	Precuring von Laminaten aus M21-E.....	25
6.1.4	Umformung von angehärteten Laminaten aus M21-E	26
6.1.5	Beurteilung der Laminatqualität	27
6.1.6	Mechanische Bearbeitbarkeit von angehärteten Laminaten aus M21-E	28
6.1.7	Zusammenfassung und Ausblick “semi-cured repair patches”	30
6.1.8	Umsetzung einer vollständigen automatisierten Reparatur.....	31

6.2	AP 2.4 Reparaturverfahren für Stringer und Spante.....	48
6.3	AP 4.2 Sensoren für die effiziente Prozessüberwachung.....	48
6.3.1	Einseitige CFK-Wabenprüfung mittels Luftultraschall	48
6.3.2	Sensorintegration in CFK Bauteile	58
6.4	AP 4.3 Anforderungen an die Prozesssteuerung	75
6.5	AP 4.4 Extended NDT für Klebungen.....	75
6.5.1	GC-IMS zur Siloxandetektion.....	75
6.5.2	Bestimmung der Rauigkeiten als Qualitätskriterium für die Oberflächenvorbehandlung	79
6.6	AP 4.5 Validierung der Prozessüberwachung & -steuerung.....	81
6.6.1	Fließfront- und Aushärtegradüberwachung mittels E-TDR	81
6.6.2	Untersuchung der Einflüsse integrierter Sensorik auf die mechanischen Laminateneigenschaften	92
6.7	AP 5.1 Methoden für die Prozessbeschreibung	92
6.7.1	Prozessstrukturierung	93
6.7.2	Prozessvisualisierung	94
6.7.3	Datenbankentwurf.....	97
6.8	AP 5.2 Analysemethoden für Einflussfaktoren	99
6.8.1	Untersuchung der Abreißgewebeentformung	99
6.8.2	Untersuchung von Porositätsproben.....	110
6.9	AP 5.4 Prozessbewertung & Beeinflussung Gesamtprozesskette	112
7	Aufwendungen und deren Angemessenheit.....	124
8	Verwertung der Ergebnisse	124
8.1	Erfindungen / Schutzrechtanmeldungen.....	124
8.2	Wirtschaftliche und wissenschaftliche Erfolgsaussichten	124
8.3	Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlußfähigkeit	125
9	Relevante Ergebnisse Dritter.....	126
10	Quellen	126
11	Versionsverwaltung.....	126

Tabellen

Tabelle 1:	Thermogravimetrische Analysen – Ergebnisse.....	66
Tabelle 2:	G1c Ergebnisse	73
Tabelle 3:	Versuchsplan Infiltrationsversuche	87
Tabelle 4:	Untersuchte Einflussparameter auf Abzugskraft.....	99
Tabelle 5:	Faserausrisse in Abhängigkeit des Abzugswinkels.....	104
Tabelle 6:	Faserausrisse in Abhängigkeit der Abreißgewebeorientierung relativ zur Abzugsrichtung.....	107
Tabelle 7:	Faserausrisse bei ausgewählten Abreißgeweben (Material 2)	109
Tabelle 8:	Übersicht der untersuchten Porositätsproben.....	111
Tabelle 9:	Testparameter der CT Messungen an Porositätsproben	111

Abbildungen

Abbildung 1: Projektstrukturplan des Verbundvorhabens RoCk	14
Abbildung 2: Ursprünglicher Arbeitsplan des Teilvorhabens SOFT-RoCk.....	15
Abbildung 3: Aktualisierter Arbeitsplan des Teilvorhabens SOFT-RoCk für das Kalenderjahr 2015	20
Abbildung 4: DSC-Messung 140°C mit 2°C Rampe 70 und 90 min.....	24
Abbildung 5: DSC-Messung 140°C mit 2°C Rampe 120 und 200 min.....	24
Abbildung 6: DSC-Messungen M21-E bei 140°C und 150°C isotherm.....	25
Abbildung 7: Aufbau für Anhärtung im Autoklaven	25
Abbildung 8: Autoklavzyklus 140°C / 90 min mit 2°C Rampe	26
Abbildung 9: Laminatumformung auf positiver Aluminiumschale mit R=2000mm	26
Abbildung 10: Ergebnis der Umformung bei den Proben mit 70, 90, 120 und 200 min Anhärtung.....	27
Abbildung 11: Mikroskopische Vermessung der Laminatdicke nach dem Precuring.....	28
Abbildung 12: Laminatquerschnitt nach dem Precuring- und Umformprozess (Probe 90min/140°C)	28
Abbildung 13: Schnittkante ohne und mit Unterlage (Probe 90min/140°C)	29
Abbildung 14: Gefräste Probe mit 200 min/140°C Anhärtung	29
Abbildung 15: Gefräste Probe mit 120 min/140°C Anhärtung	30
Abbildung 16: Gefräste Probe mit 190 min/140°C Anhärtung	30
Abbildung 17: Zusammenfassung Untersuchungsergebnisse.....	31
Abbildung 18: Vollständige Reparatur-Prozesskette inkl. Hard-Patch-Herstellung.....	32
Abbildung 19: A350 Schalensegment – links: Fotografie Innenansicht; rechts: Schadenspositionen 1 und 2 auf Bauteil	32
Abbildung 20: Festlegung Reparaturgeometrie Schaden 1 (links) und Schaden 2 (rechts)	33
Abbildung 21: Aufspannung des A350 Schalensegments auf dem Frästisch.....	34
Abbildung 22: Durchführung der Fräsungen auf dem A350 Schalensegment.....	34
Abbildung 23: Ausgefräste Schadensbereiche 1 und 2 auf dem A350 Schalensegment	35
Abbildung 24: ATOS Vermessung Schadensbereich 1	35
Abbildung 25: ATOS Vermessung Schadensbereich 1 – Flächenvergleich	36
Abbildung 26: ATOS Vermessung Schadensbereich 1 – Flächenvergleich im Schadensgrund	36
Abbildung 27: ATOS Vermessung Schadensbereich 2	37
Abbildung 28: ATOS Vermessung Schadensbereich 2 – Flächenvergleich	37
Abbildung 29: ATOS Vermessung Schadensbereich 2 – Flächenvergleich im Schadensgrund	38
Abbildung 30: ATOS San-Datenaufbereitung Schaden 1 für Werkzeugfräsen.....	39
Abbildung 31: ATOS San-Datenaufbereitung Schaden 2 für Werkzeugfräsen.....	39
Abbildung 32: CFK-Halbzeuge für Hardpatch-Werkzeuge	40
Abbildung 33: Bearbeitetes Ureol Tooling für Schaden 2	41
Abbildung 34: Flächenvergleich zwischen Ureol Tooling und angepasster Schäftung auf Schalenbauteil (Skala +0,09 mm / -0,12 mm).....	42
Abbildung 35: CFK Tooling für Schaden 1	43

Abbildung 36: CFK Tooling für Schaden 2	43
Abbildung 37: Aluminium Tooling für Schaden 2	44
Abbildung 38: Flächenvergleich zwischen CFK Tooling für Schaden 1 und angepasster Schäftung auf Schalenbauteil (Skala +0,15 mm / -0,12 mm)	45
Abbildung 39: Flächenvergleich zwischen CFK Tooling für Schaden 2 und angepasster Schäftung auf Schalenbauteil (+0,15 mm / -0,12 mm)	45
Abbildung 40: Flächenvergleich zwischen Aluminium Tooling für Schaden 2 und angepasster Schäftung auf Schalenbauteil (Skala +/- 0,15 mm).....	46
Abbildung 41: Einfügen Fadenkreuz für Fräs-Orientierung	47
Abbildung 42: Gesamtprozess der Patch-Werkzeug-Herstellung.....	47
Abbildung 45: Luftgekoppelte Ultraschallanlage in Transmissionsanordnung und Probekörper (rechts).....	48
Abbildung 46: Untersuchte Sensoranordnung und deren Veränderungen (Prüffrequenz, Abstand Sender-Empfänger, Sender-Empfänger vertauscht, Versatz, Abstand Sensor-Probekörper, Neigung der Sensoren zueinander).....	49
Abbildung 47: Ultraschall C-Bilder; Erkennung zweier künstlich eingebrachter 10 mm x 10 mm Defekte, Variation der Prüffrequenz	49
Abbildung 48: Skizze eines Sandwich Bauteils mit verschiedenen potentiellen Fehlertypen und Positionen; (a) Delamination in den Deckhäuten, (b) Ablösung der Decklagen vom Kern; (c) Kernschaden	50
Abbildung 49: Einzelsensoren der Firma Acellent tech. Inc.....	50
Abbildung 50: Versuchsaufbau mit verschiedenen Sender Positionen.....	50
Abbildung 51: Dispersionsdiagramm eines 10 mm dicken Honeycomb Sandwichs	51
Abbildung 52: Schematische Darstellung eines möglichen Wellenverlaufs in Sandwich-Bauteilen	52
Abbildung 53: C-Bild einer Sandwichprobe mit künstlich eingebrachten Fehlstellen	52
Abbildung 54: oben links: Luft US-Anlage; oben rechts: C-Bild einer 75 kHz Messung; unten links: C-Bild einer 120 kHz Messung; unten rechts: C-Bild einer 200 kHz Messung.....	53
Abbildung 55: links: Aufbau einer einseitigen Wabenprüfung mittels Luftultraschall; rechts: Lambwellenbild mit noch nicht optimierten Prüfparametern	54
Abbildung 56: Versuchsaufbau Lamb-Wellen Detektion mit Luftankopplung	54
Abbildung 57: Verwendete Piezo-Sensoren und Koppelmittel.....	55
Abbildung 58: Darstellung einer Frequenzanalyse	56
Abbildung 59: Foto Vorderseite der Probe Schaumprobe 01	56
Abbildung 60: Fehlereinbringung Schaumprobe.....	57
Abbildung 61: Luftultraschall-C-Bild der Schaumprobe 01	57
Abbildung 62: Ergebnisse der Messung mit Prüfkopf 0,5 MHz mit $\lambda/4$ -Anpasssschicht an der Schaumprobe 01	58
Abbildung 63: Folien Beständigkeitstest.....	60
Abbildung 64: Lithographische Strukturierung der Sensoren	61
Abbildung 65: Sensordesign Widerstandsthermometer.....	62
Abbildung 66: Unterschiedliche Substrate und Isolierschichten	63
Abbildung 67: Stecker zur elektrischen Kontaktierung der Sensoren	63
Abbildung 68: Langzeitverhalten der gedruckten Sensoren (Raumklima)	64
Abbildung 69: Gedruckte Sensoren - Einfluss der Grundwiderstandsänderung auf die Bestimmung der Temperatur	65

Abbildung 70: Langzeitverhalten der aufgedampften Sensoren (Raumklima)	67
Abbildung 71: Aufgedampfte Sensoren - Einfluss der Grundwiderstandsänderung auf die Bestimmung der Temperatur	68
Abbildung 72: Temperaturstabilität – Sensoren aus Aluminium	68
Abbildung 73: integrierte Sensoren im CFK.....	69
Abbildung 74: Prozess Monitoring - Vergleich zwischen Foliensensor und Thermoelement	70
Abbildung 75: Fließfront Sensor	71
Abbildung 76: Fließfront Messung – TDR Auswertung	71
Abbildung 77: Schliffbilder Sensor Fließfront.....	72
Abbildung 78: Kapazitive Fließfront Messung.....	72
Abbildung 79: Gelochte PI Folie zwischen PEI.....	74
Abbildung 80: Zusammenfassung – Passivierungen	75
Abbildung 81: Darstellung eines 3D-Spektrums der GC-IMS Analyse	76
Abbildung 82: Untersuchte Probenkonfiguration	76
Abbildung 83: GC-IMS Analysator mit Headspace und exemplarische Signalgenerierung	77
Abbildung 84: Detektierte Signale einer Probenserie	77
Abbildung 85: Desorberglocke zu großflächigen Oberflächenmessung	78
Abbildung 86: PCA Plot einer Testserie (150°C / 5Min.)	78
Abbildung 87: Mittelwert Spektren der Rohdaten von unterschiedlich rauen [Ra] CFK Oberflächen.....	79
Abbildung 88: Mittelwert Spektren nach Datenvorbehandlung	80
Abbildung 89: Ergebnisse der PLS Regression zur Vorhersage des Mittenrauwerths Ra	81
Abbildung 90: Schematische Darstellung des TDR Sensors	82
Abbildung 91: Exemplarischer Signalverlauf eines Vorversuchs	83
Abbildung 92: Simulationsergebnisse: Variation von Abstand und Durchmesser der Leiter	84
Abbildung 93: Schliffe der getesteten Sensoren a) handgefertigt b) industriell.....	84
Abbildung 94: 2D Modell zur Simulation der Impedanz eines FFC.....	85
Abbildung 95: Simulation: ΔU_{tn} in Abhängigkeit des Leiterabstandes bei FFC	86
Abbildung 96: Versuchsaufbau für Infiltrationsversuche	86
Abbildung 97: Fließfrontfortschritt (Aluminiumwerkzeug, C-Fasern, RTM6)	88
Abbildung 98: Aushärtegradmessung (Aluminiumwerkzeug, C-Fasern, Harz L20 mit Härter EPH161).....	88
Abbildung 99: Korrelation der Veränderung von U während der Aushärtung von RTM6 mit DSC Messung	89
Abbildung 100: Sensor mit geschirmter Geometrie	90
Abbildung 101: Fließfrontposition während Infiltration einer C-Faser Preform mit RTM6 Harz.....	91
Abbildung 102: Korrelation der Veränderung des Reflexionskoeffizienten während der Aushärtung mit DSC Messungen	91
Abbildung 103: Hierarchieebenen der Prozessbeschreibung	93
Abbildung 104 Beispielhafte Darstellung des Flussdiagramms	95
Abbildung 105 Maske zum Eintragen von Prozessdaten	96
Abbildung 106 Datenbankstruktur	98

Abbildung 107: Prüfvorrichtung für Abreiß-Versuche	100
Abbildung 108: Pareto-Darstellung des Einflusses der Parameter auf die Zugkraft	102
Abbildung 109: Abreißkraft in Abhängigkeit des Abzugswinkels	103
Abbildung 110: Abzugskraft in Abhängigkeit der Abreißgewebeerorientierung a) Material 3 b) Material 2	105
Abbildung 111: Zugsteifigkeit der Abreißgewebe unter verschiedenen Winkeln	105
Abbildung 112: Oberfläche einer CFK Oberfläche nach dem Entformen	106
Abbildung 113: Abreißkraft verschiedener Abreißgewebe.....	107
Abbildung 114: Abzugskraft in Abhängigkeit der Harzaufnahme verschiedener Abreißgewebe	108
Abbildung 115: Teilweise entformtes Testlaminat zur Veranschaulichung der Abzugskraft	109
Abbildung 116: Faserausrisse vor und nach der Umstellung des Abreißgewebes	110
Abbildung 117: Gerenderte Rekonstruktion dreier DMA CT-Messungen (links) und schematische Abbildung einer Auswertung (rechts).....	111
Abbildung 118: Schematische Darstellung des automatisierbaren VAP Aufbaus.....	112
Abbildung 119: Infusionskonzept für eine Druckkalotte	113
Abbildung 120: CAD-Modell des VAP-AP Druckstücks	114
Abbildung 121: Ober- und Unterseite des VAP-AP Druckstücks	115
Abbildung 122: Fließfront während des Open-Mould Vorversuchs.....	116
Abbildung 123: Bauteil des Open-Mould Infiltrationsversuchs nach dem Entformen...	116
Abbildung 124: VAP-AP Werkzeug mit aufgeklebten Membranpflastern	117
Abbildung 125: Besäumen der Preform mit Hilfe der geklemmten Schablone	117
Abbildung 126: Fixierung des Werkzeugs auf der Preform	118
Abbildung 127: Manuelles Fixieren der Preform auf dem Werkzeug.....	118
Abbildung 128: Aushärtewerkzeug mit Preform und vorbereitetes Innenwerkzeug.....	119
Abbildung 129: VAP-AP Aufbau während der Infiltration.....	120
Abbildung 130: Bauteil nach dem Entformen.....	120
Abbildung 131: Bauteil nach dem Entfernen des Abreißgewebes	121
Abbildung 132: Reduzierung der Durchlaufzeit durch VAP-AP	121
Abbildung 133: Kostenvergleich zwischen VAP [®] und VAP-AP.....	122
Abbildung 134: Innenwerkzeug mit Preform vor (links) bzw. nach (rechts) Anlegen des Vakuums	123
Abbildung 135: Zweites Demonstrator-Bauteil nach der Entformung	123

1 Aufgabestellung

1.1 Gesamtziel des Vorhabens

Der Einsatz von CFK für Strukturbauteile von Verkehrsflugzeugen hat in Deutschland in den frühen 1980er Jahren begonnen und seitdem wurden das Anwendungsspektrum und der Umfang ständig erweitert. Mit den aktuellen Programmen der Boeing 787 und des Airbus A350XWB, bei denen nun auch die Flügel- und Rumpfstrukturen weitestgehend aus CFK gefertigt werden, wurde ein weiterer großer Schritt getan. Eine solch drastische Erweiterung der Faserverbundanteile bezogen auf das Strukturgewicht, kann natürlich nur erfolgreich umgesetzt werden, wenn die entsprechenden Fertigungsverfahren in ausreichender Reife verfügbar sind und beherrscht werden. Wie die Erfahrung, insbesondere mit der B787, zeigt, stellt dies eine immense Herausforderung an die Prozessentwicklung dar.

Premium AEROTEC als Initiator und Koordinator des Verbundvorhabens RoCk (Robuste CFK-Gesamtprozesskette) hat erkannt, dass die derzeit für die CFK-Bauteilherstellung verfügbaren Prozesse und Fertigungsabläufe hinsichtlich Effizienz und Robustheit nicht zwangsläufig den künftigen Anforderungen, wie sie beispielsweise für einen A320 Nachfolger gegeben wären, genügen und somit gegenüber einer metallischen Lösung konkurrenzfähig wären.

Welche Zielsetzung Airbus Group Innovations durch den Beitrag zum Verbundprojekt RoCk verfolgte, wird im Folgenden erläutert.

1.2 Beiträge von Airbus Group Innovations

Hauptschwerpunkt der Arbeiten von Airbus Group Innovations war die Steigerung von Effizienz und Robustheit der aktuellen Gesamtprozessketten sowie die Verbesserung der Bauteilqualität durch Systematisierung, Analyse und Bewertung der Teilprozesse. Dies beinhaltet die Entwicklung einer Bewertungsmethodik, die Erweiterung des Einsatzspektrums der ZfP als Analyse und Überwachungswerkzeug, die Realisierung und Charakterisierung eines Sensorsystems zur Analyse wichtiger Parameter bei der Herstellung von CFK Bauteilen, die Erarbeitung von Lösungswegen zur Risikominimierung und Prozessoptimierung sowie die Entwicklung von Methoden für Nacharbeit (extended NDT und automatisierte "Shop-floor-repair").

1.3 Bezug des Vorhabens zu den förderpolitischen Zielen

An deutschen Luft- und Raumfahrtstandorten wurde in den letzten 30 Jahren ein immenses Fachwissen im Bereich Faserverbundtechnologie aufgebaut und die bei der Herstellung von Flugzeugkomponenten zum Einsatz kommenden Fertigungsverfahren wurden permanent verbessert, um den ständig wachsenden Anforderungen bezüglich Bauteileigenschaften und Stückzahlen gerecht zu werden. Während in der Vergangenheit noch sehr viele manuelle Arbeitsschritte notwendig waren, werden derzeit für die Herstellung von CFK-Großstrukturen mehr und mehr industrielle, automatisierte Prozesse umgesetzt. Es gilt nun, diesen Industrialisierungsschritt konsequent weiterzuentwickeln und die Robustheit entlang der gesamten Prozesskette zu gewährleisten, um

den vorhandenen Technologievorsprung gegenüber Billiglohnländern zu sichern und weiter auszubauen.

Es steht außer Frage, dass mit Faserverbundbauweisen bei Flugzeugstrukturen eine signifikante Gewichtsreduktion gegenüber den traditionellen metallischen Bauweisen erzielt werden kann. Dies darf im Hinblick auf umweltverträglichen Luftverkehr gegenüber anderen Maßnahmen wie moderne Antriebskonzepte und aerodynamische Systeme keinesfalls vernachlässigt werden. Letztlich steigt durch Reduzierung des Strukturgewichts die Transportleistung eines Flugzeugs, beziehungsweise verringert sich der Kraftstoffverbrauch und damit der CO₂-Ausstoß. Die Verwendung eines korrosions- und ermüdungsfreien Materials wie CFK verringert darüber hinaus den Aufwand für die Wartung und trägt damit ebenfalls zu einer günstigeren Gesamtbilanz über den Lebenszyklus bei.

Durch die Verbesserung der Fertigungsprozesse soll die Grundlage geschaffen werden, um auch für einen künftigen A320 Nachfolger die Vorteile von CFK-Strukturen nutzen zu können. Dieser Optimierungsschritt ist unabdingbar, da aus heutiger Sicht die vorhandenen Fertigungstechnologien und Prozessketten hinsichtlich der zu erwartenden Stückzahlen und Durchlaufzeiten noch als kritisch eingestuft werden.

1.4 Wissenschaftliche und technische Arbeitsziele des Vorhabens

Ein Schwerpunkt der Arbeitsziele von Airbus Group Innovations im Projektverbund RoCk war die Erarbeitung eines besseren Prozessverständnisses und die nachhaltige Verbesserung der Reproduzierbarkeit und Qualität bei der Bauteilherstellung entlang der Prozesskette. Dies wird zum einen erreicht durch die systematische Analyse und Bewertung der Prozessschritte, zum anderen durch ein Sensorsystem zur Überwachung und Steuerung wichtiger Parameter bei der Herstellung von CFK Bauteilen. Im Bauteil integrierte Sensoren zur Überwachung von Parametern wie z.B. Vernetzungsgrad, Temperatur, Druck oder Feuchte während der Herstellung von CFK Bauteilen waren zum Zeitpunkt des Projektstarts nicht verfügbar. Die eingesetzten Sensoren müssen extrem dünn sein, um in die CFK Matrix eingebettet zu werden und müssen den extrem widrigen Bedingungen während der Herstellung standhalten. Die Zielsetzung der diesbezüglichen Arbeiten in RoCk war die Schaffung der Möglichkeit, solche Sensoren in der Entwicklungsphase von CFK-Bauteilen zur Prozessoptimierung einzusetzen. Die Signalübertragung wird über Datenleitungen realisiert. Eine berührungslose Datenübertragung sowie ein potentieller Einsatz in Serienbauteilen ist zwar grundsätzlich denkbar, wurde aber im Rahmen dieses Vorhabens nicht betrachtet.

Die Ziele für den Bereich der Qualitätssicherung mittels zerstörungsfreier Prüfung waren eine zuverlässige Effektcharakterisierung und eine effiziente Prozesssicherung. Dies erfolgte durch den Einsatz von Computertomographie als Referenzmethode und als Technik, innere Defekte zu charakterisieren. Diese gewonnenen Informationen dienten als Grundlage zur Bewertung von Effekten bzw. der Prozessstabilität. Weiterhin sollte die Qualität von Sandwichbauteilen mit Hilfe von Ultraschallgruppenwandlern einseitig überwacht werden, um die Prozesskette der Fertigung besser zu beherrschen.

Schließlich sollten im Projekt Konzepte für Reparaturverfahren in der CFK Fertigung entwickelt werden. Basierend auf einer Analyse des Fertigungsprozesses und daraus ggf. resultierenden möglichen Bauteilabweichungen und -fehlern sollten Prozesse entwickelt werden, die eine Reparatur der selbigen in der Fertigungskette erlauben und so

Ausschussteile verringern helfen. Die erarbeiteten Prozesse sollten im Hinblick auf ihre Umsetzbarkeit evaluiert und anhand von Schikanebauteilen getestet werden. Außerdem verfolgte Airbus Group Innovations das Ziel, Ergebnisse aus Parallelprojekten zur Qualitätssicherung von Composite-Bauteiloberflächen für das Kleben auf eine Anwendbarkeit auf die Anwendungsszenarien im RoCk Projekt zu untersuchen.

2 Projektvoraussetzungen

Die bei Airbus Group Innovations vorhandene Expertise und die enge Verzahnung der Arbeiten mit den Anwendungspartnern Premium AEROTEC und Airbus Helicopters im Projekt waren ideale Voraussetzungen zum Erreichen der Projektziele.

Zu Beginn des Vorhabens war AGI bereits seit geraumer Zeit aktiv an der Entwicklung von neuen Bauweisen und Fertigungsverfahren für effiziente Leichtbaustrukturen aus Faserverbundwerkstoffen beteiligt. Dabei spielte bei der Konzeption neuer Bauweisen die Betrachtung der gesamten Prozesskette eine immer stärkere Rolle im Hinblick auf Effizienz und Ressourcenschonung in Produktion und Betrieb. Auch in den Bereichen zerstörungsfreie Werkstoffprüfung und Sensorik waren umfassende Vorarbeiten und Fähigkeiten vorhanden.

2.1.1 Composite Technologies

Airbus Group Innovations setzt sich seit Jahren mit Aufgabenstellungen im Bereich der textilen Preformtechnik sowie der Automatisierung und Robotik auseinander. In Projekten wie TIGRIS (LuFo3), ITOOL (EU FP6), ALCAS (EU FP6), REDUX (BMBF), MAAXIMUS (EU FP7), IMACPRO (EU FP7), ProFIT (LuFo IV-3) und AZIMUT (LuFo IV-3) wurden breite Kenntnisse und Fähigkeiten der Fertigungstechnik aufgebaut und stetig erweitert. Darüber hinaus verfügt AGI über langjährige Erfahrung und entsprechende Laborausstattung im Hinblick auf Werkstoffanalyse und -charakterisierung (phys.-chem., FST, mechanisch) sowie im Themenkomplex strukturelles Kleben. AGI hat maßgeblich zur Entwicklung des bei Premium AEROTEC in der Serienfertigung eingesetzten Vakuuminfusionsprozesses VAP beigetragen und wirkte im LuFo IV-3 Projekt RapidRepair im Rahmen eines Unterauftrags an der Entwicklung eines automatisierten Reparaturverfahrens für CFK-Strukturen mit. Im LuFo IV-2 Projekt EMIR wurde bei AGI bereits eine mobile Fräse für Reparaturen an einfach gekrümmten FKV-Rumpfstrukturen entwickelt und erfolgreich an einer Rumpfsektion getestet.

2.1.2 TCC3 – Structure Engineering, Production & Aeromechanics

AGI verfügt über langjährige Kompetenzen auf dem Gebiet der zerstörungsfreien Prüfung (verschiedene BMBF-Projekte) und „extended NDT“ (EU-Projekt ENCOMP; QS-Kleben). Seit 2008 steht eine μ -CT Anlage zur Verfügung, die speziell für die Mikrostrukturanalyse ausgelegt ist. Entwicklungen zur Analyse von CFK Strukturen wurden im BMBF-Projekt MISES-FOK durchgeführt.

2.1.3 TCC4 – Sensors, Electronics & Systems Integration

Airbus Group Innovations hat eine internationale Reputation auf dem Gebiet der Spezialsensorik und Sensorik in „harsh environment“ (~30 Patente, ~60 Publikationen). Vorangegangene Förderprojekte im Bereich Sensorik: NetGas (EU), NANOS4 (EU), MISSY (BMBF), IESSICA (BMBF), NACHOS (BMBF), Optozell (BMBF), Zentrilab (BMBF), Ramadek (BMBF), DOTSENSE (EU). Zur Durchführung der Arbeiten steht ein Reinraum für Mikro- und Nanotechnologien, ein Bio-Sicherheitslabor, zwei automatisierte Gasmisch- und Gasmessstände sowie weitere Labore zur Systemintegration und Sensorcharakterisierung zur Verfügung (Langzeitmessungen, Sensorentwicklungs- und Sensorintegrationsfähigkeit, Sensorsignalverarbeitung).

3 Projektplanung und –ablauf

Als Teilvorhaben des Verbundprojektes RoCk – Robuste CFK Gesamtprozesskette orientierten sich die von Airbus Group Innovations beigetragenen Arbeitspakete an der Gesamtprojektstruktur.

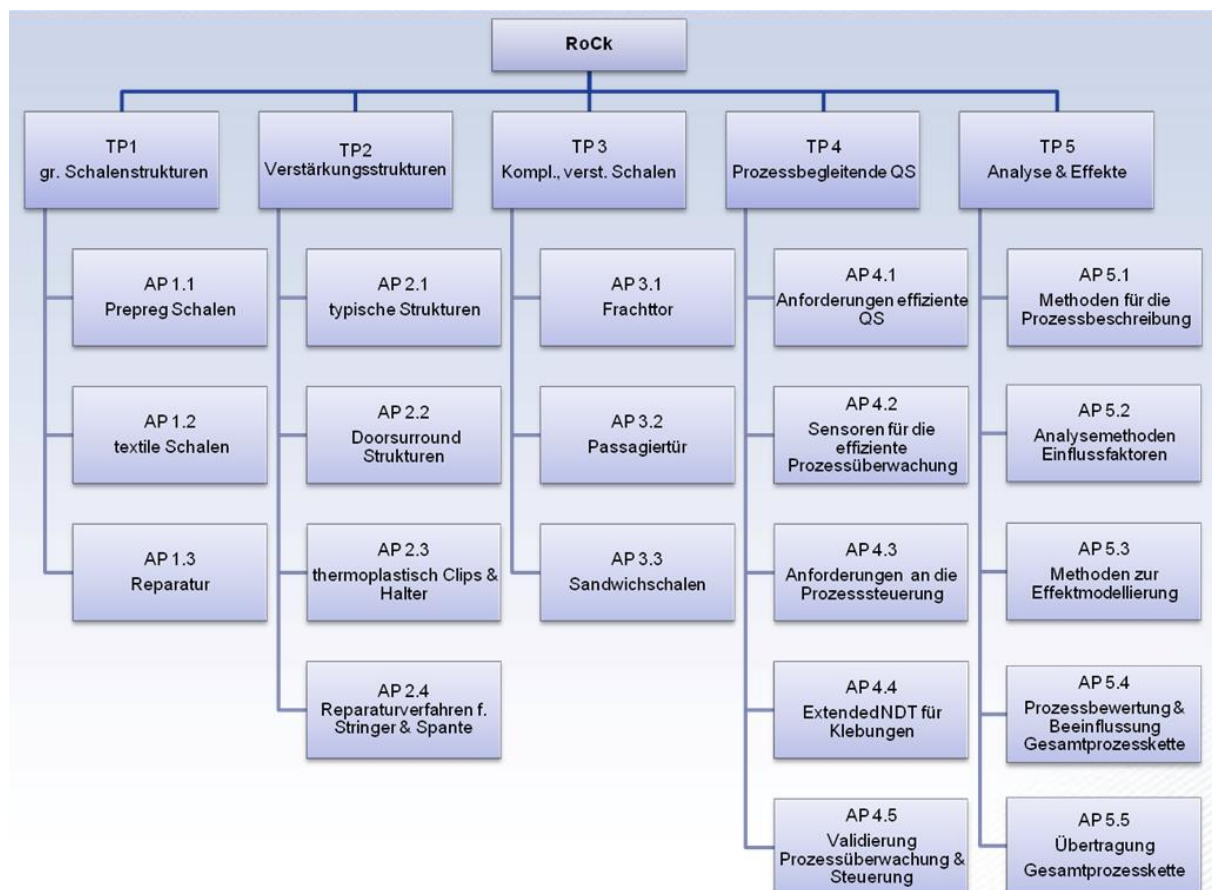


Abbildung 1: Projektstrukturplan des Verbundvorhabens RoCk

Dabei wurden von Airbus Group Innovations zu folgenden Arbeitspaketen Beiträge geleistet:

- AP 1.3 Reparatur großer Schalen
- AP 2.4 Reparaturverfahren für Stringer und Spante
- AP 4.1 Anforderungen an effiziente QS
- AP 4.2 Sensoren für die effiziente Prozessüberwachung
- AP 4.3 Anforderungen an die Prozesssteuerung
- AP 4.4 Extended NDT für Klebungen
- AP 4.5 Validierung der Prozessüberwachung & -steuerung
- AP 5.1 Methoden für die Prozessbeschreibung
- AP 5.2 Analysemethoden für Einflussfaktoren
- AP 5.4 Prozessbewertung & Beeinflussung Gesamtprozesskette

3.1 Geplante Beiträge zu den RoCk Arbeitspaketen

	Aufwand [h]	2012				2013				2014				2015			
		Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4
TCC1 Team Filsinger																	
AP 4.3 Anforderungen an die Prozesssteuerung																	
Bewertung von Einflussfaktoren und Meßgrößen hinsichtlich Prozeßsteuerbarkeit	350	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
AP 4.5 Validierung der Prozeßüberwachung & -steuerung																	
Untersuchung der Funktionsweise und des Einflusses der Sensoren im Prozeß	550					■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
AP 5.1 Methoden für die Prozeßbeschreibung																	
Mitwirkung in der Serienfertigung	700	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Systematische Gliederung der Prozeßketten, Definition von Schnittstellen und Einflußfaktoren	600	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
AP 5.2 Analysemethoden für Einflussfaktoren																	
Entwicklung einer Bewertungsmethodik für Teilprozesse, Schnittstellen und Einflußgrößen	200					■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Analyse und Korrelation von Kenngrößen und Fertigungsparametern	400					■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
AP 5.4 Prozeßbewertung & Beeinflussung Gesamtprozesskette																	
Erarbeitung von Lösungskonzepten zur Minimierung von Fertigungsrisiken	500							■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Konzeptvalidierung im Labormaßstab und Ergebnistransfer	600							■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
TCC1 Team Geistbeck																	
AP 1.3 Reparatur großer Schalen																	
Konzepte für die Korrektur von Bauteilabweichungen und Fehlern im Fertigungsprozess	250	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Untersuchung der Einsetzbarkeit verschiedener Reparatur szenarien in der Fertigungskette	450	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
AP 2.4 Reparaturverfahren für Stringer und Spante																	
Konzepte für die Korrektur von Bauteilabweichungen und Fehlern im Fertigungsprozess	250	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Untersuchung der Einsetzbarkeit verschiedener Reparatur szenarien in der Fertigungskette	450	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
AP 4.1 Anforderungen an effiziente QS																	
Definition, Auswahl und der Beschreibung der Anforderungen an die Qualitätssicherung	200	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
AP 4.4 Extended NDT für Klebungen																	
Untersuchung der Eignung von Reparaturklebverfahren für die CFK Fertigungsprozesskette	475					■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Qualitätskontrolle der Oberfläche	450					■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Untersuchung nichtzerstörender Verfahren zur Bestimmung der Klebfestigkeit	325					■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
TCC3 Team Stöbel																	
AP 4.1 Anforderungen an effiziente QS																	
Definition, Auswahl und der Beschreibung der Anforderungen an die Qualitätssicherung	56	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
AP 4.2 Sensoren für die effiziente Prozessüberwachung																	
Konzeptentwicklung effektive QS	200	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Entwicklung Einzelprüfschritte (Verfahrensauswahl, ...)	936	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
AP 4.4 Extended NDT für Klebungen																	
Qualitätskontrolle der Oberfläche	400					■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Untersuchung nichtzerstörender Verfahren zur Bestimmung der Klebfestigkeit	685					■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
AP 5.2 Analysemethoden für Einflussfaktoren																	
Untersuchung von NDT Methoden bzgl. ihrer Eignung zur Prozeßbewertung	429	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Generierung von NDT Daten zur Prozeßbewertung und Unterstützung bei der Analyse	351	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
TCC4 Team Friedberger																	
AP 4.2 Sensoren für die effiziente Prozessüberwachung																	
Definition der Anforderungen und Zielparameter	300	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Analyse geeigneter Sensorprinzipien	400	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Konzeptentwicklung	400					■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Anpassung bestehender Sensoren	600					■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Erforschung neuer Sensormechanismen	400					■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Realisierung der Transducer-Strukturen und Integration in CFK Bauteile	650					■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Charakterisierung	680					■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■

Abbildung 2: Ursprünglicher Arbeitsplan des Teilvorhabens SOFT-RoCk

Die einzelnen Beiträge werden im Folgenden detaillierter beschrieben.

3.1.1 Geplante Beiträge zu RoCk AP 1.3 Reparatur großer Schalen

Airbus Group Innovations trägt innerhalb des Arbeitspaketes bei zur Entwicklung automatisierter Nacharbeitsprozesse für die Fertigung. Konzepte für die Korrektur von Bauteilabweichungen und Fehlern im Fertigungsprozess werden erarbeitet. Hierzu trägt AGI mit der Erfassung von geometrischen Abweichungen/Fehlstellen bei. Hierfür soll ein bei AGI vorhandenes Streifenlichtprojektionsverfahren eingesetzt werden. Reparatur szenarien basierend bspw. auf vorgefertigten oder automatisch zuzuschneidenden Reparaturpatches (dry, semi- or fully cured) werden erarbeitet und deren Einsetzbarkeit in der Fertigungskette wird untersucht. In die Konzepterstellung speziell für Reparaturen an bereits ausgehärteten Teilen fließen Untersuchungen zu abtragenden Bearbeitungsprozessen (Fräsen, Schäften) aus dem national geförderten Projekt FlexiCut und zu Out-of-autoclave Härtungsprozessen aus dem Projekt Azimut ein.

3.1.2 Geplante Beiträge zu RoCk AP 2.4 Reparaturverfahren für Stringer und Spante

Zu den Reparaturverfahren für Stringer und Spante trägt AGI mit den bereits unter AP1.3 beschriebenen Ansätzen für große Schalen bei. Konzepte für die Reparatur werden auch hier erarbeitet und im Hinblick auf eine Umsetzbarkeit in der Fertigung untersucht.

3.1.3 Geplante Beiträge zu RoCk AP 4.1 Anforderungen an effiziente Qualitätssicherung

AGI beteiligt sich in diesem Arbeitspaket in enger Abstimmung mit den Hauptanwendern an der Definition, Auswahl und der Beschreibung der Anforderungen an die Qualitätssicherung. Von Seiten der NDT werden v.a. die Möglichkeiten der Messtechnik zu einer effizienten QS dargestellt und mit den Anforderungen abgeglichen. Ein Schwerpunkt wird dabei die Verbindungstechnik Kleben sein. Dies kann sich je nach den definierten Fertigungsprozessen auf Co-Curing, Co-Bonding und Secondary Bonding Prozesse beziehen.

3.1.4 Geplante Beiträge zu RoCk AP 4.2 Sensoren für effiziente Prozessüberwachung

In diesem Arbeitspaket soll in enger Zusammenarbeit mit Airbus Helicopters an einer prozessbegleitenden Preforminspektion gearbeitet werden. So ist von AGI daran gedacht, die Möglichkeiten sowohl der aktiven und der passiven berührungslosen Thermographie für die ersten Schritte des Preformkette zu evaluieren.

Die schnelle Erfassung der 2D Daten mit verschiedenen Verfahren während des Prozesses soll mit der 3D Information gewonnen aus Computer Tomographie Untersuchungen abgeglichen und kontrolliert werden. Dadurch wird die Aussagekraft der 2D Verfahren für eine Preformkontrolle unterstützt.

Weiterhin sollen die Untersuchungen zum Fließverhalten unterstützt werden. Zur Überwachung des Infiltrationsvorgangs kann an den Einsatz der Thermographie gedacht werden. Mit Hilfe einer Wärmebildkamera soll der Füllvorgang überwacht werden. Hierzu sollen entsprechende Versuche durchgeführt werden. Ein wichtiger Punkt, der den Füllvorgang beeinflusst, ist die Permeabilität des Geleges mit seinen einzelnen Rovings. Es ist daran gedacht, eine Permeabilitätsbewertung mit Computer Tomographie durchzuführen. Hierzu wird das Gelege ohne Harz mit CT gemessen. Die gewonnenen Strukturdaten sollen hinsichtlich der Orientierungen, der Fließräume, des Fasergehaltes pro Volumen und der lokalen Porosität ausgewertet werden. Die hier in 3D gewonnenen Daten werden anschließend den Projektpartnern zur Verfügung gestellt werden.

Ein weiterer Punkt, der in Zusammenarbeit mit Airbus Helicopters erarbeitet wird, ist die einseitige Prüfung von CFK-Wabenstrukturen. Hierbei ist an den Einsatz von Ultraschall-Gruppenstrahlern gedacht. Die Arbeiten bei AGI umfassen die Unterstützung bei der Auswahl eines geeigneten Arrays und des Messgerätes. Weiterhin wird an einer US-Signalanalyse gearbeitet, um die maximal mögliche Information über Effekte zu erhalten sowie Arbeiten an einer geeigneten Ankopplung.

Ein weiterer Forschungsschwerpunkt liegt in der Entwicklung von Sensoren zur in-situ Erfassung von Prozessparametern während der Bauteilherstellung (Infiltration und Aushärtung). Die Identifikation und Festlegung der relevanten Messgrößen erfolgt in AP 5.2.

Für die Sensorentwicklung müssen zunächst geeignete Materialien und Prozesse für die Herstellung der integrierbaren Mikrosensoren ausgewählt werden, die einerseits dem Parameterspektrum bei der CFK-Herstellung (Temperatur, Druck sowie chemisch) genügen und andererseits weder den Ablauf des CFK-Fertigungsprozesses noch die Lamineigenschaften signifikant beeinflussen.

Des Weiteren werden bestehende Messmethoden analysiert und bewertet. Eine Vorgehensweise für notwendige Anpassungen der einzelnen Methoden wird erarbeitet. Zeitgleich werden aktuelle Forschungsthemen aus den Bereichen Materialwissenschaft und Mikro- & Nanotechnologie auf ihre Verwendbarkeit hin überprüft. Nach Identifikation der optimalen Messmethoden werden Sensoren aufgebaut und in Testläufen in die CFK Bauteile integriert. Diese Teilaufgabe ist dabei wie folgt strukturiert:

1. Definition der Anforderungen und Zielparameter
2. Analyse geeigneter Sensorprinzipien
3. Konzeptentwicklung
4. Anpassung bestehender Sensoren
5. Erforschung neuer Sensormechanismen
6. Realisierung der Transducer-Strukturen und Integration in CFK Bauteile
7. Charakterisierung

3.1.5 Geplante Beiträge zu RoCk AP 4.3 Anforderungen an die Prozesssteuerung

In dieser Teilaufgabe soll überprüft und nachgewiesen werden, dass sich der CFK-Fertigungsprozess durch intern erfasste Messgrößen (z.B. Temperatur, Druck/Vakuum, Feuchte, Vernetzungsgrad o.ä.) zuverlässiger steuern lässt, als dies der Stand der Technik derzeit erlaubt. Dazu werden im Labormaßstab Fertigungsversuche und Parameterstudien durchgeführt und bewertet.

3.1.6 Geplante Beiträge zu RoCk AP 4.4 Extended NDT für Klebungen

Airbus Group Innovations beteiligte sich an verschiedenen Projekten zum Thema Extended-NDT von (Reparatur)Klebungen (RapidRepair (Lufo), ENCOMB (EU FP7), Qualitätskleben (BMBF), INSTRUKT (Lufo)). Ergebnisse aus diesen Projekten sollen in das Projekt RoCk einfließen und ihre Eignung für die CFK Fertigungsprozesskette untersucht werden. Die Verfahren umfassen sowohl die Qualitätskontrolle der Oberflächen vor dem Kleben, als auch nichtzerstörende Verfahren zur Bestimmung der Klebfestigkeit nach dem Verbinden (Stichwort „weak“ oder „kissing bonds“). So sollen beispielsweise Verfahren zur automatisierten Bestimmung der Oberflächenrauigkeit, als wichtiger bisher nicht kontrollierter Einflussfaktor auf die Haftfestigkeit, untersucht werden. Bei der Auswahl der Verfahren werden die Vorgaben von Airbus Helicopters berücksichtigt.

3.1.7 Geplante Beiträge zu RoCk AP 4.5 Validierung der Prozessüberwachung & -steuerung

Anhand von Fertigungsversuchen und Materialtests soll nachgewiesen werden, dass die in AP 4.2 entwickelten Sensoren zur internen Erfassung von Prozessparametern über den gesamten Fertigungsverlauf hinweg zuverlässig Prozessdaten liefern und dabei den Ablauf (z.B. der Harzinfusion) nicht signifikant stören.

3.1.8 Geplante Beiträge zu RoCk AP 5.1 Methoden für die Prozessbeschreibung

Airbus Group Innovations wird in enger Zusammenarbeit mit Premium AEROTEC die in den APs 1.1, 1.2, 2.2 und 3.1 betrachteten Prozessketten analysieren und beschreiben. Um diese Aufgabe möglichst effizient und fundiert durchführen zu können, ist eine Mitwirkung in der Serienfertigung vorgesehen. Darauf folgt eine systematische Gliederung der Prozesskette, die Identifizierung von risikobehafteten Fertigungsschritten, sowie die Definition charakteristischer Kenngrößen.

3.1.9 Geplante Beiträge zu RoCk AP 5.2 Analysemethoden für Einflussfaktoren

Die in AP 5.1 schematisierten und gegliederten Prozessketten können nun hinsichtlich ihrer Schnittstellen und charakteristischen Kenngrößen analysiert werden. Es gilt dabei vor allem, einen Zusammenhang zwischen diesen Kenngrößen und den aufgetretenen Fertigungsparametern herzustellen und ein entsprechendes Bewertungsschema zu entwickeln. Somit soll es möglich werden, die für die Prozesssteuerung relevanten Faktoren zu identifizieren. Dies ist die Grundlage um sowohl bei bestehenden, als auch bei künftigen Prozessketten die Qualität und Reproduzierbarkeit nachhaltig zu verbessern. Darüber hinaus sollen auf dem Gebiet NDT Methoden hinsichtlich der Eignung zur Generierung von Daten zur Prozessbewertung untersucht werden. Hierbei ist an aktiver und passiver Thermographie sowie an Computer Tomographie gedacht. Die gewonne-

nen Daten werden nach den Vorgaben aus AP 5.1 ausgewertet und bewertet. Hierbei kann 3D Computer Tomographie ebenfalls als Referenzmethode herangezogen werden. Zudem wird AGI In diesem AP verschiedene NDT Daten für die Analyse der Einflussfaktoren zur Verfügung stellen. Bei der eigentlichen Analyse wird IW unterstützend tätig.

3.1.10 Geplante Beiträge zu RoCk AP 5.4 Prozessbewertung & Beeinflussung

Auf Basis durchgeführten Prozesskettenanalysen und den zur Verfügung stehenden Messdaten relevanter Einflussgrößen sollen Lösungskonzepte zur Minimierung von Fertigungsrisiken erarbeitet werden. Diese Konzepte gilt es im Labormaßstab zu validieren und die Ergebnisse in die APs 1.1, 1.2, 2.2 und 3.1 zu transferieren.

3.2 Projektablauf

Aufgrund der geplanten Laufzeitverlängerung seitens Premium AEROTEC um 2 Jahre und seitens Airbus Helicopters um 1 Jahr, wurde von Airbus Group Innovation eine kostenneutrale Laufzeitverlängerung bis zum 31.12.2015 beantragt. Dies geschah, um insbesondere die Aktivitäten mit starker Vernetzung zu den Geschäftsbereichen koordiniert abschließen zu können (vgl. Abbildung 3).

Im Laufe des Projektes wurden folgende Anpassungen vorgenommen:

- AP 1.3 Reparatur großer Schalen:
Es erfolgte die Umsetzung einer vollständigen automatisierten Reparatur mit Berücksichtigung der Tooling-Prozesskette und der Herstellung eines komplett ausgehärteten Reparatur-Patches für das Szenario eines Schadens in einem Schalen-segment.
- AP 4.2 Sensoren für die effiziente Prozessüberwachung:
Verzögerungen durch Problemen beim Umbau der Ultraschallanlage. Auswahl der Sensoren bzw. die Art der Signalaufnahme mussten angepasst werden. Die Testkörper wurden verzögert bereitgestellt. Weiterhin wurde die einseitige Prüfung mit US von AHD mit aufgenommen.
Zuerst ausgewählte Sensorherstellungstechnologie (Aerosoljet und Inkjet) erwies sich als ungeeignet. Anpassung des Herstellungsverfahrens war erforderlich (PVD Metallisierung via Schattenmaske).
- AP 4.4 Extended NDT für Klebungen:
ExoScan FTIR erwies sich für bestimmte Shop-Repair Szenarien (i.d.R. Kontamination durch Siloxane) für nicht sensitiv genug, alternative Analytikverfahren mussten herangezogen werden (z.B. GC-IMS)
- AP 4.5 Validierung der Prozessüberwachung & -steuerung:
Zuerst ausgewählte Sensorherstellungstechnologie (Aerosoljet und Inkjet) erwies sich als ungeeignet. Anpassung des Herstellungsverfahrens war erforderlich (PVD Metallisierung via Schattenmaske).

- AP 5.4 Prozessbewertung & Beeinflussung Gesamtprozesskette:
Ursprünglich vorgesehene Demonstratorstruktur (Druckkalotte) erwies sich als wenig geeignet. In Abstimmung mit PAG Umschwenken auf Querrippe.

		2015											
		01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12
TX1 - Team Filsinger AP 4.3 Anforderungen an die Prozesssteuerung Bewertung von Einflußfaktoren und Meßgrößen hinsichtlich Prozeßsteuerbarkeit AP 4.5 Validierung der Prozeßüberwachung & -steuerung Untersuchung der Funktionsweise und des Einflusses der Sensoren im Prozeß AP 5.1 Methoden für die Prozeßbeschreibung Mitwirkung in der Serienfertigung Systematische Gliederung der Prozeßketten, Definition von Schnittstellen und Einflußfaktoren AP 5.2 Analysemethoden für Einflußfaktoren Entwicklung einer Bewertungsmethodik für Teilprozesse, Schnittstellen und Einflußgrößen Analyse und Korrelation von Kenngrößen und Fertigungsparametern AP 5.4 Prozeßbewertung & Beeinflussung Gesamtprozesskette Erarbeitung von Lösungskonzepten zur Minimierung von Fertigungsrisiken Konzeptvalidierung im Labormaßstab und Ergebnistransfer	abgeschl.												
	abgeschl.												
	abgeschl.												
	abgeschl.												
	abgeschl.												
	abgeschl.												
TX1 - Team Geistbeck AP 1.3 Reparatur großer Schalen Konzepte für die Korrektur von Bauteilabweichungen und Fehlern im Fertigungsprozess Untersuchung der Einsetzbarkeit verschiedener Reparatur szenarien in der Fertigungskette AP 2.4 Reparaturverfahren für Stringer und Spante Konzepte für die Korrektur von Bauteilabweichungen und Fehlern im Fertigungsprozess Untersuchung der Einsetzbarkeit verschiedener Reparatur szenarien in der Fertigungskette AP 4.1 Anforderungen an effiziente QS Definition, Auswahl und der Beschreibung der Anforderungen an die Qualitätssicherung AP 4.4 Extended NDT für Klebungen Untersuchung der Eignung von Reparaturklebverfahren für die CFK Fertigungsprozesskette Qualitätskontrolle der Oberfläche Untersuchung nichtzerstörender Verfahren zur Bestimmung der Klebfestigkeit	abgeschl.												
	abgeschl.												
	abgeschl.												
	abgeschl.												
	abgeschl.												
	abgeschl.												
TX3 - Team Stöbel AP 4.1 Anforderungen an effiziente QS Definition, Auswahl und der Beschreibung der Anforderungen an die Qualitätssicherung AP 4.2 Sensoren für die effiziente Prozessüberwachung Konzeptentwicklung effektive QS Entwicklung Einzelprüfschritte (Verfahrensauswahl, ...) AP 4.4 Extended NDT für Klebungen Qualitätskontrolle der Oberfläche Untersuchung nichtzerstörender Verfahren zur Bestimmung der Klebfestigkeit AP 5.2 Analysemethoden für Einflußfaktoren Untersuchung von NDT Methoden bzgl. ihrer Eignung zur Prozeßbewertung Generierung von NDT Daten zur Prozeßbewertung und Unterstützung bei der Analyse	abgeschl.												
	abgeschl.												
	abgeschl.												
	abgeschl.												
	abgeschl.												
	abgeschl.												
TX4 - Team Friedberger AP 4.2 Sensoren für die effiziente Prozessüberwachung Definition der Anforderungen und Zielparameter Analyse geeigneter Sensorprinzipien Konzeptentwicklung Anpassung bestehender Sensoren Erforschung neuer Sensormechanismen Realisierung der Transducer-Strukturen und Integration in CFK Bauteile Charakterisierung	abgeschl.												
	abgeschl.												
	abgeschl.												
	abgeschl.												
	abgeschl.												
	abgeschl.												

