

**Öffentlicher Schlussbericht  
für die Technische Informationsbibliothek (TIB)  
an der Universität Hannover**

---

Förderkennzeichen: 20W1108D

---

Zuwendungsempfänger: Fraunhofer-Institut für Fertigungstechnik und  
Angewandte Materialforschung (IFAM),  
Wiener Str. 12, 28359 Bremen

Projektleiter: Dr. Stefan Dieckhoff

Stellvertretender Projektleiter: Dr. Jörg Ihde

---

Vorhabensbezeichnung: Verbundprojekt CORINNA,  
Teilvorhaben: Qualitätsgesicherte Oberflächenvor-  
behandlung vor dem Kleben / Lackieren (QualiVor)

---

Laufzeit des Vorhabens: 01.09.2012 bis 31.03.2015

---

Berichtszeitraum: 01.09.2012 bis 31.03.2015

---

Förderung: Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Energie

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

im Rahmen des Luftfahrtforschungsprogramm V-I

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffent-  
lichung liegt bei den Autoren.

# Inhaltsverzeichnis

## Inhalt

1	Kurzdarstellung .....	3
1.1	Aufgabenstellung.....	3
1.2	Voraussetzungen unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde .....	3
1.3	Wissenschaftlich-technischer Stand, an dem angeknüpft wurde .....	4
1.3.1	Angabe bekannter Konstruktionen, Verfahren und Schutzrechte, die für die Durchführung des Vorhabens benutzt wurden.....	5
1.4	Verwendete Fachliteratur .....	5
2	Eingehende Darstellung der Projektergebnisse .....	7
2.1	Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele .....	7
2.2	AP1.1.2 Vorbehandlung und Eigenschaften von Klebungen.....	7
2.2.1	Zu AP3.2.2 „Prozess- und Testmethodenentwicklung für das Lackieren“ .....	15
2.2.2	Wesentliche Erfahrungen .....	21
3	Zusammenfassung .....	21

## **1 Kurzdarstellung**

### **1.1 Aufgabenstellung**

Im Rahmen des übergeordneten Gesamtvorhabens CORINNA sollten innerhalb des Teilprojektes QualiVor Konzepte für eine qualitätsgesicherte Vorbehandlung vor dem Kleben und dem Lackieren von ausgewählten Leichtbaumaterialien entwickelt werden, die nachfolgend für innovative Leichtbauweisen eingesetzt werden können, um damit eine weitere Gewichtsreduktion von Flugzeugstrukturen ermöglichen.

Die im Rahmen des Projektes angestrebten Verringerungen der Produktions- und Betriebskosten im Bereich der Oberflächenvorbehandlung korrespondieren außerdem mit den in der ACARE VISION 2020 formulierten Zielen zur Sicherheit und Umweltverträglichkeit, da mit den erarbeiteten Resultaten lösemittelhaltige Materialien und Prozesse reduziert bzw. ersetzt werden können.

Die Entwicklungen der qualitätsgesicherten Vorbehandlungsmethoden zur automatisierten Reinigung und Aktivierung verschiedener Werkstoffoberflächen vor dem Kleben und dem Lackieren wurden innerhalb der Arbeitspakete AP1 (Effizientere Fügetechnik) und AP3 (Nachhaltige, kostenreduzierte Produktionsverfahren) durchgeführt und sollten die fertigungstechnischen Randbedingungen des industriellen Flugzeugbaues berücksichtigen.

Als Werkstoffe dienten einerseits zwei verschiedene duromere CFK-Laminat für das Kleben und andererseits thermoplastische CFK- Bauteile und Titan-Nietköpfe für das Lackieren.

Für die Arbeiten sind Vorbehandlungsverfahren und Analysemethoden eingesetzt worden, deren prinzipielle Eignung bereits in vereinfachten Laborversuchen im Vorfeld des Projektes gezeigt werden konnte. Dazu gehören das CO<sub>2</sub>-Schneestahlverfahren zur Reinigung, sowie die Atmosphärendruck- und Niederdruck-Plasmabehandlung zur Feinreinigung und zur Aktivierung und im Fall von Titansubstraten die Laser- und Vakuumsaugstrahlbehandlung. Zur Inspektion der Oberflächen zur Kontrolle des Behandlungserfolges wurde das Aerosolbenetzungsverfahren und die Laser Induzierte „Breakdown“ Spektroskopie (LIBS), sowie die Streulichttechnik eingesetzt. Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens sollten die Methoden und Prozesse unter produktionsnahen Bedingungen untersucht werden, um deren industrielle Nutzbarkeit bewerten zu können.

### **1.2 Voraussetzungen unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde**

Die Arbeiten im Forschungsverbund wurden zielgerichtet zwischen Airbus und dem Institutsbereich Klebtechnik und Oberflächen des Fraunhofer-Institut für Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung (IFAM) abgestimmt.

Beide Projektpartner verfügen über langjährige Erfahrungen im Bereich der Oberflächenvorbehandlung sowie in der Untersuchung von adhäsiven Systemen und haben auf diesen Gebieten bereits häufig miteinander in Projekten kooperiert.

Das Fraunhofer IFAM verfügt über umfangreiche Erfahrungen hinsichtlich der Entwicklung geeigneter Oberflächenvorbehandlungsprozesse. Innerhalb verschiedener durch die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen (AiF) geförderter Vorhaben konnte die Wirkung von Niederdruck- (ND) und Atmosphärendruck- (AD)-Plasma-behandlungen auf Kunststoffoberflächen untersucht und die Verbesserung der adhäsiven Eigenschaften bezüglich Kleben und Lackieren charakterisiert werden. Innerhalb des hier beschriebenen Teilpro-

jekt es lag ein Schwerpunkt auf der Kombination von Vorreinigungsprozessen wie z.B. dem CO<sub>2</sub>-Schneestrahlen und der Atmosphärendruck-Plasmabehandlungen zur bedarfsgerechten Bauteilreinigung und –aktivierung.