- 1** Bereitstellung von Tools und Preforms für Konzeptvalidierung durch PAG
- 2** Bereitstellung von ausgehärteten Reparatur-Patches durch PAG
- 3** Bereitstellung von Sandwich-Prüflingen für Luftultraschalluntersuchungen durch AHD

Abbildung 3: Aktualisierter Arbeitsplan des Teilvorhabens SOFT-RoCK für das Kalenderjahr 2015

4 Stand der Technik zu Projektbeginn

Die Herstellung von Faserverbundbauteilen ist ein komplexes Zusammenspiel von Design, Material, Werkzeug und Prozess. In der Regel müssen heutzutage bei der Überführung von Faserverbundfertigungskonzepten in die Serienfertigung die anzuwendenden Verfahren und Prozessschritte auf die bauteilspezifischen Anforderungen angepasst werden. Dies bedeutet genaugenommen, dass im Grunde Einzellösungen erarbeitet werden, die in letzter Konsequenz kaum übertragbar sind und zudem wenig Reserven in Bezug auf Robustheit bieten. Ein fundierteres Verständnis für die Prozesse und die Zusammenhänge zwischen den zahlreichen Einflussgrößen wäre wünschenswert.

Ein Schritt hin zu einer tiefgreifenden Analyse der Vorgänge während des Fertigungsprozesses stellt die Überwachung physikalischer Parameter im Bauteilinnern dar. Allerdings beschränkte sich dies zum Projektbeginn meist auf die Messung der Temperatur und des Vernetzungsgrades (Dielektrizität) an wenigen ausgewählten Stellen mit verhältnismäßig großen Sensoren. Eine Funktionserweiterung (z.B. Druck/Vakuum, Feuchte etc.) wäre hilfreich. Die Sensoren müssen extrem klein und vor allem dünn sein, um in das CFK Laminat eingebettet werden zu können, ohne den Prozessablauf zu beeinflussen und müssen darüber hinaus den extrem widrigen Bedingungen während der Herstellung standhalten.

Klassische zerstörungsfreie Prüfung wird hauptsächlich zur Endkontrolle eingesetzt. Im Projekt SOFT-RoCk sollte das Einsatzspektrum hin zur Unterstützung bei dem eigentlichen Fertigungsprozess und als eine Analysemethoden erweitert werden.

CFK Rework-Arbeiten wurden zum Zeitpunkt des Projektstarts noch manuell durchgeführt und die abschließende QS erfolgte mit klassischen NDT Methoden. Im Vorhaben SOFT-RoCk werden deshalb mobile, automatisierte Erfassungsmethoden für Oberflächen und gefügte Reparaturbereiche entwickelt, die zugleich auch Beiträge zu einer verbesserten QS liefern.

5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

5.1 Projektpartner

Das Konsortium des Vorhabenverbundes RoCk besteht aus folgenden Partnern:

- Premium AEROTEC GmbH, 86179 Augsburg
- Airbus Helicopters Deutschland GmbH, 86609 Donauwörth
- Airbus Defence and Space GmbH – Airbus Group Innovations, 81663 München
- COTESA GmbH, 09648 Mittweida
- Trans-Textil GmbH, 83395 Freilassing
- Xperion AEROSPACE GmbH, 32052 Herford
- Deutsches Zentrum für Luft-und Raumfahrt e.V. –Institut BK und FA, 51147 Köln
- Fraunhofer-Gesellschaft ICT – Projektgruppe Funktionsintegrierter Leichtbau, 86159 Augsburg

- Fraunhofer Gesellschaft IZFP, 66123 Saarbrücken

Die Arbeiten von Airbus Group Innovations wurden in enger Kooperation mit Premium AEROTEC und Airbus Helicopters durchgeführt. Um beispielsweise eine effiziente Analyse und Bewertung der Prozesskette durchzuführen, war u.a. die Mitarbeit in der Serienfertigung vorgesehen.

5.2 Unterauftragnehmer

Im Rahmen der Entwicklung einer strukturintegrierten Sensorik zur Prozessüberwachung war es erforderlich, angepasste Metallisierungssysteme z.B. durch PVD-Verfahren aufzubringen. Dies sollte in geringem Umfang durch einen Unterauftrag erfolgen. Die Arbeiten bezüglich der Sensorstrukturierung mittels Aerosoljet und Inkjet Verfahren wurde von der Firma HSG-Imat in Stuttgart durchgeführt.

6 Wissenschaftlich-technische Ergebnisse

6.1 AP 1.3 Reparatur großer Schalen

6.1.1 Ausarbeitung von Konzepten für “semi-cured repair patches”

Innerhalb von AP 1.3 wurde eine Methode zur Klebereparatur mittels eines angelierten und somit teilweise ausgehärteten Patches konzeptionell dargelegt und theoretisch beschrieben. Darüber hinaus wurden die Vorteile des Konzeptes und die zu klärenden Fragen und Nachweise erörtert.

Ziel war es die Methode durch Versuche zu überprüfen und deren technische Machbarkeit auch im Hinblick auf mögliche Probleme zu validieren. In Absprache mit den Auftraggebern wurde als Prepregmaterial Hexcel M21-E ausgewählt und zur finalen Verklebung des Patches mit der ausgefrästen Schadenstelle FM300-2 definiert.

Zu Beginn der Untersuchungen wurden zunächst DSC-Messungen bei unterschiedlichen Anhärtezeiten durchgeführt, um den Aushärtegrad (α -Wert) sowie die Glasübergangstemperatur (T_G -Wert) zu ermitteln. Als nächster Schritt wurden Lamine mit einer Dicke von 1,5 mm aus M21-E im Autoklaven unter Druck bei verschiedenen Zeiten angehärtet und anschließend auf einer positiv gekrümmten Aluschale umgeformt. Des Weiteren wurde die Laminatqualität anhand von Schliffbildern und Dickenmessungen mikroskopisch beurteilt. Zum Abschluss der Untersuchungen wurde die mechanische Bearbeitbarkeit von angehärteten Laminatplatten auf deren Säge- und Fräseigenschaften überprüft.

6.1.2 Ermittlung TG-Wert und Aushärtegrad von M21-E

Ziel der Untersuchungen war es, einen maximalen Aushärtegrad α zu finden, bei dem eine „plastische“ Umformung des Prepregmaterials durch nochmaliges Erwärmen möglich ist. Erfahrungen aus vorangegangenen Projekten hatten gezeigt, dass bei Epoxy-Systemen der Aushärtegrad im Bereich zwischen 35-50% liegt. Der genaue Wert ist jedoch materialspezifisch und muss im Einzelnen durch DSC-Messungen überprüft werden. Aus diesem Grund wurden vier verschiedene Zeiten (70, 90, 120 und 200 min) bei einer Härtetemperatur von 140°C ausgewählt und per DSC gemessen. Die Proben wurden mit einer Aufheizrampe und Abkühlrate von jeweils 2°C/min gefahren. Die Ergebnisse der Messungen zeigen die folgenden Grafiken.

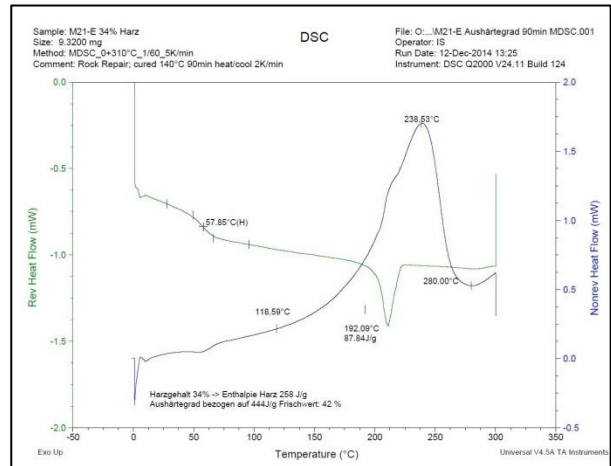
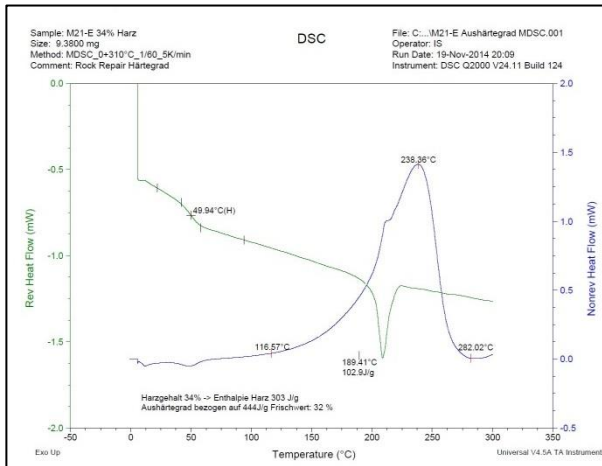


Abbildung 4: DSC-Messung 140°C mit 2°C Rampe 70 und 90 min

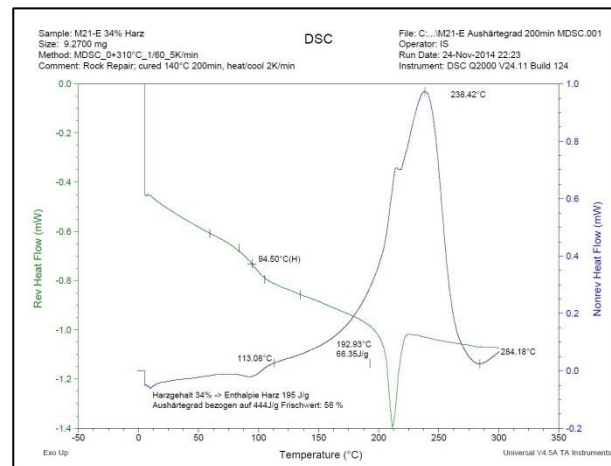
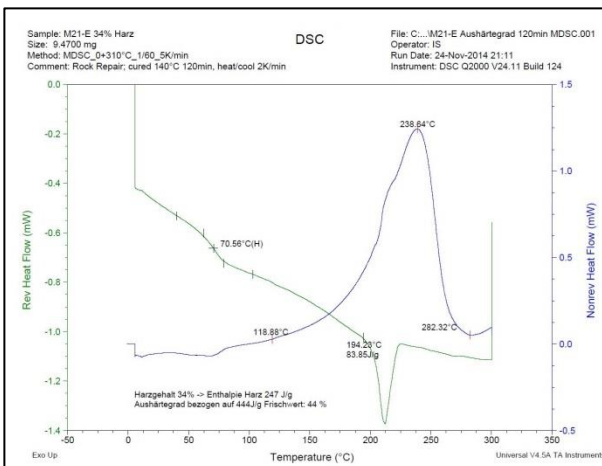


Abbildung 5: DSC-Messung 140°C mit 2°C Rampe 120 und 200 min

Bei einer Zeit von 70 min stellt sich ein TG-Wert von 50°C und ein erreichter Aushärtegrad von 32% ein. Bei 90 min steigt der TG auf 58°C bei einem α von 42%, bei 120 min wächst der TG auf 70°C mit einem dazugehörigen α von 44% an und bei 200 min beträgt der TG schließlich 95°C und einem Aushärtegrad von 56%. Zusammengefasst sind die Werte in der kommenden Grafik verzeichnet. Die Werte korrelieren gut mit vorangegangenen Messungen und deren interpolierten Kurve bei 140°C isotherm.

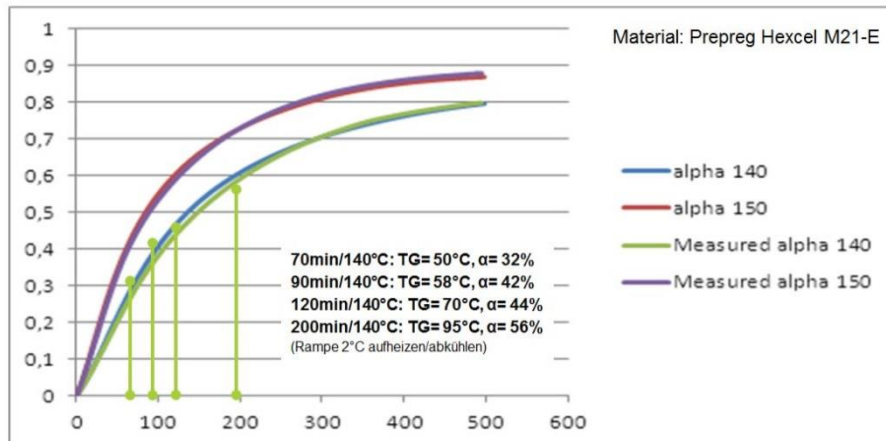


Abbildung 6: DSC-Messungen M21-E bei 140°C und 150°C isotherm

6.1.3 Precuring von Laminaten aus M21-E

Auf Basis der vorangegangenen DSC-Messungen wurden für die vier verschiedenen An Härtezeiten 70, 90, 120 und 200 min jeweils Laminatplatten in der Größe 300x200 mm mit einer Nominaldicke von 1,50 mm hergestellt. Der Lagenaufbau wurde quadraxial symmetrisch aus 12 Einzellagen mit der Sequenz [0°/+45°/90°/-45°/90°/0°]s aufgebaut. Die beiden kommenden Abbildungen zeigen den Aufbau zum Precuring im Autoklaven beginnend mit einem Druckblech, Trennfolie, Laminat, Abreißgewebe, Lochfolie, Saugvlies und einer mit Dichtband versehenen Vakuumfolie als Abdeckung.

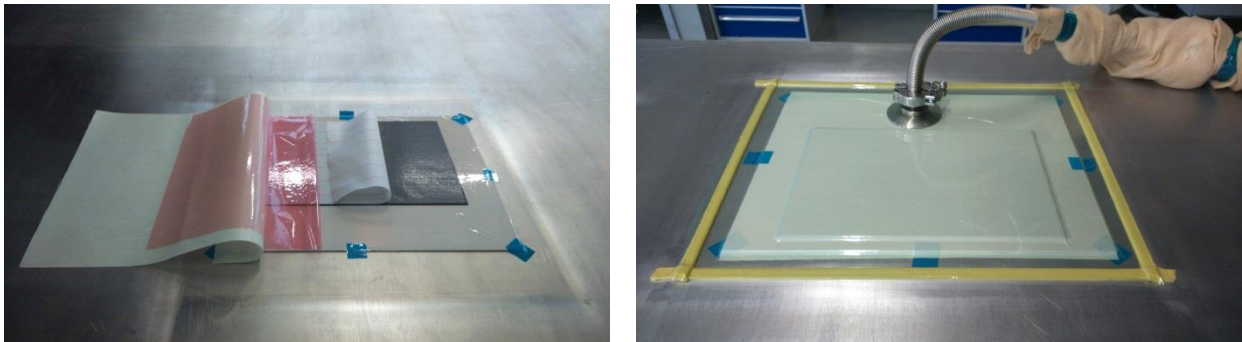


Abbildung 7: Aufbau für An Härteung im Autoklaven

Im Anschluss wurden alle 4 Laminatplatten mit folgenden Zyklen im Autoklaven ange Härte:

- Volles Vakuum -1000 mbar
- Aufheizrampe 2°C/min bis 140°C
- Druck 7 bar bei Reduzierung Vakuum auf -200 mbar
- Haltestufe Temperatur jeweils 70, 90, 120 und 200 min
- Abkühlrampe 2°C/min
- Belüftung auf Umgebungsdruck
- Entformung Laminat bei 50°C

Die folgende Abbildung zeigt exemplarisch den Autoklavzyklus für die Probe mit 90 min Härtung bei 140°C.

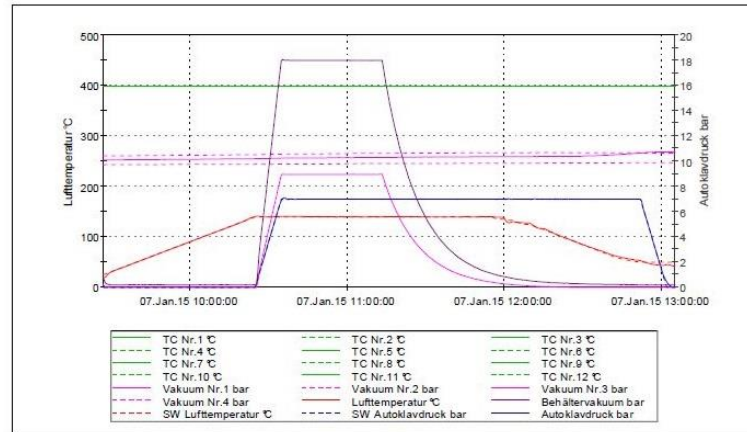


Abbildung 8: Autoklavzyklus 140°C / 90 min mit 2°C Rampe

6.1.4 Umformung von angehärteten Laminaten aus M21-E

In einem zweiten Härtezyklus wurde untersucht, in wie weit die bereits vorgehärteten und auf Solldicke konsolidierten Laminaten noch umformbar sind. Dieser Fertigungsschritt entspricht somit der finalen Verklebung des Patches mit der ausgefrästen Schadenstelle. Dabei sollte sich die plane Fläche des Patches der Außengeometrie des zu reparierenden Bauteils vollständig „plastisch“ anpassen und mittels eines dazwischenliegenden Folienklebers (FM300-2) verklebt werden. Als Versuchsbauteil für die Umformversuche wurde eine Aluminiumschale mit einem Krümmungsradius von 2000 mm ausgewählt. Diese simuliert die Oberfläche eines realen CFK-Bauteils z.B. einer Rumpfstruktur. Auf einen Klebstoff wurde in diesem Fall verzichtet, da es sich ausschließlich um Umformversuche handelt. Den Aufbau veranschaulicht die kommende Abbildung.

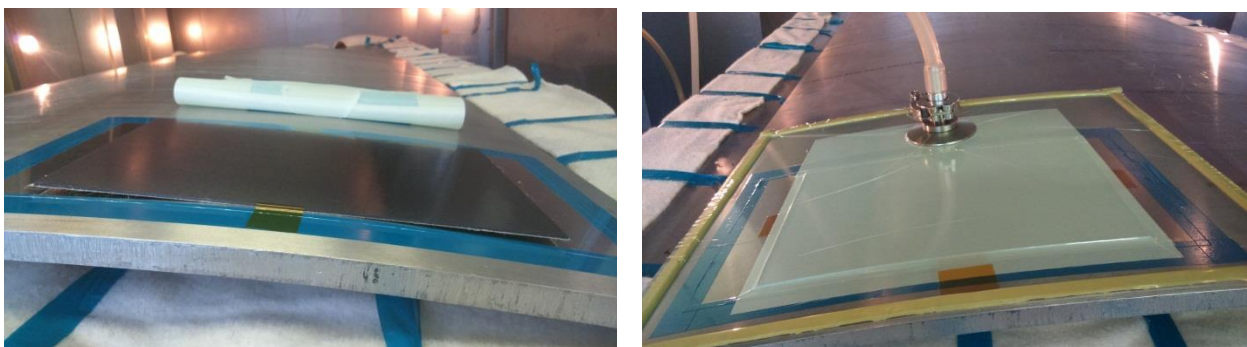


Abbildung 9: Laminatumformung auf positiver Aluminiumschale mit R=2000mm

Die Umformung der angehärteten Laminaten wurde in einem Heißluftofen unter einer Vakuumhülle ohne zusätzlichen Druck ($\Delta P=1000\text{mbar}$) durchgeführt. Das Vakuum wurde dabei bereits vor dem Aufheizen aufgebracht. Anschließend wurde der Patch mit

einer Heizrate von 2°C/min bis auf 135°C (entspricht Dwell Temperature nach IPS05-27-002-01) erhitzt und isotherm bei dieser Temperatur für 2 Stunden weiter gehärtet. In einem dritten Härtezyklus müsste dann noch die finale Härtung bei 180°C für 2 Stunden durchgeführt werden, um den maximalen TG des M21-E Materials zu erreichen. Dieser Schritt wurde jedoch bei den Umformversuchen nicht durchgeführt. Die Umformergebnisse zeigen die kommenden vier Abbildungen in der Reihenfolge der Vorhärtezeiten 70, 90, 120 und 200 min.

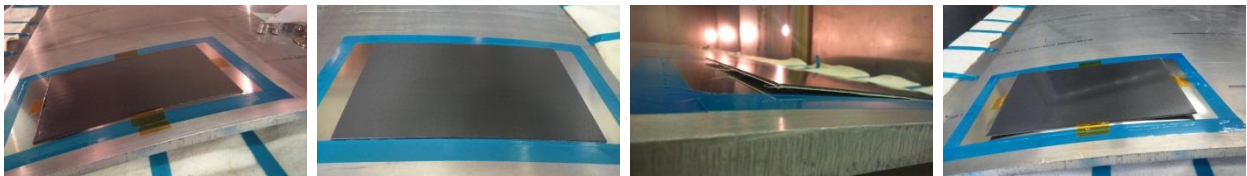


Abbildung 10: Ergebnis der Umformung bei den Proben mit 70, 90, 120 und 200 min Anhärtung

Es hat sich gezeigt, dass sich die angehärteten Proben mit 70 und 90 min Precuring vollständig umformen lassen. Auch konnte eine nochmalige Erweichung des Laminates durch Veränderung der Oberflächenstruktur (Abdruck des Abreißgewebes auf der Oberseite) festgestellt werden. Die Umformung blieb nach Abkühlung vollständig erhalten und dauerhaft bei RT stabil. Die beiden Patches mit 120 und 200 min Vorhärtung konnten mit dem beschriebenen Zyklus nicht mehr umgeformt werden. Diese federten nach Entfernung des Vakuumaufbaus in ihren planaren Zustand zurück. Es ist daher davon auszugehen, dass das Prepreg aufgrund eines bereits zu hohen Härtegrades von >44% sich nicht genügend nochmalig erweichen konnte, um eine „plastische“ Umformung zuzulassen. Dies konnte auch an der unverändert glatten Oberfläche des Laminates nach dem Umformprozess nachgewiesen werden. Abschließend lässt sich sagen, dass ein Aushärtegrad von ca. 42% mit einem dazugehörigen TG-Wert von 58°C als Obergrenze für eine nachträgliche Umformung beim M21-E angesehen werden kann.

6.1.5 Beurteilung der Laminatqualität

Zur Beurteilung der Laminatqualität, der Laminatdicken sowie der Konsolidierung der Einzellagen nach dem Anhängen und Umformen wurden Schliffbilder angefertigt und mit Hilfe eines digitalen Auflichtmikroskopes ausgewertet. Bei der Dickenvermessung zeigte sich, dass die Solldicke von 1,45 mm bereits nach dem Anhängesyklus im Autoklaven bei allen vier Probeplatten mit unterschiedlichem Härtegrad erreicht wurde. Auch nach dem nochmaligen Erwärmen und Härten beim Umformen wurde keine Dickenänderung mehr festgestellt. Das Laminat ist bereits nach dem Precuring vollständig konsolidiert, auch sind keine Imperfektionen oder Lunker erkennbar.

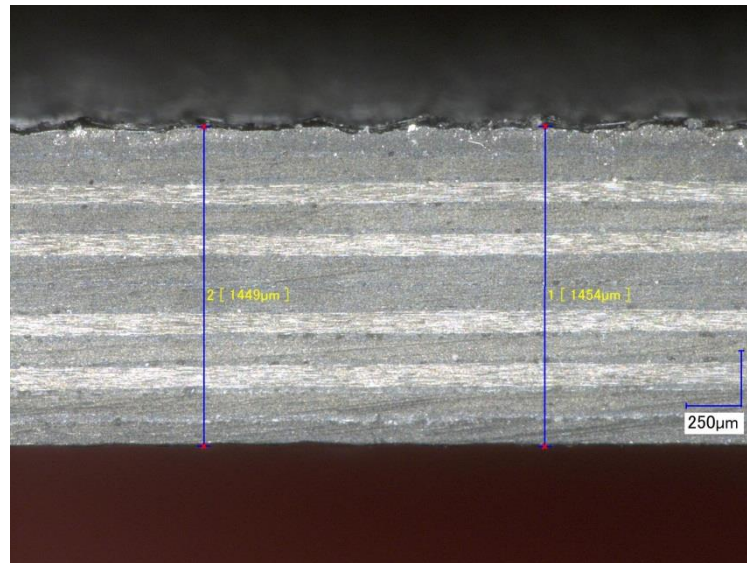


Abbildung 11: Mikroskopische Vermessung der Laminatdicke nach dem Precuring

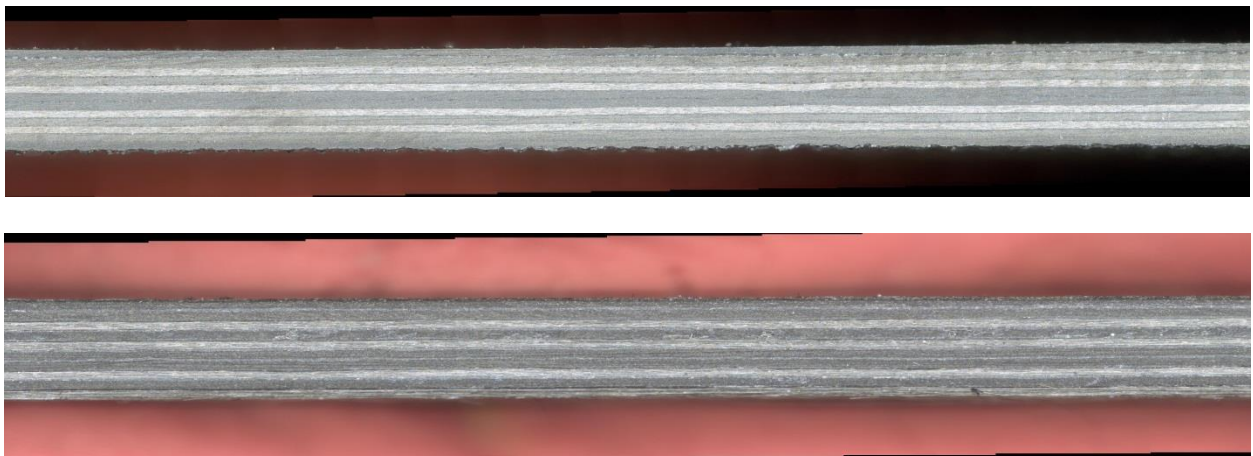


Abbildung 12: Laminatquerschnitt nach dem Precuring- und Umformprozess (Probe 90min/140°C)

6.1.6 Mechanische Bearbeitbarkeit von angehärteten Laminaten aus M21-E

Ein sehr wichtiges Merkmal zur Realisierung der Klebereparatur mittels Semi Cured Patches ist die mechanische Bearbeitbarkeit des angehärteten Laminates. Aus diesem Grund wurde der Randbeschnitt mit Hilfe einer wassergekühlten Diamantkreissäge für alle 4 Anhärtestufen überprüft. In einer zweiten Untersuchung wurde die CNC-Befrägsbarkeit der Proben ermittelt und optisch bewertet.

Für die Proben mit 200 und 120 min Vorhärtung bei 140°C zeigte sich beim Randbeschnitt ein ganz normales Schnittbild mit einer sauberen und glatten Schnittkante im Mikroskop. Die Probe mit 90 min Anhärtung wies eine geringfügige Ausfransung an der untersten Laminatlage auf, jedoch konnte dieser Effekt durch Unterlegen eines dünnen GFK-Laminats vermieden werden. Die Unterschiede der Schnittkantenausbildung zeigt die kommende Abbildung, einmal ohne und mit Unterlage.

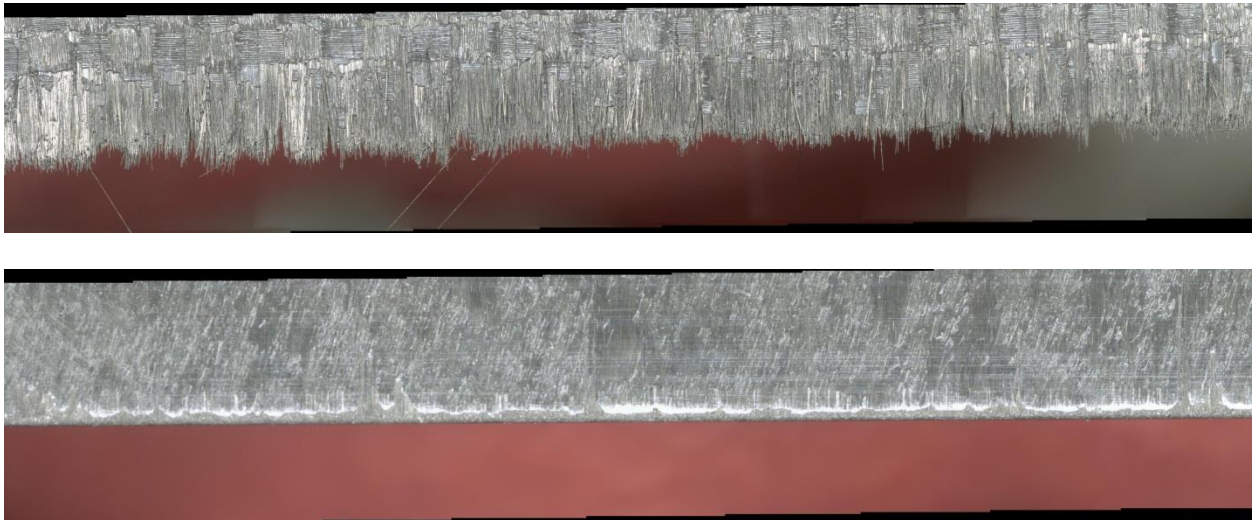


Abbildung 13: Schnittkante ohne und mit Unterlage (Probe 90min/140°C)

Die Probeplatte mit 70 min/140°C Vorhärtung lieferte kein akzeptierbares Ergebnis. Die Schnittkante franste erheblich aus und erbrachte nur eine geringfügige Verbesserung durch eine Unterlage.

Die radiale Befräsung der angehärteten M21-E Laminatproben wurde mit einer CNC geführten Roboteranlage durchgeführt. Als Fräser wurde ein Vollradiusfräser mit einem Durchmesser von 8 mm ausgewählt. Die Umdrehung betrug 10.000 U/min bei einem Vorschub in x-Richtung von 500 mm/min und einem Materialabtrag in z-Richtung von 0,1 mm schrittweise. Das Abfräsen fand bei RT statt ohne zusätzliche Kühlung. Bei den Proben mit 200 und 120 min Anhärtung bei 140°C wurden keine Auffälligkeiten festgestellt. Das Material ließ sich sauber abtragen, vergleichbar zu einem voll ausgehärteten Laminat. Die kommenden Abbildungen zeigen das Fräsmuster sowie eine 20-fache Vergrößerung der abgetragenen Flächen.

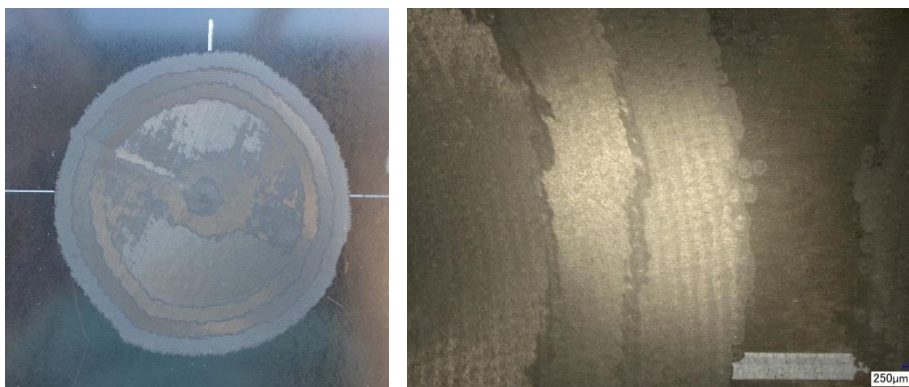


Abbildung 14: Gefräste Probe mit 200 min/140°C Anhärtung

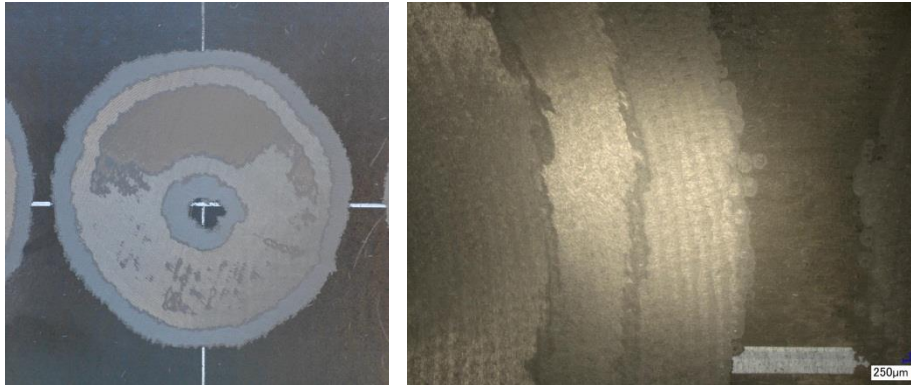


Abbildung 15: Gefräste Probe mit 120 min/140°C Anhärtung

Bei der Probe mit 90 min Anhärtung bei 140°C hat sich gezeigt, dass die Befräsbarkeit im Grenzbereich des Möglichen liegt. Partiiell kam es zu geringfügigen Ausfransungen der Fasern aus der Matrix. Dies ist zum einen auf eine reduzierte Faser/Matrix Haftung der angelierten Matrix zurückzuführen und zum anderen auf eine „weichere“ Matrix mit einem deutlich reduziertem Vernetzungsgrad. In Folge dessen werden die Fasern beim Fräsvorgang schlechter gestützt und werden daher zum Teil nicht sauber gebrochen. Dies führt dann zu einer Ausfransung der Fasern. Erschwerend kommt hinzu, dass durch die Reibung beim Fräsen zusätzlich Wärme entsteht und die Matrix zusätzlich erweicht (ΔT zwischen Bearbeitungstemperatur und TG verringert sich).

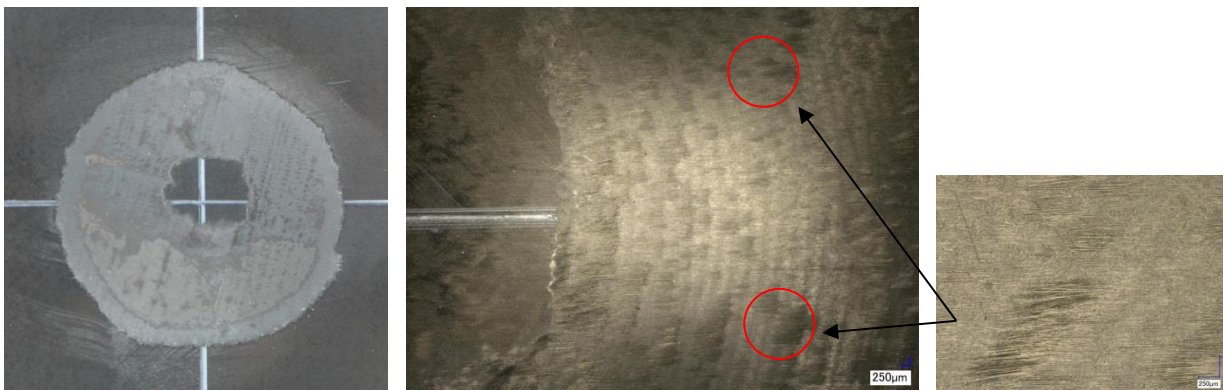


Abbildung 16: Gefräste Probe mit 190 min/140°C Anhärtung

6.1.7 Zusammenfassung und Ausblick “semi-cured repair patches”

Die Untersuchungen haben gezeigt, dass es eine Härtegrad-Obergrenze von ca. 42% gibt, bei dem das Laminat bestehend aus M21-E UD-Prepreg bei einer Anhärtung von 90 min bei 140°C vollständig im Autoklaven bei 7 bar Druck konsolidiert werden kann und anschließend eine Umformung bei 135°C bei 1 bar Druck unter Vakuum im Heißluftofen noch möglich ist. Eine anschließende frästechnische Bearbeitung ist bei dieser Angelierungs-Stufe von 90 min bei 140°C nur noch eingeschränkt machbar und deshalb bereits als kritisch zu bewerten. Die kommende Tabelle zeigt alle Ergebnisse der verschiedenen Proben und Untersuchungen nochmals im Überblick.

Untersuchungsergebnisse Semi Cured Patches						
Proben Nr.	Anhärtung	Aushärtegrad (α)	TG-Wert	Laminatqualität	Umformbarkeit	mech. Bearbeitbarkeit
1	70min/140°C	32%	50°C			
2	90min/140°C	42%	58°C			
3	120min/140°C	44%	70°C			
4	200min/140°C	56%	95°C			
	gut			Laminatqualität nach Autoklavzyklus mit 7 bar Druck		
	machbar			Umformbarkeit bei 135°C unter Vakuum		
	nicht möglich			mech. Bearbeitbarkeit CNC-Fräsen und Trennschneiden mit Nasskreissäge		

Abbildung 17: Zusammenfassung Untersuchungsergebnisse

Bei realistischer Betrachtung muss man jedoch mit größeren Temperaturschwankungen bei der Herstellung der angeleiteten Lamine und bei der Reparaturhärtung (Angleichung der angeleiteten Patches an die Schäftform) rechnen. Das heißt die Einstellung eines exakten Anhärtegrades wird unter Praxisbedingungen eine größere Toleranzbreite aufweisen. Die oben angegebenen Werte müssten also noch statistisch abgesichert werden. Eine Möglichkeit zur reproduzierbaren Einstellung eines genauen Härtegrades wäre die Härtung bei einer niedrigeren Temperatur über einen längeren Zeitraum. Fertigungsschwankungen würden sich dann weniger stark auf den Härtegrad und auf den TG auswirken.

6.1.8 Umsetzung einer vollständigen automatisierten Reparatur

Innerhalb des Arbeitspaketes erfolgte die Umsetzung einer vollständigen automatisierten Reparatur mit Berücksichtigung der Tooling-Prozesskette und der Herstellung eines komplett ausgehärteten Reparatur-Patches.

Der Ablauf der vollständigen automatisierten Prozesskette wurde ist in Abbildung 18 dargestellt.

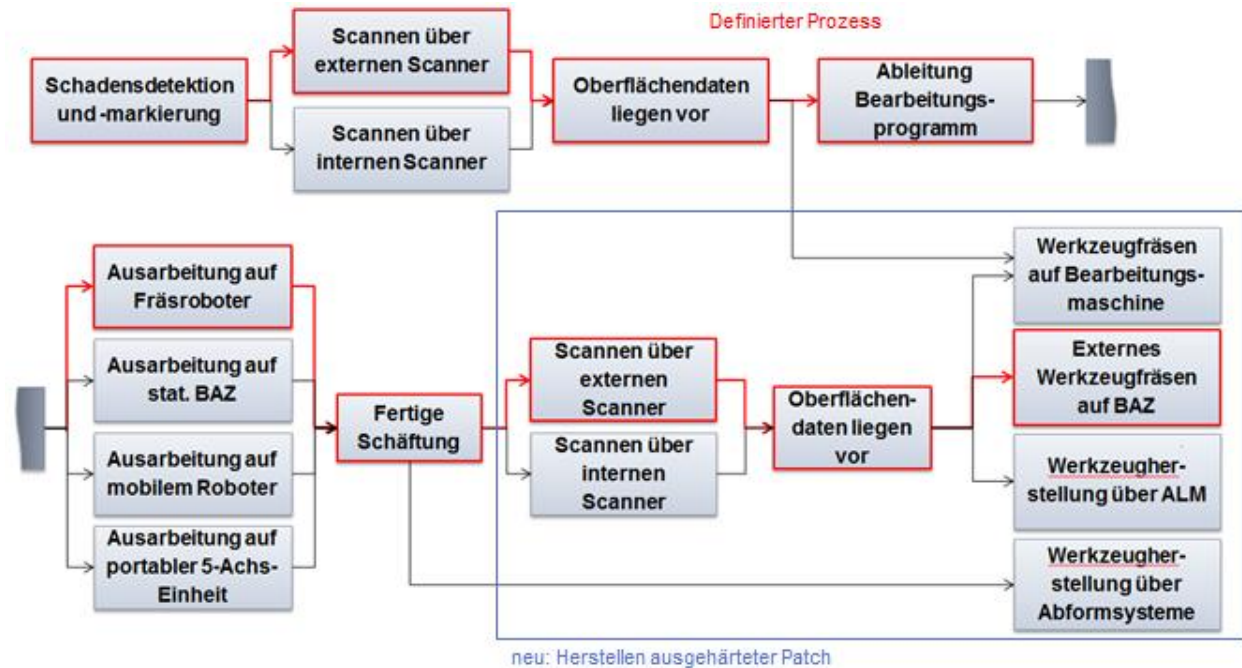


Abbildung 18: Vollständige Reparatur-Prozesskette inkl. Hard-Patch-Herstellung

Gemeinsam mit PAG wurde ein A350 Schalensegment ausgewählt sowie Schalenbereiche für eine Rundfräsung und für eine ovale Fräsung (Langloch) definiert (siehe Abbildung 19). Die Details für die Reparaturgeometrie und für die durchzuführenden Fräsungen sind in Abbildung 20 nochmal zusammengefasst.

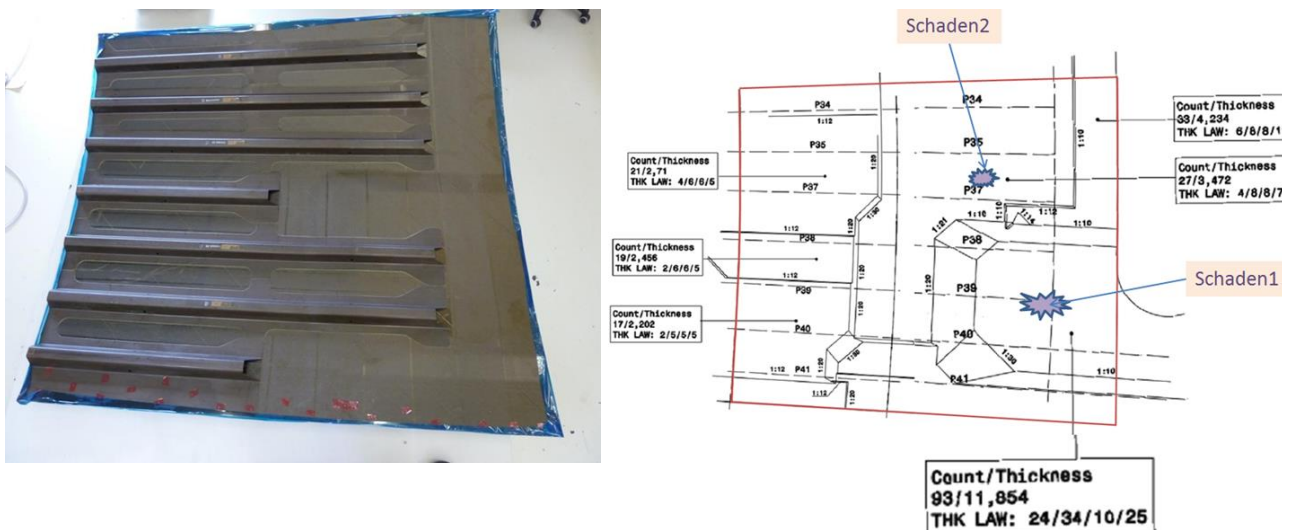


Abbildung 19: A350 Schalensegment – links: Fotografie Innenansicht; rechts: Schadenspositionen 1 und 2 auf Bauteil

Schaden 1 „Langloch“

Vorschläge für virtuelle Schadensgrößen für Schaden1

Ausgewählter Schalenbereich mit Beplankungsdicke von 12 mm

Bedingungen:

Rohling Tool Halbzeug: 550 x 440 mm
Patcheinfügung max.: 480 x 380 mm
M21e low grade 0/90 slit tape
Kleberfilm FM300-2

Schäfttiefe nominal:	6mm	4 mm	8 mm	6mm
M21e Lagen medium				
Schäftwinkel	1 : 25	1 : 30	1 : 20	1 : 20
Schäfttrampe	150 mm	120 mm	160 mm	120 mm
Schaden max.	160 x 60	200 x 100	120 x 50	200 x 120
Schadensfläche ca.	9600	20000	6000	24000
Schäftung max.	460 x 360	440 x 340	440 x 370	440 x 360

Schaden 1 (Toolfusion1/CFK Wirrfaser Rohling)

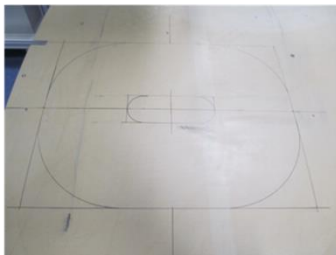
Kompromiss zw. Schäftwinkel und -tiefe 6mm Schäfttiefe, 1:25 Schäftwinkel Schaden 160 x 60

Nach telefonischer Sprache mit PAG:

„Thickness LSP Surfacer SM905 incl. Cu-mesh“ ca. 0,17 mm

→ Schäfttiefe nominal: 6,17 mm

→ Schäfttiefe gewählt: 6,20 mm



Schaden 2 „Rund“

Vorschläge für virtuelle Schadensgrößen für Schaden2

Ausgewählter Schalenbereich mit Beplankungsdicke von 12 mm

Bedingungen:

Patch Tool Halbzeug: 550
Patcheinfügung max.: 300 x 200 mm
M21e low grade 0/90 slit tape
Kleberfilm FM300-2

Schäfttiefe nominal:	1mm	1,5 mm	2 mm	2mm	2,5mm	2,5mm
M21e Lagen medium						
Schäftwinkel	1 : 30	1 : 30	1 : 20	1 : 30	1 : 30	1:30
Schäfttrampe	25 mm	45 mm	40 mm	60 mm	75 mm	75
Schaden max.	80 x 60	80 x 60	80 x 60	80	80 x 60	100 dia
Schadensfläche ca.	4800	4800	4800	5026	4800	7854
Schäftung max.	130 x 110	170 x 150	160 x 140	200 dia	230 x 210	250 dia

Schaden 2:

Kompromiss zw. Schäftwinkel und -tiefe 2mm Schäfttiefe, 1:30 Schäftwinkel, Schaden 80 mm dia

Nach telefonischer Sprache mit PAG:

„Thickness LSP Surfacer SM905 incl. Cu-mesh“ ca. 0,17 mm

→ Schäfttiefe nominal: 2,17 mm

→ Schäfttiefe gewählt: 2,20 mm → Vergrößerung des Außendurchmessers auf 212 mm

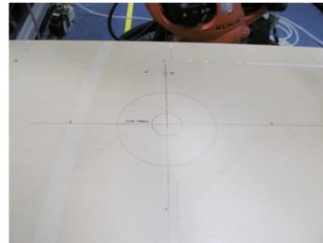


Abbildung 20: Festlegung Reparaturgeometrie Schaden 1 (links) und Schaden 2 (rechts)

Das CFK-Schalensegment wurde von PAG in Augsburg gefertigt und auch der Holzunterbau für die Aufspannung und Anschraubung auf AGI-Frästisch. Beides wurde nach OTN für die Durchführung der weiteren Prozessschritte geliefert. Nachfolgende Abbildung zeigt die Aufspannung auf dem Frästisch.

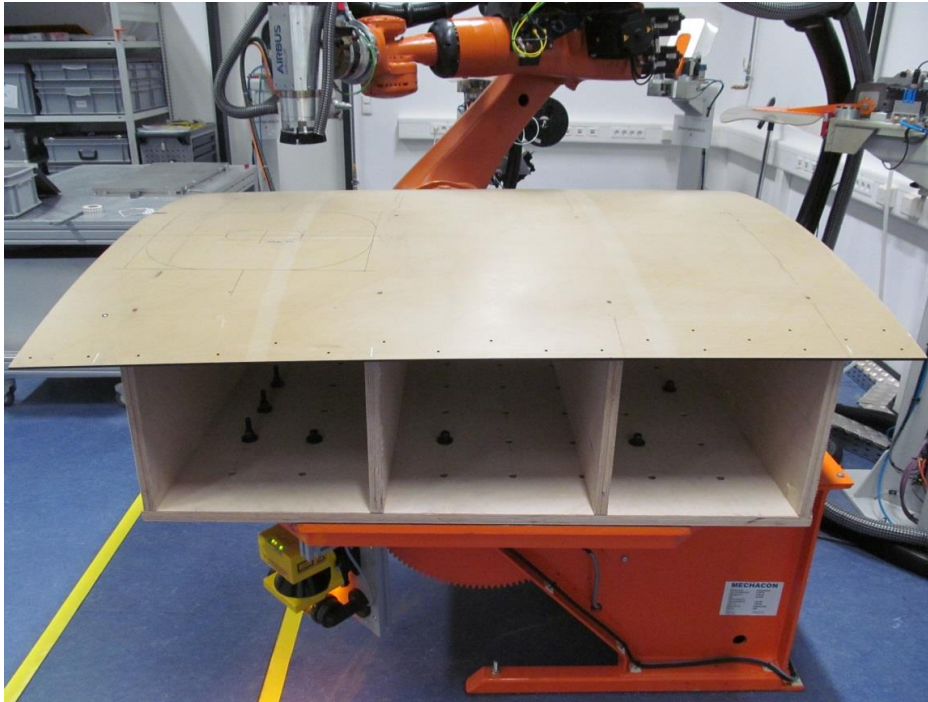


Abbildung 21: Aufspannung des A350 Schalensegments auf dem Frästisch

Die nachfolgenden Abbildungen zeigen die Durchführung der stationären Roboterfräsungen und die ausgefrästen Bereiche für Schaden 1 und 2.

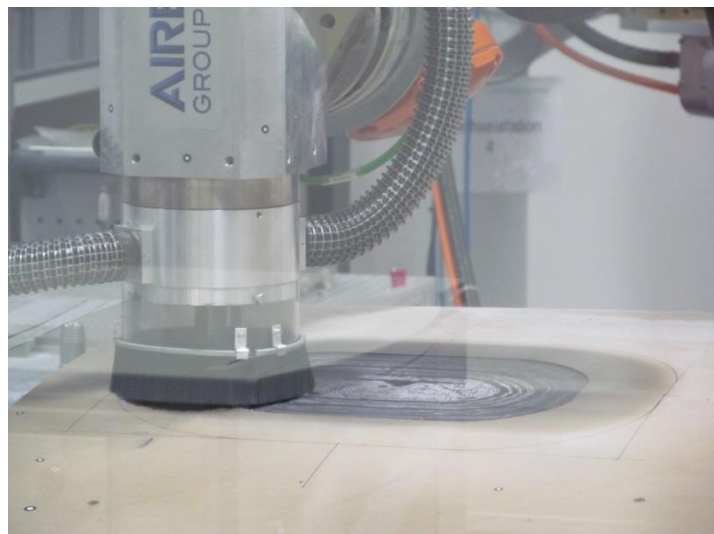


Abbildung 22: Durchführung der Fräsungen auf dem A350 Schalensegment

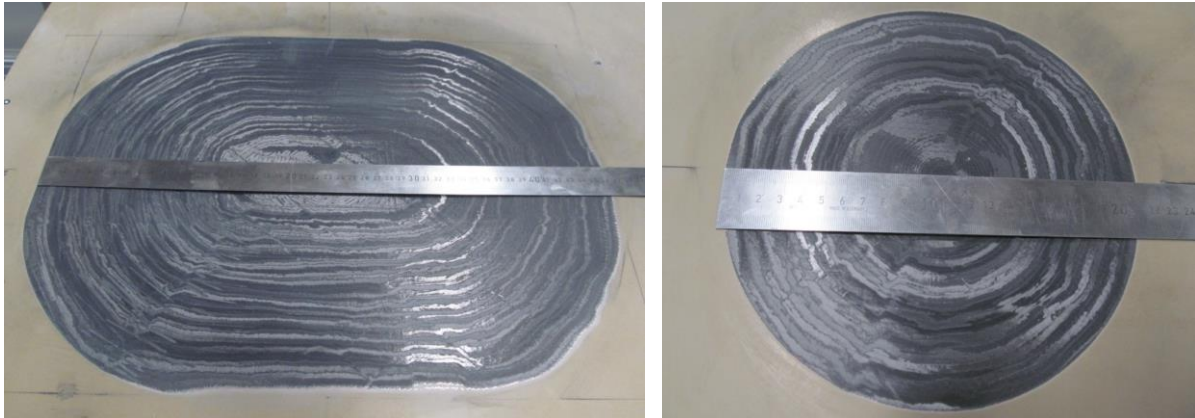


Abbildung 23: Ausgefräste Schadensbereiche 1 und 2 auf dem A350 Schalensegment

Mit Hilfe der Streifenlicht-Projektionsmethode von AGI („ATOS-Scans“) erfolgte anschließend die 3-D-Vermessung der ausgefrästen Bereiche.

Bereits im sogenannten Graubild der ovalen Schäftung 1 sind die beiden Umschwinglinien des Roboters zu erkennen. Zusätzlich sieht man im rechten Kreissegment des Graubildes eine ungleichmäßigere Höhen- und Tiefenverteilung im Schäftbereich. Vermutet wird, dass dies durch die Fräs-Software bedingt ist, da im gegenüberliegenden Kreissegment dieses Verhalten nicht feststellbar ist (siehe Abbildung 26).

Im Graubild der runden Schäftung 2 sind ebenfalls wieder die beiden Umschwinglinien des Roboters erkennbar und einige Tiefenabweichungen im Farbbild (Abbildung 27 bis Abbildung 29).

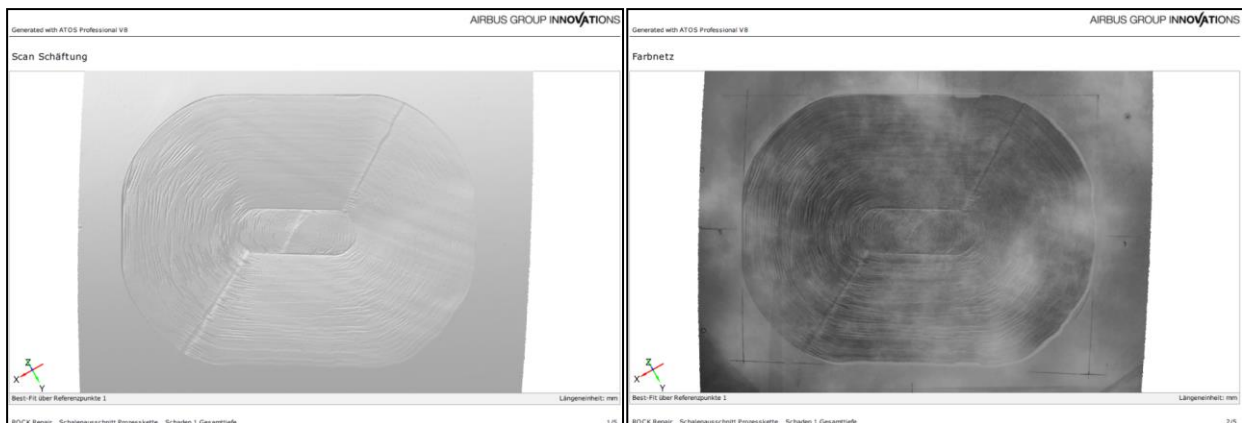


Abbildung 24: ATOS Vermessung Schadensbereich 1

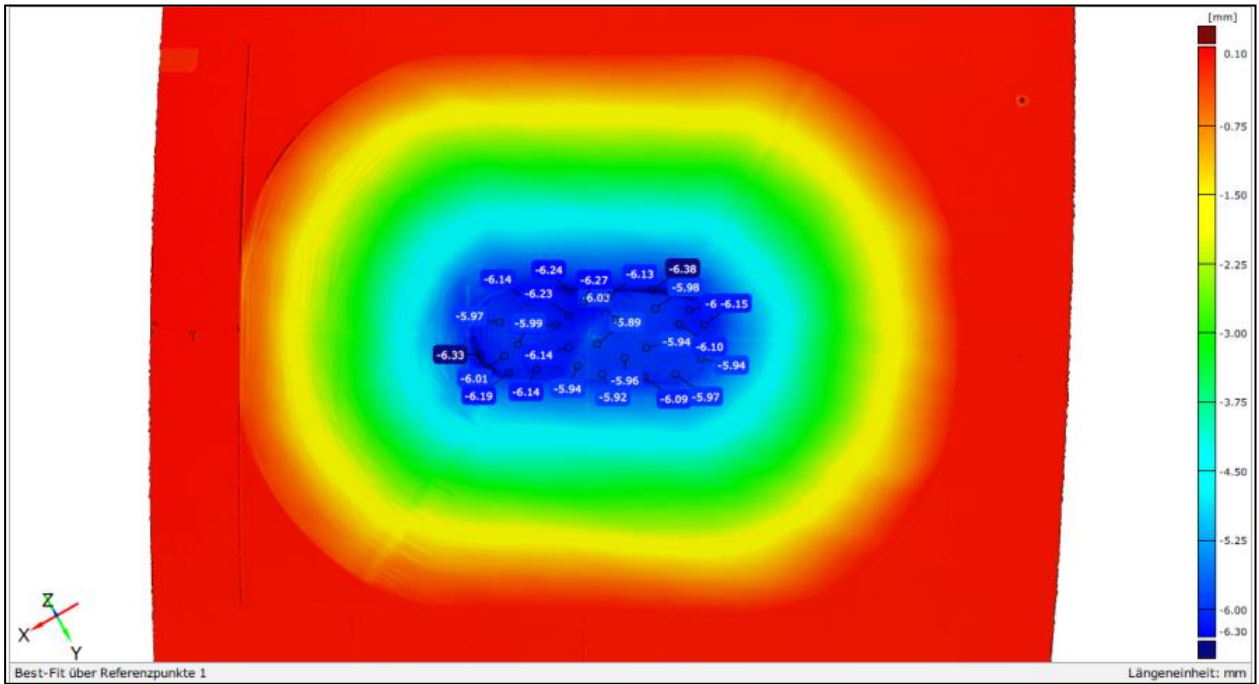


Abbildung 25: ATOS Vermessung Schadensbereich 1 – Flächenvergleich

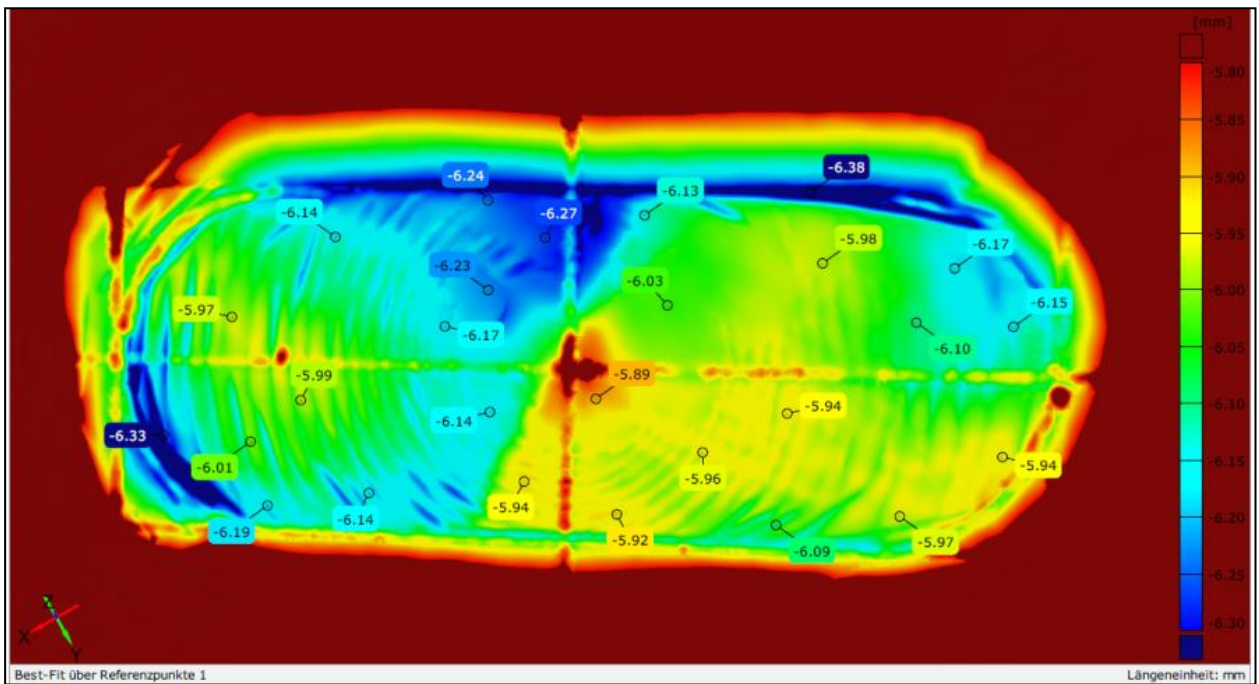


Abbildung 26: ATOS Vermessung Schadensbereich 1 – Flächenvergleich im Schadensgrund

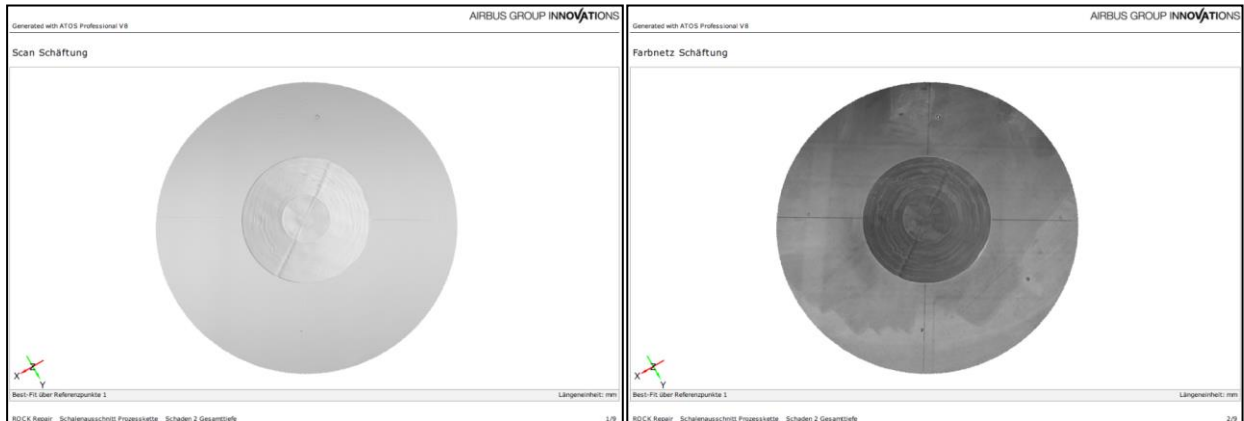


Abbildung 27: ATOS Vermessung Schadensbereich 2

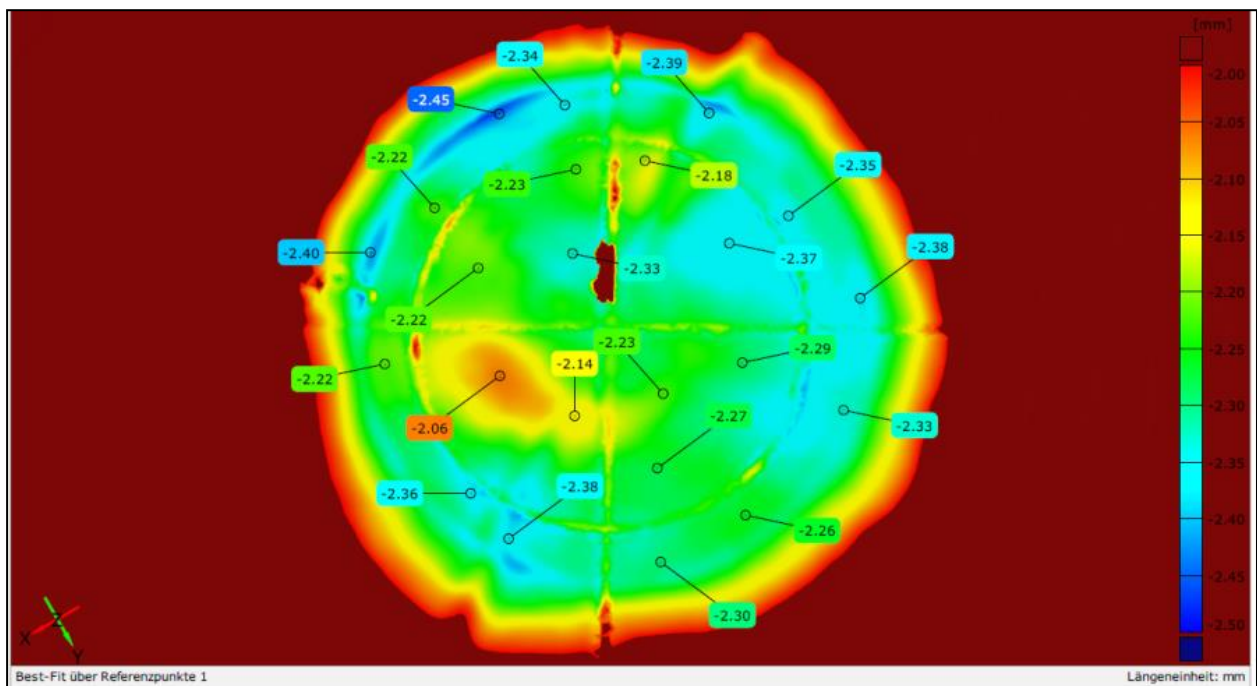


Abbildung 28: ATOS Vermessung Schadensbereich 2 – Flächenvergleich

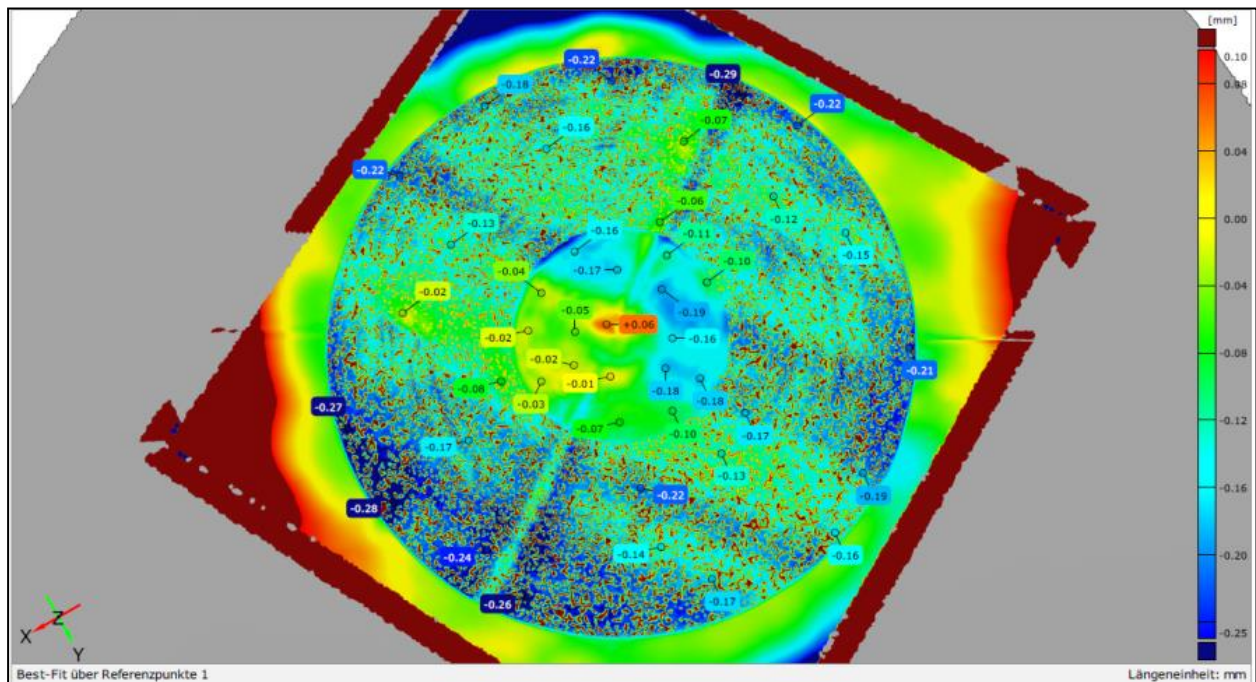


Abbildung 29: ATOS Vermessung Schadensbereich 2 – Flächenvergleich im Schadensgrund

Im darauffolgenden Schritt erfolgt die software-technische Aufbereitung der ATOS-Scandaten für die anschließende Werkzeug-Herstellung von Hardpatches. Hierzu werden die ATOS „.stl-Daten“ in igs-Daten“ umgewandelt und in verschiedene Fräsegmente (Kurvenbereiche) unterteilt. Zusätzlich muss auch noch ein Datensatz für das Einfräsen des Koordinatenkreuzes auf der Werkzeugoberfläche erstellt werden. Siehe Abbildung 30 und Abbildung 31.

Die Herstellung der Hardpatches soll in CFK-Werkzeugen erfolgen. Von PAG sind hierzu verschiedene CFK-Blöcke als Halbzeuge angefertigt worden. Die mehrere Zentimeter-dicken CFK-Blöcke wurden in Augsburg mit zwei verschiedenen CFK-Ausgangsmaterialien (Toolfusion 1 und 3) hergestellt. Der CFK-Block „Toolfusion 1“ wurde im Infusionsverfahren mit Wirrfasern hergestellt. Dieser CFK-Block hat optisch eine gute Qualität und wurde zugeschnitten aber nicht überfräst und wird anschließend als Halbzeug für die das Patch-Werkzeug 1 verwendet. Der CFK-Block „Toolfusion 3“ zeigte eine schlechtere Oberflächenqualität und musste beidseitig überfräst werden. Der bearbeitete Block „Toolfusion 3“ wird anschließend als Halbzeug für das Patch-Werkzeug 2 eingesetzt. Siehe Abbildung 32.

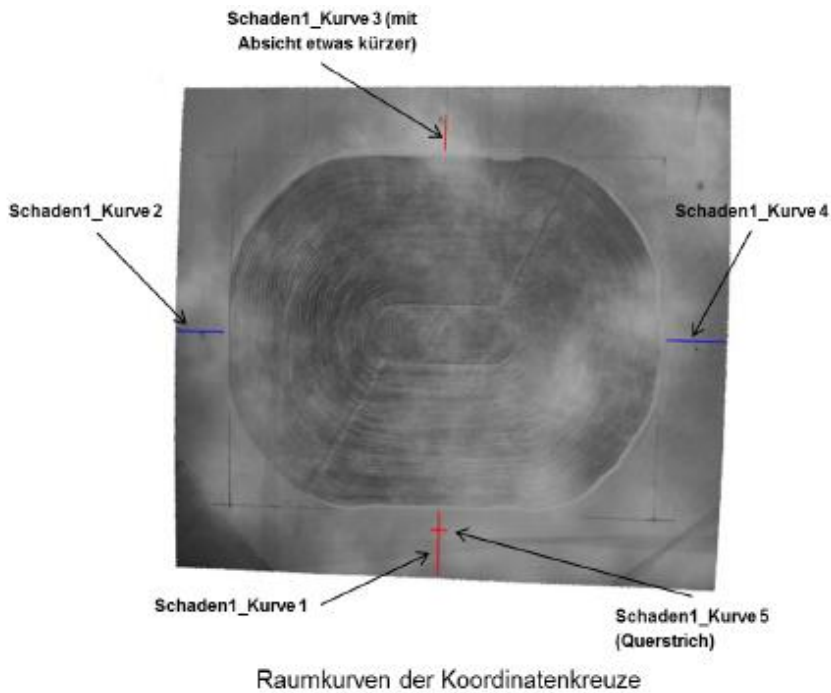


Abbildung 30: ATOS San-Datenaufbereitung Schaden 1 für Werkzeugfräsen

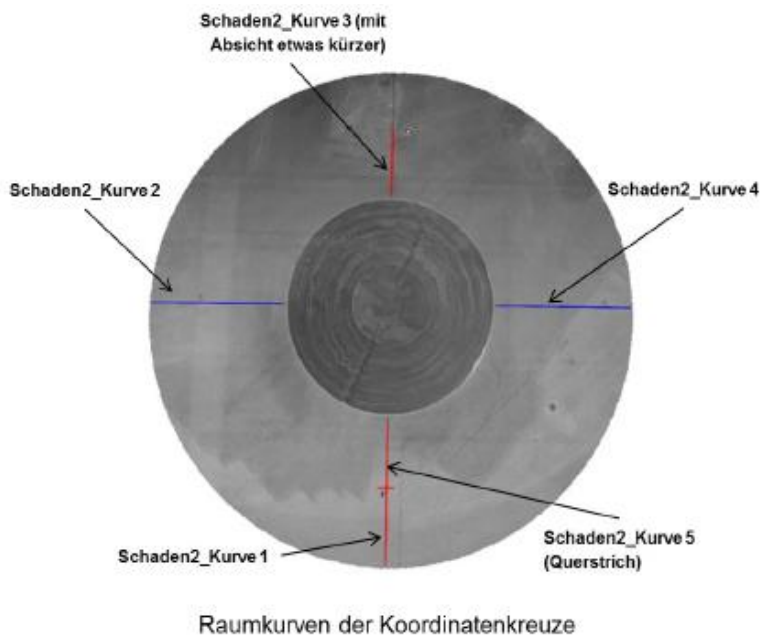
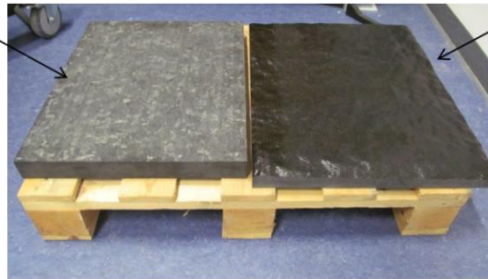


Abbildung 31: ATOS San-Datenaufbereitung Schaden 2 für Werkzeugfräsen

„Toolfusion 3“-Block:

- Material hergestellt bei PAG in verschiedenen Einzelschritten
- Block hat schlechte Qualität
- Material zugeschnitten und überfräst
- Block soll nur als optionales Tooling verwendet werden für Schaden 2
- Tooling-Herstellung bei CKF in Aluminium für Schaden 2



„Toolfusion 1“-Block:

- Material hergestellt bei PAG
- Wirrfasern mit Toolfusion 1a/b infundiert
- Block hat gute Qualität
- Material zugeschnitten, aber nicht überfräst
- Block soll nur als Tooling für Schaden 1 verwendet werden

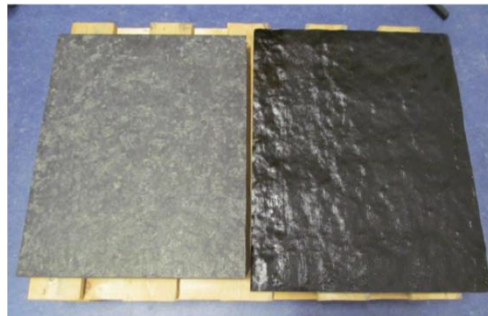
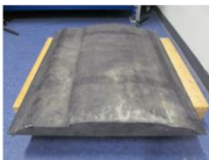


Abbildung 32: CFK-Halbzeuge für Hardpatch-Werkzeuge

Neben den CFK-Blöcken soll auch die frästechnische Patch-Werkzeug-Herstellung mit Aluminiumblöcken untersucht werden. Hier muss bei der Übertragung der Datensätze berücksichtigt werden, dass sich Aluminium bei der Patch-Härtungstemperatur stärker ausdehnt als CFK. Dies wurde bei den Datensätzen für Aluminium berücksichtigt, heißt die Al-Fräslfläche ist bei Raumtemperatur etwas kleiner als bei CFK.

Wie bereits erwähnt, erfolgt die frästechnische Herstellung der Patch-Werkzeuge extern auf einer voll-automatischen Portalfräse. Diese Vorgehensweise wurde einerseits gewählt um die Austauschbarkeit der Daten darzustellen (z. B. für spätere externe Bearbeitung und Herstellung) und andererseits, da auf Portalfräsen im Vergleich zum Roboterfräsen höhere Fräsgenauigkeiten erzielt werden können.

Um das Risiko von Fehlfräsungen zu minimieren, wurde zusätzlich beschlossen die Werkzeugfräsungen zunächst mit Ureol-Blöcken durchzuführen, mit ATOS-Messungen auf Genauigkeit hin zu überprüfen und dann erst bei akzeptablen Ergebnissen mit den Al- und CFK-Fräsungen zu beginnen.

Für die externe Herstellung der Ureol-, Al- und CFK-Werkzeuge wurde die Firma CKF-Feinmechanik von AGI beauftragt. Die ATOS-Überprüfungen erfolgten jeweils bei AGI. Die zusätzlich eingefügten Raumkurven dienen zwei Zielen. Zum einen sind sie gut geeignet als Geometrieobjekte, über die eine erste Ausrichtung für die anzustellenden Flächenvergleiche durchgeführt werden kann. Daneben kann die Orientierung der fertigen Hardpatches anhand der nicht symmetrischen fünften Linie (Querstrich) erkannt werden und dadurch ein Verdrehen nach dem Entnehmen aus dem Tooling beim Einleiben in das Schalenbauteil vermieden werden.



Abbildung 33: Bearbeitetes Ureol Tooling für Schaden 2

Abbildung 33 zeigt ein Ureol Tooling mit einer gefrästen Schäftung für den Schaden 2. Aufgrund des geringen Kontrastes ist diese mit bloßem Auge schwierig zu erkennen. Deutlich sichtbar sind aber die zusätzlich eingefügten Raumkurven. Die in den Außenbereichen stehen gebliebenen Ecken resultieren aus der Bearbeitung (Ausgangsdicke des Ureol-Halbzeuges) und sind verblieben, um das Spannen zu erleichtern.

Diese werden aber bei den Al- und CFK-Werkzeugformen in einem zusätzlichen Bearbeitungsschritt entfernt.

Um die Qualität der Fräsung vorab bewerten zu können, werden Flächenvergleiche zwischen den eingescannten Daten der Ureol Toolings und der Schäftungen auf dem Schalenbauteil angestellt, wobei der Offset für den Klebspalt und – im Falle des Aluminium Tools – der größere Wärmeausdehnungskoeffizient berücksichtigt werden. Abbildung 34 zeigt, dass die Abweichungen zwischen Soll-Daten (Schäftung auf Schalenbauteil) als Vorgabe für den Fräsprozess und Ist-Daten (Ureol Tooling) im Bereich der Schäftung und des Überstandes relativ gering sind. Lediglich die zusätzlichen Raumkurven (Fadenkreuz) zeichnen sich deutlich ab, da diese natürlich nicht auf dem Schalenbauteil vorhanden sind und die Ecken-Bereiche, in denen das wenig steife Ureol gespannt ist.

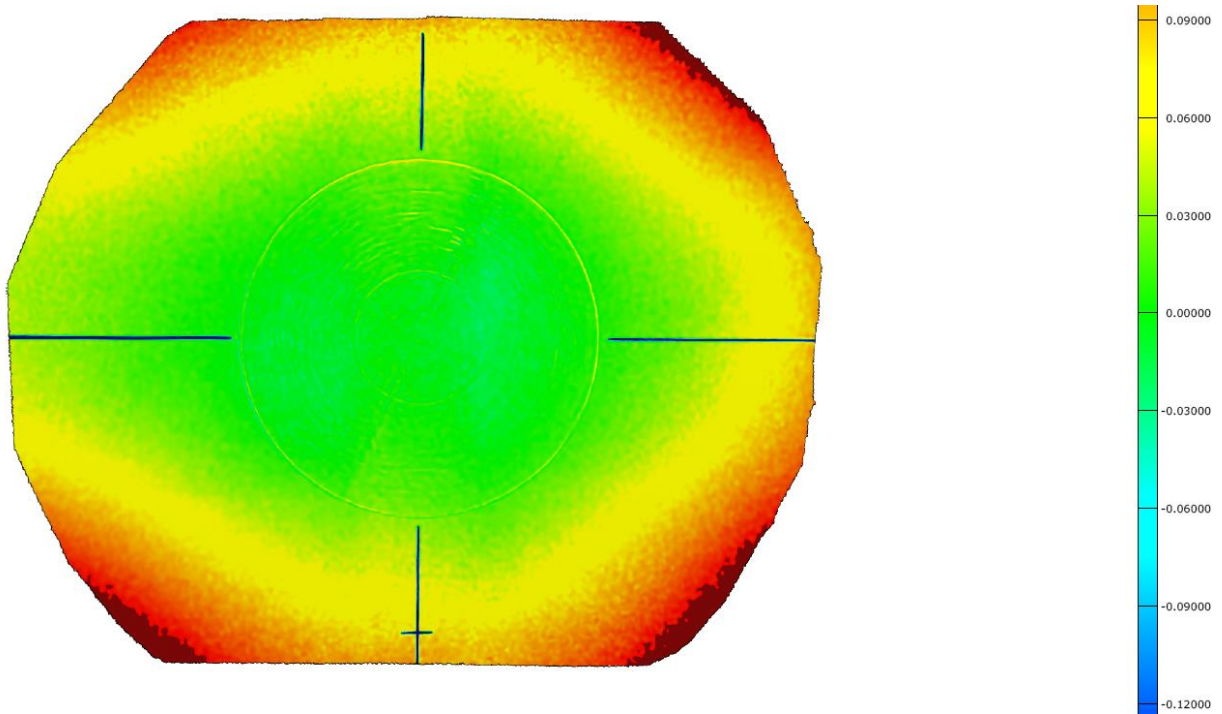


Abbildung 34: Flächenvergleich zwischen Ureol Tooling und angepasster Schäftung auf Schalenbauteil (Skala +0,09 mm / -0,12 mm)

Die Daten werden für die Flächenvergleiche zunächst über die Raumkurven grob gefittet und anschließend über die gesamte farblich gekennzeichnete Fläche per Best-Fit genau ausgerichtet.

Nachdem die Qualität der Fräsung anhand der Ureol-Toolings überprüft ist, werden mit den gleichen Fräs-Daten die tatsächlichen Toolings hergestellt. Diese sind auf Abbildung 35, Abbildung 36 und Abbildung 37 gezeigt. Die Schäftung ist insbesondere auf dem Aluminium Tooling in Abbildung 37 gut zu erkennen. Die beiden Toolings für den Schaden 2 weisen noch die weiter oben besagten Ecken von der Herstellung auf, die jedoch vor der Herstellung der Hardpatches entfernt werden.

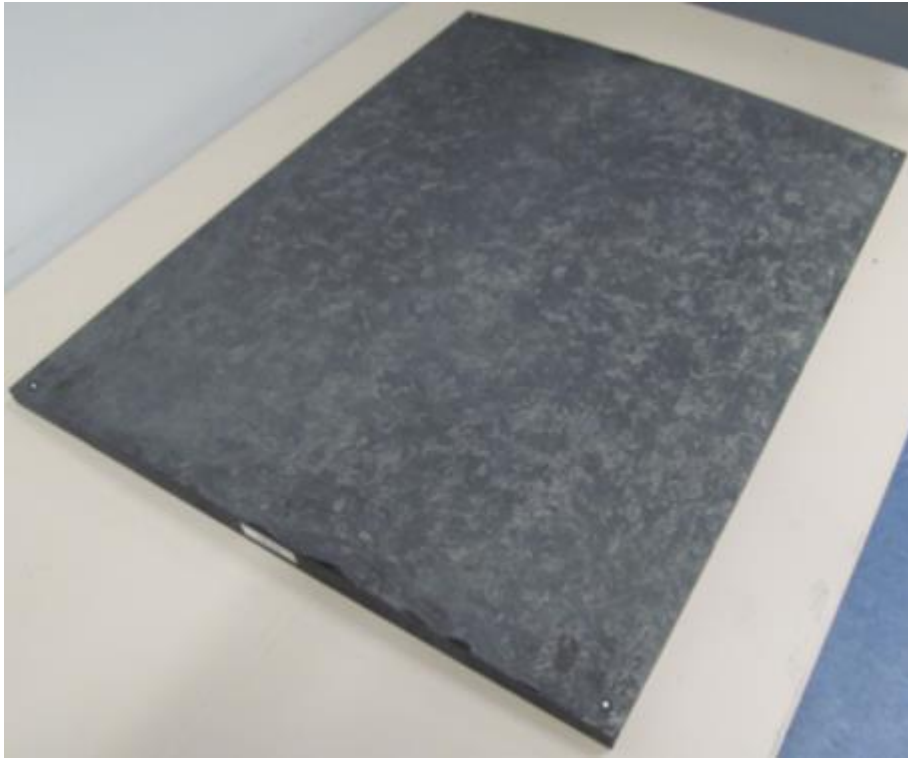


Abbildung 35: CFK Tooling für Schaden 1



Abbildung 36: CFK Tooling für Schaden 2



Abbildung 37: Aluminium Tooling für Schaden 2

Die Maßhaltigkeit der fertigen Toolings wird ebenfalls mit dem ATOS-System überprüft. Dazu werden wieder die gleichen Ursprungsdaten mit den Scandaten der Toolings verglichen. Diese sind in Abbildung 38, Abbildung 39 und Abbildung 40 zu sehen. Die Geometriedaten wurden wie oben beschrieben zueinander ausgerichtet. Es zeigt sich, dass die Toolings sehr genau gefräst wurden und die Oberflächen sehr gut mit den Schäftungsflächen im Schalenbauteil übereinstimmen. Die Abweichungen sind sehr gering.

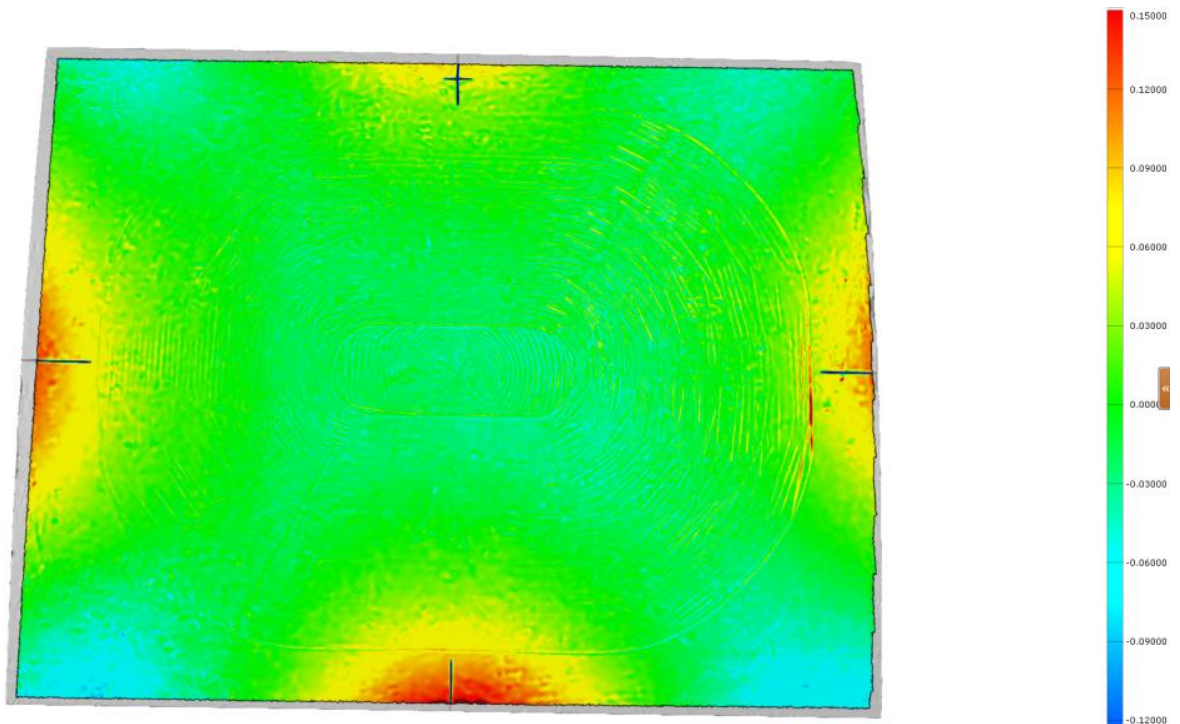


Abbildung 38: Flächenvergleich zwischen CFK Tooling für Schaden 1 und angepasster Schäftung auf Schalenbauteil (Skala +0,15 mm / -0,12 mm)

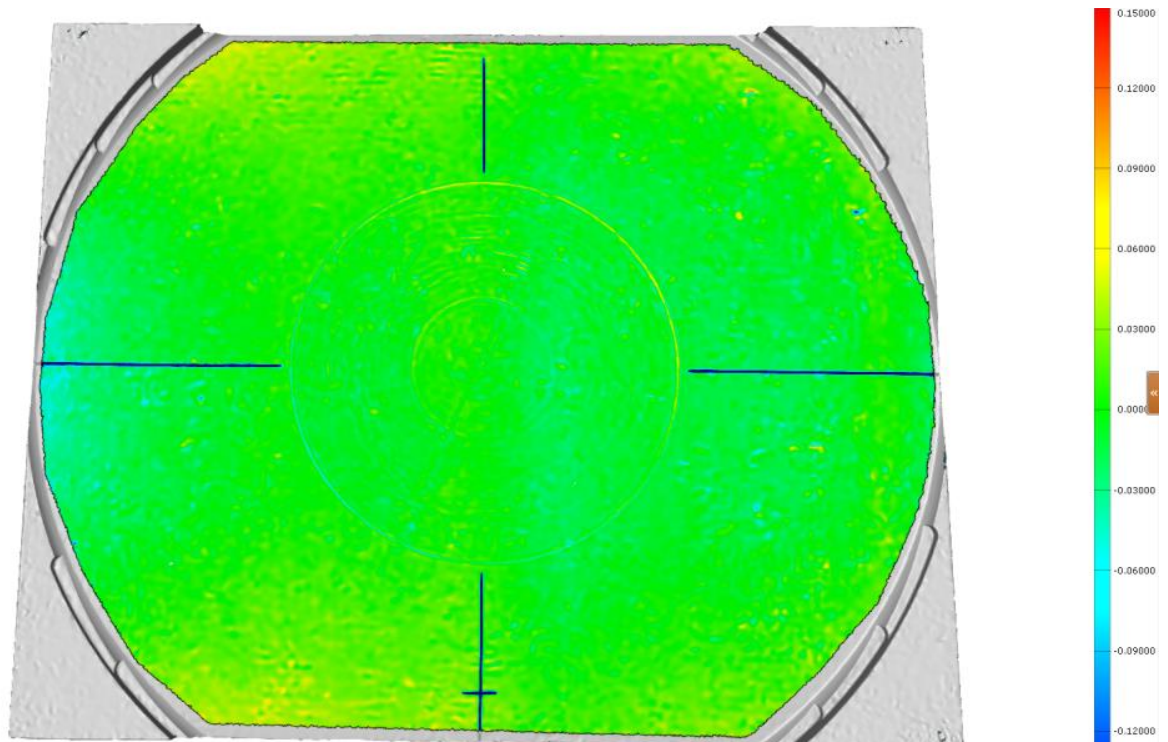


Abbildung 39: Flächenvergleich zwischen CFK Tooling für Schaden 2 und angepasster Schäftung auf Schalenbauteil (+0,15 mm / -0,12 mm)

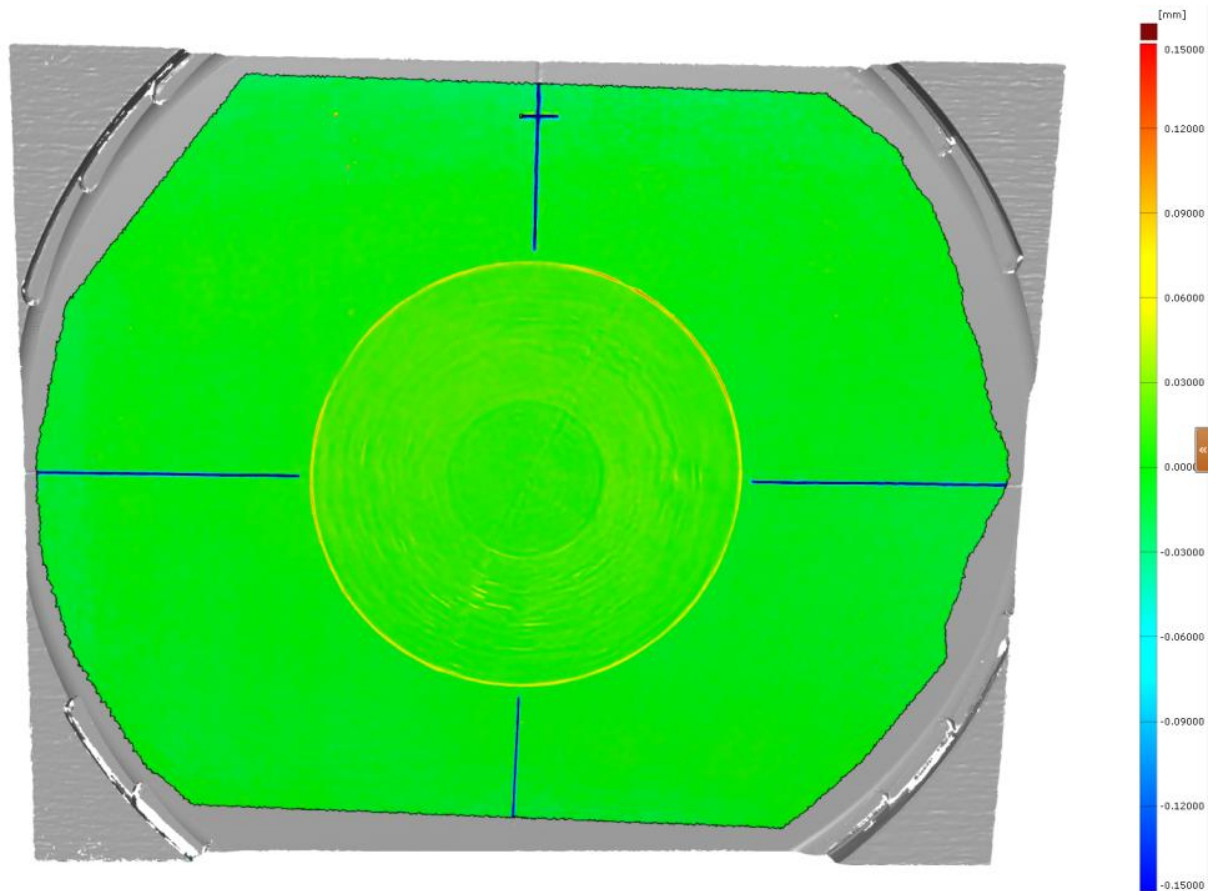
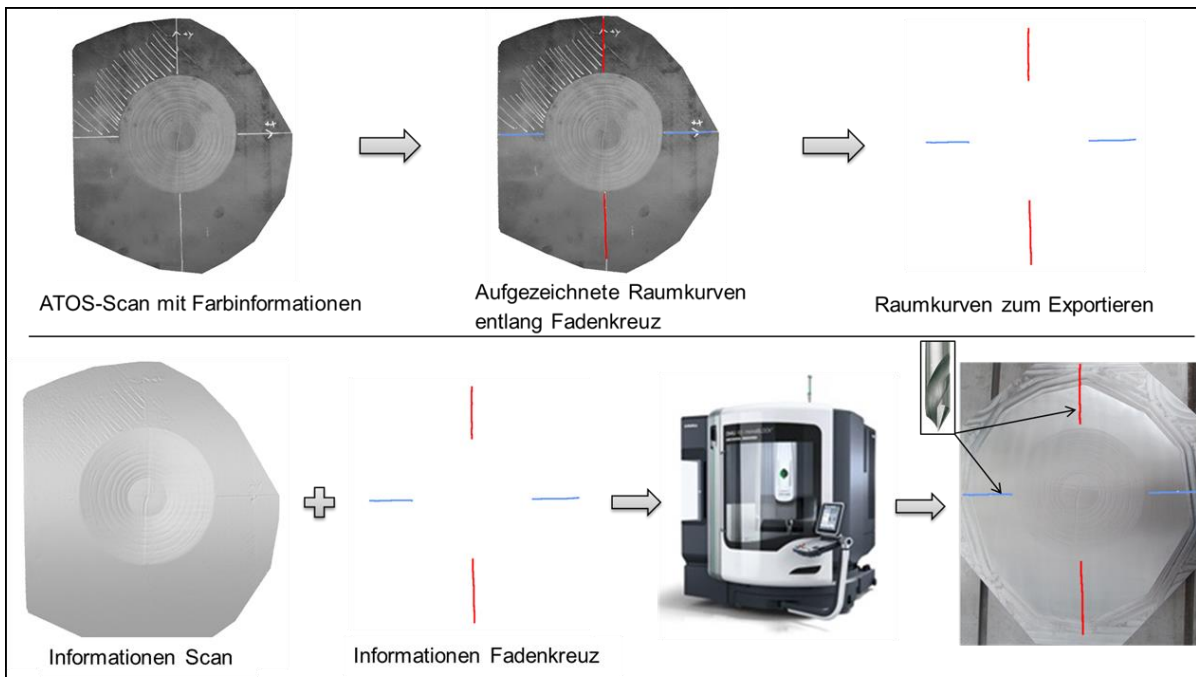


Abbildung 40: Flächenvergleich zwischen Aluminium Tooling für Schaden 2 und angepasster Schäftung auf Schalenbauteil (Skala +/- 0,15 mm)

In den nachfolgenden Abbildungen sind nochmal die Arbeitsschritte Einfügen eines Fadenkreuzes (Abbildung 41) und der Gesamtprozess der Patch-Werkzeug-Herstellung (Abbildung 41) exemplarisch dargestellt.



Daten für CKF-Feinmechanik zum Nachfräsen:

1. Scan der fertigen Schäftungen inkl. Randbereich (STL-Format)
2. Raumkurven der Koordinatenkreuze (5 einzelne Daten im iges-Format)

Abbildung 41: Einfügen Fadenkreuz für Fräs-Orientierung

Externes Werkzeugfräsen auf Bearbeitungszentrum

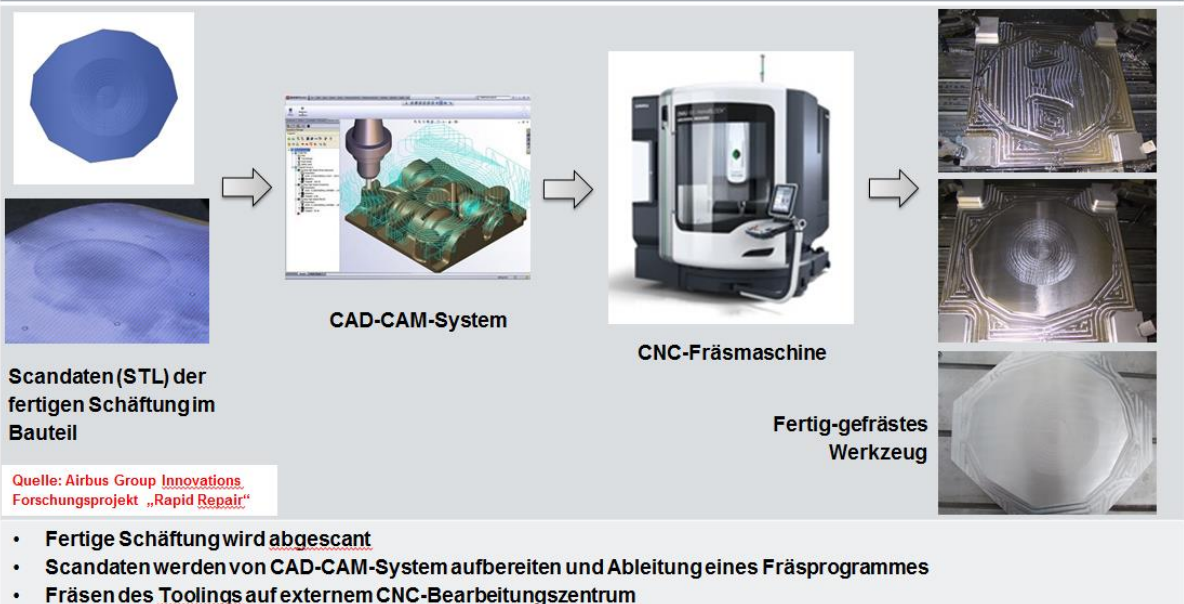


Abbildung 42: Gesamtprozess der Patch-Werkzeug-Herstellung

6.2 AP 2.4 Reparaturverfahren für Stringer und Spante

Die Arbeiten zur Reparatur wurden in Abstimmung mit dem Projektpartner PAG auf Hautstrukturen fokussiert und sind in 6.1.8 beschrieben. Die Prozessketten der Reparatur sind für beide Reparaturszenarien identisch.

6.3 AP 4.2 Sensoren für die effiziente Prozessüberwachung

6.3.1 Einseitige CFK-Wabenprüfung mittels Luftultraschall

Im Rahmen des Projektes wurde zunächst eine Studie zur Prüfung von Sandwichstrukturen mit zweiseitigem Zugang mittels luftgekoppelter Ultraschalltechnik durchgeführt. Dabei wurde v.a. auf die Ermittlung der Robustheit der Messungen wert gelegt. Interessant war dabei der Einfluss der Sensoranordnung auf die Erkennbarkeit der Defekte. Dabei wurde beispielsweise die Ausrichtung zueinander bzw. der Abstand untersucht. Den Messaufbau, den Probekörper, die untersuchten Anordnungen sowie ausgesuchte Ergebnisse zeigen die folgenden Abbildungen (Abbildung 43 und Abbildung 44).

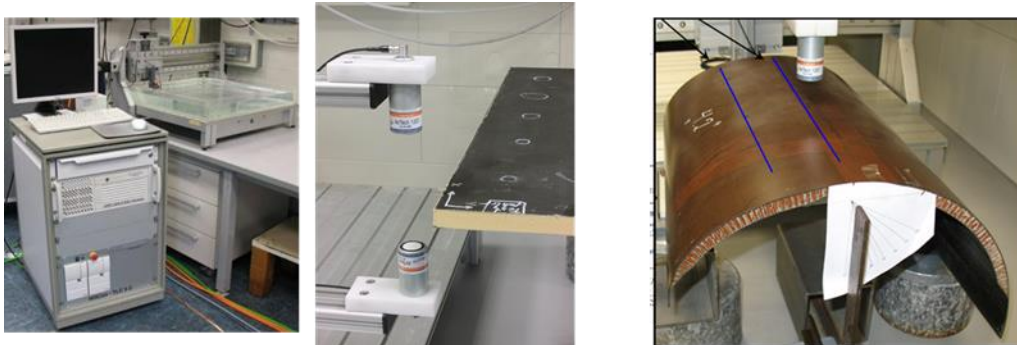


Abbildung 43: Luftgekoppelte Ultraschallanlage in Transmissionsanordnung und Probekörper (rechts)

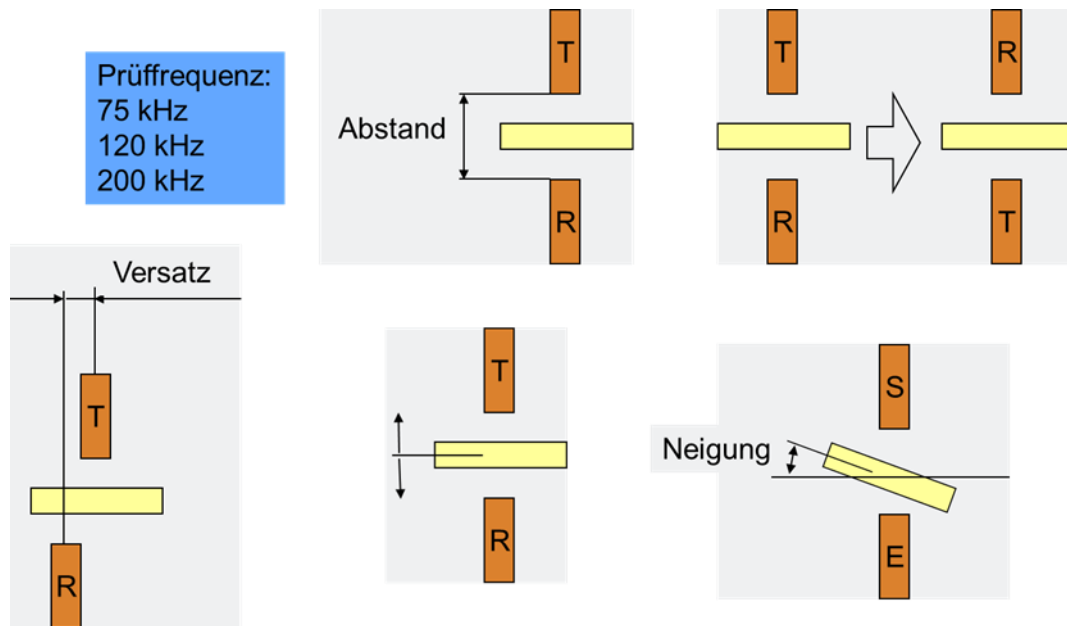


Abbildung 44: Untersuchte Sensoranordnung und deren Veränderungen (Prüffrequenz, Abstand Sender-Empfänger, Sender-Empfänger vertauscht, Versatz, Abstand Sensor-Probekörper, Neigung der Sensoren zueinander)

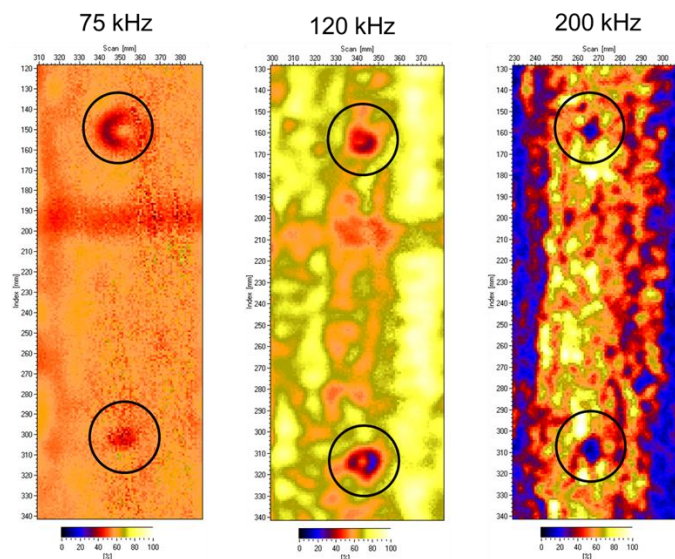


Abbildung 45: Ultraschall C-Bilder; Erkennung zweier künstlich eingebrachter 10 mm x 10 mm Defekte, Variation der Prüffrequenz

Auf den Ultraschall C-Bilder (Abbildung 45) ist zu erkennen, dass die künstlich eingebrachten Fehlstellen mit allen drei gewählten Frequenzen zu detektierbar sind. Mit zunehmender Frequenz bilden sich die Defekte schärfer ab.

Die Prüfmethode zur einseitigen Wabenprüfung soll dabei Delaminationen in beiden Decklagen sowie Ablösungen zwischen Decklagen und Honeycomb-Kern und Kernschäden detektieren können (Abbildung 46).

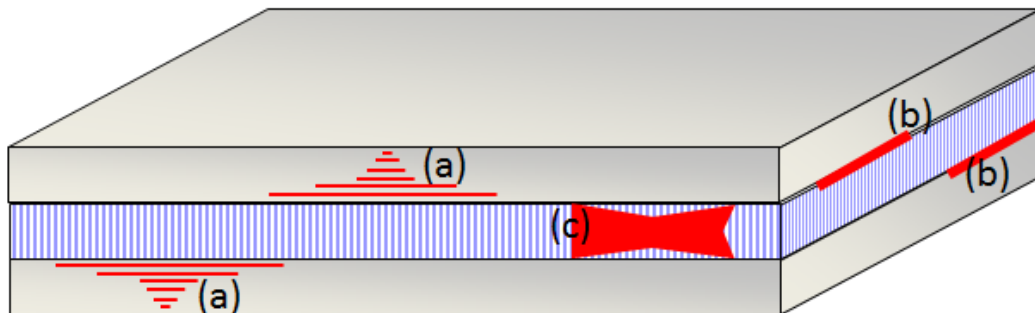


Abbildung 46: Skizze eines Sandwich Bauteils mit verschiedenen potentiellen Fehlertypen und Positionen; (a) Delamination in den Deckhäuten, (b) Ablösung der Decklagen vom Kern; (c) Kernschaden

Zunächst war es Ziel das Ausbilden von Lambwellen in den Stegen der Honeycomb-Wabe nachzuweisen.

Um die Ausbildung von Lambwellen nachzuweisen, sind entsprechende piezoelektrische Wandlern (Abbildung 47) auf einer typischen Honeycombstruktur aufgebracht. In diesem Versuchsstadium sind die Wandler auf beiden Seiten der Struktur Abbildung 48) auf verschiedenen Positionen aufgebracht, um die Messgenauigkeit zu erhöhen.



Abbildung 47: Einzelsensoren der Firma Acellent tech. Inc.



Abbildung 48: Versuchsaufbau mit verschiedenen Sender Positionen

Um Lambwellen anzuregen, wurde der typische Frequenzbereich (50 kHz bis 600 kHz) mit einem schmalbandigen Burst angeregt.

Abbildung 49 zeigt die Zusammenfassung der Experimente. Dargestellt sind dabei die Gruppengeschwindigkeiten der eindeutig identifizierbaren Wellenpakete in der Zeitdomäne. Die Geschwindigkeit wird über die Laufzeit und die Dicke des Bauteils ermittelt. Sie stellt damit eine mittlere Geschwindigkeit über die beiden Decklagen und den Honeycomb-Kern dar.

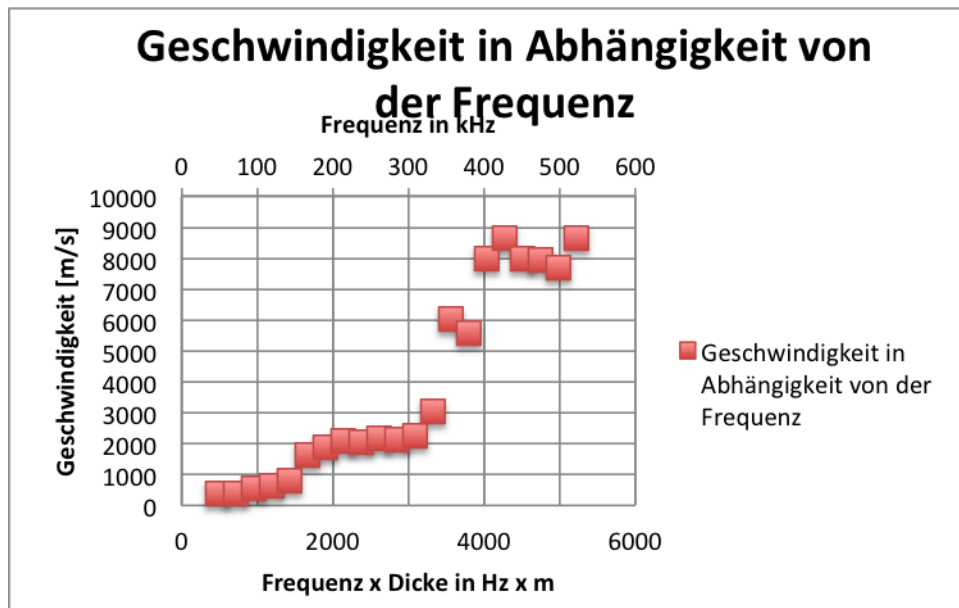


Abbildung 49: Dispersionsdiagramm eines 10 mm dicken Honeycomb Sandwichs

Mit Hilfe des Dispersionsdiagramms können folgende Aussagen getroffen werden.

- Hinsichtlich Frequenz und Geschwindigkeit der aufgenommenen Wellenpakete gibt es starke Hinweise auf die Ausbildung von Lambwellen in den Honeycombstegen. Dabei ist zu vermuten, dass die eingekoppelten Longitudinal- und Scheer-Wellen sich nach durchlaufen der CFK Decklage in den Honeycombstegen in Lambwellen der A- und S-Moden umwandeln. Unter der Berücksichtigung der Dicke der Honeycombstege und der Frequenz, kann von einer Ausbildung des A_0 - und S_0 -Modes ausgegangen werden (Abbildung 50). Der A_0 -Mode scheint im Bereich bis 300 kHz dominant, der S_0 ab 400 kHz bis 500 kHz dominant. Im Bereich von 300 kHz bis 400 kHz scheint sich eine Überlagerung auszubilden, der sogenannte SH-Mode.
- Die gemessene Amplitude ist ausreichend stark um eine einseitige Prüfung nicht auszuschließen.

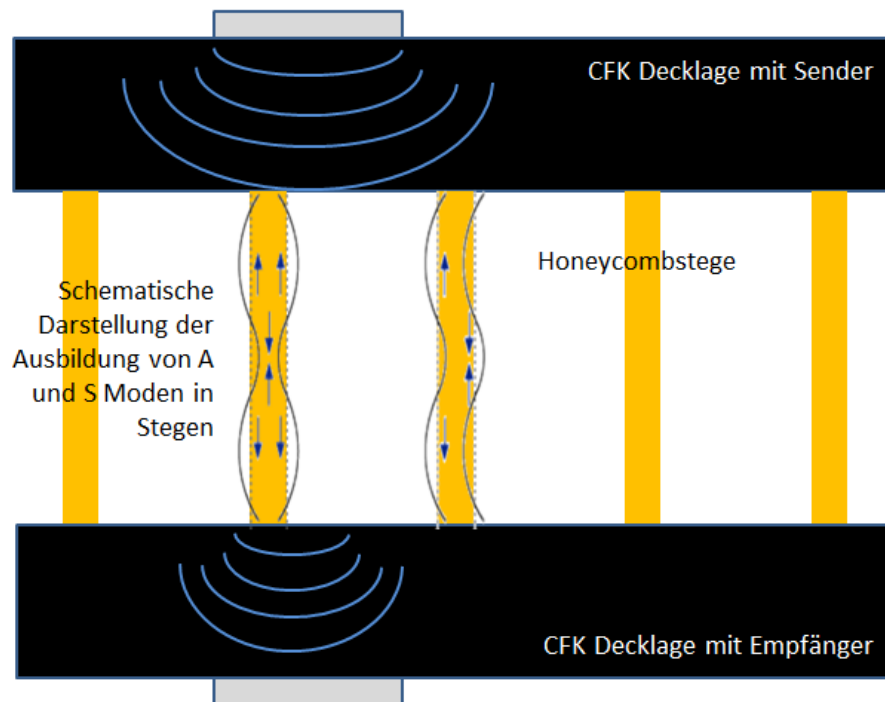


Abbildung 50: Schematische Darstellung eines möglichen Wellenverlaufs in Sandwich-Bauteilen

Aufgrund dieser Ergebnisse wurde die Ultraschallanlage bei Airbus Group Innovations angepasst, um mit einem niederfrequenten Ultraschallkontaktprüfkopf die Sandwichproben zu untersuchen. Hierbei sollte eine rasternde Abbildung erfolgen. Die Auswertung erfolgte in Form von C-Bildern, bei denen die Amplitudenhöhe farbko- diert in Abhängigkeit von der x-, y-Position dargestellt wird. Auf diesen C-Bildern sind die künstlich in verschiedenen Tiefenlagen eingebrachten Fehlstellen (Abbildung 51, blaue, dunkle Bereiche) zu erkennen.

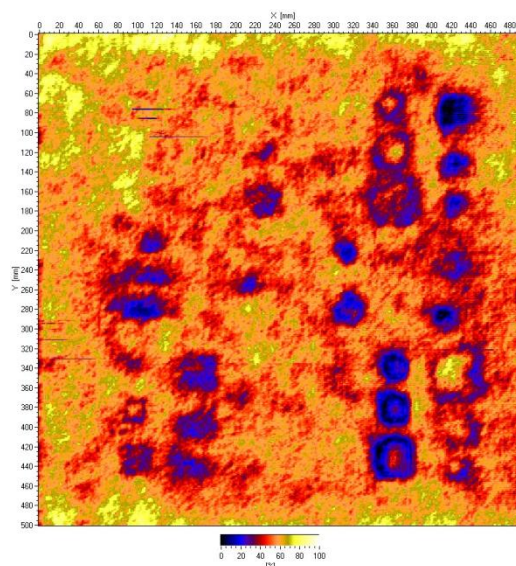


Abbildung 51: C-Bild einer Sandwichprobe mit künstlich eingebrachten Fehlstellen

Zum Vergleich wurden mit Luftultraschall (Ankopplung über Luftspalt) in Transmission Messungen mit Mittelfrequenzen von 75 kHz, 120 kHz und 200 kHz durchgeführt (Abbildung 52).

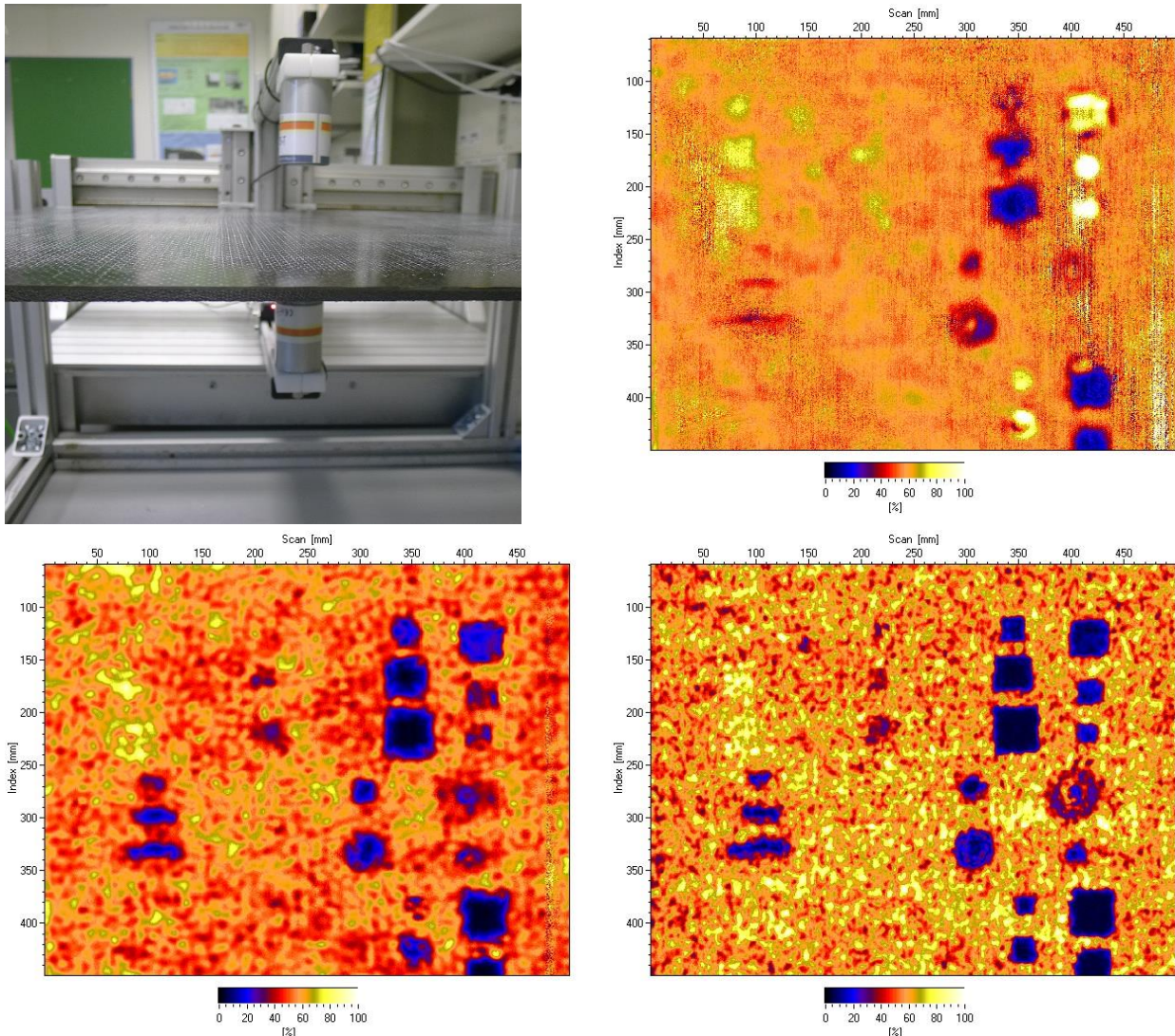


Abbildung 52: oben links: Luft US-Anlage; oben rechts: C-Bild einer 75 kHz Messung; unten links: C-Bild einer 120 kHz Messung; unten rechts: C-Bild einer 200 kHz Messung

Mit zunehmender Prüffrequenz werden die künstlichen Fehlstellen deutlicher und schärfer dargestellt.

Als Weiterentwicklung der einseitigen Wabenprüfung in Kontaktschlepptechnik wurden Untersuchungen mit einseitiger Prüfung über Luftankopplung unternommen (Abbildung 53). Hierzu wird ein Piezoschwinger auf der Probe angebracht und mit dem Sendesignal der Luftultraschallanlage angesteuert. Das Signal wird mit dem Luftultraschallempfangskopf (verschiedene Frequenzen) aufgezeichnet und ein C-Bild (Lambwellenbild zu einem bestimmten Zeitpunkt) erstellt.

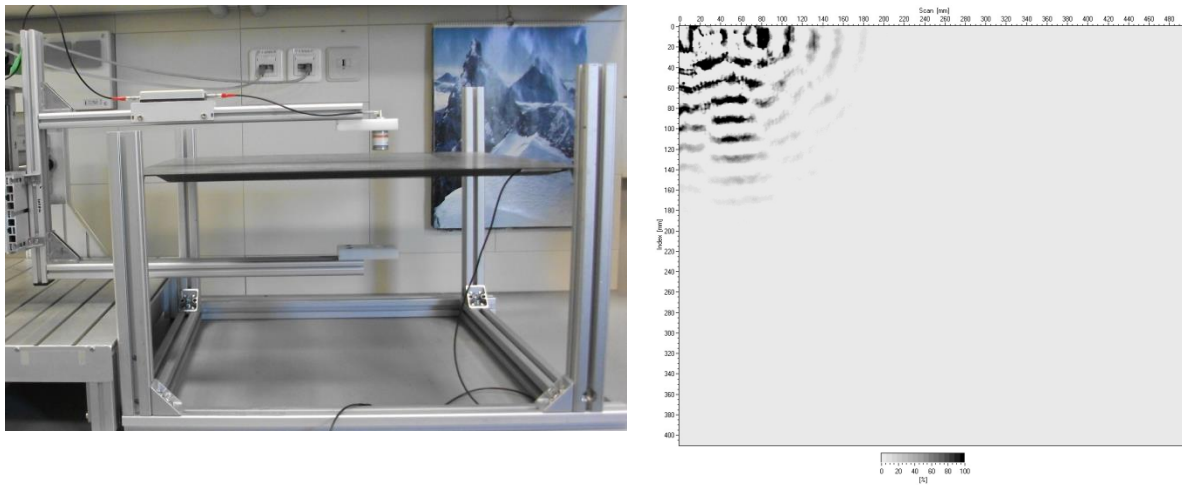


Abbildung 53: links: Aufbau einer einseitigen Wabenprüfung mittels Luftultraschall; rechts: Lambwellenbild mit noch nicht optimierten Prüfparametern

An einer CFK-Sandwich Probe wurden entsprechende Untersuchungen zur einseitigen CFK-Wabenprüfung durchgeführt. Dabei wurden Lamb-Wellen gesendet und das Antwortverhalten aufgezeichnet. Den schematischen Versuchsaufbau zeigt die folgende Abbildung 54.

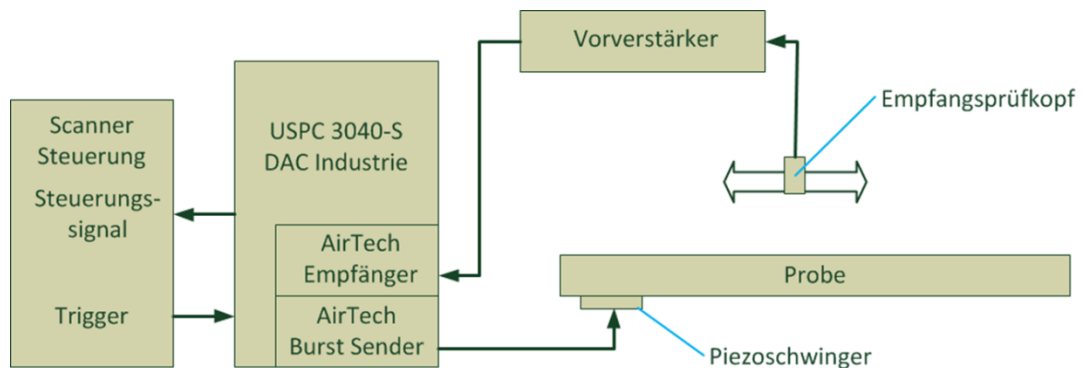


Abbildung 54: Versuchsaufbau Lamb-Wellen Detektion mit Luftankopplung

Hierzu wurde eine Luftultraschallanlage angepasst und der Sender durch einen Piezo ersetzt, der direkt auf die Struktur angebracht wurde. Die verwendeten Sensoren und deren Ankopplung an die Struktur ist unten (Abbildung 55) dargestellt.

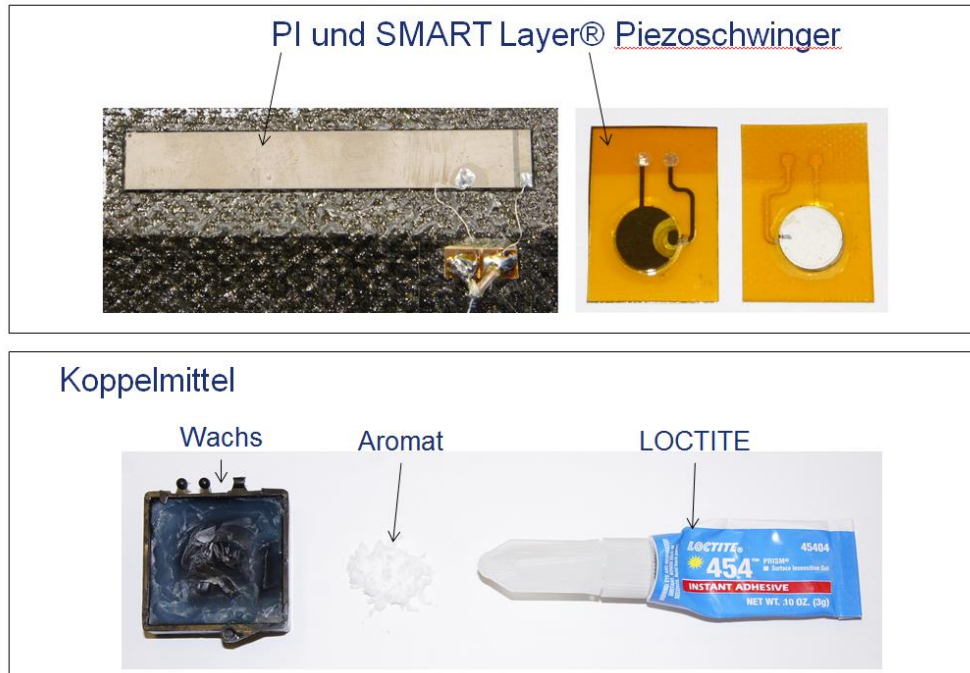


Abbildung 55: Verwendete Piezo-Sensoren und Koppelmittel

Die Aufgabenstellung beinhaltete dabei folgende Aspekte:

- Variation verschiedener Parameter der Messung:
 - Art, Position und Ankopplung des Piezos
 - Leistung, Frequenz und Signalform der Anregung
 - Probenseite, an der gemessen wird
 - Messfrequenz bei Luftultraschall
 - Evaluieren anderer Messmethoden
 - Frequenzanalyse

Das Vorgehen bei der Frequenzanalyse war das folgende:

1. Erstellung eines Volumenscans → A-Bilder zu x-y Koordinaten
2. Konvertieren der Daten → Dateiformat hgy in Rohdaten
3. FFT mit dazu entwickeltem Matlabtool → Frequenzspektrum zu x-y Koord.
4. Visualisieren mit VG Studio MAX 2.2

Eine Frequenzanalyse zeigt Abbildung 56.

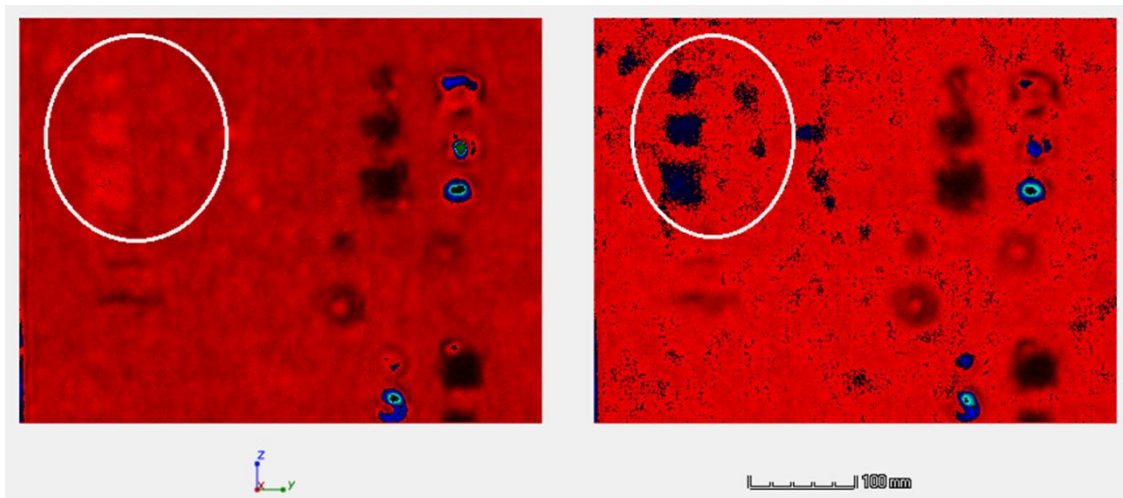


Abbildung 56: Darstellung einer Frequenzanalyse

Je nach Wahl der Frequenz sind bestimmte künstliche Fehlstellen mehr oder weniger deutlich zu erkennen.

Neben Wabenkernstrukturen wurde eine kleine Studie zur Ermittlung des Potentials von US zur Prüfung von Schaumproben (Abbildung 57) durchgeführt werden. Diese sollte zeigen, ob eine einseitige Sandwichschaumprüfung mittels Niederfrequenzultraschall generell möglich ist.



Abbildung 57: Foto Vorderseite der Probe Schaumprobe 01

Die Positionierung und die Tiefenlage der Fehler können Abbildung 58 entnommen werden.

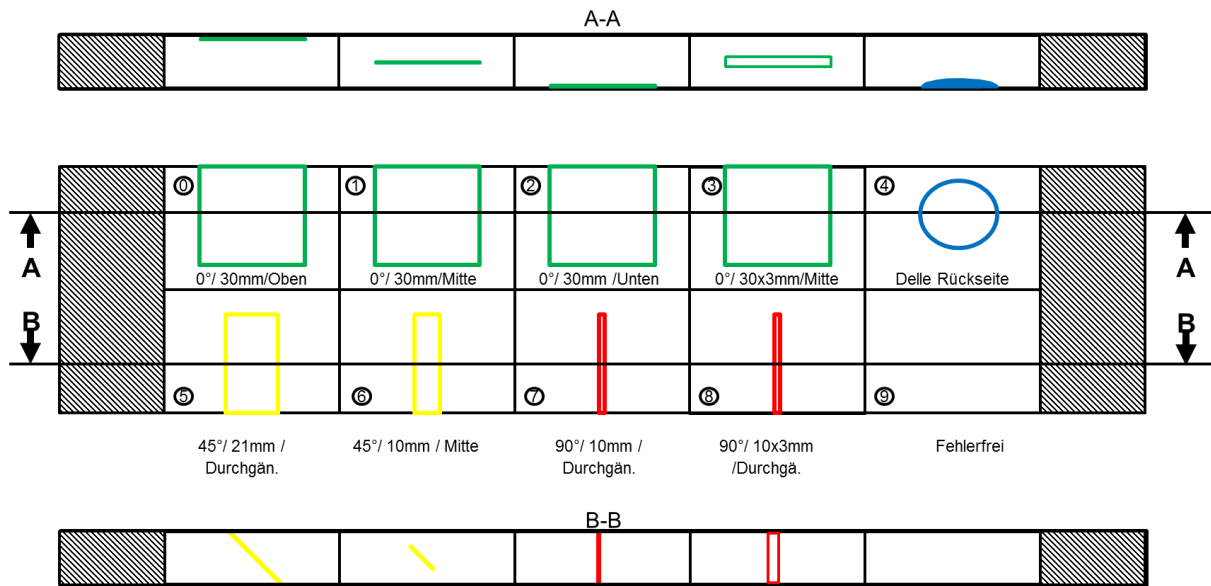


Abbildung 58: Fehlereinbringung Schaumprobe

Abbildung 59 zeigt das Luftultraschall-C-Bild der Probe mit Schaum als Kernmaterial. Es wurde mit einer Prüffrequenz von 120 kHz aufgenommen. Bei dieser Probe können alle Defekte erkannt werden. An den Randbereichen ist die Messung übersteuert, da sich die Prüfköpfe bereits „sehen“ können, wenn sie noch nicht ganz über das Bauteil hinausgefahren sind. Dadurch wird der Schall ungehindert übertragen.

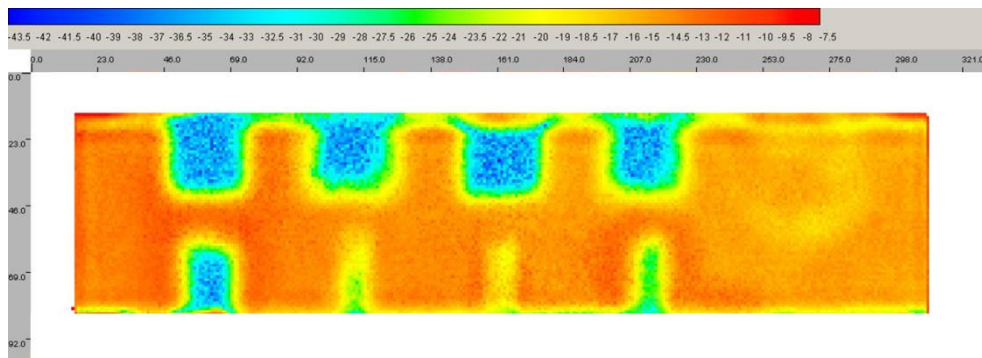


Abbildung 59: Luftultraschall-C-Bild der Schaumprobe 01

Die Ergebnisse der Messung mit niederfrequenten US-Prüfköpfen an der Schaumprobe sind vergleichbar mit denen der Luftultraschallprüfung. Es kann eine leichte Verbesserung der Auflösung festgestellt werden (Abbildung 60).

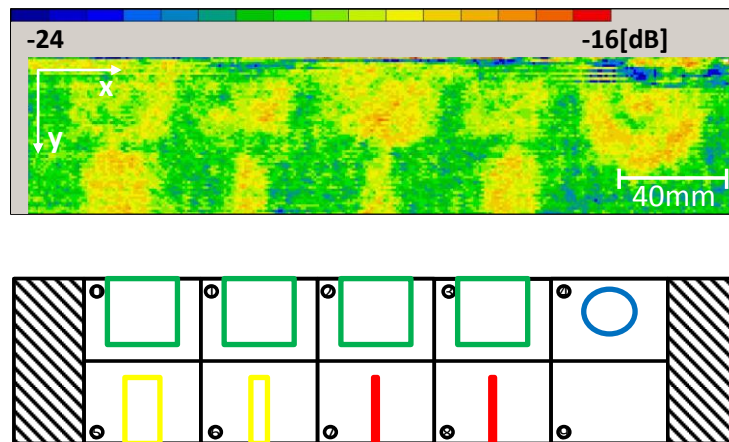


Abbildung 60: Ergebnisse der Messung mit Prüfkopf 0,5 MHz mit $\lambda/4$ -Anpasssschicht an der Schaumprobe 01

6.3.2 Sensorintegration in CFK Bauteile

Der Forschungsschwerpunkt in AP 4.2 lag in der Entwicklung von Sensoren zur in-situ Erfassung von Prozessparametern während der Bauteilherstellung (Infiltration und Aushärtung). Dafür wurden geeignete Materialien und Prozesse für die Herstellung der integrierbaren Mikrosensoren ausgewählt, die einerseits dem Parameterspektrum bei der CFK-Herstellung genügen und andererseits weder den Ablauf des CFK-Fertigungsprozesses noch die Lamineigenschaften signifikant beeinflussen.

6.3.2.1 Zielparameter

Von den Anwendern und EADS IW wurden die in Frage kommenden Messgrößen ermittelt, bewertet und priorisiert. Während der Herstellung des CFK Bauteils sollte nun mittels geeigneter Sensoren die Temperatur und der Vernetzungsgrad im Bauteil erfasst werden. Für die zwei identifizierten Zielparameter wurden unterschiedlichste Sensorprinzipien zusammengetragen und analysiert. Weiterhin wurde auch die Erfassung der Fließfront untersucht.

6.3.2.2 Analyse geeigneter Sensorprinzipien

Da der Fokus im Projekt auf drahtgebundene Lösungen lag, wurde für die Temperaturmessung die Verwendung eines Widerstandsthermometers weiterverfolgt. Ziel dabei war, Leiterbahnen auf einem Substrat herzustellen, die im CFK Verbund integriert werden können. Weiterhin soll der Sensor dem Infiltrations- und Aushärtungsprozess standhalten und soll die mechanischen Eigenschaften des Laminats so wenig wie möglich beeinflussen.

Eine erfolgreiche Umsetzung des Konzepts wäre für die zweite Zielgröße von großer Bedeutung. Der Vernetzungsgrad kann durch Messung der Dielektrizität ermittelt werden. Interdigitale Elektrodenstrukturen eignen sich als Signalüberträger und setzen eine erfolgreiche Strukturierung von Leiterbahnen voraus.

Für die Fließfront wurde ein Konzept mit kapazitiver Messung entwickelt. Basierend auf der Messung der Kapazität entlang zweier paralleler Leiter kann die Anwesenheit von Harz nachgewiesen werden.

6.3.2.3 Konzeptentwicklung – Trägermaterial

Die extremen Prozessbedingungen während des Aushärtens im Autoklaven diktiert die Eigenschaften der Sensormaterialien. Der große Unterschied zwischen den Ausdehnungskoeffizienten von Metallen, Kunststoffen und Standardträgermaterial wie z.B. Silizium oder Keramik macht eine sinnvolle Kombination mit der CFK Matrix fast unmöglich.

Um den Flammenschutz zu verbessern wurden in anderen Forschungsprojekten Untersuchungen durchgeführt, flammhemmende Folien in den Verbund einzubringen.

Diese Folien, die bei der Herstellung von CFK Bauteilen zwischen den Verbundlagen einlaminieren werden, wurden auf Anwendbarkeit als Trägermaterial für das Sensorsystem untersucht.

Die Prozesskompatibilität zwischen mikrotechnischen Fertigungsschritten für die Sensoren und den Fertigungsschritten für die CFK-Herstellung wurde untersucht. Insbesondere wurde getestet, zu welchen in der mikrotechnischen Prozessierung verwendeten Chemikalien (z.B. DI-Wasser, Isopropanol, Aceton) eine Beständigkeit der Thermoplastfolien gegeben ist. Unterschiedliche Folien verschiedener Thermoplaste wurden getestet. Die folgende Abbildung gibt einen Überblick über die durchgeführten Versuche sowie deren Ergebnisse.

Beständigkeitstest	Dauer	Folien						
		PEI 50µm	PES 125µm	PSU 250µm	PESU 250µm	PPSU 125µm	Cu - Pi - Cu 100 µm	Pi - Kleber - Cu 50µm - 12µm - 18µm
Isopropanol	3 min	✓	✓	✓	✗	✓	✓	✓
Aceton	3 min	✓	✗	✗	✗	✓	✓	✓
carosche säure H ₂ SO ₄ + H ₂ O ₂	3 min	✓	✗	✓	✗	✓	✗	✓
HMDS Haftvermittler	ca. 25min	✓	✓	✓	✗	✓	✓	✓
Developper AZ 351B	3 min	✓	✓	✓	✓	✓	✗	✗
1 ↓ Photolack AZ 1514H	30 s	✓	✓	✓	✗	✓	✓	✓
2 UV Belichtung 350W Lampe - 6mW/cm ² λ = 365nm	30 s							
3 ↓ Developper AZ (1:1 mit H ₂ O)	3 min							
180°C Auf Alu Platte	2,5 h + 30 min Heizen	✓	✓	✓	✗	✓	✓	✓

PEI	Polyetherimide
PES	Polyethersulfon
PESU	
PSU	Polysulfone
PPSU	Polyphenylsulfon
Cu	Kupfer
Pi	Kapton

Abbildung 61: Folien Beständigkeitstest

Nur zwei Folien, bestehend aus Polyetherimide PEI und Polyphenylsulfon PPSU, blieben bei den Beständigkeitstests ohne sichtbare Schäden.

Erkenntnisse aus anderen Projekten und insbesondere bezüglich der mechanischen Eigenschaften des fertigen Bauteils zeigte eine vielversprechende Anwendbarkeit von PEI als Zwischenlage im CFK.

6.3.2.4 Konzeptentwicklung – Leiterbahnenherstellung

Bei der lithographischen Strukturierung von Leiterbahnen auf thermoplastischen Folien wurden drei unterschiedliche Herstellungsmethoden untersucht. Die benötigten Prozess-Schritte bei den drei untersuchten Verfahren, sowie eine Mikroskop Aufnahme eines fertigen Sensors sind in Abbildung 62 detailliert dargestellt.

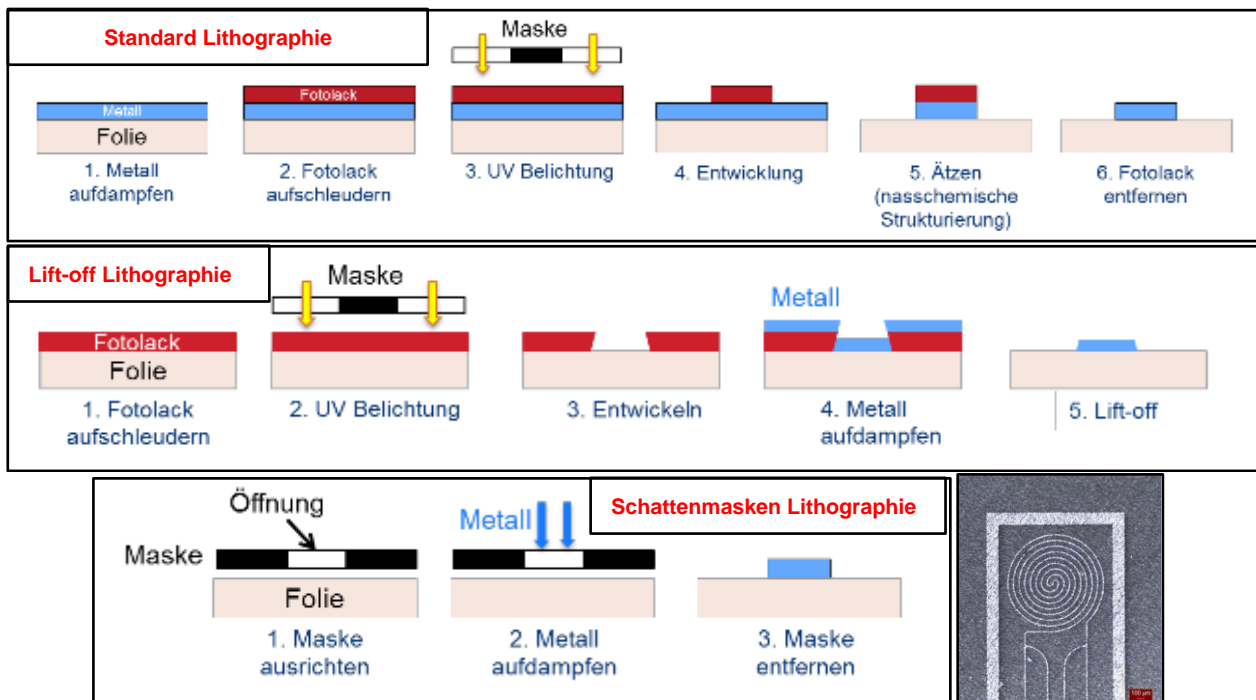


Abbildung 62: Lithographische Strukturierung der Sensoren

Zuerst wurde mittels nasschemischer Ätzschritte (Methode 1) Sensoren auf den unterschiedlichen Thermoplastfolien hergestellt. Jedoch wurden die Leiterbahnen, oft sogar an mehreren Stellen, durchtrennt. Es stellte sich heraus, dass auf der Oberfläche der Folien bereits vor dem Prozess kleine Kratzer vorhanden waren. Diese ermöglichen das Eindringen der Ätzlösung unter die Leiterbahnen, was unweigerlich zur Auflösung der Struktur führt. Aufgrund der offensichtlichen niedrigen Ausbeute bei vergleichsweise hohem Zeitaufwand wurde die nasschemische Strukturierung eingestellt. Um den Einsatz von Chemikalien zu vermeiden wurde weiterhin die Strukturierung mittels eines Ionenstrahlätzers untersucht. Es konnten funktionierende Sensoren hergestellt werden. Bei der Charakterisierung wurde jedoch festgestellt, dass die Leiterbahnen bei erhöhter Temperatur abreißen.

Beim Lift-Off Verfahren (Methode 2) wird erst Fotolack als Opferschicht auf der Folie aufgetragen und strukturiert. Die unbelichteten Bereiche des Lacks werden beim Entwickeln entfernt. Anschließend wird die Metallisierung ganzflächig aufgebracht. Im letzten Schritt wird der Fotolack (Opferschicht) wieder abgelöst. Die Metallisierung verbleibt nur dort zurück, wo sie direkt auf dem Substrat abgeschieden wurde. Mit diesem Strukturierungsprozess konnten allerdings keine funktionsfähigen Sensoren hergestellt werden. Beim Entfernen der Opferschicht löste sich teilweise die komplette Metallisierung vom Substrat ab. Eine mögliche Ursache hierfür ist die durchsichtige Eigenschaft der Folie. Beim Eindringen des Lichtes wirkt die Folie wie ein Lichtwellenleiter und verteilt die eingebrachte Energie gleichförmig. Dabei werden unerwünschte Bereiche des Lacks belichtet. Eine gezielte Strukturierung war mit diesem Verfahren nicht möglich.

Bei der Sensorstrukturierung mittels Schattenmasken (Methode 3) wird eine Art Schablone auf die Folie gebracht und darauf wird ganzflächig Metall abgeschieden. Die Öffnungen der Maske entsprechen der gewünschten Sensorstruktur. Das Metall wird direkt

auf die Folie aufgetragen. Zum Schluss wird die Maske von der Folie entfernt. Es ist kein weiterer Prozessschritt notwendig. Die Öffnungen der Schattenmaske werden per Laserstrahl erzeugt. Mit Hilfe dieser Methode konnten funktionierende Sensoren hergestellt werden.

Parallel zur klassischen Lithographie im Haus eigenen Labor wurde ein zweiter Ansatz zur Herstellung der Leiterbahnen verfolgt. Das Aerosoljet-Verfahren bietet durch maskenlosen Direktdruck eine flexible Lösung zur Herstellung von Prototypen. Mit externen Firmen wurde eine Anwendbarkeit für die vorliegende Applikation überprüft. Ein Entwurf des ersten Sensordesigns ist in Abbildung 63 dargestellt.

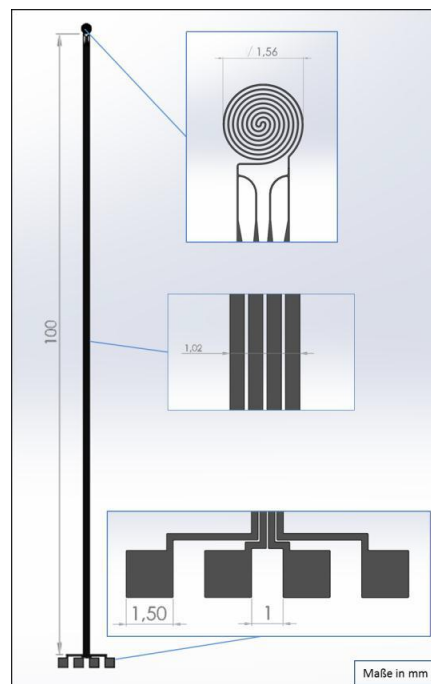


Abbildung 63: Sensordesign Widerstandsthermometer

Im ersten Fertigungsschritt werden die Zuleitungen und Kontaktpads mittels des Inkjetverfahrens gedruckt. Anschließend wird das Sensorelement mittels Aerosoljet aufgebracht. Als abschließender Fertigungsschritt wird eine Isolierschicht über die Leiterbahnen aufgebracht, die den Sensor gegenüber der leitfähigen Umgebung abschirmt. Für das Aufbringen der Isolierschicht wird die Siebdrucktechnik verwendet. Untersucht wurde eine Passivierung durch Polyimide und durch Lötstopplack. Nach jedem Siebdruckprozess muss die aufgetragene Passivierungsschicht ausgehärtet werden. In der folgenden Abbildung sind gefertigte Sensoren mit unterschiedlichen Kombinationen von Substratmaterial und Isolierschicht dargestellt.

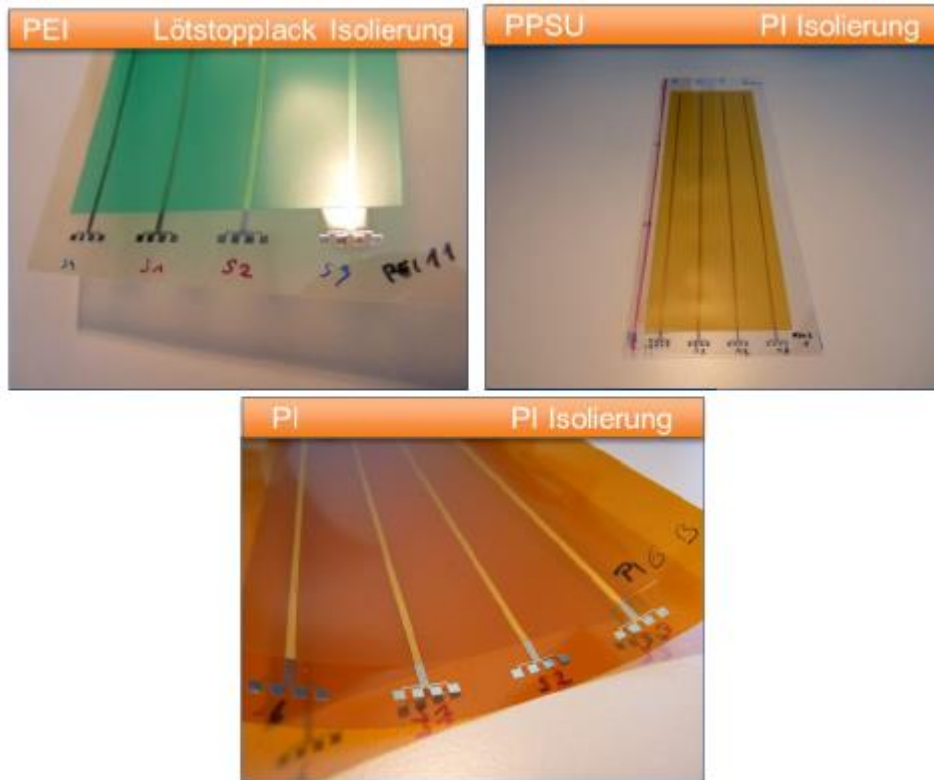


Abbildung 64: Unterschiedliche Substrate und Isolierschichten

6.3.2.5 Charakterisierung der Sensoren

Kontaktierung der Sensoren

Um die Sensoren elektrisch kontaktieren zu können wurde ein Stecker entwickelt, der auch im Autoklaven montiert werden kann. Das Gehäuse aus PEEK und hochtemperaturstabile Federkontakte gewährleisten eine sichere Funktion auch bei den benötigten Prozessparametern. Die Folie wird mit Hilfe einer Zugentlastung auf dem Stecker angebracht und durch den aufgebracht Anpressdruck kontaktiert. Der Sensorwiderstand wird im Vierleiterbetrieb gemessen. Das Prinzip ist auf den folgenden Bildern dargestellt.

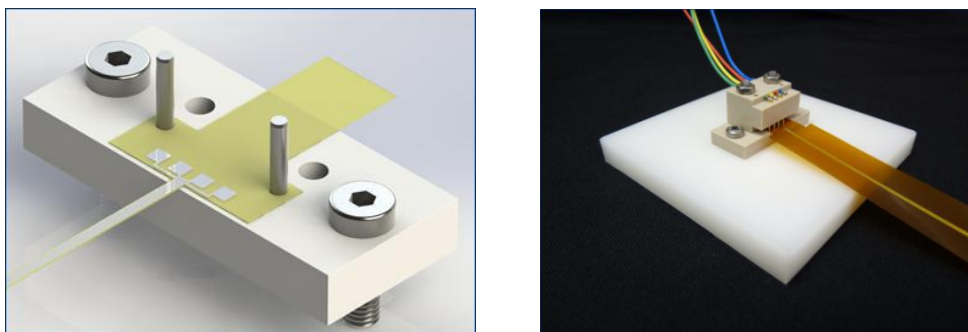


Abbildung 65: Stecker zur elektrischen Kontaktierung der Sensoren

Die gedruckten und mikrotechnisch hergestellten Sensoren wurden im Klimaschrank untersucht. Die Widerstandswerte wurden mit einem Keithley Messgerät und einer Multiplexer Karte erfasst. Es konnten zehn Sensoren gleichzeitig vermessen werden. Ein kommerzielles Widerstandsthermometer (Pt 100) wurde als Referenz benutzt.

Gedruckte Sensoren

Die ersten Untersuchungen zeigten starke Widerstandsschwankungen bei den gedruckten Sensoren, und dies ohne Einwirkung von Temperatur. Um den Einfluss auf die Genauigkeit der Sensoren zu bestimmen, wurden diese bei Raumklima gelagert und nach einer bestimmten Zeit charakterisiert. Die nachfolgende Abbildung stellt die Ergebnisse dar.

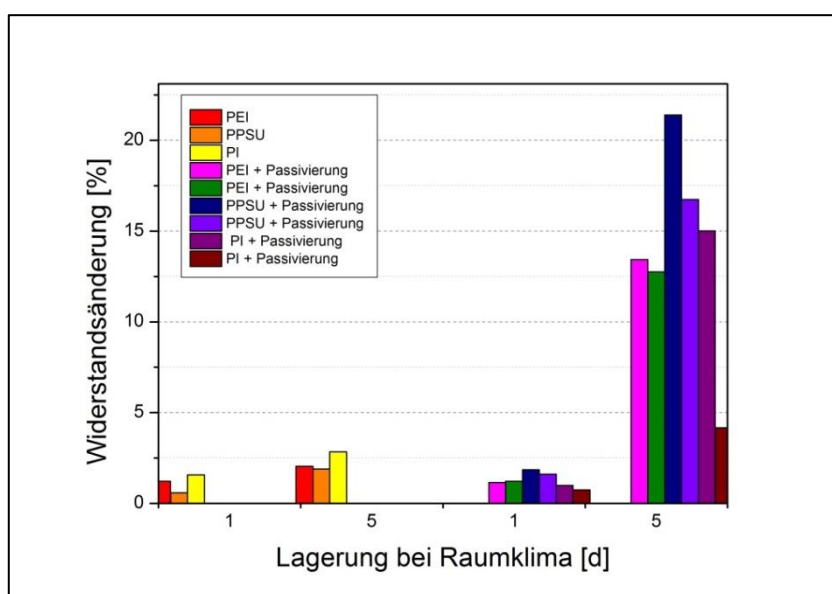


Abbildung 66: Langzeitverhalten der gedruckten Sensoren (Raumklima)

In der Abbildung steht jeder Balken für einen gedruckten Sensor. Die Sensoren unterscheiden sich durch das jeweilige Substrat (PEI, PPSU, PI) und die Passivierung (mit oder ohne). Die Bestimmung des Widerstands erfolgte bei null Grad. Bereits nach einem Tag verändert sich der Widerstand aller Sensoren um ungefähr ein bis zwei Prozent und beträgt bei den ungeschützten Sensoren nach fünf Tagen etwa zweieinhalb Prozent. Bei den passivierten Sensoren variiert der Widerstand nach fünf Tagen schon zwischen 12 und 23 Prozent.

Der lineare Temperaturkoeffizient des elektrischen Widerstands (TCR) gibt die relative Änderung des Widerstandswertes pro Änderung der Temperatur zu einer Bezugstemperatur an und berechnet sich wie folgt:

$$TCR = \frac{1}{R_0} \times \frac{\Delta R}{\Delta T} = \frac{R_T - R_0}{R_0 \times (T - T_0)} \quad (1)$$

Bei der Berechnung des TCRs in Bezug auf null Grad ist R_0 der gemessene Widerstand bei dieser Temperatur und der Wert R_T der bei Temperatur T . In der Literatur wie auch hier wird die Temperatur $T=100^\circ\text{C}$ gewählt.

Streng genommen ist der TCR temperaturabhängig und es werden für die präzise Bestimmung der Temperatur Polynome verwendet.

Um auf das Verhalten der Sensoren näher einzugehen, betrachten wir hier den Fall eines linearen TCR.

Aus der Gleichung (1) kann folgend die Temperatur bestimmt werden,

$$\Delta T = \frac{R_T - R_0}{R_0 \times TCR} \quad (2)$$

$$\text{mit } R_T = R_{0g}(1 + TCR(T - T_0)) = R_{0g} + (R_{0g} \times TCR \times T) \quad (3)$$

R_{0g} ist der tatsächliche Widerstandswert am Anfang der Messung, der nach Lagerung bei Raumtemperatur von R_0 abweicht (siehe Abbildung 66). Wird diese Abweichung nicht erkannt führt dies zu einer Fehlbestimmung der Temperatur.

Die gedruckten Sensoren die für die Messung in Abbildung 66 verwendet wurden besitzen einen TCR von $1,19 \times 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ ($\pm 30\%$).

Nimmt man den größten TCR von $1,54 \times 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ und die geringste Veränderung des Grundwiderstandswerts von 0,583% nach einer eintägigen Einlagerung, werden bereits hier $184,84^\circ\text{C}$ statt den tatsächlich vorliegenden 180°C gemessen.

Die maximale Abweichung für 180°C beträgt also im besten Fall 5°C . Für jeden Sensor wurde anhand des TCRs und der Widerstandsabweichung eine Temperaturberechnung durchgeführt. Abbildung 67 stellt die Ergebnisse dar.

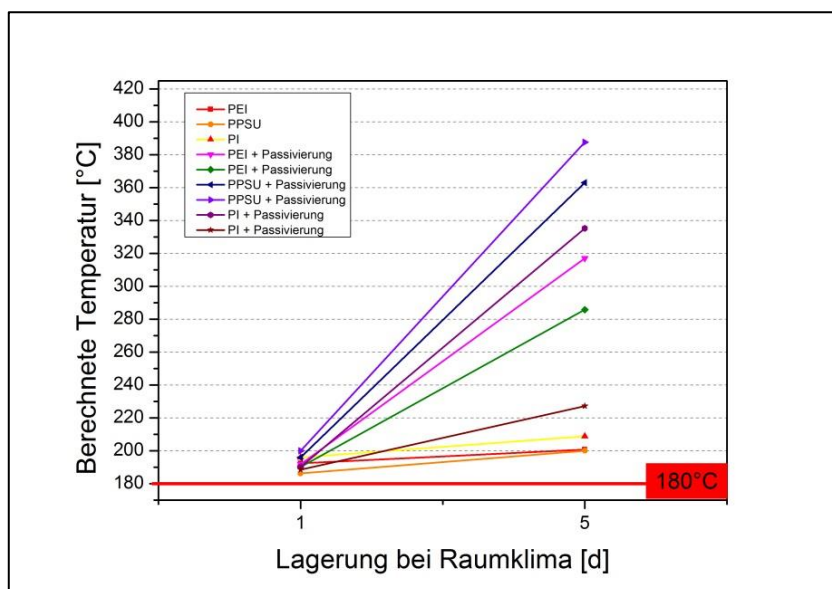


Abbildung 67: Gedruckte Sensoren - Einfluss der Grundwiderstandsänderung auf die Bestimmung der Temperatur

Bereits nach einer eintägigen Lagerung bei Raumtemperatur lässt sich die Temperatur nicht mehr präzise ermitteln. Die Werte schwanken zwischen 186°C und 200°C. Der Fehler nimmt nach fünftägiger Lagerung an Raumluft noch erheblich zu.

Um die Ursache zu identifizieren wurden die Bestandteile der Sensoren bei Temperatureinwirkung gravimetrisch untersucht. Es wurde der Masseverlust bis und bei 180°C aufgezeichnet. In der nachfolgenden Tabelle sind die Ergebnisse dargestellt.

Tabelle 1: Thermogravimetrische Analysen – Ergebnisse

Probe	Masseverlust bis 180°C [%]	Masseverlust bei 180°C [%]
PEI Folie Luft	0,467	0,008
PEI Folie Stickstoff	0,440	0,010
PEI + PI Passivierung	0,526	0,126
PEI + Lötstopplack Passivierung	0,564	0,112
PEI + Inkjet Pads	0,418	0,012
PEI + Lithographische Pads	0,433	0,007

Es wurde eine PEI Folie in reiner Form sowie in Kombination mit den verschiedenen Passivierungen und Metallisierungen getestet. Alle Proben zeigten identische Masseverluste während der Aufheizphase. Während der Isotherme (180°C) ist dennoch deutlich zu erkennen, dass die Proben mit Passivierungen von den gedruckten Sensoren um eine Größenordnung mehr Masse verlieren.

Um die ausgasenden Substanzen zu identifizieren wurde gleichzeitig mit einem FTIR-Spektrometer (Fourier-Transformations-Infrarotspektrometer) die Emissionsspektren aufgenommen.

Die ermittelten Absorptionsbanden lassen auf Wasser (~3500-4000, ~1300-1900 cm⁻¹) und CO₂ (~2250-2400, ~1760 cm⁻¹) zurückschließen. Die Passivierungen, die im Siebdruckverfahren aufgetragen werden, nehmen also Feuchtigkeit auf, die bei hoher Temperatur langsam entweicht.

Die gedruckten Sensoren sind somit für die Temperaturmessung in einem industriellen Umfeld ohne weitere Vorbehandlung nicht geeignet.

Sensorstrukturierung mittels Schattenmaske

Es wurden mehrere Metalle und Metallpaarungen für den Einsatz als Temperatursensor untersucht. Neben kostengünstigen Materialien wie Kupfer, Aluminium und Silber wurden auch Platin und Gold begutachtet. Das Metall wurde bei EADS IW in einer PVD Aufdampfanlage auf Folien abgeschieden. Die erzielten Ergebnisse mit Sensorschichten aus Aluminium werden nun ausführlicher dargestellt.

Wie bei den gedruckten Sensoren wurde das Langzeitverhalten untersucht. Die Aluminiumschicht ist nicht isoliert und wird deshalb mit den gedruckten Sensoren ohne Passivierung verglichen. Abbildung 68 stellt die prozentualen Änderungen des Grundwiderstands nach einem und nach 25 Tagen Lagerung bei Raumtemperatur dar.

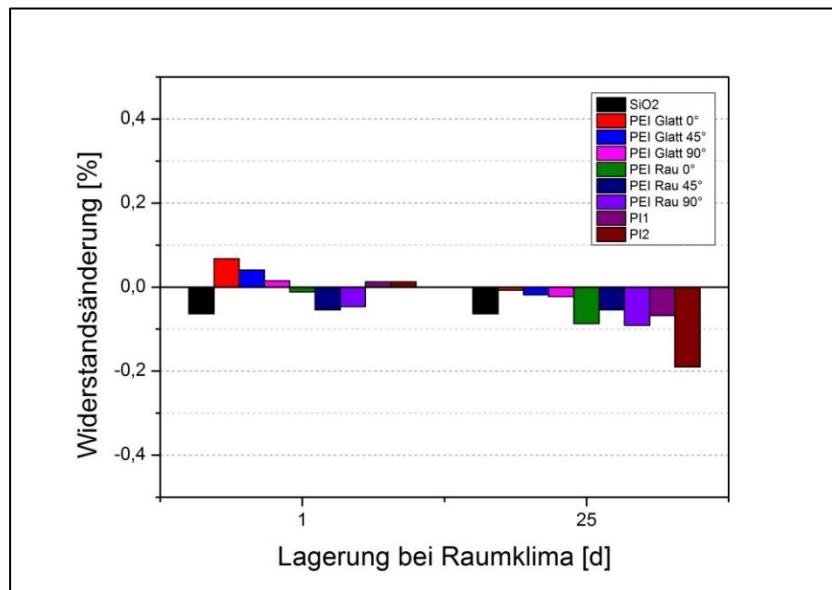


Abbildung 68: Langzeitverhalten der aufgedampften Sensoren (Raumklima)

Die Sensoren wurden auf drei unterschiedlichen Substraten hergestellt: Siliziumdioxid Wafer, PEI und PI Folien. Bei den PEI Folien wird zwischen glatter und rauher Seite, sowie der Extrusionsrichtung unterschieden. Bis auf einen Sensor ist der Widerstand nach einem und sogar nach 25 Tagen um weniger als 0,1% vom Grundwert abgewichen. Die gemittelte Abweichung beträgt 0,05%. Eine Korrelation mit der Lagerungsdauer ist hier nicht ersichtlich. Die leichten Unterschiede werden möglicherweise von der Ungenauigkeit des Klimaschranks verursacht ($\pm 1^\circ\text{C}$). Die hergestellten Sensoren besitzen einen mittleren TCR von $3,15 \times 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ ($\pm 10\%$).

Die maximale Abweichung für 180°C beträgt im schlechtesten Fall 1°C . In Abbildung 69 ist der Einfluss der Widerstandsänderung auf die Temperaturberechnung für alle Sensoren aus Abbildung 68 dargestellt.

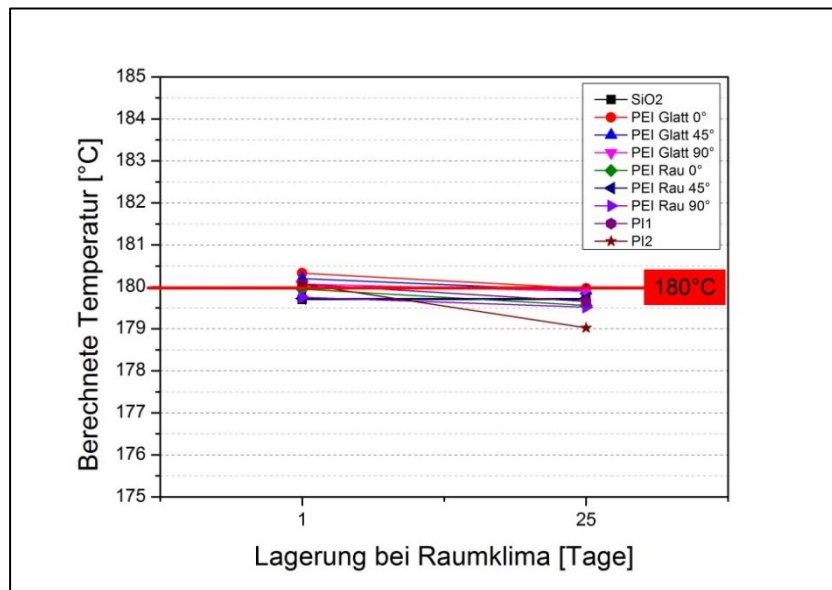


Abbildung 69: Aufgedampfte Sensoren - Einfluss der Grundwiderstandsänderung auf die Bestimmung der Temperatur

Eine Bestimmung der Temperatur ist trotz der Lagerung bei Raumtemperatur mit einer Genauigkeit von $\pm 1^\circ\text{C}$ möglich.

Weiterhin wurde die Temperaturstabilität der Sensoren untersucht. Hierzu wurden die Sensoren im Klimaschrank mehrmals von 0°C auf 180°C aufgeheizt. Die Widerstandsänderungen wurden erfasst. Dies wurde für alle 5 zuvor genannten Metalle durchgeführt. Abbildung 70 zeigt die Ergebnisse für einen Sensor aus Aluminium. Die Metallisierungsdicke betrug 150 nm und es wurde zu Vergleichszwecken auch auf andere Substrate aufgetragen (Kapton, SiO2).

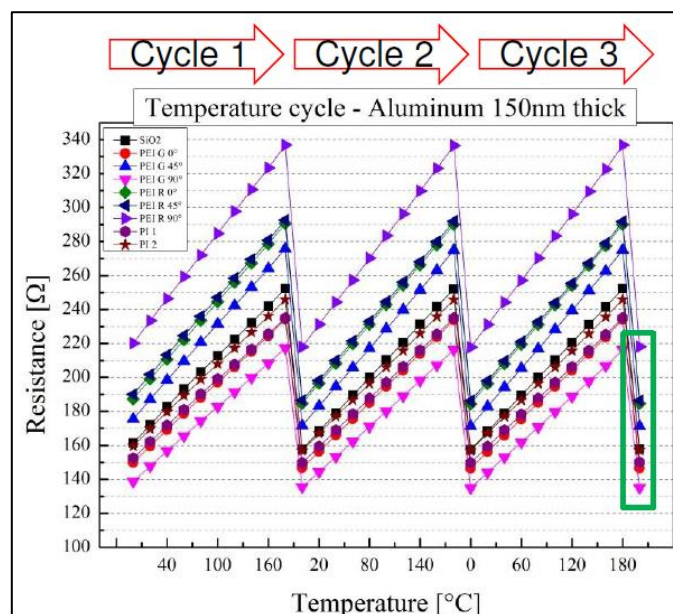


Abbildung 70: Temperaturstabilität – Sensoren aus Aluminium

Im Vergleich zu den anderen Metallen und Metallpaarungen aus denen die Sensoren gefertigt wurden, zeigte Aluminium die beste Temperaturstabilität. Weiterhin zeigten diese Sensoren (Aluminium) am wenigsten Ausfälle nach den Temperaturzyklen. Aufgrund dieser Erkenntnisse wurde für die folgenden Untersuchungen, bei denen Sensoren ins Laminat integriert wurden, Aluminium als Sensorschicht gewählt.

6.3.2.6 Online Messungen mit integrierte Sensoren

Um die Eignung der Sensoren für die Prozessüberwachung zu verifizieren, wurde während eines Fertigungszyklus im Autoklaven die Temperatur gemessen. Die Sensoren wurden mittels Schattenmasken hergestellt und bestehen aus Aluminium. Zwei Sensoren wurden zwischen den CFK-Lagen einlamiert. Abbildung 71 stellt den Versuchsaufbau dar.

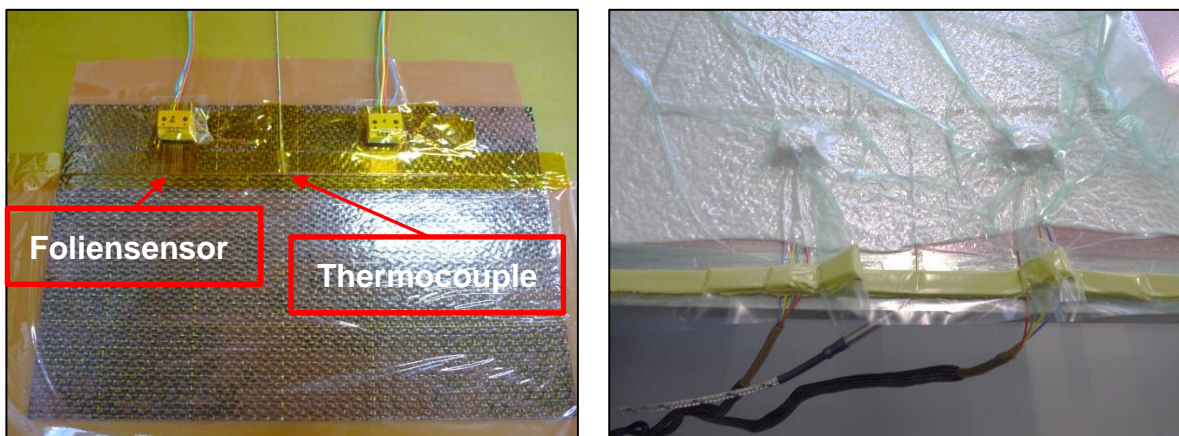


Abbildung 71: integrierte Sensoren im CFK

Für die Referenzmessung wurde zwischen den beiden Sensoren ein Thermoelement (Typ J) einlamiert. Es wurde keine Passivierungsschicht auf die Sensoren aufgebracht. Um Kontakt mit dem CFK zu vermeiden, wurden die Sensoren mit Kapton-Klebeband abgedeckt. Vor der Messung wurde der TCR der Sensoren bestimmt. Das Signal von einem der beiden Sensoren wurde ausgewertet. Die Ergebnisse sind in Abbildung 72 zusammengefasst.

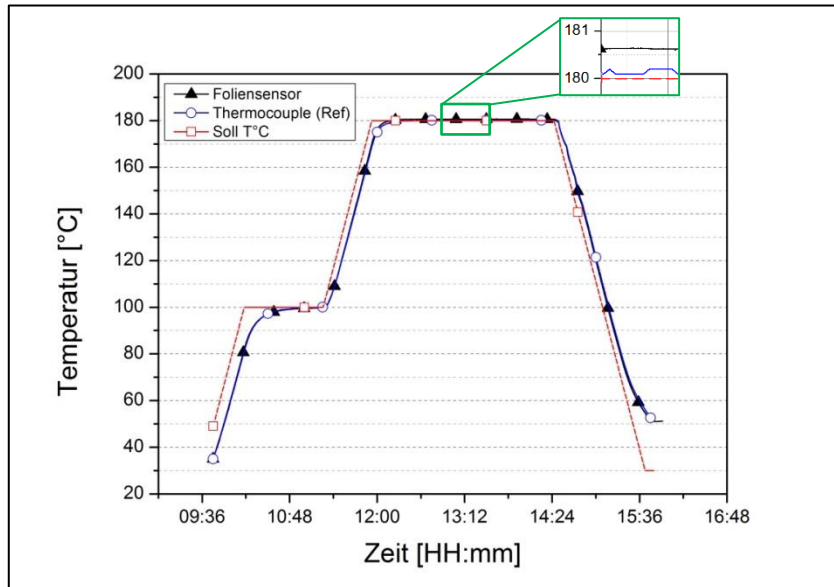


Abbildung 72: Prozess Monitoring - Vergleich zwischen Foliensensor und Thermoelement

In der Abbildung ist ein Fertigungszyklus im Autoklaven über die Zeit dargestellt. Die eingestellte Soll Temperatur ist in rot gekennzeichnet. Das Thermoelement liefert Temperaturwerte die direkt mitgeloggt wurden (blaue Kurve). Der einlamierte Foliensensor lieferte Widerstandswerte, die mithilfe der Gleichung (1) in Temperatur umgerechnet wurden (schwarze Kurve). Der gemessene Temperaturverlauf korreliert gut mit der Referenzmessung. Die maximale Abweichung von der Referenztemperatur beträgt $\pm 0,5^\circ\text{C}$. Dies lässt sich damit begründen, dass der TCR für den Temperaturbereich zwischen 20°C und 100°C bestimmt wurde. Um eine höhere Genauigkeit zu erzielen, wäre es sinnvoll bei der Kalibrierung des Sensors eine quadratische Gleichung für den Temperaturbereich zwischen 0°C und 180°C zu verwenden.

Trotz dieser leichten Abweichung zeigten sich die Foliensensoren als geeignete Methode für die Temperaturüberwachung beim Aushärtprozess von Prepreg-Laminaten.

6.3.2.7 Fließfront Sensoren

Um die Fließfront zu bestimmen, wurde ein Sensorkonzept entwickelt. Basierend auf der Messung der Kapazität entlang zweier paralleler Leiter kann die Anwesenheit von Harz nachgewiesen werden. Analog zum Funktionsprinzip eines Koaxialkabels wird hier ein Leiter von einem Hohlraum und anschließend von einem Massenpol ummantelt. Da die Dielektrizitätskonstante von Harz größer ist als die von Luft, wird beim Eindringen von Harz in den Hohlraum eine Erhöhung der Kapazität gemessen. Abbildung 73 zeigt den Sensor im Detail.

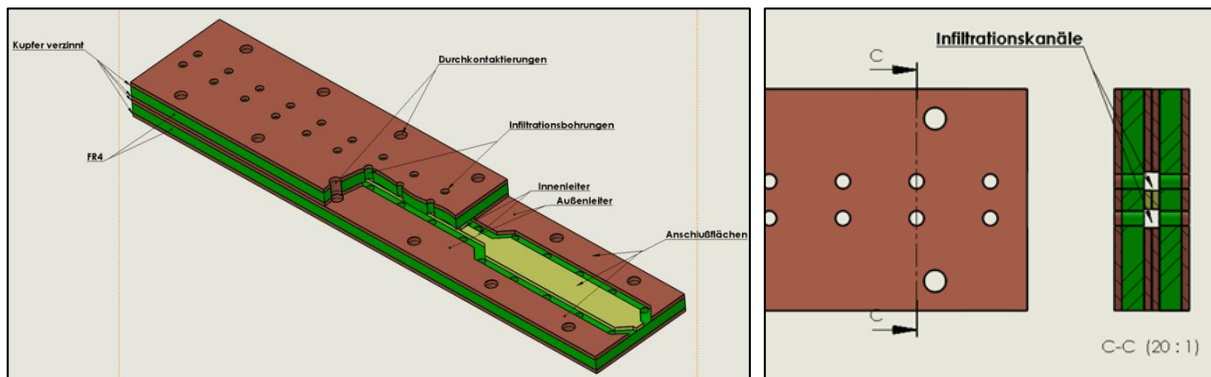


Abbildung 73: Fließfront Sensor

Vor dem Einleiten des Harzes liegt in den Infiltrationskanälen ein Vakuum an. Durch die Infiltrationsbohrungen kann Harz in die Kanäle eindringen und den Hohlraum um den Innenleiter füllen. Für den Träger wurde Glasfasergewebe als Material gewählt, für die Leiterbahnen wurde Kupfer verwendet. Zur Veranschaulichung ist der Innenleiter in der Abbildung gelb gefärbt. Die Durchkontaktierungen dienen der kompletten Abschirmung gegenüber der Umgebung.

Um die Anwendbarkeit des Sensors zu prüfen, wurden Infiltrationsversuche durchgeführt. Die Daten wurden erstmal mit der TDR (Time Domain Reflectometry) Auswerteeinheit von TX1 aufgezeichnet. Die Ergebnisse sind in Abbildung 74 dargestellt. Der Sensor wurde entlang der Fließfront positioniert.

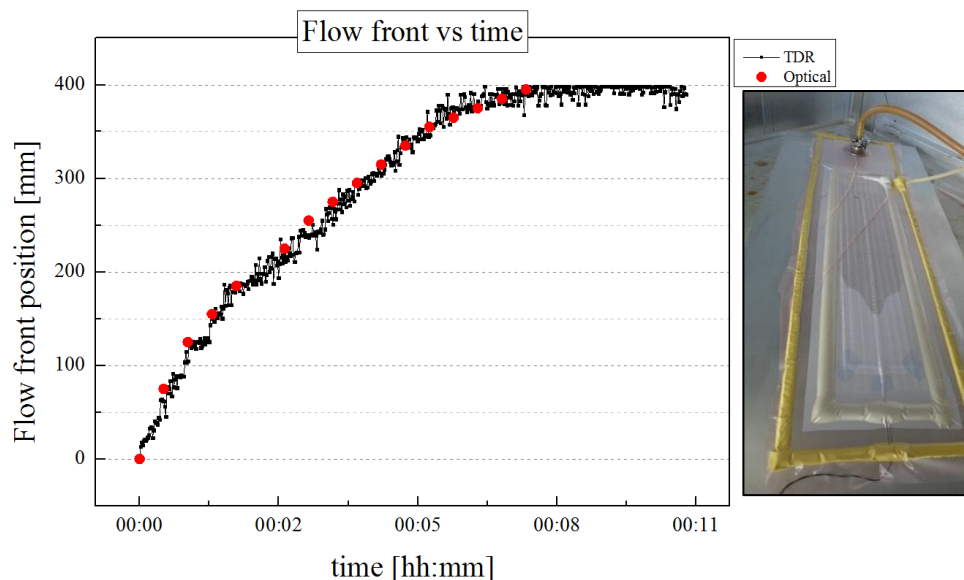


Abbildung 74: Fließfront Messung – TDR Auswertung

Die Position der Fließfront ist auf die Entfernung zur Angussstelle bezogen. Optisch wurde diese mit Hilfe eines Lineals alle 30 Sekunden erfasst. Die mit der TDR-Methode ermittelten Daten stimmen gut mit der optischen Messung überein.

Die in Abbildung 75 dargestellten Aufnahmen sind Schlibfbilder des Sensors nach dem Infiltrations- und Aushärtungsprozess.

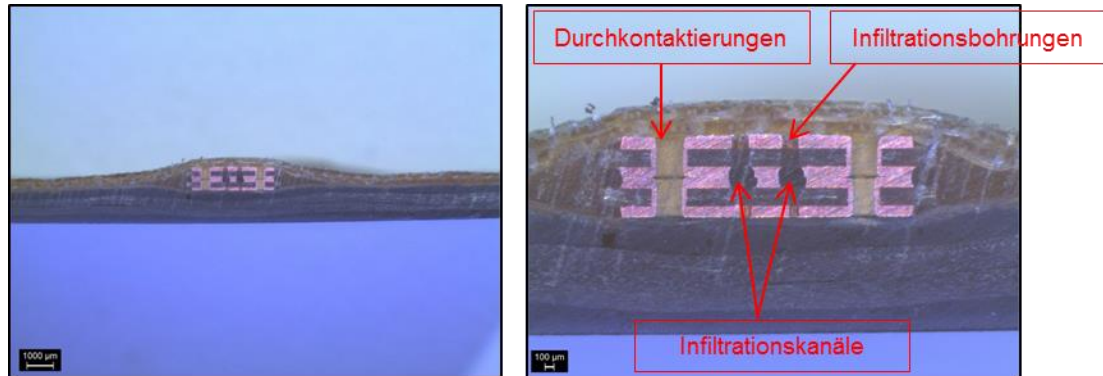


Abbildung 75: Schlibfbilder Sensor Fließfront

Die Wiederholung der Messung mit der Aufzeichnung der Kapazität zeigte eine gute Anwendbarkeit des Messprinzips. Die Ergebnisse sind in Abbildung 76 dargestellt.

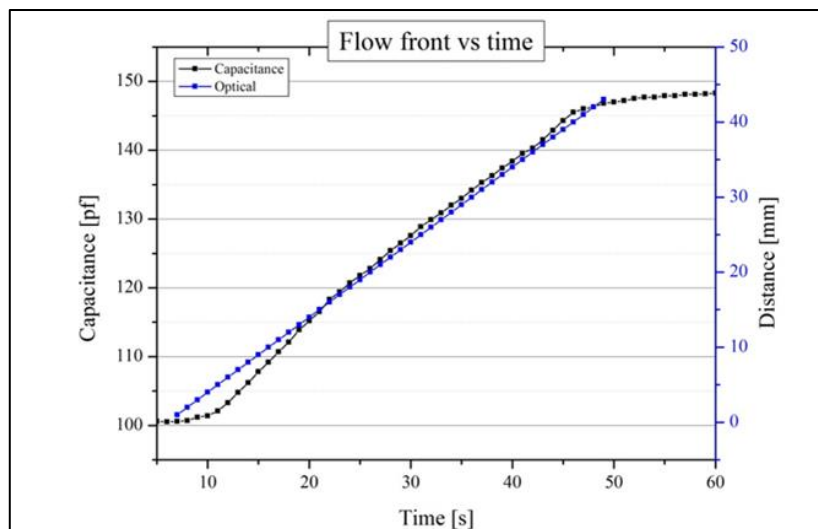


Abbildung 76: Kapazitive Fließfront Messung

Die schwarze Kurve stellt die gemessene Kapazität über die Zeit dar. Die blaue Kurve stellt den optischen Verlauf der Harzfront dar, die mit Hilfe eines Lineals gemessen wurde. Die optische Messung wird als Referenz betrachtet. Die Messung erfolgte bei einer Frequenz von 1 kHz. Die gemessene Kapazität zeigte eine sehr gute Übereinstimmung mit der Referenz. Zu Beginn des Infiltrationsprozesses ist eine leichte Abweichung zu erkennen. Möglicherweise kam es hier zum Austreiben von eingeschlossenen Luftblasen aus dem Vakuumaufbau.

6.3.2.8 Integration im CFK

Um den Sensor vor Harz oder Kontakt mit dem Material zu schützen, musste eine Lösung zur Passivierung gefunden werden.

Wenngleich die im Rahmen des Projektes RoCk entwickelte Sensorik lediglich zur Erarbeitung eines besseren Prozessverständnisses in der Entwicklungsphase von Compositebauteilen gedacht war und nicht in Bauteile aus einer Serienfertigung integriert werden sollte, wurde dennoch darauf geachtet, durch geeignete Vorauswahl von Materialien und Bearbeitungsprozessen, diese Option für künftige Entwicklungen grundsätzlich offen zu halten. Dazu wurde in einer erster Versuchsreihe untersucht, inwiefern die gängigen Substratmaterialien und Beschichtungen von elektronischen Schaltkreisen die Laminateneigenschaften beeinflussen.

Es wurden CFK Laminat hergestellt mit Folien aus PI, PPSU und PEI in der Symmetrieebene. Die Folien waren jeweils im Siebdruckverfahren mit PI bzw. Lötstopplack als Passivierung beschichtet worden.

Beim anschließenden Test des Schälverhaltens (G1c Test) wurde gegenüber den Referenzproben ohne Folie eine gravierende Minderung des G1c-Wertes um den Faktor 10 bis 20 verzeichnet. Anhand von statischen Zug- und Druckversuchen wurde die Auswirkung des Einbruchs des G1c-Wertes auf 1/10 am Beispiel der mit PI beschichteten PEI Folie betrachtet. Dazu war bei den Prüfkörpern im Prüfquerschnitt über die gesamte Probenbreite in der Laminatmitte ein 2 mm breiter Folienstreifen eingelegt, der einen eingebetteten Sensor repräsentieren sollte. Bei der Zugprüfung wurde gegenüber den Referenzproben ohne Folienstreifen kein Einfluss auf Festigkeit und Modul festgestellt. Bei der Druckprüfung blieb die Steifigkeit ebenfalls unbeeinflusst, jedoch die Druckfestigkeit sank um 35%. Da die konventionellen Sensormaterialien und Beschichtungen wenig geeignet erschienen für eine Integration in Composite Material, wurde eine weitere Versuchsreihe zur G1c-Prüfung definiert.

Bei der zweiten Untersuchung wurden nun neue Passivierungsmethoden als auch weitere Substratmaterialien für den Sensor getestet. Unter anderem wurde Kapton als Substratmaterial eingesetzt. Weiterhin wurde der Einfluss von verschiedenen Vorbehandlungen der PEI Folie untersucht. Das benutzte Laminat war aus Hexcel T800/M21 Prepreg hergestellt worden. Die Ergebnisse sind in der folgenden Tabelle zusammengefasst.

Tabelle 2: G1c Ergebnisse

Probe	Sensorfolie Typ & Vorbehandlung	Mittelwert G1c [J/m ²]	Std.abw. G1c [J/m ²]
Ref	ohne Sensorfolie - Referenz	1431,79	117,44
1	PEI (unbehandelt)	954,08	33,64
2	PEI + Oberflächenbehandlung - AZ100 (80°C / 5 min) + US	977,99	36,47
3	PEI + Oberflächenbehandlung - O2 Plasma (300 W / 5 min)	957,82	60,21
4	PEI + Oberflächenbehandlung - Aceton + Propanol + Wasser	933,24	45,41
5	PI gelocht (Durchmesser 31 mm)	897,36	96,8
6	PI gelocht (Durchmesser 20 mm)	953,2	55,41
8	PEI + PEI verschweißt (Sensor auf PEI)	1021,54	76,11
9	PEI + PI (gelocht d=20mm) + PEI verschweißt (Sensor auf PI)	763,79	35,21
10	PEI + flüssiges PEI (mit Pinsel aufgetragen)	930,34	32,17

Gegenüber der unbehandelten PEI Folie wurden bei den vorbehandelten Folien keine Unterschiede festgestellt. Der Einsatz von gelochten Kaptonfolien (Probe 5 & 6) zeigte

zwar gute Ergebnisse, jedoch konnten bei der Betrachtung der G1c Kurvenverläufe auch Einbrüche festgestellt werden, die auf eine schlechte Bindung zwischen Kapton und CFK hindeuten. Im Gesamtergebnis wirkt es sich sehr geringfügig auf den G1c Wert aus, da der Flächenanteil von Kapton durch die Anbringung von Bohrungen stark vermindert wurde. Dies wurde ebenso bei der Probe Nr. 9 beobachtet. Diese ist schematisch in Abbildung 77 dargestellt.

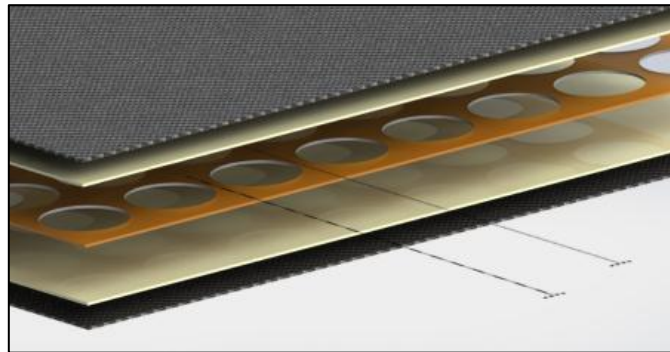


Abbildung 77: Gelochte PI Folie zwischen PEI

Hier wurde der Sensor auf der Kapton Folie angebracht und zwischen zwei PEI Folien eingeschweißt. Es konnte jedoch keine feste Verbindung zwischen den zwei Thermoplasten hergestellt werden.

Somit sollte PI als Substrat für einzubettende Sensoren vermieden werden.

Die optimierten Passivierungen (Probe 8 & 10) verhielten sich wie eine einzeln eingelegte PEI Folie.

Das verwendete M18 Harz ist bereits zäh modifiziert und weist mit 1400 J/m^2 einen hervorragenden (aber für Prepreg eben nicht untypischen) G1c-Wert auf. Dies wurde für die Versuchsreihen bewusst gewählt, um auch leichte Unterschiede in der Auswirkung von Substratmaterial und Vorbehandlung sicher identifizieren zu können.

Bei Infusionslaminaten mit Hexcel RTM6 liegt der G1c-Wert beispielsweise je nach Struktur des verwendeten C-Fasertextils zwischen 300 und 800 J/m^2 . In diesem Fall wäre dann davon auszugehen, dass durch eine PEI-Sensorfolie keine Verschlechterung der Risszähigkeit eintritt. Die Zusammenfassung der Passivierungsschichten sowie ein Vergleich mit dem RTM6 System ist in Abbildung 78 dargestellt.

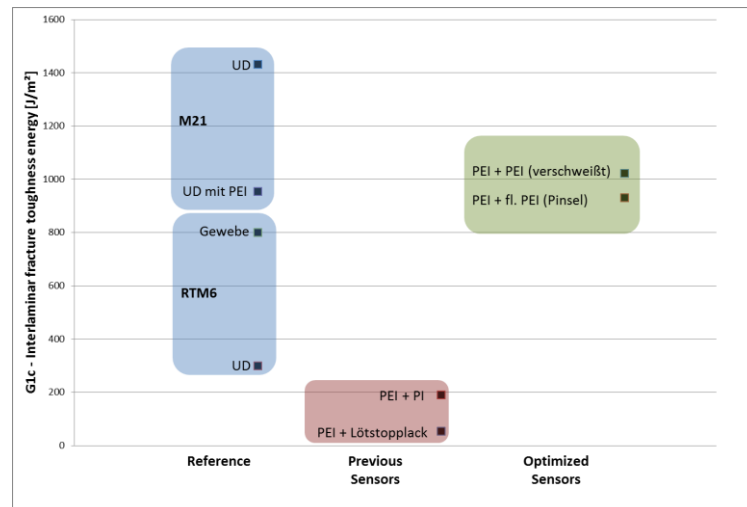


Abbildung 78: Zusammenfassung – Passivierungen

Durch eine Optimierung der Passivierungen konnten die mechanischen Eigenschaften des Laminats erheblich verbessert werden. Aus der Abbildung 78 ist zu erkennen, dass die Proben mit optimierten Passivierungsschichten ähnliche Kennwerte aufweisen wie ein M21 UD Laminat und sogar bessere Kennwerte zeigen als ein Gewebelaminat mit RTM6 Matrix. Eine Integration der Sensoren in das Laminat erscheint hinsichtlich der mechanischen Eigenschaften nun als durchaus möglich.

6.4 AP 4.3 Anforderungen an die Prozesssteuerung

Zur besseren Übersichtlichkeit wurden die Ergebnisse zur Fließfront- und Aushärtegradüberwachung mittels E-TDR in Kapitel 6.6 mit den Ergebnissen aus AP 5.4 zusammengefasst.

6.5 AP 4.4 Extended NDT für Klebungen

6.5.1 GC-IMS zur Siloxandetektion

Siloxane auf Oberflächen können bei Klebungen zu spontanem, adhäsivem Versagen führen, was auf jeden Fall vermieden werden muss. Siloxane können fertigungsbedingt durch Trennmittel oder Peel Plies auf die Oberfläche gelangen oder unkontrolliert durch Fremdeinwirkung, wie Kosmetika, Hygieneartikel, Klebebänder, Öle, Fette oder Glanzsprays u.v.m..

Meist liegen diese „Kontaminationen“ nur in einer extrem dünnen Schicht vor, weshalb sie sehr schwer zu detektieren sind. Eine sichere Detektion ist heute nur an Kleinproben unter Laborbedingungen möglich (XPS, ESCA, TOF-SIMS). Die Eignung für das inline-fähige Aufspüren in einer Produktionsumgebung soll für die GC-IMS Technik (Gaschromatographie – Ionenmobilitätsspektroskopie) untersucht werden. Mit der Kombination von GC und IMS ergibt sich eine dreidimensionale Information aus Run Time (GC) und Drift-Time (IMS) und aus der entsprechenden Signalintensität. Da die Technik mit gasförmigen Proben arbeitet, müssen Siloxan-Komponenten zunächst in die Gasphase

überführt werden, dies geschieht durch Temperaturerhöhung (z.B. 130°C). Die GC-IMS Analyse ist sehr sensitiv auf Siloxane und kann diese bereits in einer extrem niedrigen Konzentration aufspüren.

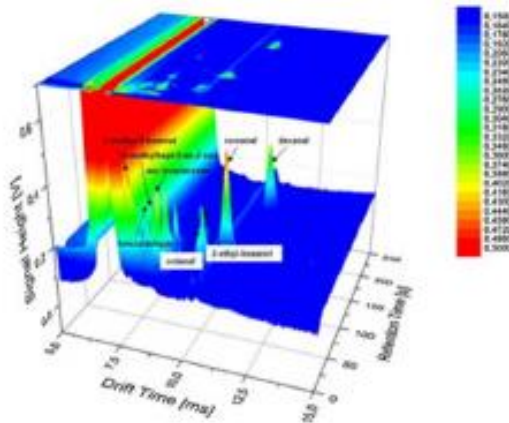


Abbildung 79: Darstellung eines 3D-Spektrums der GC-IMS Analyse

Für die Untersuchung wurden verschiedene fertigungsbedingte Oberflächenzustände von CFK untersucht, welche unterschiedliche Arten und Konzentrationen von Siloxanen aufwiesen.

		A	B	C	D	E
	130°C and 90°C	Neat auxiliary material	CFRP* after PP removal	CFRP* + AP-Plasma**	CFRP* + low AP-Plasma	CFRP* + sanding
I	Liquid release agent „Frekote 700NC“	X / -	X / - ***	X / - ***		X / -
II	Peel Ply (high PDMS content) „Super Release Blue“	X / X	X / X	X / -	X / -	
III	Peel Ply (low PDMS content) „Tygavac 60BR“	X / -	X / -			
IV	Peel Ply (no PDMS content) „UTT08940“	X / -	X / -			

Abbildung 80: Untersuchte Probenkonfiguration

Aus der Analyse einer kleinen CFK Probe (10x10mm) in einem Labormessgerät ergaben sich die in folgender Abbildung gezeigten Spektren. Daraus wurden markante Signale herausgezogen und die Signale unterschiedlicher Proben verglichen. Es zeigte sich, dass bestimmte Signale aus der Umgebungsluft resultieren und bestimmte dem Basis-CFK zuzuordnen sind. Diese waren bei allen Proben zu finden.

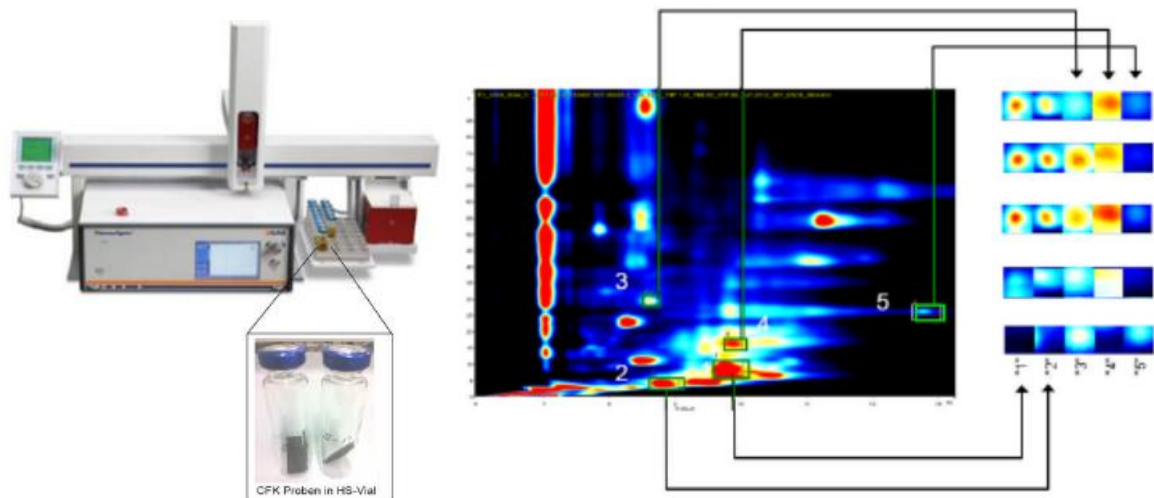


Abbildung 81: GC-IMS Analysator mit Headspace und exemplarische Signalgenerierung

Allerdings waren auch Signale detektierbar, die nur bei der jeweiligen Probenvariante zu finden waren. Diese galt es zu bestimmen. Es zeigte sich in ersten Versuchsreihen, dass es durchaus möglich ist, die verschiedenen „kontaminierten“ Proben zu unterscheiden.

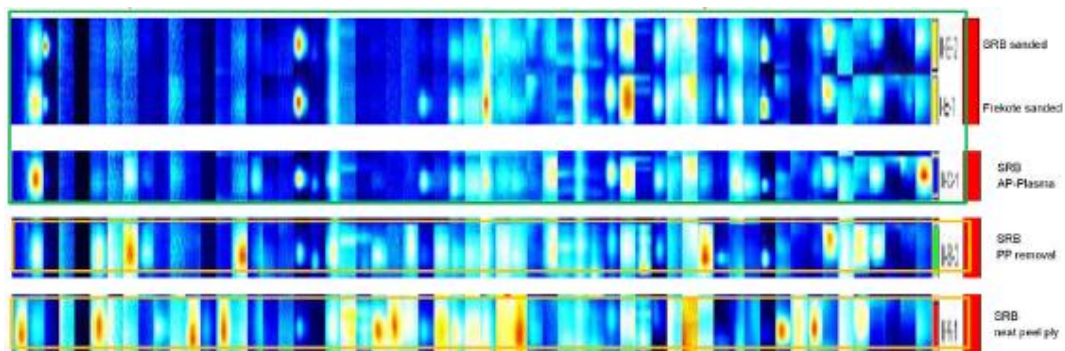


Abbildung 82: Detektierte Signale einer Probenserie

Für die Untersuchung von größeren Probenflächen ist eine Desorberglocke aus Edelstahl und Quarzglas konstruiert und gebaut worden. Hierdurch wird ein geschlossener Gasraum geschaffen und die Probenoberflächen durch diesen Gasraum mittels Infrarotstrahler erwärmt. Die Temperatur der Oberfläche kann mittels Pyrometer konstant gehalten werden. Flüchtige Stoffe können bei definierten Temperaturen aus der Probe in den Gasraum überführt werden, wo sie durch das GC-IMS analysiert werden.

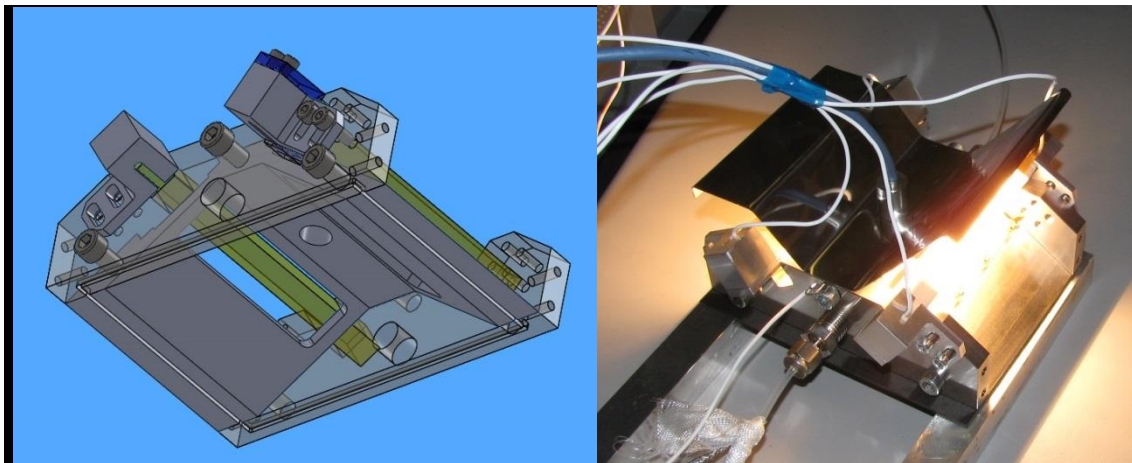


Abbildung 83: Desorberglocke zu großflächigen Oberflächenmessung

Für die Untersuchung wurden verschieden kontaminierte CFK (Hexply 8552/IM7) getestet. Typische Kontaminationen waren Siloxan Rückstände, hervorgerufen durch Peel Ply (Super Release Blue; Tygavav 60 BR) abziehen oder Formtrennmittel (Frekote 700 NC). Als Referenz wurden saubere CFK Oberflächen (geschliffen, Plasmabehandlung) verwendet.

Für die Bestimmung der Siloxan Rückstände wurde die CFK Oberflächen auf Temperaturen zwischen 120°C bis 220°C gebracht und der Gasraum bis zu 300 Sekunden angereichert.

Nach Bestimmung der Spektren und der Auswertung über eine PCA Analyse sind Unterschiede in den einzelnen Proben feststellbar. Gleich konditionierte Proben liegen nah zusammen, unterschiedliche Konditionierungen liegen hingegen getrennt vor. Dadurch ist eine Differenzierung eindeutig möglich.

■ Referenz ■ Plasma SRB ■ Kont. SRB ■ Plasma TV ■ Kont TV

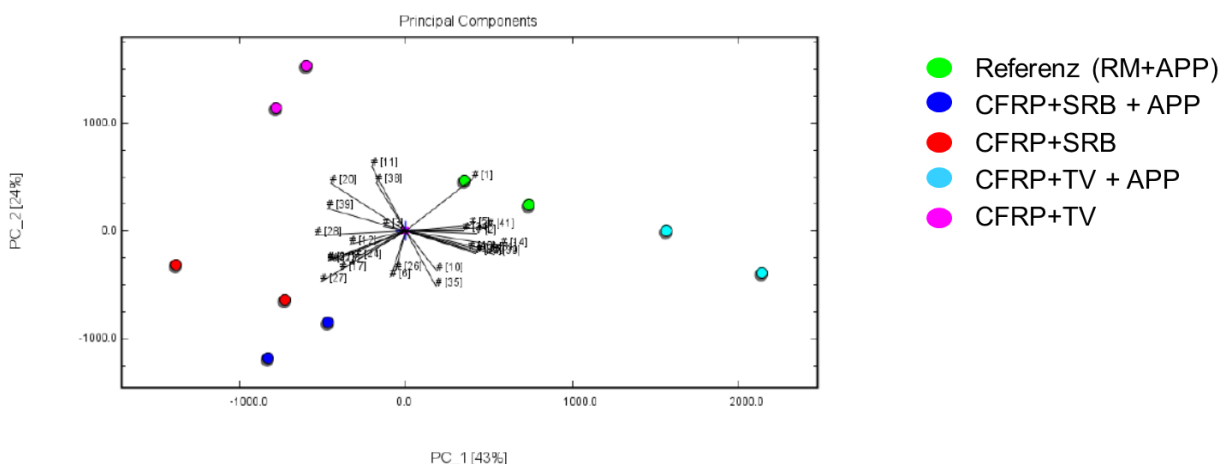


Abbildung 84: PCA Plot einer Testserie (150°C / 5Min.)

Die Messmethode Siloxan Rückstände mittels GC-IMS zu detektieren sowie die Desorberglocke wurden zum Patent eingereicht (P700928-DE-NP; P700930-EP-EPA).

6.5.2 Bestimmung der Rauigkeiten als Qualitätskriterium für die Oberflächenvorbehandlung

Bei der IR Spektroskopie werden im Bereich der Eindringtiefe der Strahlung liegende Moleküle zum Schwingen angeregt. Die dabei absorbierten Wellenlängen lassen sich in einem Spektrum darstellen.

Rein theoretisch sollten unterschiedliche Rauheiten keinen Einfluss auf die Messung haben. Jedoch ist bekannt das sich bei rauen Oberflächen die Brechung der elektromagnetischen Wellen in Abhängigkeit der Wellenlänge ändert. Um zu überprüfen ob dies einen Einfluss auf die Messmethodik der IR Spektroskopie hat und inwiefern dies eventuell nützlich sein kann zur Bestimmung von Rauigkeiten wurde dieser Einfluss untersucht.

Damit der IR Spektroskopie klassischerweise chemische Unterschiede gemessen werden, war es nötig Proben zu untersuchen welche die identische chemische Zusammensetzungen besitzen jedoch unterschiedliche Rauheiten an der Oberfläche.

Für diese Versuche wurden CFK Platten gleicher Zusammensetzung aber mit bekannt unterschiedlichen Rauigkeiten aus abgeschlossenen Projekten verwendet.

Die IR Messungen wurden mit dem tragbaren FTIR Spektrometer Exoscan durchgeführt. Als Messparameter wurden 64Scans bei einer Auflösung von 8cm^{-1} Wellenzahlen verwendet. Es wurde an 10 unterschiedlichen Stellen auf der Probe gemessen.

In Abbildung 85 sind die Mittelwert Spektren der Messungen angetragen. Dies dient der Übersichtlichkeit und zeigt klarere Tendenzen auf.

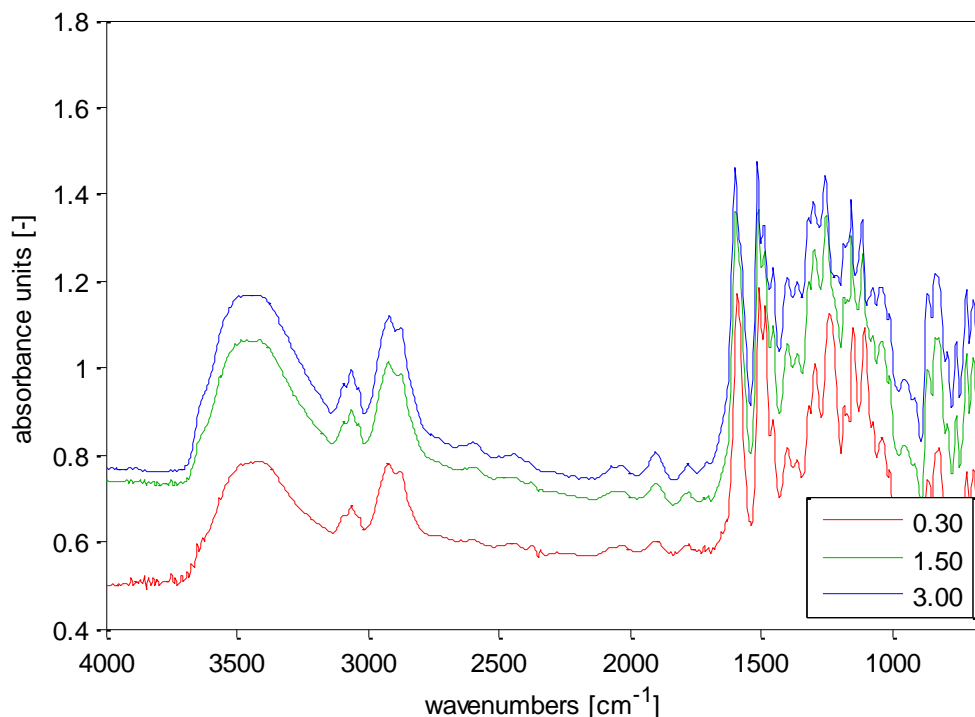
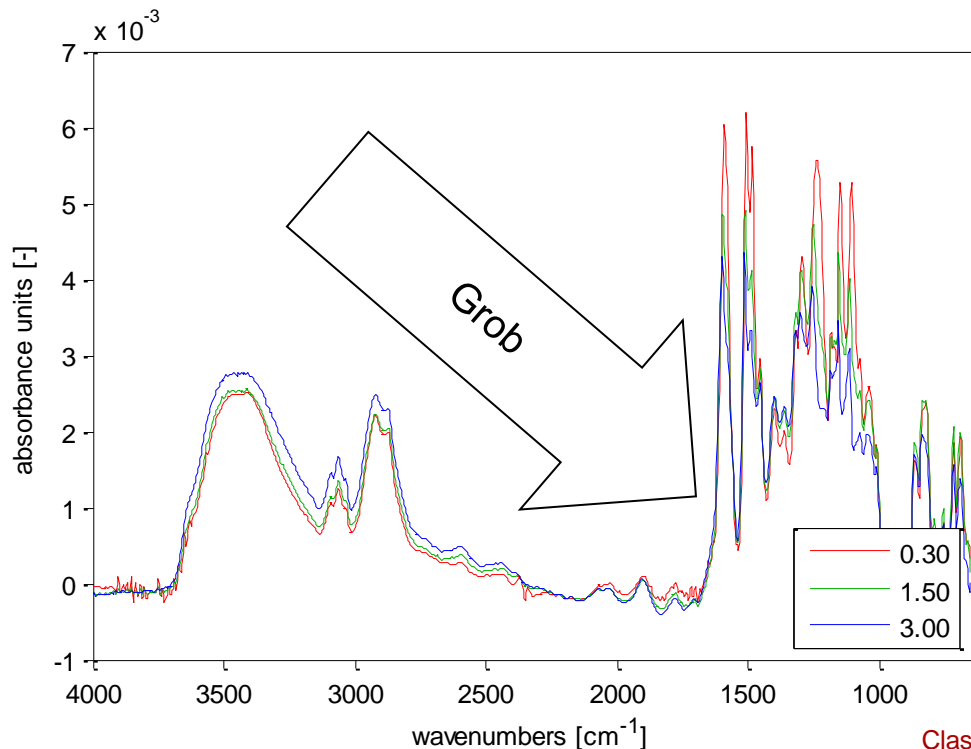


Abbildung 85: Mittelwert Spektren der Rohdaten von unterschiedlich rauen [Ra] CFK Oberflächen

Es ist zu erkennen, dass die Messungen sich grundsätzlich durch eine Verschiebung der Y-Achse unterscheiden. Dieser Effekt ist auf Schichtdickenschwankungen zwischen der letzten C-Faser Lage und der Matrix Deckschicht zurück zu führen.

Um diesen Einfluss zu korrigieren wurden die Daten durch eine Basislinienverschiebung korrigiert und anschließend die Fläche unter dem Graphen zu =1 normiert. Daraus ergeben sich die Spektren wie in untenstehender Abbildung dargestellt.



Class Set: #2

Abbildung 86: Mittelwert Spektren nach Datenvorbehandlung

Nun ist deutlich zu erkennen, dass hin zu kleineren Wellenzahlen, gleichbedeutend mit größeren Wellenlängen, die IR Intensität im Vergleich zu den anderen abfällt.

Durch Ausnutzung dieses Effekts lässt sich die Rauheit bestimmen. Dazu wurde eine PLS Regression erstellt. Die Daten wurden wie folgt vorbehandelt:

- 1st Derivative (order: 1, window: 9 pt, incl only, tails: polyinterp)
- Normalize (1-Norm, Area = 1)
- Autoscale

Die Ergebnisse der Regression sind in Abbildung 87 dargestellt und zeigen gute Vorhersagen für die unterschiedlichen Rauheiten. (X-Achse: Ist-Wert; Y-Achse: mittels Exoscan vorhergesagte Rauheit)

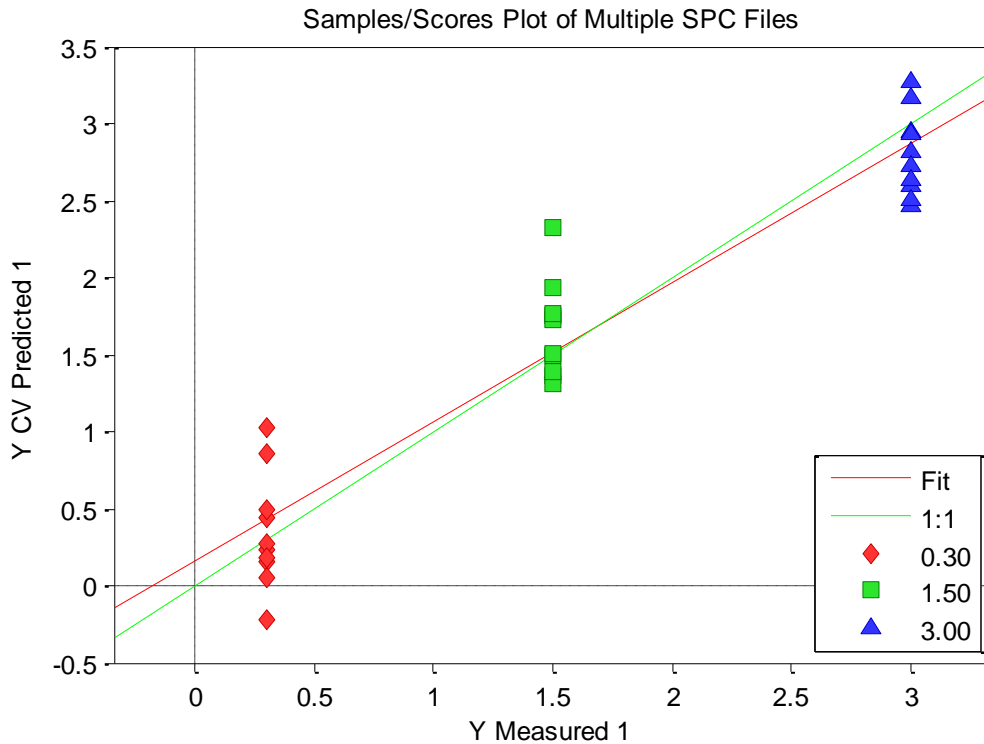


Abbildung 87: Ergebnisse der PLS Regression zur Vorhersage des Mittenrauwwerts Ra

6.6 AP 4.5 Validierung der Prozessüberwachung & -steuerung

6.6.1 Fließfront- und Aushärtegradüberwachung mittels E-TDR

Neben den in AP 4.2 entwickelten Mikrosensoren wurde ein weiteres Sensorkonzept untersucht, welches die Erfassung von Fließfront und Aushärtegrad bei Infusionsprozessen erlaubt. Das Konzept basiert auf Zeitbereichsreflektometrie. Diese Technologie arbeitet nach dem physikalischen Prinzip, dass Wellen an der Grenze zwischen unterschiedlichen Medien teilweise reflektiert werden. Im Fall der elektrischen Zeitbereichsreflektometrie (engl. Electric Time Domain Reflectometry E-TDR) wird ein Spannungspuls in eine zweiadrige Leitung eingeleitet. Ein Teil der hier aufgeführten Untersuchungen fand bereits in den Veröffentlichungen [1-3] Erwähnung.

Inwieweit das Signal reflektiert wird, hängt vom Wellenwiderstand (Impedanz Z) der Leitung ab, die wiederum eine Funktion der dielektrischen Eigenschaften der Umgebung sowie der Geometrie der Leitung ist. Für eine Leitung mit zwei parallelen, runden Leitern lässt sich die Impedanz aus der Induktivität L und der Kapazität C wie folgt berechnen:

$$Z = \sqrt{\frac{L}{C}} = \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{\mu_0 \mu_r}{\epsilon_0 \epsilon_r}} \cosh^{-1} \left(\frac{a}{d} \right)$$

Darin ist a der Abstand der Leiterbahnen und d ihr Durchmesser. Nimmt man die Permittivitätszahl μ_r als konstant an hängt die Impedanz außer von der Geometrie nur von der dielektrischen Permittivität ϵ_r ab. Die magnetische Feldkonstante μ_0 und die elektrische Feldkonstante ϵ_0 sind physikalische Konstanten.

Ändert sich entlang der Leitung die Impedanz, was zum Beispiel beim Übergang von trockener zu infiltrierter Preform (Änderung von ϵ_r) der Fall ist wird ein Teil des Signals reflektiert. In Abhängigkeit der Laufzeit kann dann die Position der Impedanzänderung lokalisiert werden. In Abbildung 88 ist schematisch ein Ersatzschaltbild eines TDR Sensors dargestellt.

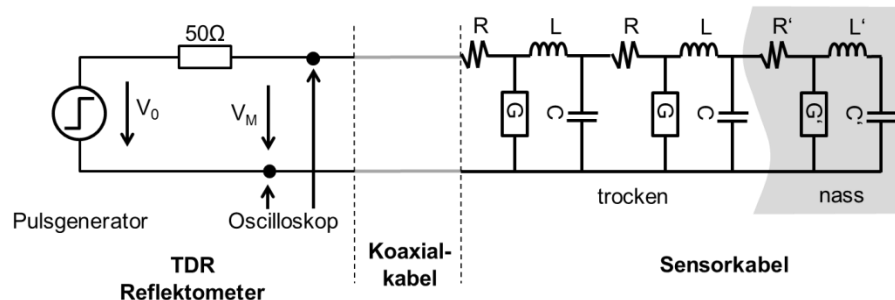


Abbildung 88: Schematische Darstellung des TDR Sensors

Zur Durchführung der Versuche wurde ein günstiges TDR Reflektometer der Firma Sympuls GmbH verwendet. Dieses bietet den Vorteil, dass es über einen USB Port direkt mit einem PC verbunden werden kann und keine zusätzlichen Anschlüsse notwendig sind. Die Auswertung der Signale erfolgt dann am PC. Zur Auswertung wird der Reflexionsfaktor U herangezogen den das Gerät ausgibt. Dieser ist über folgende Formel mit der Impedanz verknüpft:

$$U = 100 \cdot \left(1 + \frac{Z - Z_0}{Z + Z_0} \right)$$

Darin ist Z_0 die vom Gerät vorgegeben Wellenimpedanz 50Ω .

6.6.1.1 Vorversuche

Um ein Gefühl für die Technologie zu gewinnen, wurden Vorversuche durchgeführt, mit deren Hilfe ein optimales Sensordesign gefunden werden sollte. Dabei wurde sowohl die Geometrie als auch das Material der Leiter variiert. Neben der Entwicklung eines selbst gefertigten Sensors wurde eine Recherche durchgeführt, welche weiteren Kabeltypen als Sensor in Frage kommen könnten. Hauptanforderungen waren dabei ein möglichst flacher Querschnitt des Sensors um den Einfluss auf das Laminat und die Infusion zu minimieren sowie die Temperaturbeständigkeit bis 180°C was die Aushärtetemperatur für typische Harzsysteme bei Luftfahrtanwendungen darstellt.

Als Materialien wurden verschiedene Metalle wie Konstantan und Kupfer aber auch Kohlenstoffasern untersucht. Aufgrund der hohen Flexibilität, die eine parallele Ausrichtung der Leiter erleichtert und der Verfügbarkeit verschiedener Querschnitte, wurde Kupfer Zopfgeflecht als geeignetstes Material für die Versuche zur Variation der Geometrie eingesetzt. Dazu wurden die Leiter mit Kapton Klebeband auf 300mm lange GFK Platten aufgebracht die anschließend teilweise in Harz eingetaucht wurden. Dabei wur-

de der Durchmesser zwischen 0,25mm und 0,47mm und 0,9mm variiert und der Abstand zwischen 3mm, 5mm und 10mm. In Abbildung 89 ist ein typischer Signalverlauf eines Vorversuches dargestellt.

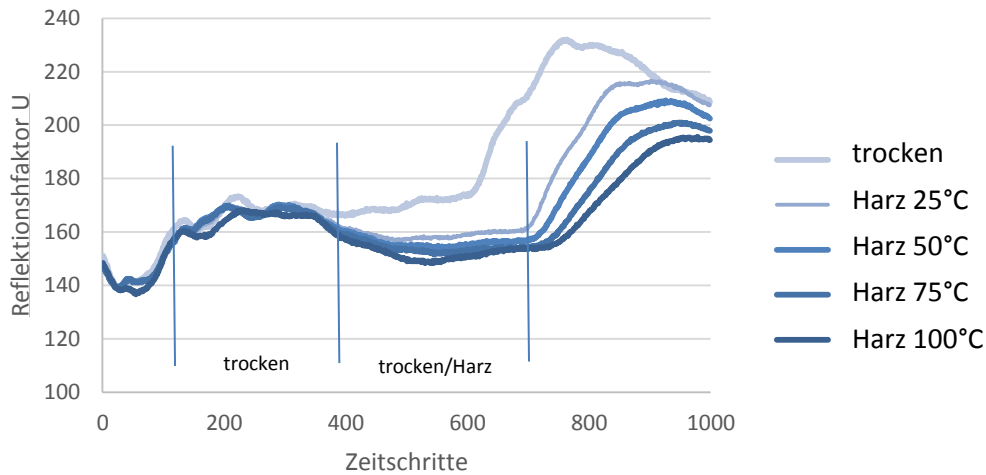


Abbildung 89: Exemplarischer Signalverlauf eines Vorversuchs

Dabei stellt der erste Sprung links den Übergang vom Koaxialkabel auf den Sensor dar. Der annähernd horizontal verlaufende Bereich stellt den trockenen Zustand dar. Wird der Sensor in Harz getaucht fällt die Impedanz ab der Mitte des Sensors ab. Der Anstieg des Signals rechts resultiert aus dem Ende des Sensors an dem es zu einer Totalreflektion kommt. Als Kriterium der Sensorqualität wurde der Unterschied zwischen den Niveaus des Reflexionsfaktors U für Luft und Harz herangezogen. Je größer dieser ist, desto leichter fällt es mit dem Sensor die Fließfront zu detektieren. Durch Aufheizen des Harzes konnte der Einfluss der Temperatur auf die Signalqualität untersucht werden. Man erkennt, dass mit zunehmender Temperatur die Impedanz abnimmt, was die Detektion der Fließfront erleichtert.

Auch wenn die Versuche die Anwendbarkeit des Sensorkonzeptes zeigten, waren eindeutige Aussagen basierend auf den Ergebnissen nur schwer möglich. Dies liegt insbesondere daran, dass trotz der Flexibilität der Kupferleiter ein exaktes Aufbringen nur schwer möglich ist und sich geringe Abweichungen im Abstand bereits signifikant auf die Messung auswirken. Zudem bildeten sich unter dem Kaptonband neben den Leitern unregelmäßige Luftkammern, die ebenfalls eine exakte Messung erschweren. Da diese Luftkammern umso größer werden je dicker die Leiterbahnen sind und je enger sie zusammenliegen, da die Haftfläche zwischen ihnen sich verkleinert, wurde aus Fertigungssicht ein Abstand von 5mm und ein Durchmesser von 0,47 mm als optimale Lösung definiert.

Um eine fundierte Aussage zu erhalten, wurden auch Simulationen durchgeführt. Diese zeigen, dass ein optimaler Sensor für alle Randbedingungen nicht definiert werden kann. So ist die optimale Sensorkonfiguration vielmehr abhängig vom verwendeten Fasermaterial, des Materials des Werkzeugs, der Position des Sensors der Temperatur und vielen weiteren Faktoren die die dielektrischen Eigenschaften beeinflussen. Beispielhaft sind in Abbildung 90 die Ergebnisse einer Simulation einer Preform aus Glasfaser auf einem Aluminiumwerkzeug dargestellt. Als Auswertekriterium dient der Unter-

schied des Spannungsverhältnisses U zwischen trockener und infiltrierter Preform. Hierbei zeigt sich, dass der Niveauunterschied mit zunehmendem Durchmesser und mit steigender Distanz abnimmt. Für sehr geringe Abstände nimmt der Niveauunterschied wieder ab. Derart geringe Abstände lassen sich allerdings technisch nur schwer realisieren. Es muss erwähnt werden, dass eine exakte Simulation aufgrund der in der Realität komplexen Geometrie mit Hilfsstoffen, deren elektrische Permittivität unbekannt ist, nicht durchgeführt werden kann. Der Trend der Simulation konnte jedoch auch experimentell bestätigt werden.

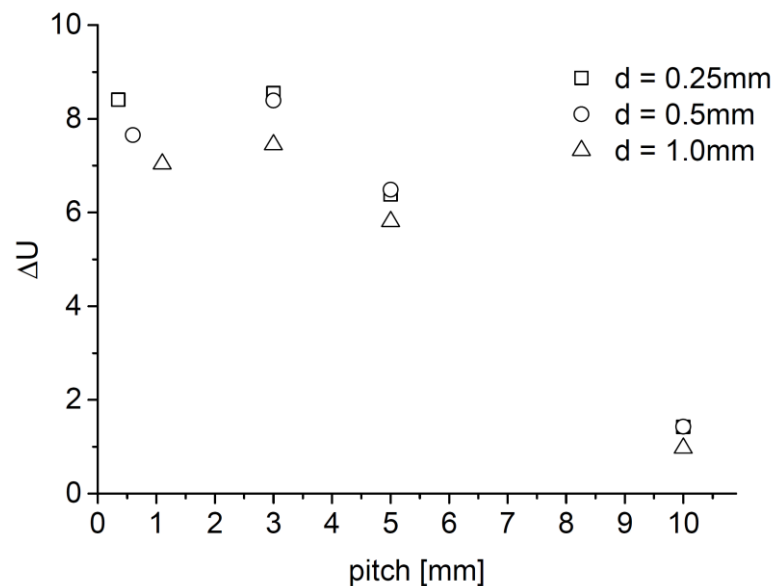


Abbildung 90: Simulationsergebnisse: Variation von Abstand und Durchmesser der Leiter

Auch wenn möglichst geringe Abstände zwischen den Leiterbahnen als ideal ermittelt wurden, erweist sich die für die technische Umsetzung Sensorfertigung optimale Konfiguration mit 0,47mm dicken Leiterbahnen und einem Abstand von 5mm als guter Kompromiss.

Für weitere Infiltrationsversuche wurden die Leiter zwischen zwei Kapton Klebebänder eingebracht und mit Hilfe einer Walze fixiert. Neben dem selbst gefertigten Sensor wurde ein kommerziell erhältliches flexibles Flachkabel der Firma Axon Cable getestet. Da eine Sonderanfertigung in Hochtemperaturlösung zu hohe Kosten verursacht hätte, wurde auf ein bis 100°C zugelassenes Produkt mit Polyester Isolierung zurückgegriffen. Das Kabel verfügt über zwei rechteckige Leiter von 1,5mm Breite und 0,1mm Höhe und einem Abstand von 2,54mm. Dieser Abstand liegt im Bereich des durch die Simulation ermittelten Maximums der Signalqualität. Die Gesamtdicke beträgt ca. 0,3mm. In Abbildung 91 sind die Querschnitte der Sensoren vergleichend dargestellt.

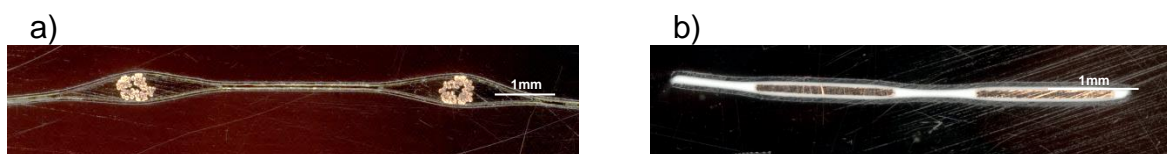


Abbildung 91: Schliffe der getesteten Sensoren a) handgefertigt b) industriell

Durch die industrielle Fertigung sind sehr viel geringere Abstände zwischen den Leiterbahnen ohne Luftschlüsse realisierbar. Somit ist die Signalqualität dieser Sensoren deutlich besser, weswegen sie und nicht die selbst gefertigten bei den weiteren Infiltrationsversuchen eingesetzt wurden. Nichtsdestoweniger konnten durch die Vorversuche weitere wichtige Erkenntnisse z.B. hinsichtlich der Kontaktierung gewonnen werden auf die aber nicht im Detail eingegangen werden soll.

Um den Einfluss des Leiterabstandes bei FFC Sensoren zu bewerten, wurde eine Simulation mit Hilfe des von Airbus Group Innovations entwickelten Programms ASERIS.NET durchgeführt. Dieses Programm erlaubt für beliebige Leitungskonfigurationen die Berechnung der Induktivität und Kapazität und damit der Impedanz. Aus dieser lässt sich wiederum der vom TDR Messgerät ausgegebene Reflexionskoeffizient berechnen. Abbildung 92 stellt das für die Simulation verwendete zweidimensionale Modell des Aufbaus dar. Durch Änderung der dielektrischen Permittivität des Harzbereichs können die verschiedenen Zustände trocken, nass und ausgehärtet simuliert werden.

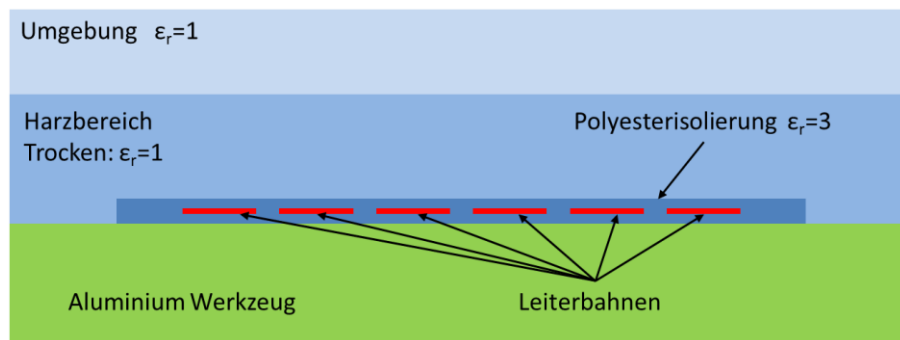


Abbildung 92: 2D Modell zur Simulation der Impedanz eines FFC

In Abbildung 93 sind die Ergebnisse der Simulation dargestellt. Die Werte für den geringsten Abstand liegen bei der Simulation sogar im negativen Bereich was für eine Zunahme von U im nassen Zustand sprechen würde. Vernachlässigt man in der Simulation die Polyester Isolierung und nimmt die Leiter als komplett von Harz umschlossen an tritt dieser Effekt nicht auf.

Bei den parallel durchgeführten Experimenten, bei denen das FFC auf einem Aluminiumwerkzeug aufgebracht und mit Harz übergossen wurde, ließen sich die Ergebnisse nicht bestätigen. Hier zeigt sich kein signifikanter Einfluss des Leiterabstandes auf ΔU_{tn} . Auch liegen die Werte von ΔU_{tn} in den Experimenten deutlich niedriger. Möglicherweise spielt dabei die Tatsache, dass der Sensor in der Realität nicht perfekt auf dem Aluminiumwerkzeug aufliegt und sich aufgrund der welligen Struktur der Oberfläche des Sensors zwischen den Leiterbahnen mit Luft gefüllte Bereiche ergeben, eine Rolle. Diese könnten durch eine Reduzierung der dielektrischen Permittivität der Polyesterisolierung in der Simulation berücksichtigt werden.

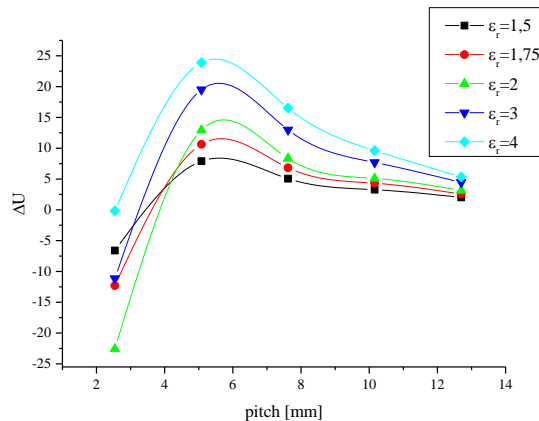


Abbildung 93: Simulation: ΔU_{tn} in Abhängigkeit des Leiterabstandes bei FFC

Trotz der abweichenden Simulationsergebnisse zu den Experimenten wird ein FFC mit einem Leiterbahnenabstand von 2,54mm als bevorzugte Sensorkonfiguration verwendet. Zum einen weist diese Konfiguration den kleinsten Querschnitt auf, zum anderen konnte in Experimenten kein positiver Einfluss eines größeren Leiterabstandes identifiziert werden. Grundsätzlich ist durch den geringeren Leiterabstand wie in Abbildung 90 dargestellt, eher eine Verbesserung des Signal/Rausch Verhältnisses zu erwarten.

6.6.1.2 Infiltrationsversuche

6.6.1.2.1 Charakterisierung des Einflusses elektrisch leitender Materialien

Um die Anwendbarkeit der Sensorik unter realistischen Randbedingungen zu validieren, wurden mehrere Preforms infiltriert. Der Versuchsaufbau ist in Abbildung 94 dargestellt.

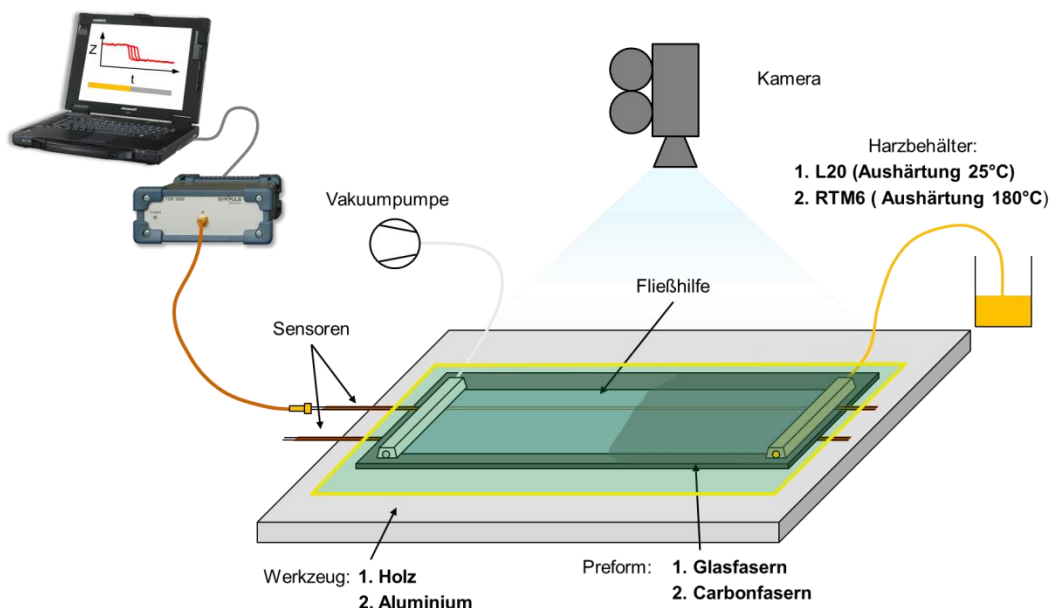


Abbildung 94: Versuchsaufbau für Infiltrationsversuche

Wie Abbildung 94 entnommen werden kann, wurde bei den Versuchen sowohl das Material des Werkzeugs variiert, als auch das Fasermaterial und das Harzsystem. Zudem wurde der Einfluss der Sensorposition untersucht. Dazu wurden ein Sensor auf der Preform unter der Fließhilfe und ein Sensor direkt auf dem Werkzeug positioniert.

Da elektrisch leitende Materialien in der Umgebung das Signal schwächen stellt der Aufbau mit einer Glasfaser-Preform auf einem nicht leitenden Tooling aus Holz den am einfachsten zu detektierenden Fall dar. Schrittweise wurde der Aufbau der Realität eines Luftfahrtbauteils angenähert, das aus C-Fasern auf einem metallischen Werkzeug gefertigt wird und bei 180°C ausgehärtet wird.

Der Versuchsplan ist in Tabelle 3 dargestellt.

Tabelle 3: Versuchsplan Infiltrationsversuche

Versuch	Werkzeug	Fasermaterial	Harzsystem (Aushärtetemp.)
1	Holz	Glasfasern	L (20°C)
2	Holz	C-Fasern	L (20°C)
3	Aluminium	Glasfasern	L (20°C)
4	Aluminium	C-Fasern	L (20°C)
5	Aluminium	C-Fasern	RTM6 (180°C)

Die Versuche zeigen, dass leitende Materialien in der Umgebung des Sensorkabels den Unterschied des Reflexionskoeffizienten zwischen trockenem und nassem Zustand ΔU reduzieren. So fällt das Signal-Rausch-Verhältnis bei einer Sensorpositionierung zwischen Metallwerkzeug und C-Faser-Preform gegenüber einer Positionierung auf einer Glasfaserpreform deutlich ab. Da ein niedriges Signal-Rausch-Verhältnis eine Detektion der Fließfront erschwert wurde bei den Versuchen mit FFC Sensoren der Fokus auf eine Sensorposition zwischen Preform und Fließhilfe gelegt.

Bei der Auswertung der Versuche wurden verschiedene Algorithmen untersucht. Es zeigt sich, dass sich aus der Differenz des Signals zum Ausgangssignal im trockenen Zustand die Fließfront gut detektieren lässt. Exemplarisch ist der Fortschritt der Fließfront in Abbildung 95 für die Infiltration von RTM6 bei 100°C dargestellt. Man erkennt, dass die Messung mittels TDR gut mit der optischen Messung übereinstimmt. Die Abweichung liegt in einem Bereich von maximal 24 mm auf 750 mm Infiltrationslänge.

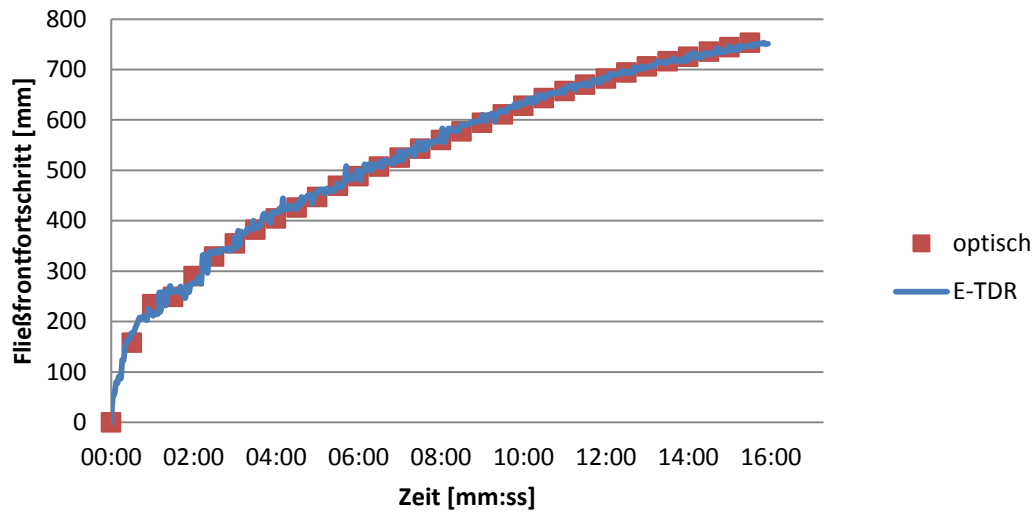


Abbildung 95: Fließfrontfortschritt (Aluminiumwerkzeug, C-Fasern, RTM6)

Nach der Infiltration kann über einen anderen Algorithmus, der die Veränderung des Signals über die gesamte Sensorlänge ermittelt, die fortschreitende Aushärtung des Harzes detektiert werden. In Abbildung 96 ist exemplarisch der Verlauf der Aushärtung für das raumhärtende Harz vom Typ L20 mit Härter EPH161 dargestellt. Zur Überprüfung der Ergebnisse ist die Messung mit einer DSC Messung überlagert dargestellt.

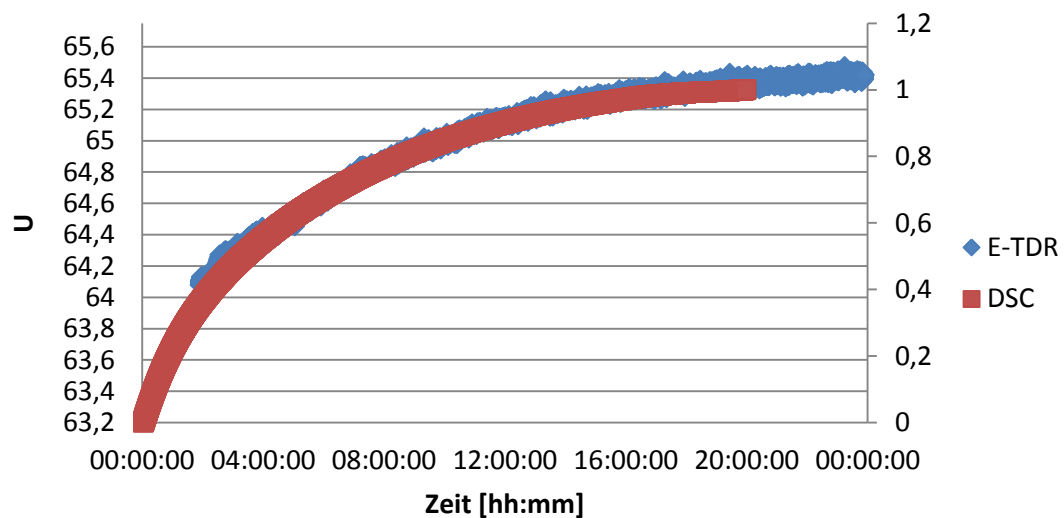


Abbildung 96: Aushärtegradmessung (Aluminiumwerkzeug, C-Fasern, Harz L20 mit Härter EPH161)

Es zeigt sich, dass die dielektrische Messung gut mit dem per DSC ermittelten Aushärtegrad übereinstimmt. Somit kann die Messmethode dazu dienen, die Aushärtung zu überwachen. Dies kann sinnvoll sein wenn auf Prozessabweichungen wie z.B. trockene Stellen im Bauteil reagiert werden muss. Liegt die Aushärtung und damit die Viskosität

noch auf einem niedrigen Niveau kann z.B. durch erhöhte Temperatur die Viskosität weiter gesenkt und die trockene Stelle gefüllt werden.

Neben den Versuchen zur Messung der Aushärtung raumhärtender Harzsysteme wurden auch Versuche mit RTM6 durchgeführt, welches bei 180°C aushärtet. Hierbei treten verschiedene Effekte auf, die eine Messung erschweren. Diese umfassen die Wärmedehnung des Laminats während des Aufheizens, die die Distanz eines auf der Preform angebrachten Sensors vom Werkzeug erhöht und somit zu einer Zunahme des Reflexionskoeffizienten führt. Zudem weist der mit Polyester isolierte Sensor nur eine begrenzte thermische Stabilität auf. Nichtsdestoweniger konnte für einen Aufbau mit einer Glasfaser-Preform auf einem Aluminium Werkzeug der in Abbildung 97 dargestellte Signalverlauf aufgezeichnet werden. In den Aufbau wurden Thermolemente integriert. Anhand des gemessenen Temperaturverlaufs wurde eine DSC Messung durchgeführt.

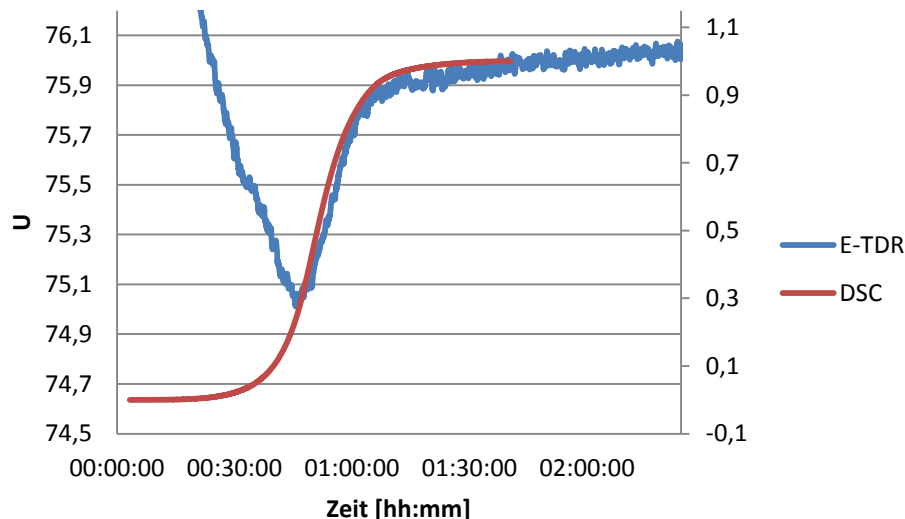


Abbildung 97: Korrelation der Veränderung von U während der Aushärtung von RTM6 mit DSC Messung

Es zeigt sich, dass der gemessene Signalverlauf gut mit der DSC Messung korreliert. Die leichte Verschiebung gegenüber der DSC Messung ist damit zu begründen, dass der Temperaturverlauf der in Realität langsam gegen die Aushärtetemperatur konvergiert durch eine lineare Rampe angenähert werden muss.

Nichtsdestoweniger zeigt die gute Korrelation, dass sich TDR als Methode zur Überwachung des Aushärtegrades auch bei Harzsystemen eignet, die bei 180°C ausgehärtet werden.

6.6.1.2.2 Untersuchung einer geschirmten Sensorgeometrie

Das Funktionsprinzip ist in Abbildung 98 dargestellt. Das Dielektrikum des Sensors besteht aus Glasfasermaterial, welches von einer geflochtenen Schirmung umgeben ist. Das elektrische Feld bildet sich so nur innerhalb der Schirmung aus. Aufgrund der Porosität des Geflechts kann das Dielektrikum Harz aufnehmen. Da geschirmte Thermo-

elemente für Hochtemperaturanwendungen die gezeigte Geometrie aufweisen, wurden sie für die erste Validierung des Konzepts verwendet.

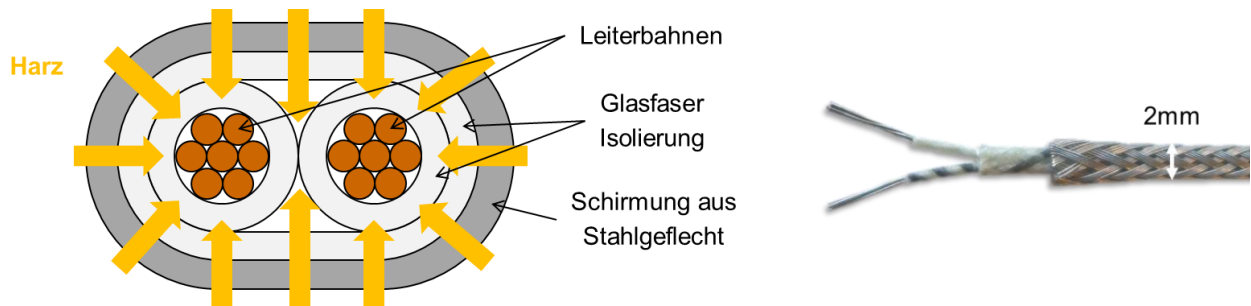


Abbildung 98: Sensor mit geschirmter Geometrie

Die Effektivität der Schirmung wurde anhand eines Aufbaus mit einer Glasfaser-Preform, welche unterschiedliche Dicken aufwies, auf einem Aluminiumwerkzeug untersucht. Der unterschiedliche Abstand des auf der Preform positionierten Sensors führt bei Verwendung eines Flexiblen Flachkabels (FFC) zu einem sehr inhomogenen Signalverlauf. Bei Verwendung des geschirmten Sensors ergeben sich keine derart großen Schwankungen. Insbesondere bei Verwendung eines differentiellen Messverfahrens, bei dem gegenpolige Spannungspulse in die Leiterbahnen eingeleitet werden, ergibt sich ein sehr ebener Signalverlauf, der eine Auswertung erleichtert.

Infiltrationsversuche zeigten eine gute Übereinstimmung des gemessenen Fließfrontfortschritts mit optischen Messungen. Im Gegensatz zu FFC Sensoren kann ein geringeres Signal-Rausch-Verhältnis festgestellt werden. In Abbildung 99 sind beispielhaft die optisch und mittels TDR ermittelte Fließfrontposition während einer Infiltration dargestellt. Die optische Auswertung erfolgte anhand eines neben dem Aufbau positionierten Lineals. Das Funktionsprinzip des geschirmten Sensors konnte somit demonstriert werden. Allerdings beeinflusst der Sensor aufgrund seiner Größe die Fließfront, da es zu Racetracking Effekten kommt. Eine Miniaturisierung des Sensors stellt somit eine sinnvolle Fortführung der Untersuchungen dar.

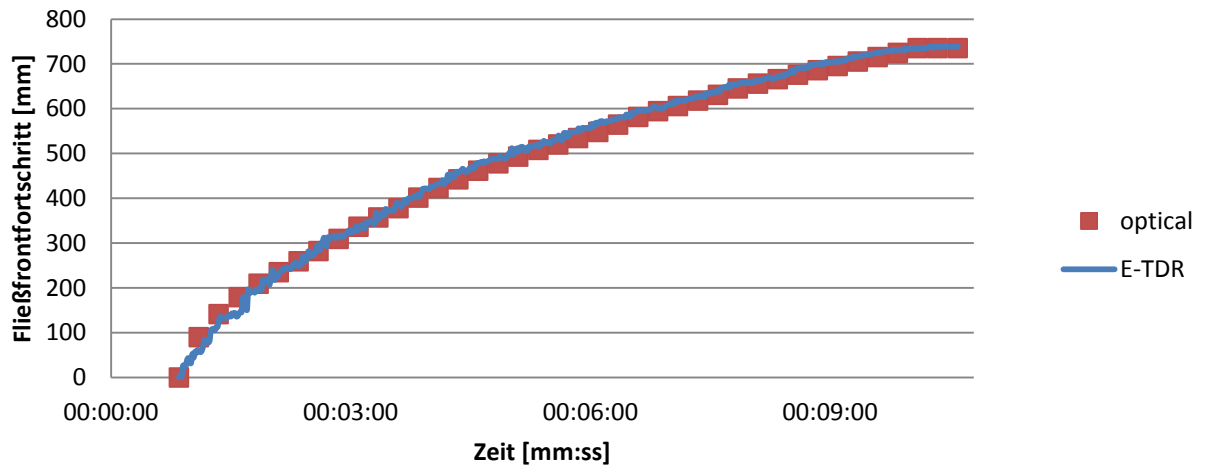


Abbildung 99: Fließfrontposition während Infiltration einer C-Faser Preform mit RTM6 Harz

Eine Korrelation der gemessenen Veränderung des Reflexionskoeffizienten während der Aushärtung von RTM6 Harz bei unterschiedlichen Temperaturen mit DSC Messungen zeigte einen leicht unterschiedlichen Verlauf der Kurven mit einem früheren Einsetzen des Anstiegs und einem flacheren Anstieg für die TDR Kurven (siehe Abbildung 100). Mögliche Gründe für diese Unterschiede sind eine thermische Ausdehnung des Sensors sowie ein geringfügig schnellerer Temperaturanstieg im Inneren des Sensors als außerhalb. Dort wurden die Thermoelemente platziert anhand derer die DSC Messung gefahren wurde. Da die TDR Kurven sich aber zueinander ähnlich verhalten wie die DSC Kurven zueinander, erscheint es plausibel aus den Daten eine Information über die Aushärtung abzuleiten. So korreliert der Schnittpunkt des linearen Bereichs der TDR Kurven mit der horizontalen Linie, die 100% Vernetzung entspräche, gut mit dem Punkt an dem ein Abflachen der DSC Kurven ein Ende der Vernetzung signalisiert.

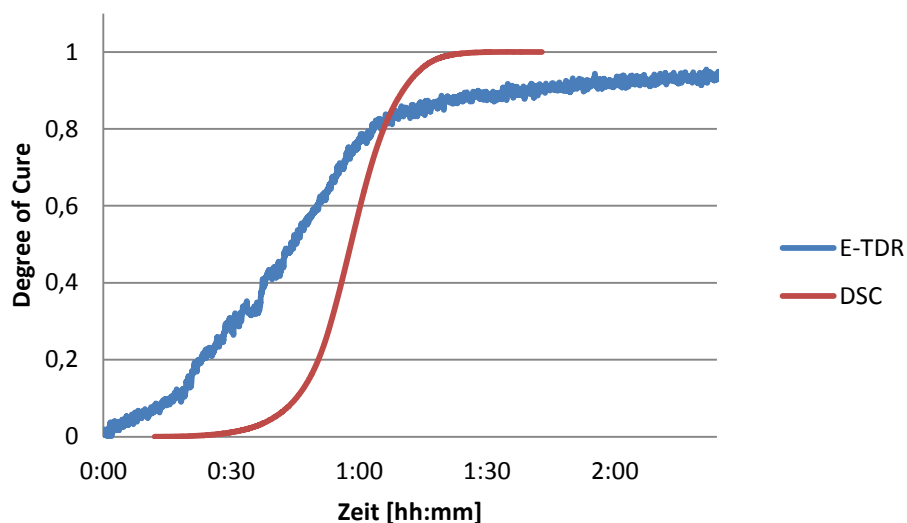


Abbildung 100: Korrelation der Veränderung des Reflexionskoeffizienten während der Aushärtung mit DSC Messungen

Die mit diesen Versuchen abgeschlossenen Untersuchungen zeigen, dass Zeitbereichsreflektometrie eine geeignete Methode zur Überwachung von Fließfrontposition und Aushärtegrad bei Infusionsprozessen darstellt. Insbesondere konnte gezeigt werden, dass sich auch mit günstigem Messequipment präzise Messungen durchführen lassen. Durch die geschirmte Sensorgeometrie in Kombination mit dem differentiellen Messverfahren konnte der Einfluss leitender Materialien reduziert werden, was die Methode auch für Anwendungen im Bereich der Luftfahrt interessant macht. Die geplante Demonstration der Anwendbarkeit des Konzeptes konnte somit erreicht werden. Nach Durchführung weiterer Untersuchungen hinsichtlich einer Miniaturisierung der Sensorgeometrie und verbesserter Algorithmen zur Signalauswertung ist eine Anwendung im Serienbetrieb vorstellbar.

6.6.2 Untersuchung der Einflüsse integrierter Sensorik auf die mechanischen Lamineigenschaften

Zur besseren Übersichtlichkeit sind die Ergebnisse der Untersuchungen in Kapitel 6.3.2 im Unterkapitel 6.3.2.8 aufgeführt.

6.7 AP 5.1 Methoden für die Prozessbeschreibung

Im Rahmen des Teilprojektes 5 Analyse und Effekte konzentriert sich die Arbeit auf die Entwicklung einer Beschreibungsmethodik für Faserverbundprozesse, die durch Erfassung von Ist- und Soll-Prozessen die Grundlage einer späteren Prozessanalyse darstellen soll. Ein Teil der folgenden Ausführungen fand bereits in [1] Erwähnung

Die Planung des Projektes sah vor, sämtliche methodischen Schritte mit einer Vorlaufzeit von zwei bis 3 Monaten an einem Pilotprozess zu testen und zu optimieren, um die auf diese Weise validierten Methoden auf verschiedene andere Fertigungsprozesse zu übertragen. Hierzu wurde der Fertigungsprozess für die Bathtub Panels des Airbus A380 ausgewählt. Um den Fertigungsprozess und die beteiligten Mitarbeiter kennenzulernen, wurde eine eintägige Besichtigung der Fertigung am Standort Augsburg durchgeführt. Zudem wurden auch mögliche weitere für RoCk in Frage kommende Prozesse an den Standorten Nordenham (Rumpfschalen A350), Bremen (Thermoplast-Clips A350) und Augsburg (Rumpfschalen A350, Druckkalotten A350 & B787) besichtigt.

Nach der Besichtigung der Fertigung der Bathtub Panels wurde ein Workshop mit den am Prozess beteiligten Mitarbeitern geplant und durchgeführt. Der beteiligte Personenkreis wurde neben dem Projekt Kernteam auf den Prozessingenieur, den Fertigungsmeister, einen Prüfer und einen Mitarbeiter aus dem Bereich Quality Engineering begrenzt. In Absprache mit dem Prozessingenieur wurde im Vorfeld des Workshops ein Prozessplan erstellt, anhand dessen die Teilprozesse der Fertigung besprochen wurden. Zudem wurden an die Teilnehmer einseitige Fragebögen verschickt, um als besonders kritisch erachtete Punkte und Teilprozesse bereits im Vorfeld zu in Erfahrung zu bringen und die aktive Vorbereitung auf den Workshop zu fördern. Um jeden Teilprozess in gleicher Weise zu behandeln, wurden Formulare mit Fragen erstellt, die für jeden Teilprozess beantwortet werden sollten und die von den Mitgliedern des Kernteams ausgefüllt wurden.

Die Arbeit im Workshop war sehr produktiv und es konnten wertvolle Informationen hinsichtlich den Prozessbeziehungen und auftretender Probleme gewonnen werden. Auch von den Teilnehmern des Workshops wurde dessen Durchführung durchaus positiv bewertet.

6.7.1 Prozessstrukturierung

Im Rahmen der Literaturrecherche und unter Berücksichtigung der bereits bei PAG verwendeten Werkzeuge zur Prozessvisualisierung wurde als Grundgerüst der graphischen Prozessbeschreibung das Ablaufdiagramm nach DIN 66001 gewählt. Auch der im Workshop verwendete Prozessplan wurde in Anlehnung an DIN 66001 erstellt. Allerdings muss diese rein graphische Beschreibungsform zur effizienten Beschreibung von Faserverbundfertigungsprozessen um weitere Funktionalitäten erweitert werden. Um die Beschreibungstiefe und den Detaillierungsgrad innerhalb des Prozesses variabel gestalten zu können und an Probleme und Unklarheiten bei bestimmten Teilprozessen anzupassen, wurde eine hierarchische Prozessbeschreibung definiert. Deren Grundelemente sind in Abbildung 101 dargestellt.

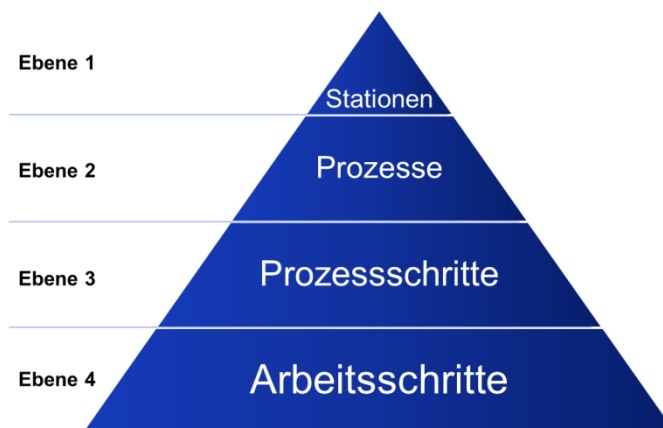


Abbildung 101: Hierarchieebenen der Prozessbeschreibung

Die Einteilung der Stationen richtet sich dabei nach den räumlich abgegrenzten Bereichen innerhalb der Fertigung. Als Prozesse sind Logistikvorgänge zwischen den Stationen und komplexe Arbeitsfolgen wie z.B. das Lay-Up zusammengefasst. Prozessschritte liefern eine feinere Detaillierung hinsichtlich der verwendeten Materialien, z.B. Hilfs- bzw. Werkstoffe, während Arbeitsschritte nicht weiter sinnvoll unterteilbare Arbeitsvorgänge wie das Ablegen einzelner Lagen beinhalten. Durch eine Erfassung von Vorgänger- und Nachfolgerprozessen sowie ein eindeutiges Nummerierungsschema ist eine eindeutige Zuordnung der Prozesse möglich. Um die graphische Darstellung der Hierarchisierung übersichtlich zu gestalten, können Elemente der BPMN wie expandierbare Prozesssymbole in die Beschreibung integriert werden. Die Umsetzung der Beschreibung in ein Software Tool ist jedoch nicht vor der Verifikation ihrer Anwendbarkeit sinnvoll.

Neben der zeitlichen Abfolge der Teilprozesse soll die Beschreibungsmethodik auch Prozessbeziehungen abbilden können. Dazu wurde eine Systematik entwickelt, wie sol-

che Beziehungen und Abhängigkeiten durch Mitarbeiter quantitativ unter Berücksichtigung von Unsicherheiten erfasst werden können. Zur Sammlung sämtlicher Daten wurde eine relationale Datenbank erstellt. Auf diese Weise ist sichergestellt, dass die erfassten Daten in konsistenter Form vorhanden sind und für spätere Analysen genutzt werden können. In dieser Datenbank können auch Prozesszeiten und Kosten erfasst werden, um unterschiedliche Sichten auf den Prozess zu ermöglichen.

Für die Wabenstabilisierung als Teil des Bathtub-Prozesses wurde die Datenbank in Zusammenarbeit mit dem Prozessingenieur und unter Berücksichtigung verschiedener Prozessdokumente und der während des Workshops generierten Daten gefüllt. Dabei wurden sowohl durch die Prozessdokumente vorgegebene Soll-Daten als auch im Ist-Prozess auftretende Probleme und bestehende Unklarheiten erfasst.

6.7.2 Prozessvisualisierung

Aufbauend auf der entwickelten Systematik zur Strukturierung der Fertigungsprozesse wurden in Zusammenarbeit mit der Premium AEROTEC GmbH Darstellungsformen ausgewählt, mit denen die in der Faserverbundfertigung ablaufenden Prozesse visualisiert werden können. Diese Darstellungen beschränken sich auf die beiden obersten und damit grobsten Ebenen der Prozessstruktur. Diese Ebenen umfassen Stationen und Prozesse. Die ausgewählten Darstellungsformen sind ein Ablaufdiagramm, das sich an der Norm DIN 66001 orientiert, und eine vom Informationsgehalt umfangreichere Prozessorientierte Darstellung.

Die Prozessdarstellungen sollen an unterschiedlichen Stellen des Projektes RoCk zum Einsatz kommen. Das Flussdiagramm bietet sich als Diskussionsgrundlage an, um in Workshops mit am Prozess beteiligten Mitarbeitern Probleme bestimmten Prozessen zuzuordnen und Prozesszusammenhänge klar artikulieren zu können. Im Vergleich dazu eignet sich die Prozessorientierte Darstellung, um die komplexen Erkenntnisse der Prozessanalyse zu visualisieren. Da diese erst im weiteren Verlauf des Projektes erfolgt, wurde die Darstellung in Form eines Flussdiagramms primär betrachtet. Die nachfolgende Abbildung stellt beispielhaft den Beginn des als Pilotprozess ausgewählten Fertigungsprozesses der Bathtub Panels des Airbus A380 als Flussdiagramm dar. Dabei stellen die horizontalen Bereiche (Swimlanes) die Stationen und die rechteckigen Symbole die Prozesse dar.

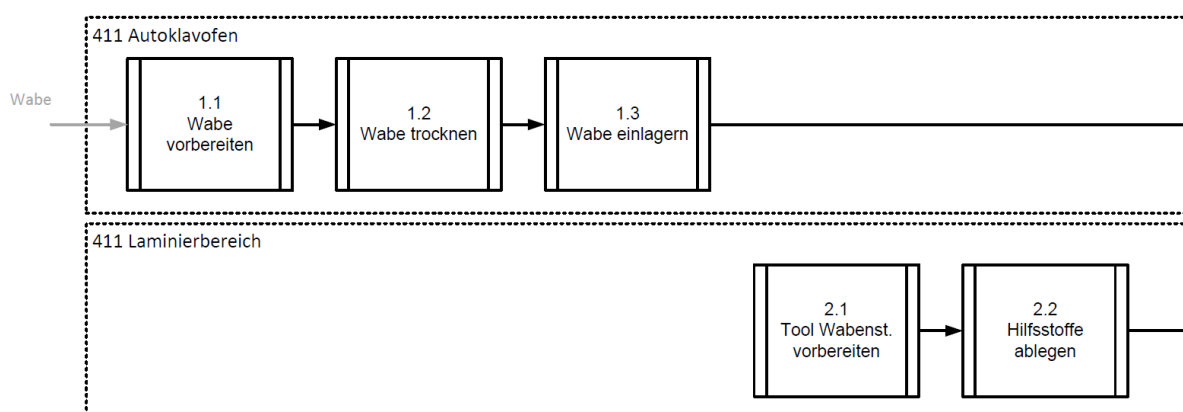


Abbildung 102 Beispielhafte Darstellung des Flussdiagramms

Die Darstellung in Form des Flussdiagramms wurde in verschiedenen Dokumenten eindeutig definiert, um Einheitlichkeit bei den Darstellungen unterschiedlicher Fertigungsprozesse zu gewährleisten. Diese Dokumente beinhalten u.a. Informationen über die genaue Darstellung der Prozess- und Stationssymbole und deren Verbinder, die Nummerierung der Prozesse und die exakte Positionierung der Symbole zueinander.

Um die Nutzbarkeit der Darstellungsformen in der Fertigung sicherzustellen, wurden die verschiedenen Entwicklungsschritte der Darstellung eng mit Fertigungs- und Entwicklungsabteilungen der Premium AEROTEC GmbH abgestimmt. Besonderer Wert wurde bei der Prozessdarstellung auf eine Nutzbarkeit der gesammelten Daten für weitere Schritte hin zur Prozessanalyse gelegt. Um dies zu erreichen, ist es notwendig, die Darstellung in digitaler Form zu generieren.

In digitaler Form kann die Darstellung als primäres Werkzeug zur Erfassung der Prozessstruktur genutzt werden. Gegenüber einer Erfassung der Prozessstruktur in Tabellenform bietet sie diverse Vorteile. So ist es in der graphischen Darstellung einfacher, Fehler in der Prozessreihenfolge zu identifizieren und zu korrigieren, oder die Darstellung um fehlende Prozesse zu ergänzen. Zudem ist die Differenzierung zwischen Prozessen und Stationen sehr eindeutig. Eine Darstellung in Tabellenform erlaubt außerdem keine übersichtliche Darstellung der Prozesszusammenhänge, da Verbindungen nur über die Angabe von Vorgängern und Nachfolgern in zusätzlichen Spalten erfolgen kann.

Um die Erstellung des Flussdiagramms auch Mitarbeitern mit nur geringen Software Kenntnissen zu ermöglichen, wurde eine intuitiv zu nutzende Schablone entwickelt. Diese Schablone basiert auf Microsoft Visio und ermöglicht ein Erstellen des Flussdiagramms durch Drag&Drop vordefinierter Symbole. Durch eine automatische Größenanpassung des Zeichenblattes wird die Übersichtlichkeit der Darstellung gewährleistet. Zudem wird durch Abfrage der Koordinaten der auf dem Zeichenblatt eingefügten Symbole eine falsche Positionierung verhindert und eine einheitliche, strukturierte Darstellungsform erreicht. Dies ist wichtig, da z.B. variierende Abstände zwischen Prozessen den Betrachter irritieren können und seine Aufmerksamkeit auf möglicherweise unwichtige Prozesse lenken. Eine objektive Betrachtung des Diagramms wird dadurch verhindert. Durch die Option, sich Hilfe anzeigen zu lassen, wird der Umgang mit der Schablone zusätzlich erleichtert.

Da die Schablone als Werkzeug zur Prozesserfassung dienen soll, wurden zudem Möglichkeiten integriert, über die reine Prozessstruktur hinausgehende Informationen aufzunehmen. Dazu erscheint bei der Positionierung eines Symbols automatische ein Eingabefenster, in welchem Daten des Prozesses oder der Station eingetragen werden können. Dieses Eingabefenster kann auch jederzeit durch Doppelklick auf das entsprechende Symbol geöffnet werden. Durch ein Auswahlfenster beim Öffnen der Schablone kann der Umfang der einzutragenden Daten festgelegt werden. So kann für eine reine Erfassung der Prozessstruktur die Erfassung der Prozess und Symbolnamen ausreichen, während es im Rahmen späterer Workshops sinnvoll ist, auch Daten zu etwaigen Fehlern einzutragen. Die folgende Abbildung stellt beispielhaft die Eingabemaske dar.

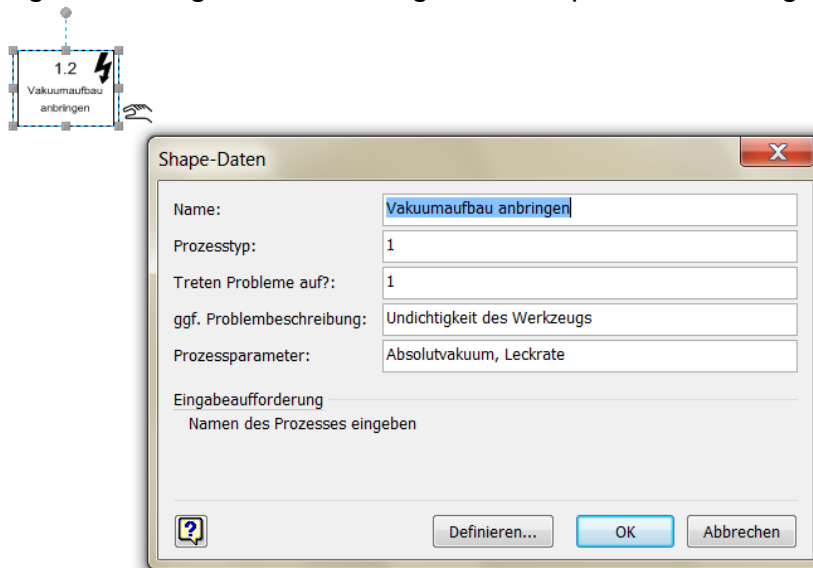


Abbildung 103 Maske zum Eintragen von Prozessdaten

Die erfassten Daten sind auch mit der graphischen Darstellung verknüpft. So wird der gewählte Prozesstyp, d.h. ob es sich um einen manuellen oder automatisierten Prozess handelt, in der graphischen Darstellung in Form eines Handsymbols (manuell) oder eines Zahnradsymbols (automatisiert) veranschaulicht. Durch ein Blitzsymbol werden Prozesse hervorgehoben, in denen Fehler auftreten. Diese intuitive Darstellung ermöglicht eine Erfassung kritischer Prozesse auf den ersten Blick.

In der Schablone wurde ein Algorithmus hinterlegt, der, basierend auf der Art des Symbols (Prozess, QS-Prozess, Station) und dessen Position auf dem Zeichenblatt, eine automatische Nummerierung vornimmt. Somit sind Fehler durch den Bediener bei der Nummerierung ausgeschlossen und eine manuelle Neunummerierung bei einer Manipulation der Prozessstruktur entfällt.

In ihrer Funktion als Werkzeug zur Erfassung der Prozessstruktur bietet die Vorlage die Möglichkeit, die Prozessstruktur in Tabellenform zu exportieren. Um eine konsistente Tabelle zu erhalten, die auch einzeln genutzt werden kann, wird in der Tabelle bei jedem erneuten Durchlauf die Station erneut genannt. Somit ist eine eindeutige Zuordenbarkeit der Prozesse zu den Stationen gewährleistet. Durch Ergänzung der Prozessstrukturtable um einen eindeutigen Schlüssel, der sich aus einem ebenfalls eindeuti-

gen Schlüssel der Symbole des Flussdiagramms ableitet, kann die Prozessstruktur als Datentabelle in eine Datenbank integriert werden.

Zur Darstellung der Einflüsse innerhalb der Prozesskette wurde ein Einfluss-Baumdiagramm entwickelt, welches sich in tabellarischer Form bereits aus der Datenbank exportieren lässt. Diese Variation eines Baumdiagramms hat als Wurzel eine Bauteileigenschaft (KC). Diese wird mit dem letzten Prozess der Prozesskette verknüpft, der einen Einfluss auf die Bauteileigenschaft hat. Dem Prozess können dann Parameter zugeordnet werden. Zudem werden KCs erfasst, die als Eingangsgrößen des Prozesses dienen. Nimmt man diese KCs wiederum als Ausgangsgrößen vorangegangener Prozesse an, lässt sich eine vollständige Einflusskette über die Prozesse der Prozesskette hinweg aufbauen. Dabei werden Prozesse als rechteckige Symbole, KCs als abgerundete, rechteckige Symbole und KPPs als ovale Symbole dargestellt.

6.7.3 Datenbankentwurf

Ein erster Entwurf sieht dabei eine relationale Datenbank vor, in der die Prozessstrukturtabelle mit weiteren Tabellen wie Sensorik, Prozessdokumenten, Schlüsselmerkmalen des Prozesses (KPPs), Schlüsselmerkmalen der Bauteile (KCs) u.v.m. verknüpft werden kann. Diese Verknüpfungen zwischen den Datentabellen werden in einer Relationen-Tabelle gespeichert. Anders als bei Verweisen auf andere Datentabellen in einer Spalte einer Datentabelle sind so n:m Verknüpfungen zwischen den Tabellen möglich. Das bedeutet, dass z.B. einem Prozess mehrere Sensoren zugeordnet werden können und ein Sensor mit mehreren Prozessen verknüpft werden kann. Zudem wird durch die Verwendung der Relationstabellen eine hohe Normalform der Datenbank erreicht. Diese ist Voraussetzung für ein fehlerfreies Funktionieren der Datenbank.

Da die einzelnen Relationen wie auch die Elemente der Datentabellen über eindeutige IDs verfügen, kann jeder Relation ein weiteres Element zugeordnet werden. Auf diese Weise ist es z.B. möglich, einem materiellen Gut, das in einen Prozess eintritt und nur durch die Verknüpfung *Prozess-Gut* eindeutig bestimmt ist, eine KC zuzuordnen, die dieses Gut aufweist.

Die folgende Abbildung stellt einen ersten Entwurf der Datenbankstruktur dar.

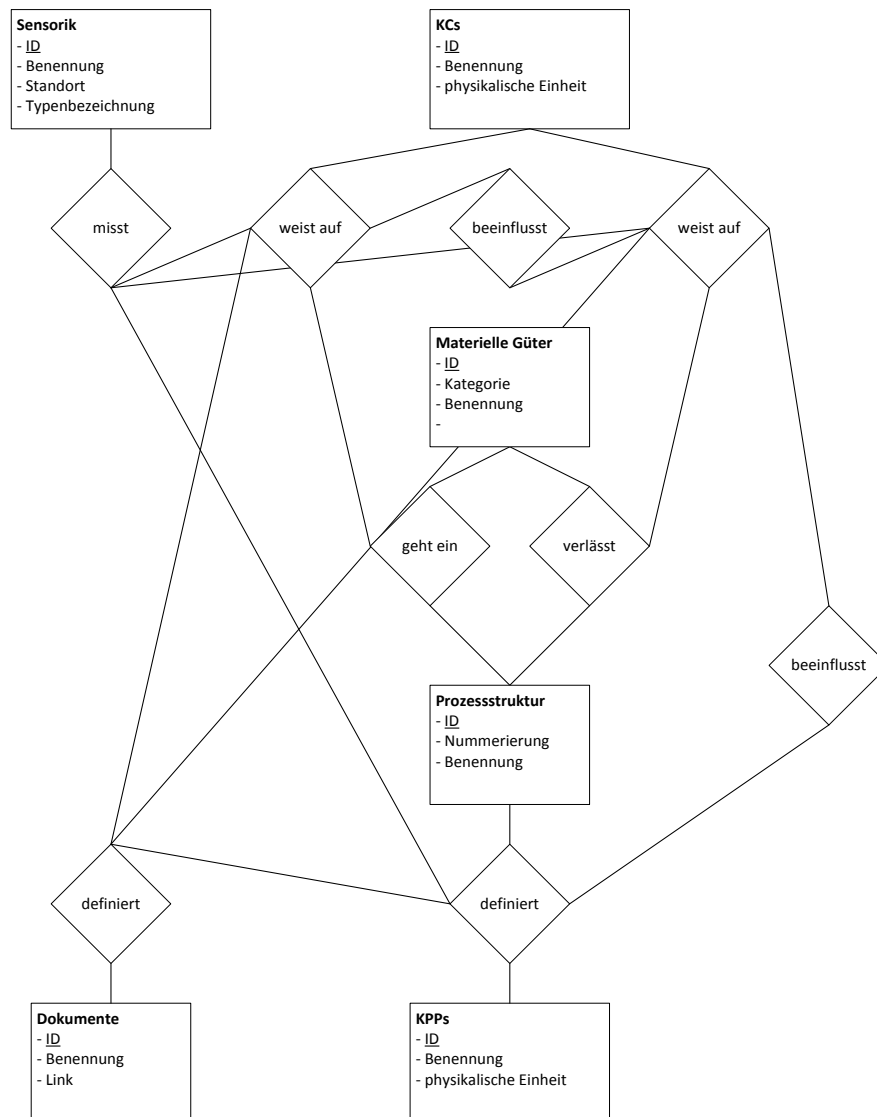


Abbildung 104 Datenbankstruktur

Dabei sind Datentabellen als Rechtecke und Relationen als Rauten dargestellt. Die ID stellt immer den eindeutigen Schlüssel der Datentabelle dar. Durch Definition von Relationstypen lassen sich die Relationen in einer einzigen Datentabelle sammeln. Inwieweit das die Performance der Datenbank steigert, muss untersucht werden. Durch Erstellung eines übersichtlichen Front-Ends ist es möglich, die Datenbank auch ohne Vorkenntnisse zu füllen, und Prozesszusammenhänge in eindeutiger Form zu speichern. Durch Abfragen können diese Zusammenhänge dann z.B. in Abhängigkeit von Prozessabweichungen ausgelesen werden und einem Soll-Ist-Vergleich als Bestandteil der Prozessanalyse zugeführt werden.

In Fortführung der Arbeiten wurde das in 12/2 entwickelte Datenbankmodell in eine Datenbank auf Basis von MySQL umgesetzt. Bei MySQL handelt es sich um ein populäres, relationales Datenbankverwaltungssystem welches auf der Datenbanksprache SQL basiert.

6.8 AP 5.2 Analysemethoden für Einflussfaktoren

6.8.1 Untersuchung der Abreißgewebeentformung

6.8.1.1 Prozessanalyse

Eine Analyse der Prozessbeschreibung für den Fertigungsprozess großer Schalenbauteile wurde in enger Abstimmung mit der Fertigungsabteilung der Premium AEROTEC GmbH durchgeführt. Ein Teil der beschriebenen Untersuchungen fand bereits in Quellen [2,4] Erwähnung.

Dabei zeigte sich, dass der Prozess der Entformung des Bauteils einen kritischen Prozess darstellt. Bei jeder Druckkalotte entstehen beim manuellen Entfernen des Abreißgewebes von der Oberfläche Faserausrisse. Diese sind zum einen auf das verwendete Material und die Bauteilgeometrie mit vielen an der Oberfläche endenden Faserlagen zurückzuführen.

6.8.1.2 Versuchsdurchführung

Da eine Umsetzung aller Parameter in einem Versuchsprogramm nicht möglich ist, wurden sechs Größen ausgewählt, die vermutlich den größten Einfluss auf Faserausrisse haben, und die sich in einem vereinfachten Versuchsaufbau nachbilden lassen. Untersucht wurde der Einfluss der in Tabelle 4 aufgelisteten Parameter.

Tabelle 4: Untersuchte Einflussparameter auf Abzugskraft

Faktor	-1 Stufe	+1 Stufe
Abreißgeschwindigkeit [mm/min]	100	500
Abzugswinkel [°]	90	165
Entformtemperatur [°C]	23	60
Dauer des Preformings [min]	155	275
Normierter thermoplastischer Matrixanteil [%]	0	100
Abreißgewebeorientierung gegenüber Abzugsrichtung[°]	0	45

Für ein erstes Screening zur Abschätzung, welche Parameter, Faserausrisse bedingen, wurde ein teilfaktorieller, zweistufiger Versuchsplan mit den Stufen aus Tabelle 4 erstellt. Auf diese Weise konnte der Versuchsumfang gegenüber einem vollfaktoriellen Versuchsplan auf ein Viertel reduziert werden. Da Faserausrisse nur schwer zu erzeugen sind, wurde eine Auswertung nach der Abzugskraft vorgenommen, die einen maßgeblichen Einfluss auf die Entstehung von Faserausrisse hat. Durch eine Probengeometrie mit mehreren Stufen wurde die Struktur der Bauteiloberfläche nachgebildet, um zu analysieren, ob ein bestimmter Winkel der Lagen an der Oberfläche Faserausrisse begünstigt. Um die Steifigkeit zu erhöhen wurde das Abreißgewebe, welches auf die Probe aufgebracht wurde, neben der Probe doppelt gelegt da es später im Zugversuch zur Einspannung dient.

Da keine Prüfnorm existiert, die den Prozess des Entfernen des Abreißgewebes realistisch abbildet, wurde eine spezielle Prüfvorrichtung konstruiert. Deren Aufbau orientiert sich an einer Norm für Klebebänder, da der Vorgang des Abschälens von Klebeband

dem der manuellen Entformung von CFK-Bauteilen sehr nahe kommt. Die Prüfvorrichtung ist in Abbildung 105 dargestellt.



Abbildung 105: Prüfvorrichtung für Abreiß-Versuche

Die größte Schwierigkeit bei der Prüfung besteht darin, den Abzugswinkel über den gesamten Versuch konstant zu halten. Dazu muss die Linie, auf der das Abreißgewebe von der Probe getrennt wird, immer unter der Einspannung liegen. Um dies zu erreichen wird die Probe über die in Abbildung 105 sichtbaren Schnellspanner auf einem beweglichen Tisch befestigt, der sich mit der gleichen Geschwindigkeit, in der das Abreißgewebe nach oben gezogen wird, horizontal (im Fall des Abzugs senkrecht zur Probe) bewegt. Die Lagerung des Tisches erfolgt über die in Abbildung 105 zu sehenden weißen Kunststoffrollen. Die Bewegung des Tisches wird über Stahlseile realisiert, die mit der oberen Traverse der Prüfmaschine verbunden sind. Um verschiedene Winkel zu prüfen, wurde der Tisch drehbar konstruiert. Für eine Prüfung bei erhöhten Temperaturen kann der Tisch über eine elektrische Flächenheizung auf 60°C erhitzt werden. Die Prüfvorrichtung wurde in eine statische Prüfmaschine integriert, die eine maximale Prüfgeschwindigkeit von 500mm/min aufweist.

6.8.1.2.1 Generierung von Faserausrissen

Da anhand der gefertigten Proben in den Versuchen keine Faserausrisse generiert werden konnten, wurde ein Verfahren entwickelt, Faserausrisse zu provozieren. Dazu wurden mittels einer Standbohrmaschine fünf gleichmäßig über die Probenbreite verteilte Löcher in die Proben gebohrt. Das Bohren der Löcher erfolgte randomisiert, um einen Effekt des sich möglicherweise abnutzenden Bohrers auszuschließen. Anschließend wurde das Abreißgewebe entfernt.

6.8.1.2.2 Bestimmung der Zugsteifigkeit der Abreißgewebe

Basierend auf diesen Erkenntnissen wurden zur Validierung der These, die gemessene Kraft stehe in Zusammenhang mit der Zugsteifigkeit des Abreißgewebes, Zugproben aus trockenem und infiltriertem Abreißgewebe gefertigt und geprüft. Dazu wurde ein dünnes Laminat mit Abreißgewebe belegt und infiltriert. Anschließend wurden Proben der Dimension 50mm x 200mm zugesägt und das Abreißgewebe händisch in einem Winkel von ca. 165° entfernt. Die Abreißgewebestreifen wurden anschließend einer Zugprüfung in Anlehnung an EN ISO 13934-1 unterzogen. Die freie Länge der Proben betrug 100mm. Da die Versuche zur vergleichenden Analyse der Abreißgewebe dienen sollten wurde zur Berechnung der Steifigkeit der von der Prüfmaschine gemessene Weg genutzt. Etwaige Dehnungen der Prüfvorrichtung werden bei allen Proben als identisch angenommen und sind somit vernachlässigbar. Vor dem Einspannen der Proben wurde die Distanz zwischen den Spannbacken um 0,1mm reduziert und anschließend die Probe eingespannt. Anschließend wurde eine Vorspannung von ca. 3N auf die Probe aufgebracht, und der Abstand der Spannbacken als Ausgangslänge notiert. Zur Berechnung der Steifigkeit wurde der Weg der zurückgelegt wird bis eine Kraft von 20N erreicht wurde gemessen. Unter Berücksichtigung der Ausgangslänge und der Breite der Proben lässt sich ein Steifigkeitswert berechnen, der der Kraft entspricht, die theoretisch notwendig ist, einen Streifen Abreißgewebe von 1mm Breite um 100% zu dehnen.

6.8.1.3 Ergebnisse

Eine Auswertung des Kraftverlaufs zeigt, dass die Kraft während des Abziehens stark oszilliert. Dies macht eine Auswertung der Versuche hinsichtlich eines einzelnen Kraftwerts, der zur statistischen Betrachtung notwendig ist, schwierig. Da bei manchen Proben das Abreißgewebe nach einer gewissen Strecke vom Rand her einreißt, wurde der Mittelwert der Kraft auf den ersten 30mm der Probe, d.h. im ebenen Bereich, bestimmt und der Versuchsplan nach diesem Wert ausgewertet. In diesem Bereich wurde das Abreißgewebe bei nahezu allen Proben auf ganzer Breite abgezogen.

Der Einfluss der untersuchten Parameter auf die Abzugskraft ist in Form eine Pareto-Diagramms in Abbildung 106 dargestellt. Dabei beschreibt der standardisierte Effekt den Einfluss einzelner Parameter oder Parameterkombinationen.

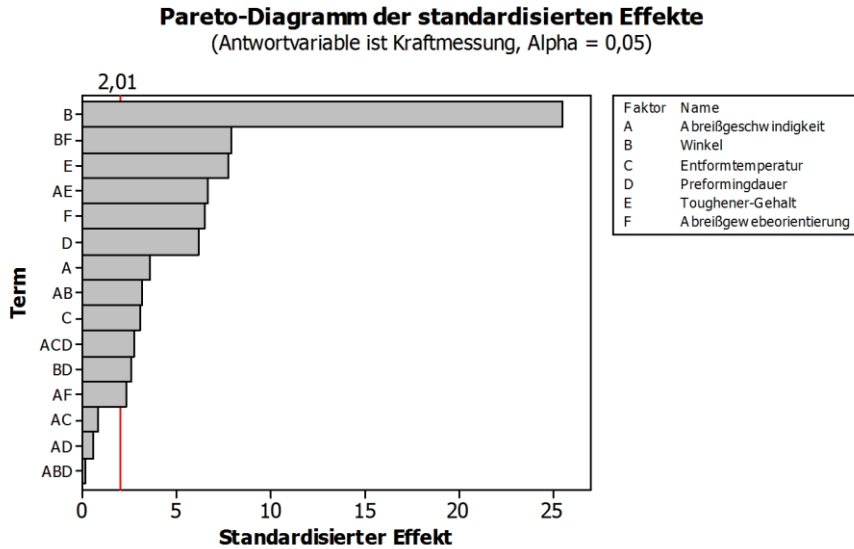


Abbildung 106: Pareto-Darstellung des Einflusses der Parameter auf die Zugkraft

Es zeigt sich, dass der Winkel, in dem das Abreißgewebe abgezogen wird, die Abzugskraft am stärksten beeinflusst. Der Gehalt des thermoplastischen Tougheners hat ebenfalls einen Einfluss, wie auch die Abreißgewebeorientierung und die Dauer des Preformings. Der kombinierte Einfluss von Winkel und Abreißgewebeorientierung kann ein Ergebnis der niedrigeren Längssteifigkeit des Abreißgewebes in 45°-Orientierung sein, die bei 165° Abzugswinkel besonders zum Tragen kommt, da hier aus Platzgründen das Abreißgewebe ganz am Ende eingespannt wird. Der Einfluss von Toughener-Gehalt und Abreißgeschwindigkeit könnte durch sprödes Bruchversagen das durch schnelles Abziehen und niedrigen Toughener-Gehalt unterstützt wird bedingt sein. Gegenüber den genannten Einflüssen sind die Einflüsse der übrigen Parameter zu vernachlässigen.

Bei der Prüfung zeigte sich, dass die starken Oszillationen das Ergebnis von Harzrückständen auf der Oberfläche des Abreißgewebes sind, die durch die für die Infiltration notwendige Fließhilfe entstehen. Da diese Riefen bei den verschiedenen Platten unterschiedlich stark ausgeprägt waren, wurde das Flächengewicht des Abreißgewebes nach dem Entformen bestimmt, um Einflüsse der Harzaufnahme auf die Abzugskraft zu identifizieren. Dazu wurden im ebenen Bereich der Probe und im Bereich der Stufen Proben entnommen und gewogen.

Dabei zeigte sich, dass der Harzgehalt und damit auch das Flächengewicht des abgerissenen Abreißgewebes im Bereich der Stufen höher liegen als im ebenen Bereich der Probe. Zudem nimmt die Abzugskraft mit steigendem Flächengewicht des Abreißgewebes zu.

Da eine statistische Auswertung des Einflusses bei unterschiedlichen Flächengewichten jeder Probenreihe nicht möglich ist, wurde die Probenplatte, aus der eine Serie entstammt, als Faktor in den Versuchsplan integriert. Dies ist vertretbar, da gezeigt werden konnte, dass das Flächengewicht innerhalb einer Platte konstant ist. Die Ergebnisse bestätigten die Erwartungen, da eine Platte mit einem erhöhten Flächengewicht eine erhöhte Abzugskraft aufwies. Durch eine Varianzanalyse konnte der große Einfluss des Faktors Platte und damit des Flächengewichts auf die Abzugskraft bestätigt werden.

6.8.1.3.1 Einfluss des Abreißwinkels

Um den Einfluss des Abzugswinkels auf die Kraft zu untersuchen, wurde die Probengeometrie gegenüber den Screening-Versuchen leicht modifiziert. Da die an der Oberfläche endenden Lagen keine Faserausrisse produzierten, wurden gleichmäßig dicke Proben gefertigt, was den Versuchsaufwand erheblich reduziert. Zudem wurde die Einspannung an den Stirnseiten der Proben vorgenommen, da so ein Einschneiden des Abreißgewebes entfallen kann.

Zur detaillierten Ermittlung des Einflusses des Abzugswinkels auf die Abzugskraft, wurde der Winkel in Schritten von 15° zwischen 90° und 165° variiert. Ein Abzugswinkel von 180° ist mit der Prüfvorrichtung nur mit erhöhtem Aufwand realisierbar und tritt auch in der Praxis nicht auf.

Als Materialien wurden sowohl Gelege von Saertex, welches mit RTM6 Harz infiltriert wurde (Material 1) als auch ein Material mit Thermoplastanteil (Material 2) verwendet. Auch Proben aus UD-Prepregmaterial (Material 3) wurden untersucht. Auf diese Weise können Unterschiede im Abreißverhalten zwischen den Materialien identifiziert werden. In Abbildung 107 ist der Verlauf der Abzugskraft über den Abzugswinkel dargestellt. Die Ergebnisse wurden bei einer Abzugsgeschwindigkeit von 500mm/min ermittelt.

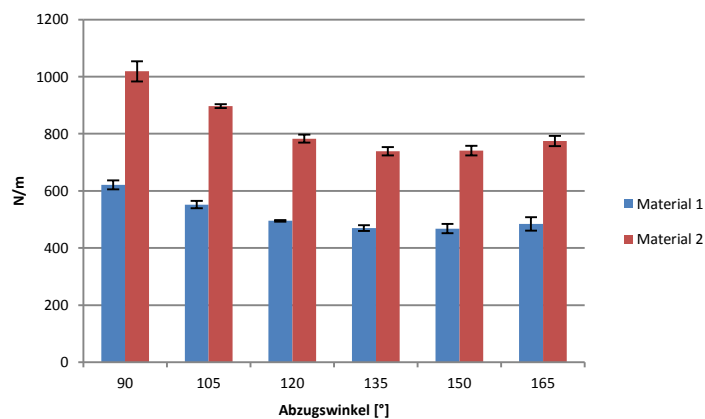


Abbildung 107: Abreißkraft in Abhängigkeit des Abzugswinkels

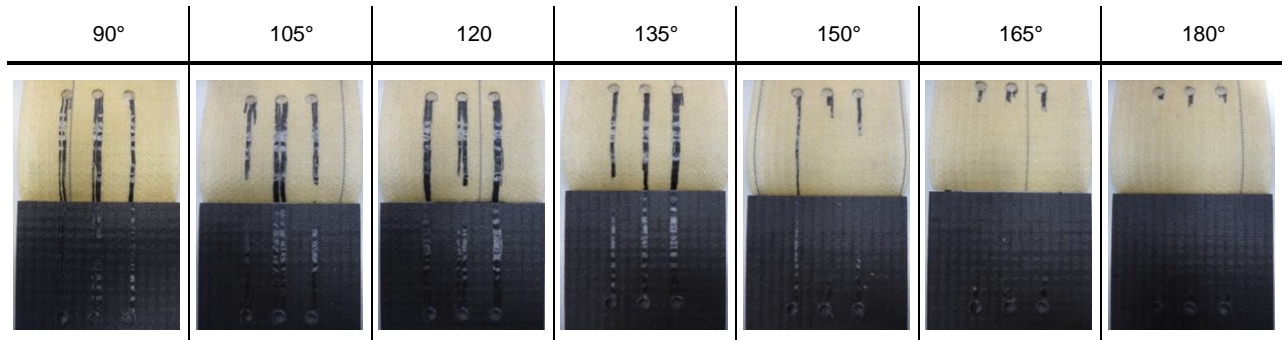
Man erkennt, dass sich bei einem Abzugswinkel von 90° die größte Abreißkraft einstellt. Das Minimum der Abreißkraft liegt im Bereich von 135° bis 150°. Auffällig ist auch, dass sich die Kurven der beiden Materialien stark ähneln. Somit ist von einer Übertragbarkeit der Ergebnisse auch auf Infusionsbauteile mit anderen Werkstoffen auszugehen. Allerdings weist das thermoplastmodifizierte Material aufgrund der höheren Zähigkeit der Matrix deutlich höhere Abzugskräfte auf. Somit ist auch das Risiko von Faserausrisse bei derartigen Materialien höher.

Die Auswertung nach den lokalen Maxima der Messkurven, die sich durch die Oszillation der Kraft ergeben sind ebenfalls in Abbildung 107 dargestellt. Dabei zeigt sich, dass die Oszillationen bei allen Winkeln die nahezu gleiche Amplitude aufweisen.

Zur Charakterisierung des Einflusses des Winkels wurden infiltrierte Proben einem im Serienbetrieb verwendeten Nylon Abreißgewebe getestet. Das Abreißgewebe wurde

mit 500mm/min unter verschiedenen Winkeln abgezogen. Die Ergebnisse sind in Tabelle 5 dargestellt.

Tabelle 5: Faserausrisse in Abhängigkeit des Abzugswinkels

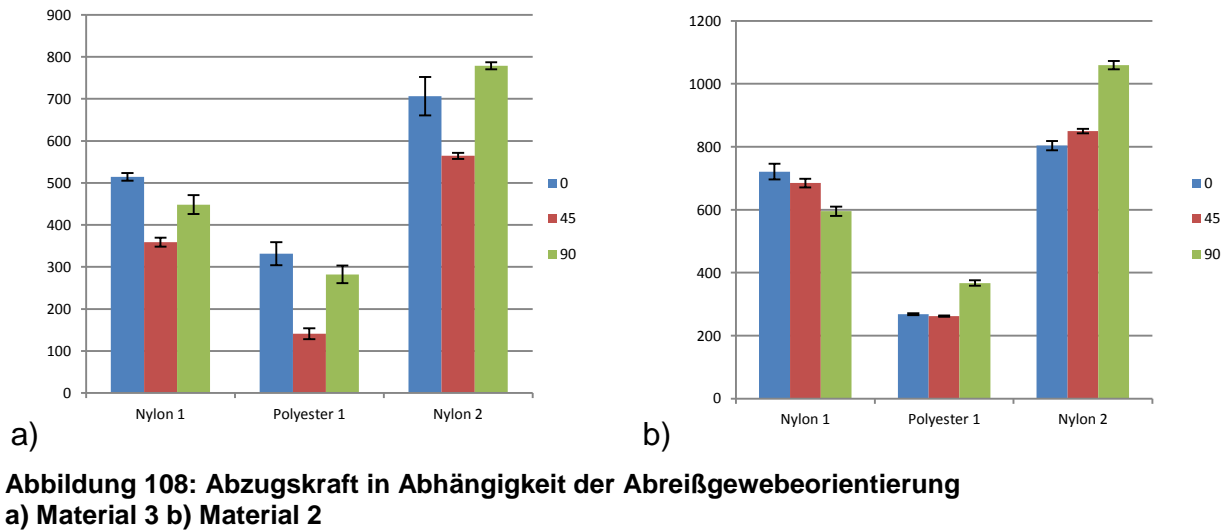


Man erkennt, dass sowohl die Breite als auch die Länge der Faserausrisse mit flacher werdendem Winkel abnimmt. Dies deckt sich mit der Erkenntnis, dass auch die Abreißkraft mit flacherem Winkel abnimmt. Dass die Faserausrisse bei einem flacheren Winkel als 135 nicht wie die Kraft zunehmen, liegt daran, dass die Fasern flachen Umlenkwinkeln nicht folgen können, und somit kurz hinter der Bohrung abbrechen. Somit ist zur Vermeidung von Faserausrisen ein möglichst flacher Winkel ideal, auch wenn dies mit etwas höheren Abreißkräften verbunden ist.

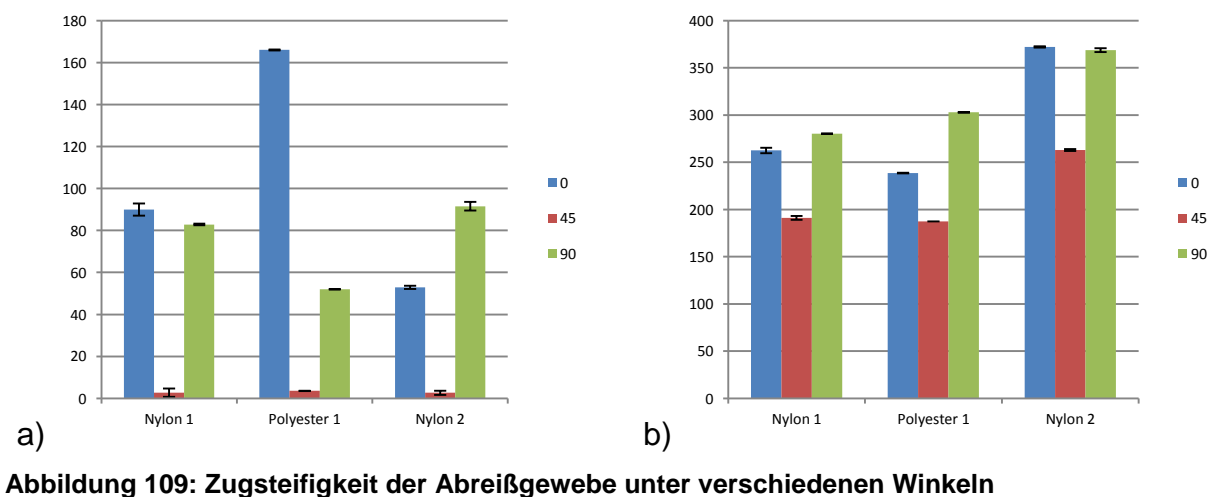
6.8.1.3.2 Einfluss der Abreißgewebeorientierung

Ein weiterer Faktor, der sich im Screening als signifikant herausgestellt hatte, ist die Orientierung des Abreißgewebes relativ zur Abzugsrichtung. Dieser Einfluss wird in einem weiteren versuchsplan detailliert untersucht. Dabei wird der Winkel zwischen den Kettfäden des Abreißgewebes und der Abzugsrichtung variiert. Ein Winkel von 0° entspricht einem Abzug in Richtung der Kettfäden. Für die Versuche werden Abreißgewebe ausgewählt, die sich hinsichtlich des Verhältnisses von Kett- zu Schussfäden voneinander unterscheiden. Dieses liegt bei Nylon1 bei 220/185, bei Polyester 1 bei 472/252 und bei Nylon 2 bei 158/158.

Abbildung 108 zeigt die Abzugskraft in Abhängigkeit der Abreißgewebeorientierung für drei ausgewählte Abreißgewebe.



Alle Abreißgewebe zeigen beim Prepreg Material 3 in 45° Richtung die geringsten Abzugskräfte. In dieser Richtung ist die Zugsteifigkeit des Abreißgewebes aufgrund der geringen Harzaufnahme sehr gering. Dies legt die Vermutung nahe, dass die Steifigkeit des Abreißgewebes die gemessene Kraft beeinflusst. Es wird vermutet, dass eine geringere Steifigkeit des Abreißgewebes dazu führt, dass Kraft zur Dehnung des Abreißgewebes verbraucht wird und sich die gemessene Kraft reduziert. In Abbildung 109 sind die gemessenen Steifigkeiten der Abreißgewebeprouben dargestellt. Vergleich man die Werte aus Abbildung 109 zeigt sich, dass das Abreißgewebe in der Richtung, in der es eine höhere Steifigkeit besitzt auch größere Abzugskräfte aufweist. Dies unterstützt die These, dass ein weniger steifes Abreißgewebe mehr Energie absorbiert und eine niedrigere Abzugskraft gemessen wird.



Bei den infiltrierten Proben ist der Unterschied der Steifigkeit mit der Orientierung deutlich geringer ausgeprägt, was dafür spricht, dass das Harz die Steifigkeit stark beeinflusst.

Ein weiterer Grund für den Einfluss der Abreißgewebeorientierung auf die Abzugskraft erklärt sich bei einer Betrachtung der Oberfläche nach dem Abreißen unter dem Mikroskop. In Abbildung 110 ist beispielhaft die Oberfläche für das Nylon 2 Abreißgewebe dargestellt.

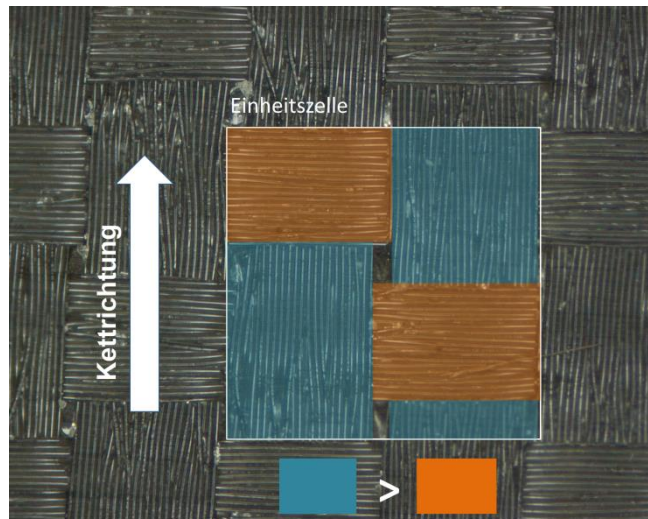
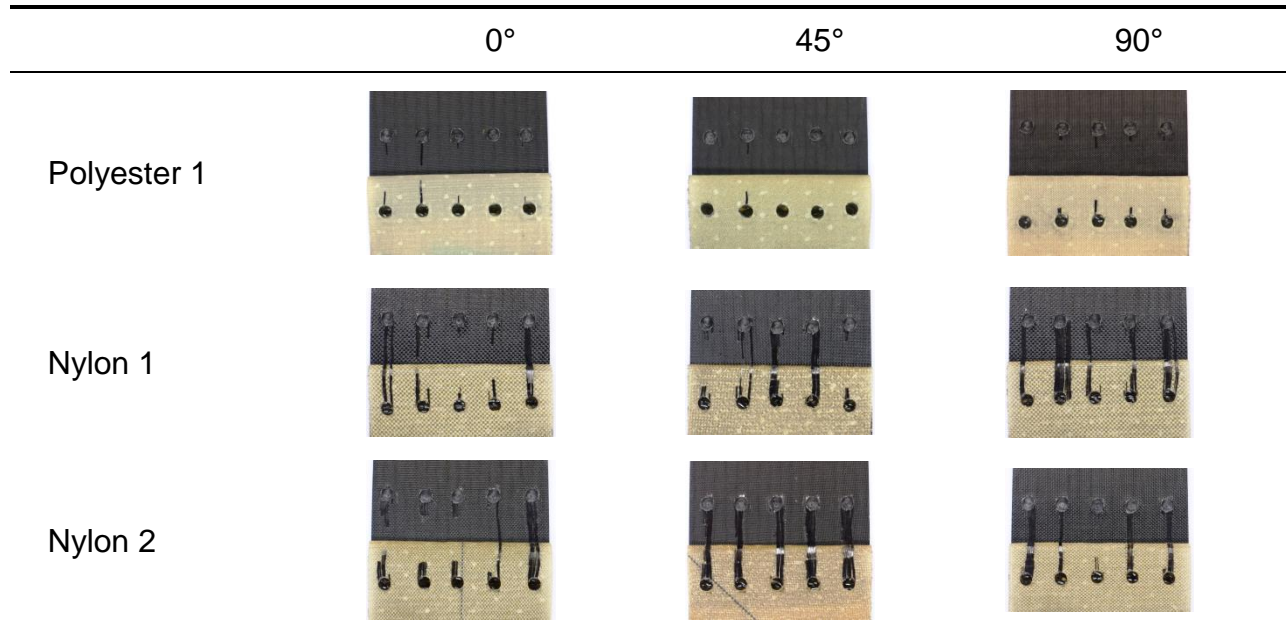


Abbildung 110: Oberfläche einer CFK Oberfläche nach dem Entformen

Es fällt auf, dass trotz gleicher Anzahl an Kett- und Schussfäden pro Dezimeter, die von den jeweiligen Fäden bedeckte Fläche variiert. Dies lässt sich leicht durch die Berechnung der Fläche für eine 2x2 Fäden große Einheitszelle verifizieren. Es zeigt sich, dass durch die engere Anordnung der Kettfäden im Vergleich zu den Schussfäden die von Kettfäden bedeckte Fläche größer ist. Die verringerte Abreißkraft beruht vermutlich auf der Tatsache, dass sich die Fäden des Abreißgewebes in Längsrichtung leichter von der Oberfläche entfernen lassen als in Querrichtung, wo der Widerstand durch die vielen einzelnen Harzkanten größer ist.

In Tabelle 6 sind die beim Abziehen an gebohrten Proben auftretenden Faserausrisse bei Infiltrationsproben dargestellt. Ein signifikanter Unterschied ist dabei bei den Proben nicht zu erkennen.

Tabelle 6: Faserausrisse in Abhängigkeit der Abreißgewebeorientierung relativ zur Abzugsrichtung



6.8.1.3.3 Einfluss des Abreißgewebematerials

Neben den verschiedenen Parametern, die den Prozess des Abreißens beeinflussen, wurde auch der Einfluss verschiedener Abreißgewebe untersucht. Getestet wurden verschiedene Abreißgewebe unterschiedlicher Hersteller aus Polyamid und Nylon, teilweise in beschichteter und unbeschichteter Ausführung. Bei einem Abzugswinkel von 165° und einer Abzugsgeschwindigkeit von 500mm/min wurden die Abzugskräfte ermittelt. Die Ergebnisse sind in Abbildung 111 dargestellt

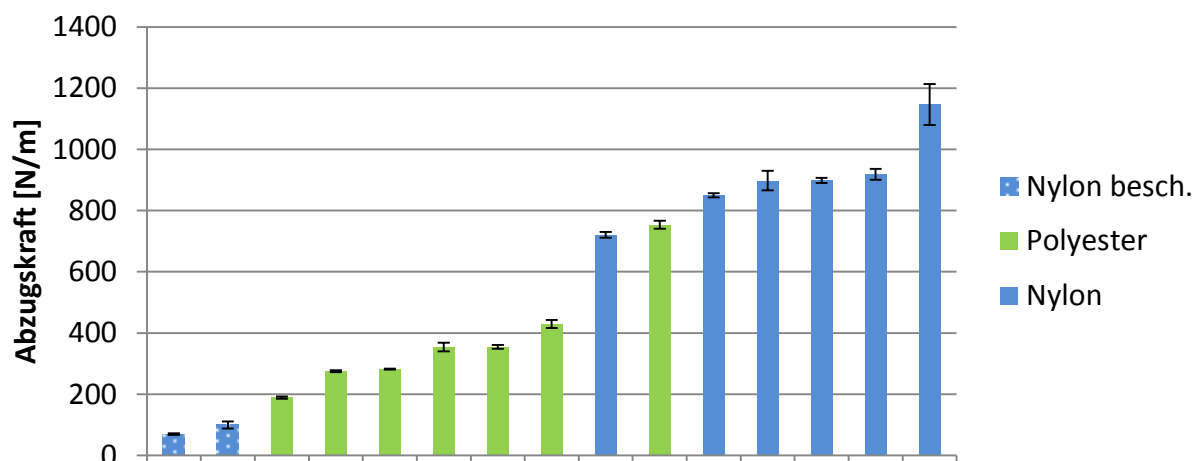


Abbildung 111: Abreißkraft verschiedener Abreißgewebe

Es fällt auf, dass beschichtete Abreißgewebe die niedrigsten Abzugskräfte besitzen. Zwischen Abreißgewebe aus Polyamid und Polyester lässt sich kein eindeutiger Unter-

schied ableiten. Allerdings lässt sich eine deutliche Tendenz bei der Aufnahme von Harz im Abreißgewebe erkennen. Dazu wurden aus dem entformten Abreißgewebe Proben entnommen und deren Flächengewicht mit dem trockenen Flächengewicht verglichen. Die Ergebnisse sind in Abbildung 112 dargestellt.

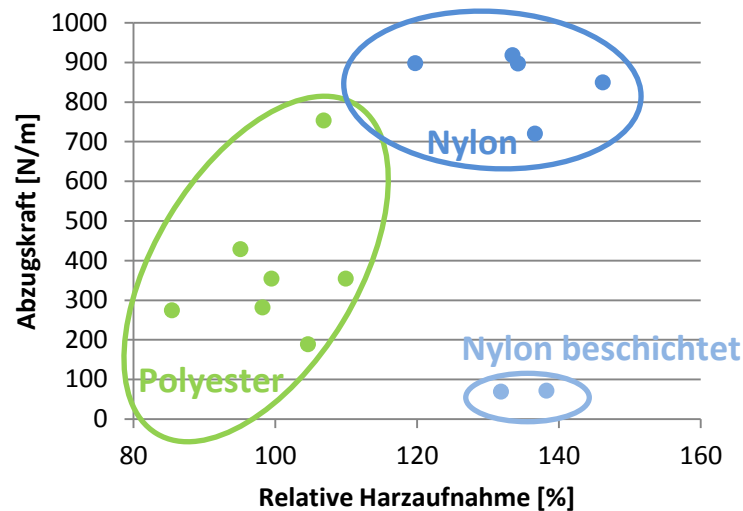
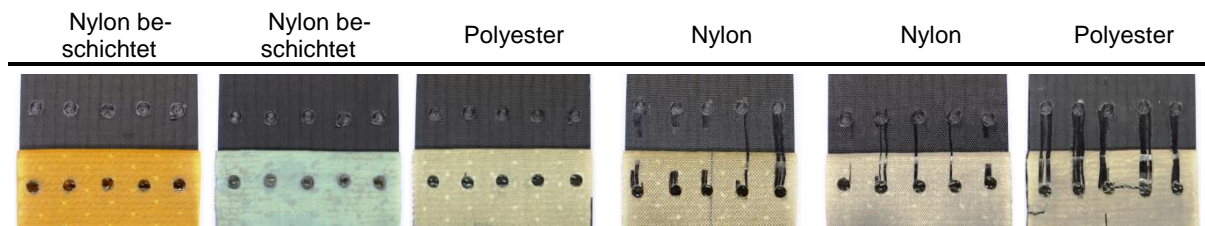


Abbildung 112: Abzugskraft in Abhängigkeit der Harzaufnahme verschiedener Abreißgewebe

Es zeigt sich, dass Polyamid Abreißgewebe mehr Harz aufnehmen, als solche aus Polyester. Dies zeigt sich sowohl bei infiltrierte Proben als auch bei Proben die aus Prepreg gefertigt wurden. Dies ist möglicherweise auf das erhöhte Quellverhalten von Polyamid zurückzuführen. Zudem unterscheiden sich die Materialien hinsichtlich ihrer Oberflächenenergie die bei Polyamid niedriger liegt als bei Polyester. Eine weitere Theorie geht von einer chemischen Reaktion des Polyamid Materials mit dem Epoxidharz aus, wodurch das Polyamid Abreißgewebe mehr Harz von der Bauteiloberfläche mitnimmt.

In einem weiteren Versuch wurde der Einfluss des Abreißgewebes auf die Entstehung von Faserausrissen untersucht. Die Entformung erfolgte bei einer Geschwindigkeit von 500mm/min unter einem Winkel von 90°. Für ausgewählte Abreißgewebe sind die Ergebnisse in Tabelle 7 dargestellt. Die Abreißgewebe sind ansteigend entsprechend ihrer Abreißkraft geordnet

Tabelle 7: Faserausrisse bei ausgewählten Abreißgeweben (Material 2)



Man erkennt, dass die Faserausrisse mit zunehmender Abzugskraft zunehmen. Dies entspricht der Erwartung, da bei höheren Abzugskräften die Wahrscheinlichkeit größer ist, dass die Anhaftung der Fasern am Abreißgewebe die Anhaftung der Fasern am Laminat übersteigt.

Für die Fertigung leitet sich daraus der Vorschlag ab, das verwendete Polyamid Abreißgewebe mit sehr hohen Abzugskräften durch eines aus Polyester zu ersetzen.

6.8.1.4 Implementierung in die Serie

Die Ergebnisse der Untersuchungen wurden Premium AEROTEC vorgestellt. Aufgrund der deutlichen Unterschiede zwischen den Abreißgeweben wurde eine Umstellung des Abreißgewebes in Betracht gezogen. Um die Ergebnisse in einem seriennahen Umfeld zu validieren, wurden Testlaminat mit verschiedenen Abreißgeweben gefertigt. Diese wiesen an der Oberfläche auslaufende Lagen auf um die Bauteiloberfläche in Frage kommender Bauteile zu imitieren. Als Abreißgewebe wurden zwei Polyester-Fabrikate ausgewählt, die von den zugelassenen Abreißgeweben die geringsten Abzugskraft und am wenigsten ausgeprägte Faserausrisse hervorriefen. In Abbildung 113 ist ein zum Teil entformtes Testlaminat dargestellt.

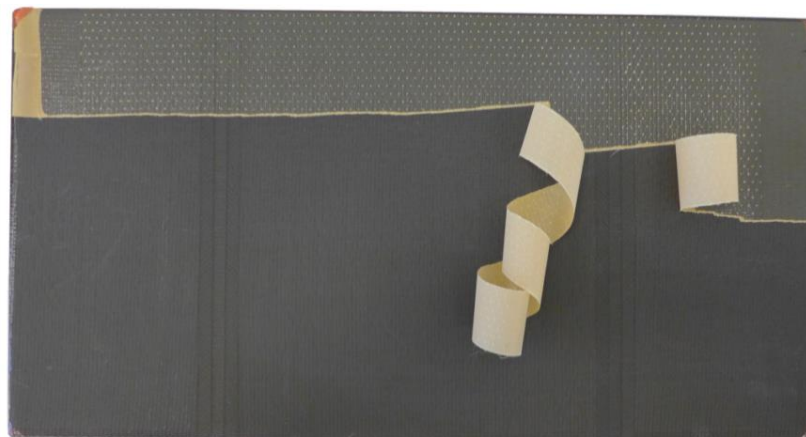


Abbildung 113: Teilweise entformtes Testlaminat zur Veranschaulichung der Abzugskraft

Bei der manuellen Entformung konnte die deutliche Reduzierung der Abzugskraft auf eine anschauliche Weise bestätigt werden.

Aufbauend auf den Versuchen und aufgrund erfolgreicher Entformversuche mit den Testplatten, wurde eine Umstellung des Abreißgewebes bei der Serienfertigung von Schalenbauteilen beschlossen.

Eine Auswertung der Prüfprotokolle in Abbildung 114 zeigt, dass bei zwei ausgewählten Bauteilen durch eine Umstellung des Abreißgewebes in Kombination mit der Einhaltung eines spitzen Abzugswinkels, Faserausrisse um mehr als 90% reduziert werden konnten.

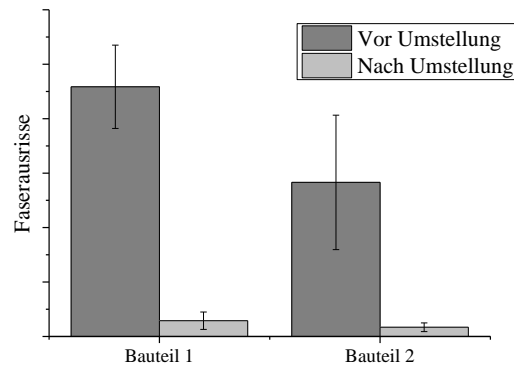


Abbildung 114: Faserausrisse vor und nach der Umstellung des Abreißgewebes

Dies ist ein großer Vorteil für die Fertigung, da der Arbeitsaufwand für Qualitätssicherungs- und Nacharbeitsschritte, die bisher einen Flaschenhals in der Prozesskette darstellten, deutlich reduziert werden konnte. Somit ergibt sich eine Verkürzung der Durchlaufzeit für das Bauteil von mehreren Stunden.

Es konnte somit für ein im Rahmen von RoCk durch die Anwendung einer systematischen Analyse identifiziertes Problem, welches bisher vernachlässigt worden war, eine Lösung gefunden werden. Ermöglicht wurde dies durch die enge und vertrauensvolle Zusammenarbeit zwischen Airbus Group Innovations und Premium AEROTEC. Durch die im Rahmen umfangreicher Versuche gewonnenen Erkenntnisse wurde eine signifikante Steigerung der Prozessrobustheit bei der Fertigung großer Schalenstrukturen in Composite Bauweise erreicht.

6.8.2 Untersuchung von Porositätsproben

Zur Analyse der Einflussfaktoren während der Fertigung auf den Porositätsgrad in CFK wurden Computertomografie-Messungen an verschiedenen Porositätsproben durchgeführt. Insgesamt wurden 31 Prüfkörper in 10 Messungen untersucht. Hierbei wurden die aufgelisteten Proben typen mit jeweils einer Referenzprobe -welche zur Schwellwertmittlung dient- gemessen.

Compression Proben	9
I.L.S.S. Proben	18
DMA Proben	3
Referenzprobe	1

Tabelle 8: Übersicht der untersuchten Porositätsproben

Folgende Testparameter wurden gewählt:

Röntgenröhreneinstellung	
Spannung	80 kV
Strom	300 μ A
Detektoreinstellung	
Belichtungszeit	999 ms
Mittelungen	keine
Gain	1
Aufnahmeparameter	
Voxelgröße	15 μ m (20 μ m)

Tabelle 9: Testparameter der CT Messungen an Porositätsproben

Die Voxelgröße der „Compression“ Proben haben eine GFK Aufdickung (Spannflächen für mech. Tests), weshalb durch die gegebenen CT-Systemeigenschaften eine Voxelgröße von 20 μ m gewählt wurde. Alle weiteren wurden mit 15 μ m gemessen.

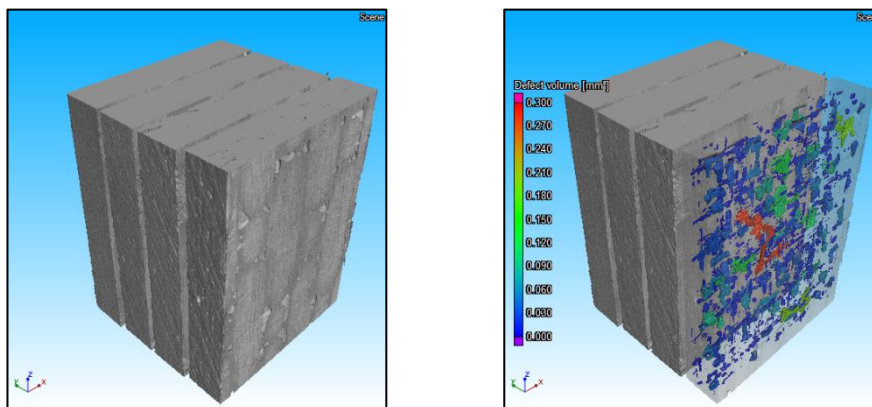


Abbildung 115: Gerenderte Rekonstruktion dreier DMA CT-Messungen (links) und schematische Abbildung einer Auswertung (rechts)

Abbildung 115 veranschaulicht schematisch eine mit VGStudio 2.2 MAX ausgewertete DMA Probe. Zur Auswertung ist eine Referenzprobe ohne Poren notwendig, um den für die Segmentierung notwendigen Schwellwert zu ermitteln. Dieser Grauwert wird an einem festgelegten prozentualen Anteil des untersten Grauwert-Histogrammbereichs ermittelt. Die ausgewertete Volumenporosität beträgt in der dargestellten Probe 3,0 vol.%. Die CT-Datensätze wurden an AHD für weitere Auswertungen übergeben.

6.9 AP 5.4 Prozessbewertung & Beeinflussung Gesamtprozesskette

Im Arbeitspaket 5.4 wurden Untersuchungen durchgeführt, wie sich die in den anderen Teilprojekten gewonnenen Erkenntnisse in einem robusteren Fertigungsprozess umsetzen lassen. Die Analyse verschiedener Prozessketten der Premium AEROTEC GmbH zeigt, dass ein Großteil der Prozesse manuell abläuft, was zu einer Streuung der Qualität führen kann. Als Beispiele sei hier der Prozess des Entfernens des Abreißgewebes genannt. Auch bei anderen Prozessketten haben manuelle Prozesse wie das Zuschneiden und Aufbringen der Hilfsstoffe einen großen Einfluss auf die Laminatqualität. Durch eine Automatisierung des Aufbringens der Hilfsstoffe und Modifikationen des Aufbaus, z.B. einer Reduzierung des Abreißgewebes, kann die Streuung innerhalb der Prozesskette gesenkt und damit die Prozessrobustheit erhöht werden. Untersuchungen zur Automatisierung eines VAP Aufbaus waren bereits im Projekt Azimut durchgeführt worden, welches als Grundlage der hier dargestellten Untersuchungen dient.

Das im Rahmen von Azimut entwickelte automatisierbare VAP Konzept basiert auf Druckblechen, die mit Hilfsstoffen belegt werden. Diese funktionalisierten Druckbleche ersetzen damit den Folienaufbau des traditionellen und in der Serienfertigung eingesetzten VAP Verfahrens. Ein Teil der Druckbleche ist dabei mit einem Verteilermedium belegt und dient zur Verteilung des Harzes. Ein weiterer Teil der Druckbleche ist mit einer VAP Membran belegt und dient der Absaugung der im Bauteil enthaltenen Luft. Abbildung 116 stellt einen automatisierbaren VAP Aufbau schematisch dar.

Im Projekt Azimut hatte die Funktion des Konzepts anhand eines Demonstrators in Form einer Rumpfschale erfolgreich demonstriert werden können. Somit ist es ein logischer Schritt, die gewonnenen Erkenntnisse anhand eines Serienprozesses umzusetzen, um auf diese Weise aufzuzeigen, inwieweit die Robustheit durch eine Steigerung des Automatisierungsgrades erhöht werden kann.

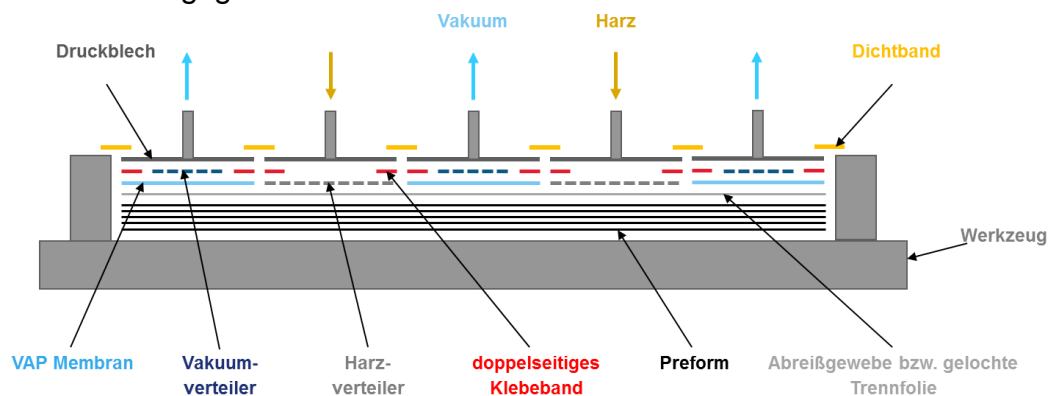


Abbildung 116: Schematische Darstellung des automatisierbaren VAP Aufbaus

Um auszuwählen anhand welches Prozesses eine Umsetzung des automatisierbaren VAP Konzeptes durchgeführt werden soll, wurden verschiedene Fertigungsprozesse für Infusionsbauteile der Premium AEROTEC GmbH betrachtet. Besonders vielversprechend erschien dabei der Fertigungsprozess von Druckkalotten, da aufgrund der Größe des Bauteils eine Reduktion der Hilfsstoffe wie der VAP Membran zu einer großen Kostenreduktion führen kann. Zudem ähnelt die Druckkalotte mit den schaumgefüllten

Stringern dem im Projekt Azimut gefertigten Demonstrators, sodass ein Großteil des Wissens übertragen werden kann.

Anhand eines potentiellen Infusionskonzeptes, das in Abbildung 117 dargestellt ist, wurde eine Analyse der Kosten und der Zeiten durchgeführt. Das Infusionskonzept basiert auf einem Ringguss mit acht identischen Segmenten die mit einem sich nach innen verjüngenden Streifen eines Verteilmediums für das Harz belegt sind. Dadurch kann eine schräge Fließfront in den Stringern erreicht werden, was die Entstehung von Lufteinschlüssen verhindert. Bei der Verteilung der Membran wurden zwei Szenarien betrachtet. Die konservative Lösung sieht Membranstreifen neben den Stringern vor, da hier die Harzfronten zusammenlaufen. Sollte es hierbei zu keinen Lufteinschlüssen kommen, kann die Membran auf den Bereich in der Mitte beschränkt werden. Für beide Szenarien wurde eine Kostenanalyse durchgeführt.

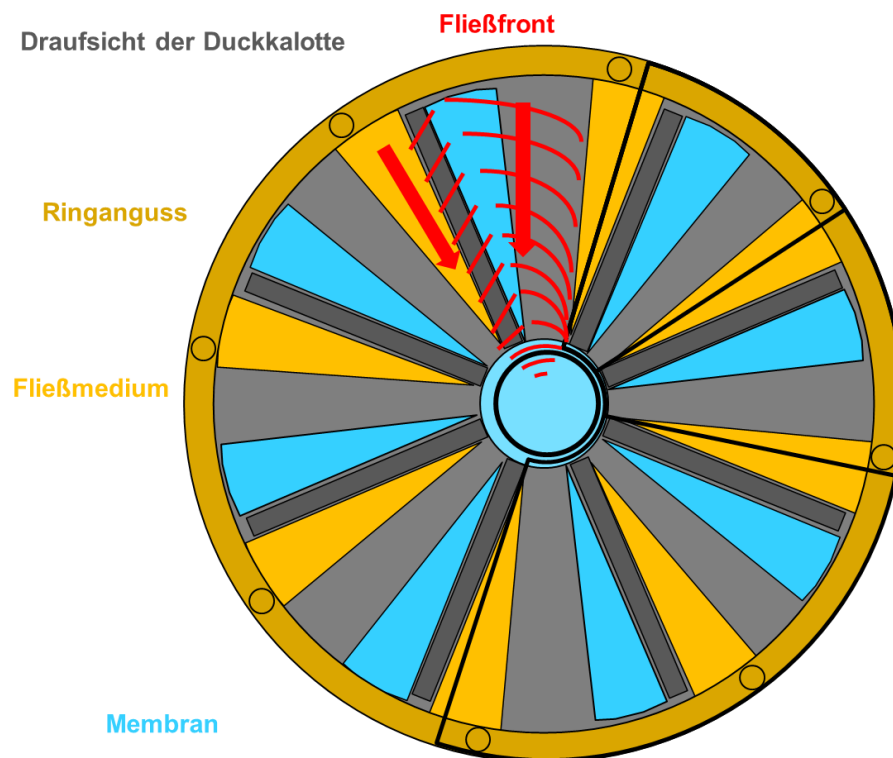


Abbildung 117: Infusionskonzept für eine Druckkalotte

Dabei kam die in Zusammenarbeit mit der Premium AEROTEC GmbH entwickelte Methodik zur Prozessmodellierung und -analyse Einsatz. Mit Hilfe des Swimlane Diagramms wurden die beiden Prozessketten erfasst um eine vergleichende Analyse vornehmen zu können. Dabei wurden auch Herausforderungen identifiziert, die mit den bisherigen Untersuchungen zum automatisierbaren VAP Konzept noch nicht betrachtet worden waren, aber bei der Prozesskette der Druckkalottenfertigung eine wichtige Rolle spielen.

Die Analyse lieferte folgende Ergebnisse:

- Durch die Möglichkeit das Aufbringen der Hilfsstoffe auf die Druckbleche parallel zum Legen der Preform durchzuführen kann eine Reduktion der Durchlaufzeit um mehrere Stunden erreicht werden.
- Durch eine Erhöhung der Automatisierung bei den Zuschnitten der Hilfsstoffe und der Entformung kann die Arbeitszeit um mehrere Stunden reduziert werden.
- Durch die Reduzierung der Hilfsstoffe und der Arbeitszeit können die Produktionskosten signifikant reduziert werden.

Neben diesen Vorteilen offenbarte die Analyse auch einige Herausforderungen.

- Durch die dreidimensional gekrümmte Form der Druckkalotte kann es zu Problemen bei der Drapierbarkeit der Hilfsstoffe auf den Druckblechen kommen.
- Die Druckkalotte weist viele Dickensprünge auf die in den Druckblechen berücksichtigt werden müssen.

Die Ergebnisse der Analyse waren Grundlage einer Besprechung mit Premium AEROTECH. Dabei konnte das Potential der Technologie gezeigt werden. Allerdings erwiesen sich die Dickensprünge als Show Stopper, da kein Konzept identifiziert werden konnte, wie diese in den Druckstücken vorgehalten werden können.

Aufgrund des Potentials der Technologie wurde vereinbart, das automatisierbare VAP Konzept anhand eines anderen Bauteils zu demonstrieren. Eine detaillierte Betrachtung verschiedener Bauteile zeigte, dass bei einigen Schalenbauteilen bereits ein Fertigungsprozess mit Druckstecken eingesetzt wird, der eine Adaption auf VAP-AP erleichtert.

Abbildung 118 zeigt das Konstruktionsmodell des Innenwerkzeugs für das ausgewählte Spantbauteil.

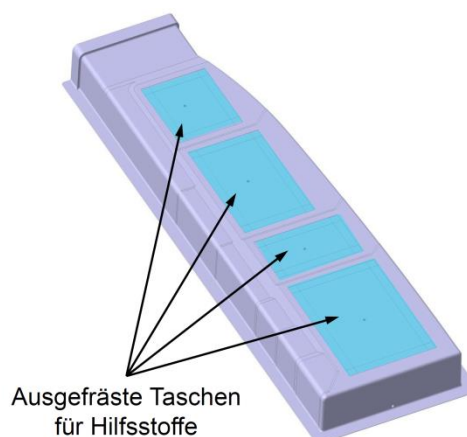


Abbildung 118: CAD-Modell des VAP-AP Druckstücks

In Abbildung 119 sind die Oberseite und die Unterseite mit den ausgefrästen Taschen des fertigen Druckstücks zu sehen. Man erkennt die eingeschraubten Adapter zur Anbringung der Vakuum- und Angussleitungen. Das Konzept sieht einen Ringanguss entlang des Flansches vor. Vakuum wird an die vier Membranpflaster im Stegbereich angelegt.

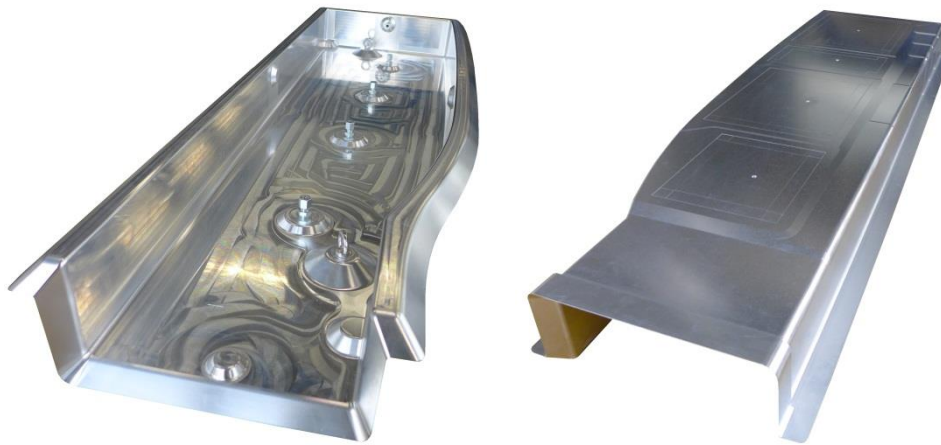


Abbildung 119: Ober- und Unterseite des VAP-AP Druckstücks

Um das Angusskonzept zu validieren, wurde ein Infiltrationsversuch ohne das starre Aushärtewerkzeug durchgeführt. Stattdessen wurde entlang des Flansches eine Vakuumfolie angebracht. Um den Angusskanal zu simulieren, wurde ein ca. 20mm breiter textiler Harz-Fließkanal entlang des Flansches angebracht. Die Preform bestand aus sechs Lagen bidirektionalen NCFs mit einem Flächengewicht von 550g/m². Damit ergibt sich eine Dicke von ca. 3mm. Auf eine komplex aufgebaute Preform mit auslaufenden Lagen wurde verzichtet. Die Lagen wurden mit Hilfe einer Schablone von Hand zugeschnitten. Diese Schablone wurde angefertigt, da bei der Serien-Preform eine Besäumung vorgenommen werden muss, um den Angusskanal zu generieren. Ohne diese Besäumung würde die Preform an den zur Abdichtung angebrachten umlaufenden Rand stoßen und eine definierte Verteilung des Harzes erschweren.

Für den Infiltrationsversuch wurden mit Hilfe von Schablonen passende Stücke Fließhilfe um Membran für die Vakuumabsaugung zugeschnitten. In einem ersten Schritt wurde entlang des Randes der Ausfräsung doppelseitiges Klebeband Typ Raphold 1 in die vorgesehene Vertiefung geklebt und an den Ecken überlappt. Anschließend wurde der Fließhilfeszuschnitt in den Innenraum gelegt und die Membran auf das Klebeband aufgebracht. Um eine perfekte Abdichtung sicherzustellen wurde große Sorgfalt beim Andrücken der Membran aufgewendet. Es zeigte sich, dass die eingefrästen Vertiefungen die Dicken der Hilfsstoffe gut kompensieren da sich nach dem Aufbringen der Membranpflaster ein sehr glatter Übergang zwischen Werkzeug und Membranpflaster ergibt.

Für den Infiltrationsversuch wurde eine Lage Abreißgewebe, die Faserlagen und abschließend eine weitere Lage Abreißgewebe auf das Druckstück aufgebracht. Nach dem Anbringen der Vakuumfolie wurde das Bauteil über die Vakuumanschlüsse evakuiert. Dabei zeigt sich, dass aufgrund der geringen Permeabilität der Membran nur eine langsame Evakuierung möglich ist.

Der Infiltrationsversuch zeigte, dass sich mit dem erdachten Angusskonzept eine sehr gute Konvergenz der Fließfront im Bereich der Membranpflaster ergibt. In Abbildung 120 ist der Fortschritt der Fließfront nach ca. 6 min, ca. 18 min, ca. 27 min und ca. 30 min dargestellt.

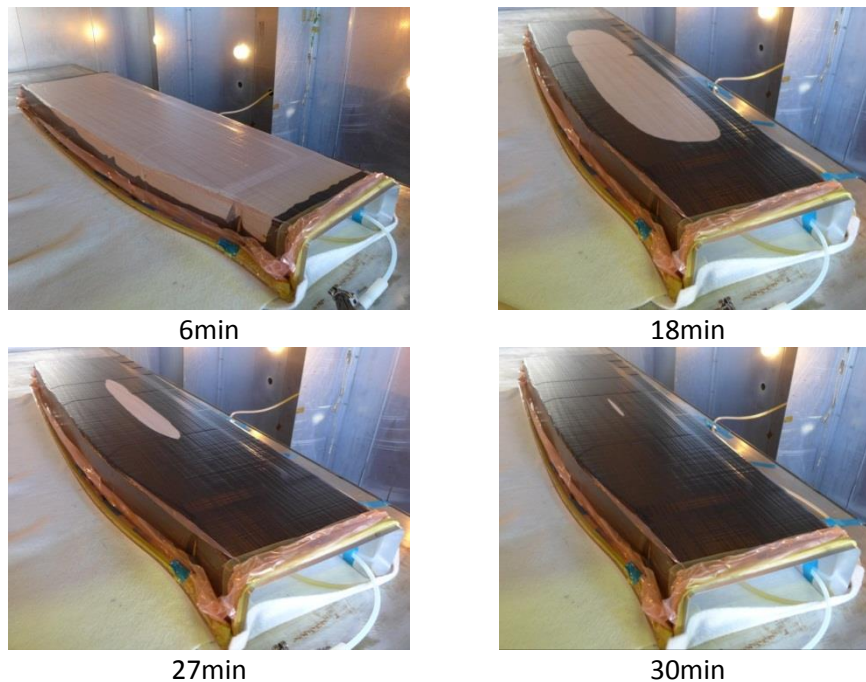


Abbildung 120: Fließfront während des Open-Mould Vorversuchs

Zu Beginn der Infiltration verteilt sich das Harz entlang des Angusskanals. Im Bereich des Angusses dringt es zuerst in das Laminat ein, sodass sich von der Seite betrachtet eine schräge Harzfront im Bereich der Flansche ergibt. Da das Harz an der offenen Seite des Bauteils direkt in das Steglaminat eindringen kann, läuft die Fließfront sehr gut in der Mitte des Stegs zusammen. Der letzte trockene Punkt befindet sich über dem von der offenen Seite her gesehen zweiten Membranpflaster. Somit kann eventuell verbliebene Restluft abgesaugt werden und es ergeben sich keine Porositäten in diesem Bereich. Abbildung 121 zeigt das ausgehärtete Bauteil nach dem Entformen. Eine visuelle Untersuchung ließ nur minimale Abdrücke der Membranpflaster erkennen. Dies deutet auf eine korrekt gewählte Tiefe der Ausfräsungen hin.

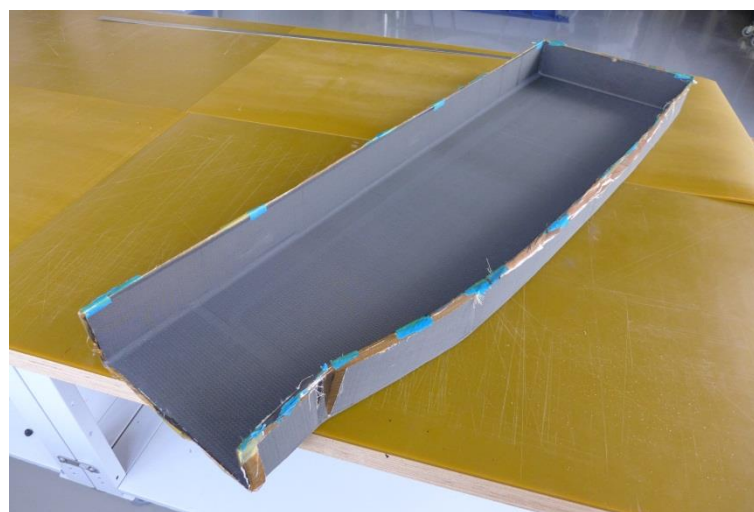


Abbildung 121: Bauteil des Open-Mould Infiltrationsversuchs nach dem Entformen

Aufbauend auf dem positiven Infiltrationsversuch wurde ein erstes seriennahes Bauteil im VAP-AP Verfahren gefertigt. Dazu wurde das Innenwerkzeug in Ottobrunn gereinigt und die Membranpflaster wurden aufgebracht. In Abbildung 122 ist das vorbereitete Druckstück mit den aufgeklebten Membranpflastern zu sehen.

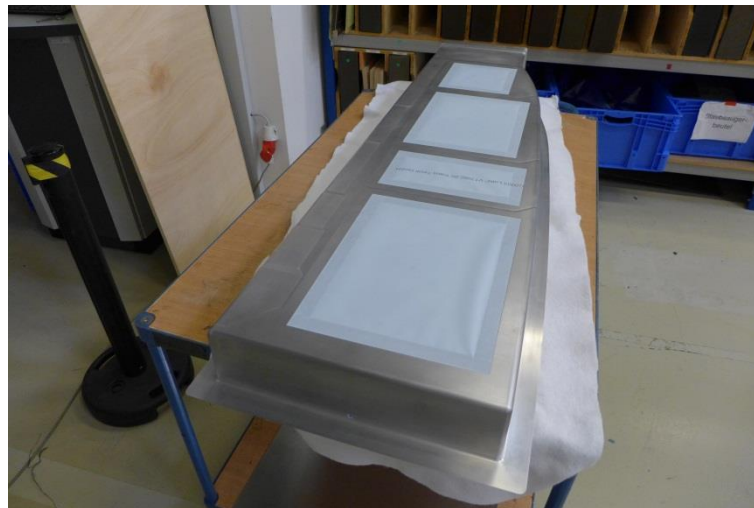


Abbildung 122: VAP-AP Werkzeug mit aufgeklebten Membranpflastern

Das Legen der Preform erfolgte durch Mitarbeiter von Premium AEROTEC unter identischen Rahmenbedingungen wie im Serienbetrieb. Um eine spätere Fixierung der Preform auf dem Druckstück zu ermöglichen, wurde eine Vakuumfolie unter dem Lagenpaket platziert. Anschließend wurde die Preform mit Hilfe der bereits im Vorversuch verwendeten Schablone besäumt. Hierzu wurde die Schablone auf die Preform gespannt. Zum Schneiden wurden Metallleisten unter die Preform geschoben und die Preform mit einem Cutter besäumt. In Abbildung 123 ist die Preform mit der verspannten Schablone zu sehen.

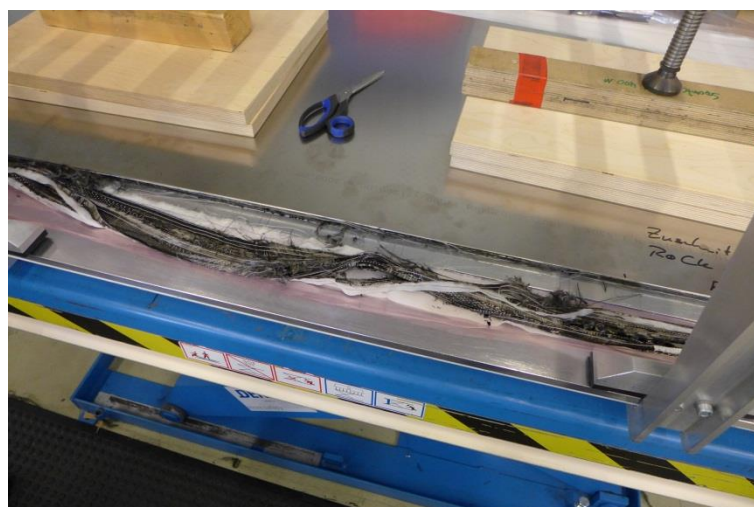


Abbildung 123: Besäumen der Preform mit Hilfe der geklemmten Schablone

Anschließend wurde die Schablone entfernt und das Druckstück mit Hilfe zweier projizierter Kreuze auf der Preform positioniert. Zuvor wurde entlang des Randes Dichtband aufgebracht, um die Preform mit Hilfe der Vakuumfolie unter Vakuum auf dem Druckstück zu fixieren.

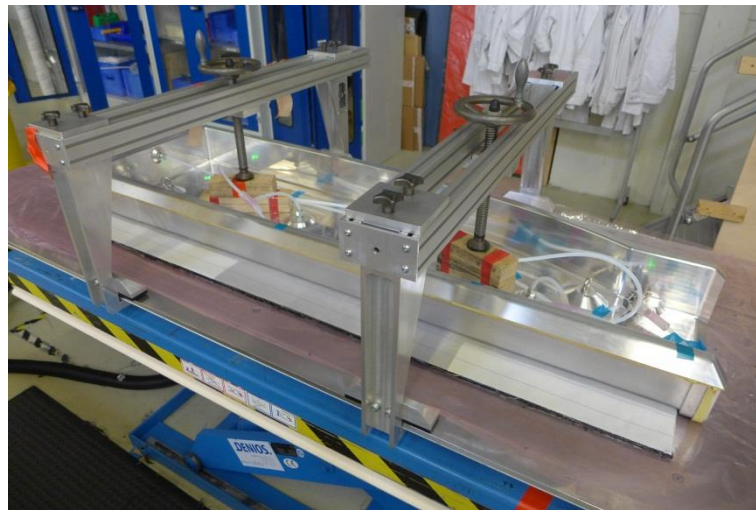


Abbildung 124: Fixierung des Werkzeugs auf der Preform

Bei der Fixierung wird die Vakuumfolie per Hand nach oben gezogen und am Dichtband festgeklebt. Wird Vakuum angelegt, legt sich die Vakuumfolie zuerst im Bereich des Radius an die Preform an und anschließend nach und nach im Bereich des Flansches in Richtung Dichtband. Dadurch wird das Material im Bereich des Radius nicht gestaucht und Faltenbildung wird vermieden. In Abbildung 125 ist das manuelle Fixieren der Vakuumfolie dargestellt.

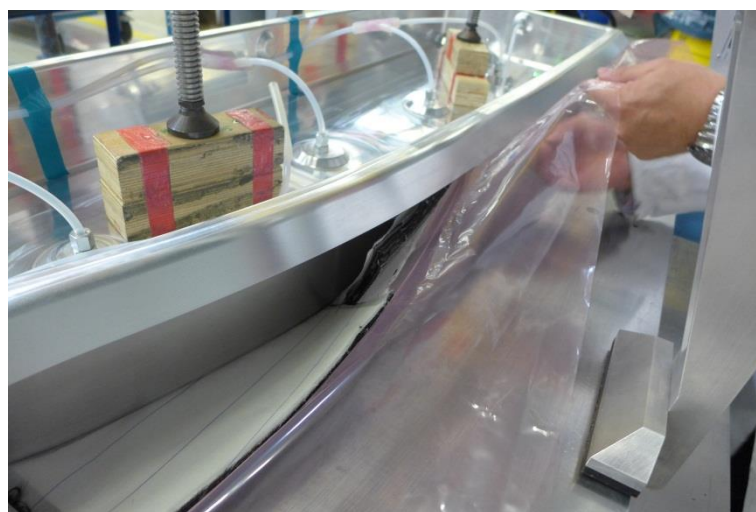


Abbildung 125: Manuelles Fixieren der Preform auf dem Werkzeug

Da es nicht möglich war, die Preform unter Vakuum nach Ottobrunn zu transportieren, wurde sie mit Hilfe von Hartschaumplatten und Spanngurten mechanisch fixiert. In Ottobrunn wurde wieder Vakuum angelegt. Faltenbildung durch die kurzzeitige fehlende Fixierung durch Vakuum konnte nicht festgestellt werden. Um das Handling der Preform zu erleichtern, wurde der bereits angebrachte Vakuumaufbau genutzt, um die Preform thermisch zu fixieren. Dies erfolgte im Ofen bei 120°C für 60min. Hinsichtlich der erhöhten Prozesszeit und Prozesskosten ist ein solcher Schritt im Serieneinsatz nicht sinnvoll. Um Defekte in der Preform durch Probleme beim Handling zu vermeiden wurde er aber bei diesem ersten Infiltrationsversuch in Kauf genommen. Die fixierte Preform ermöglichte es, die Preform in das Aushärtewerkzeug einzulegen und anschließend das Druckstück einzusetzen. Durch Fixierung des Abreißgewebes mit Klebeband konnte ein Verrutschen verhindert werden. Abbildung 126 zeigt die in das Aushärtewerkzeug eingelegte Preform und das für die Infiltration vorbereitete Druckstück.



Abbildung 126: Aushärtewerkzeug mit Preform und vorbereitetes Innenwerkzeug

Nach dem Einlegen wurde das Druckstück gegenüber dem Außenwerkzeug mit Schraubzwingen verspannt, um den Spalt zwischen den Werkzeugen zu reduzieren. Anschließend wurde das Druckstück gegenüber dem Außenwerkzeug mit Dichtband abgedichtet. Um ein Eindringen des Dichtbands in den Spalt zu verhindern, wurde zusätzlich eine Lage Klebeband auf das Dichtband aufgebracht. Der komplette Aufbau ist in Abbildung 127 zu sehen. In Orientierung an der Serienfertigung wurde das Bauteil bei einer Werkzeugtemperatur von 120°C und einer Harztemperatur von 80°C infiltriert.



Abbildung 127: VAP-AP Aufbau während der Infiltration

Bei der Infiltration wurde mit Rücksaugen gearbeitet, da die benötigte Harzmenge vorher nicht genau berechnet werden konnte.

In Abbildung 128 ist das Bauteil direkt nach dem Entformen dargestellt. Man erkennt die sehr gute Oberflächenqualität. Das komplette Bauteil wies keinerlei trockene Stellen oder oberflächliche Porositäten auf. Die Entformung verlief ohne Probleme.



Abbildung 128: Bauteil nach dem Entformen

In Abbildung 129 ist das Bauteil nach dem Entfernen des Abreißgewebes zu sehen. In diesem Zustand wurde das Bauteil an Premium AEROTEC übergeben, wo es auf Endkontur gefräst und anschließend ultraschallgeprüft und geometrisch vermessen wurde.

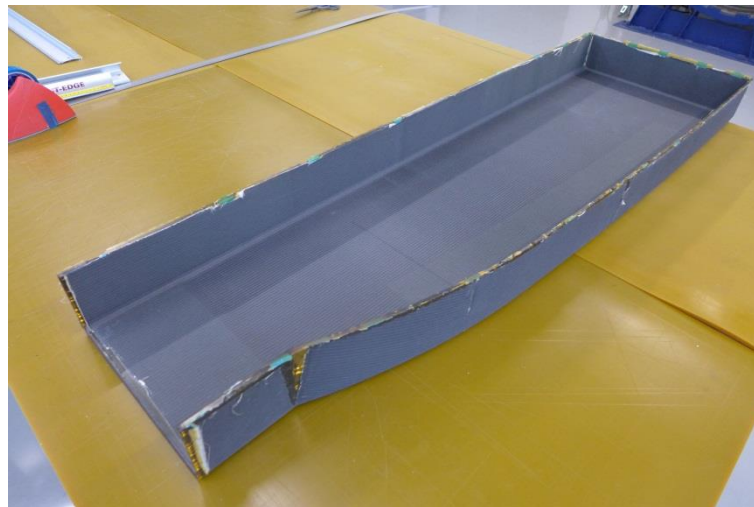


Abbildung 129: Bauteil nach dem Entfernen des Abreißgewebes

Der gefertigte Spant weist eine sehr gute Qualität auf und eine Sichtprüfung offenbart keine Defekte. Im Rahmen der US-Untersuchung können keine Defekte innerhalb des Bauteils festgestellt werden.

Die Vermessung des Spantes zeigt, dass die Toleranzen hinsichtlich Laminatdicke und Lage eingehalten werden. Dass im Bereich der Membranpflaster die korrekte laminatdicke erreicht wurde, deutet auf die korrekt gewählte Tiefe der Ausfräsungen hin.

Auch eine Ultraschalluntersuchung offenbart keine Defekte innerhalb des Bauteils. Damit könnte der Spant in ein Luftfahrzeug eingebaut werden. Dass eine so gute Qualität im ersten Versuch erreicht werden konnte, beweist die große Robustheit des Prozesses.

Auch die Wirtschaftlichkeit des Prozesses lässt sich durch den Einsatz der VAP-AP Technologie steigern. Abbildung 130 veranschaulicht die Reduzierung der Durchlaufzeit in Form eines Gantt-Diagramms. Besonders positiv wirkt sich die Tatsache aus, dass das Vorbereiten des Innenwerkzeugs und das legen der Preform parallel ablaufen können. Insgesamt reduziert sich die Durchlaufzeit für die Station Legebereich um mehr als 40%.

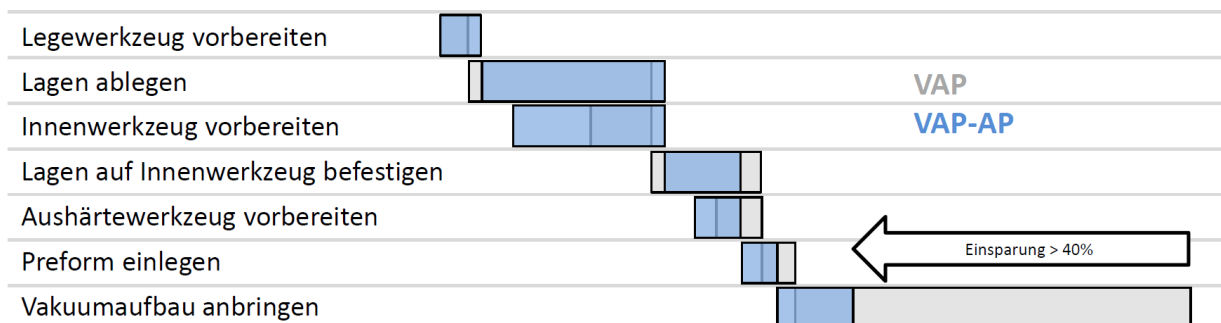


Abbildung 130: Reduzierung der Durchlaufzeit durch VAP-AP

Auch die Arbeitszeit reduziert sich durch den Einsatz von VAP-AP. Das Aufbringen der Membranpflaster und Abdichten des Werkzeugs geht wesentlich schneller als das Aufbringen des Vakuumaufbaus. In Zukunft lässt sich durch eine Automatisierung des Zuschnitts die Effizienz möglicherweise noch weiter steigern.

Die Diagramme in Abbildung 131 zeigen welche Einsparung durch VAP-AP gegenüber einem VAP Verfahren möglich sind. Bei den Hilfsstoffen kann mehr als ein Drittel der Kosten eingespart werden. Die Fertigungskosten bis zur Entformung des Bauteils reduzieren sich um ca. 15%. Für die Station Legebereich allein ergibt sich eine Reduktion um ca. ¼. Die Diagramme lassen sich direkt aus den exportierten Daten des erstellten Swimlane-Diagramms generieren.

Bei der vorgestellten Bewertung der Prozessverbesserungen kamen die Methoden aus AP 5.1 und 5.2 zum Einsatz. So lassen sich die Diagramme in Abbildung 131 direkt aus den Daten generieren, die aus dem Swimlane Diagramm exportiert wurden.

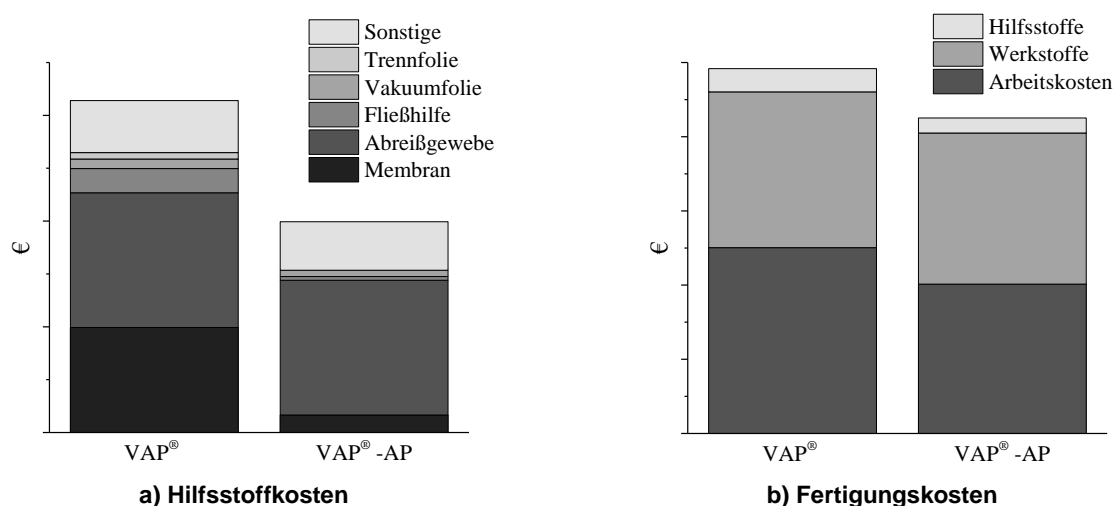


Abbildung 131: Kostenvergleich zwischen VAP® und VAP-AP

Ausgehend von den beim ersten Fertigungsversuch gesammelten Erfahrungen wurde ein zweites Bauteil gefertigt, mit leichten Modifikationen bezüglich Hilfsstoffe und Ablauf. So wurden die VAP®-Membran-Patches statt mit doppelseitigem Klebeband mit herkömmlichem Klebeband auf dem Innenwerkzeug angebracht. In Vorversuchen wurden 4 verschiedenen Klebebänder getestet und für geeignet befunden, die Fertigung des zweiten Demonstrator-Bauteils erfolgte dann mit Nitto Denko PS-1. Eine weitere Modifikation bestand in der Verwendung einer dehnfähigen Trennfolie für den Transfer der Preform in das Aushärtewerkzeug. Dazu wurde der Zuschnittstapel mit Hilfe einer Richmond VAK-PAK® A6200 Folie unter Vakuum am Innenwerkzeug fixiert (s. Abbildung 132). Die Folie verblieb während der Infusion und Aushärtung am Bauteil. Dieser geänderte Prozessschritt erbrachte eine deutliche Erleichterung bei der Handhabung, ohne negative Effekte auf die Infusion und die Bauteilqualität zu haben. Auch das zweite Demonstratorbauteil wurde mit einwandfreier optischer Qualität fertiggestellt (s. Abbildung 133) und zur Nachbearbeitung und Qualitätsprüfung an PAG übergeben. Die Ergebnisse stehen noch aus.



Abbildung 132: Innenwerkzeug mit Preform vor (links) bzw. nach (rechts) Anlegen des Vakuums

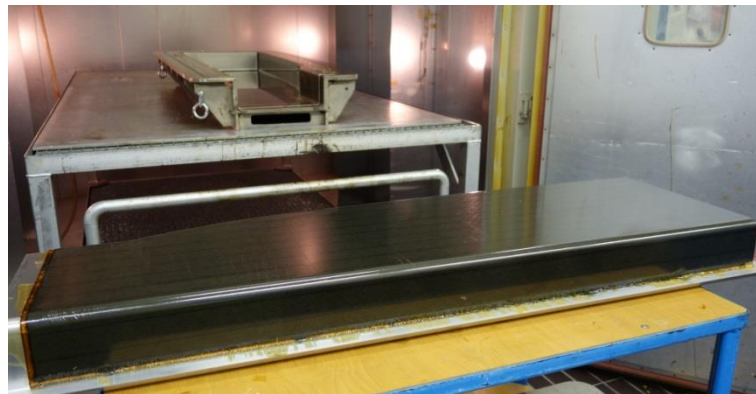


Abbildung 133: Zweites Demonstrator-Bauteil nach der Entformung

Bevor jedoch die VAP-AP Technologie in eine Serienanwendung überführt werden kann, ist die entsprechende Qualifikation eines Klebebandes erforderlich. Derzeit ist bei Airbus noch kein Klebeband, weder einseitig noch doppelseitig, für den Kontakt mit nicht ausgehärtetem Infusionsharz innerhalb der Bauteiloberfläche zugelassen.

7 Aufwendungen und deren Angemessenheit

Die im Projekt getätigten Aufwendungen sind detailliert im zahlenmäßigen Verwendungsnachweis dargestellt. Bei der Bearbeitung des Vorhabens wurden die Werte der Vorkalkulation weitestgehend eingehalten.

8 Verwertung der Ergebnisse

8.1 Erfindungen / Schutzrechanmeldungen

Die im Vorhaben durchgeführten Forschungsarbeiten zur Sensorintegration in CFK zur Prozessüberwachung führten zu zwei Erfindungen, die schließlich beim Europäischen Patentamt als Patente angemeldet wurden:

- Amtl. Kennzeichen EPA 14198966.5, Anmeldetag: 18.12.2014
- Amtl. Kennzeichen EP16174255.6, Anmeldung: 13.06.2016.

Die im Vorhaben durchgeführten Forschungsarbeiten zur Fließfront- und Aushärtegradüberwachung mittels E-TDR führten zu zwei Erfindungen, die schließlich beim Europäischen Patentamt als Patente angemeldet wurden:

- Amtl. Kennzeichen EP 3035041 A1, Anmeldetag: 18.12.2014
- Amtl. Kennzeichen EP 3035042 A1, Anmeldung: 18.12.2014.

8.2 Wirtschaftliche und wissenschaftliche Erfolgsaussichten

Es ist Aufgabe von Airbus Group Innovations, die Geschäftsbereiche der Airbus Group in ihren Entwicklungen zu unterstützen. Die im Rahmen von SOFT-RoCk erarbeiteten Lösungen zielen darauf ab, die bei Premium AEROTEC und Airbus Helicopters in der Produktion Anwendung findenden CFK-Fertigungsprozessketten hinsichtlich Effizienz, Reproduzierbarkeit und Qualität nachhaltig zu verbessern.

Entsprechend sind die Beiträge von Airbus Group Innovations als Teillösungen in das Gesamtprojekt RoCk eingebunden. Die Nutzung der erarbeiteten Ergebnisse erfolgt primär durch Premium AEROTEC und Airbus Helicopters mit Ausrichtung auf die Flugzeugprogramme von Airbus. AGI nutzt darüber hinaus die gewonnenen Erkenntnisse für die Entwicklung neuer Technologien und Prozesse, um damit langfristig weitere Standort- und Wettbewerbsvorteile für deutsche Luftfahrtunternehmen zu erarbeiten.

Im Rahmen des Teilvorhabens SOFT-RoCk wurden zahlreiche vielversprechende Ergebnisse generiert, die teilweise bereits erfolgreich bei PAG implementiert wurden. Insbesondere zu nennen sind hier die Methodik zur Analyse und Beschreibung von Prozessketten sowie die Analysemethoden für Einflussfaktoren.

Von AGI wurde im Laufe des Projektes ein MS-Visio Template zur Erzeugung von Swimlane-Diagrammen für Prozessketten entwickelt und getestet. Dieses Template wurde unmittelbar im Anschluss an die Fertigungsvorbereitung bei PAG in Augsburg übergeben und wird seither dort zur übersichtlichen Darstellung von Fertigungsabläufen genutzt.

Die von AGI durchgeführten systematischen Untersuchungen der Abreißgewebeentformung bei Schalenbauteilen resultierten in einer Umstellung des im Serienprozess

verwendeten Abreißgewebes, wodurch eine drastische Reduktion der Nacharbeit erreicht wurde.

Die von AGI zusammen mit PAG durchgeführten Fertigungsversuche zur Validierung des VAP-AP Verfahrens zur Herstellung von Faserverbundkomponenten lieferten sowohl in technischer als auch wirtschaftlicher Hinsicht vielversprechende Ergebnisse, selbst bei rein manueller Ausführung der Prozessschritte. Nun wird gemeinsam mit Airbus geprüft, welche weiteren Schritte für eine Qualifikation und Serieneinführung des Verfahrens erforderlich sind.

Die von AGI zusammen mit AHD durchgeführten Untersuchungen zur einseitigen US-Prüfung zeigten sowohl technisch als auch wirtschaftlich erfolgversprechende Ergebnisse. So kann darauf aufbauend daran gedacht werden von einer Prüfung mit Zugang von beiden Seiten auf eine einfachere einseitige Prüfung z.B. ohne das Bauteil auszubauen, bessere Zugänglichkeit) gedacht werden. Hierdurch ergibt sich ein zeitlicher- und finanzieller Vorteil.

Die Auslegung und Entwicklung einer Prüfanlage in der AHD Produktion zur Fertigungskontrolle mittels Luftultraschall einer Wagenstruktur wurde durch die Studie zur zweiseitigen Prüfung unterstützt. Die Anlage wird jetzt von AHD eingesetzt.

Die von AGI hergestellten Temperatursensoren konnten erfolgreich ins CFK Bauteil integriert werden. Die Temperatur während des Herstellungsprozesses wurde mit der benötigten Genauigkeit überwacht. Weitere Arbeiten zur Integration in den Fertigungsprozess zeigen vielversprechende Erfolgsaussichten, die in einem Nachfolgeprojekt realisiert werden sollen. Gemeinsam mit Airbus wird geprüft, welche weiteren Schritte für eine Einführung des Verfahrens in die Produktion erforderlich sind.

Die im Vorhaben durchgeführten Forschungsarbeiten zur Fließfront- und Aushärtegradüberwachung mittels E-TDR zeigten vielversprechende Ergebnisse, die eine Verwendung solcher Sensoren in einem Serenumfeld nach Weiterentwicklung der Technologie realistisch erscheinen lassen.

8.3 Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit

Das dem VAP-AP Verfahren zugrundeliegende Konzept wurde bereits in dem Vorläuferprojekt AZIMUT (FKZ 20W0903F) beim Deutschen Patentamt angemeldet und ist unter der Nummer DE102010025068A1 offengelegt. Neben dem Interesse seitens Premium AEROTEC, das Verfahren in die Serienfertigung zu überführen, wurde es im Rahmen der Airbus Technology Licensing Initiative in das Portfolio der Technologien aufgenommen, die externen Kunden zur Lizenzierung angeboten werden.

Die Arbeiten im Bereich NDT dienen als Grundlage für Untersuchungen im Lufo-V Projekt IPROP und für interne Aktivitäten zur einseitigen Prüfung zwischen AGI und AHD.

Die Temperatursensoren zur CFK-Integration werden gegenwärtig im LuFo-Projekt SCHACH weiterentwickelt. Der Fokus liegt dabei auf Passivierungsschichten, die es erlauben, dass die mechanischen Eigenschaften des CFK-Sensorverbunds weitestgehend erhalten bleiben.

Hinsichtlich der Fließfront- und Aushärtegradüberwachung mittels E-TDR existieren Bestrebungen, das Potential der Technologie intern weiter zu untersuchen.

9 Relevante Ergebnisse Dritter

Ergebnisse von dritter Stelle liegen keine vor.

10 Quellen

- [1] Buchmann, C., Burka, P. und Drechsler, K.: Increasing the Robustness and Reliability of CFRP Production Processes through Systematic Analysis and Process Monitoring. In: 12th International Conference on Flow Processing in Composite Materials, Enschede, NL, Juli 2014.
- [2] Buchmann, C., Filsinger, J., Weimer, C. und Ladstätter, E.: Strategies to Improve the Efficiency of Liquid Composite Moulding. In: SAMPE Europe SETEC 14, Tampere, FI, September 2014.
- [3] Buchmann, C., Filsinger, J. und Ladstätter, E.: Investigation of Electrical Time Domain Reflectometry for Infusion and Cure Monitoring in Combination with Electrically Conductive Fibers and Tooling Materials. Composites Part B: Engineering, 94:389–398, 2016.
- [4] Buchmann, C., Langer, S., Filsinger, J. und Drechsler, K.: Analysis of the Removal of Peel Ply from CFRP Surfaces. Composites Part B: Engineering, 89:352–361, 2016.

11 Versionsverwaltung

Änderungsübersicht

Version	Datum	Geändert	Kurzbeschreibung der Änderung
	15.07.2016	---	Erstversion