Im Bereich der Qualitätssicherung von Oberflächeneigenschaften nutzt das IFAM seine langjährige Erfahrung, um neue Verfahren der Oberflächencharakterisierung für den Einsatz im Produktionsbetrieb zu testen, zu optimieren und zu entwickeln. Im Rahmen des Teilprojektes QualiVor lag der Schwerpunkt auf optischen bzw. spektroskopischen Messverfahren, sowie der Aerosol-Benetzungsprüfung zur prozessintegrierten Qualitätssicherung für die klebtechnische Fertigung von Faserverbundwerkstoffen.

### **1.3 Wissenschaftlich-technischer Stand, an dem angeknüpft wurde**

Im Fraunhofer IFAM besteht eine langjährige Erfahrung hinsichtlich der Entwicklung geeigneter Oberflächenvorbehandlungsprozesse für eine nachfolgende Applikation von Klebstoffen oder Lacken. Innerhalb verschiedener durch die AiF geförderter Vorhaben konnte die Wirkung von Plasmabehandlungen auf Kunststoffoberflächen untersucht und die Verbesserung der adhäsiven Eigenschaften bezüglich Kleben und Lackieren charakterisiert werden (AiF-Forschungsvorhaben 12651 N/1). Innerhalb des abgeschlossenen AiF-Vorhabens 15443 N/1 konnte die komplexe Wirkung verschiedener Vorbehandlungsverfahren (verschiedene AD-Plasmaquellen, ND-Plasma, Beflammung, VUV-Bestrahlung) auf Formtrennmittel und trennmittelkontaminierte CFK-Oberflächen untersucht und erforscht werden.

Im Zusammenhang mit der Qualitätssicherung von Oberflächeneigenschaften arbeitet das IFAM seit vielen Jahren an der Entwicklung und Optimierung von Verfahren zur Oberflächencharakterisierung für den industriellen Einsatz. Die Arbeiten in diesem Projekt konnten daher auf die Erfahrungen mit spektroskopischen und optischen Messverfahren, sowie der am IFAM entwickelten Aerosol-Benetzungsprüfung zur prozessintegrierten Qualitätssicherung aufbauen.

Im Rahmen des EU-Projektes Abitas, Förderkennzeichen AST5-CT-2006-030996, wurden unter anderem Verfahren zur Vorbehandlung von CFK als auch zum Inline-Monitoring der Oberflächeneigenschaften nach der Vorbehandlung untersucht und weiterentwickelt. Es hat sich gezeigt, dass mittels Atmosphärendruckplasma, im Vergleich zu anderen Vorbehandlungsverfahren, die höchsten Verbundfestigkeiten erzielt werden konnten, und dass der Aktivierungseffekt mit Hilfe des Aerosolverfahrens grundsätzlich nachgewiesen werden konnte. Hinsichtlich der zuverlässigen und automatisierten Kontrolle von CFK-Oberflächen bestand jedoch Optimierungsbedarf. Eine Weiterentwicklung eines prototypischen Aufbaus zum Einsatz in der Fertigung wurde innerhalb des BMBF-Projektes Qualitätskleben (Förderkennzeichen 02PJ2121) vorangetrieben.

Innerhalb des vom Land Bremen, der Fraunhofer Gesellschaft und industriellen Partnern finanzierten Fraunhofer-Innovationsclusters Multimat wurden im Teilprojekt „Fügen von Faserverbundstrukturen - FüFast“ die Einflüsse der CFK-Fertigung, der Oberflächenvorbehandlung im Zusammenspiel mit der Klebstoffapplikation und den vorherrschenden klimatischen Bedingungen erforscht<sup>1</sup>. Zudem wurde auch der Einfluss der Umgebungsbedingungen auf die Ergebnisse der Aerosol-Benetzungsprüfung untersucht.

---

<sup>1</sup> Wilken R., „Aspekte zum qualitätsgesicherten Kleben von CFK-Komponenten“, Lightweight Design 3 (2011), 33 - 37

### 1.3.1 Angabe bekannter Konstruktionen, Verfahren und Schutzrechte, die für die Durchführung des Vorhabens benutzt wurden.

Im Rahmen des Projektes wurde das vom IFAM entwickelte und patentierte Verfahren der Aerosolbenetzungsprüfung verwendet:

R. Wilken, S. Markus, M. Amkreutz, C. Tornow, A. Seiler, S. Dieckhoff, U. Meyer,  
„Prüfverfahren und Prüfvorrichtung, Verfahren und Vorrichtung zum Prüfen einer Oberflächengüte  
Patent: DE 102005027106 B3, erteilt: 04.01.2007

Weiterhin wurden durch den Einsatz der Vorbehandlungsmethoden die folgenden Patente berücksichtigt:

F. Elbing, R. Rotstein “Verfahren und Vorrichtung zum Reinigen, Aktivieren oder Vorbehandeln von Werkstücken mittels Kohlendioxid-Schneestrahlen“ Patent DE102005005638 B3

P. Förnsel „Rotationsdüse“ Patent: DE50012751

## 1.4 Verwendete Fachliteratur

1. Habenicht, G., Kleben – Grundlagen, Technologien, Anwendungen, 5. erweiterte u. aktualisierte Auflage, Berlin: Springer Verlag, 2006
2. Possart, W.(Ed.), Adhesion, Current research and Applications, Weinheim: Wiley-VCH, 2005
3. Starck, F., Kleben von Kunststoffen, Kleben: Grundlagen, Forschungsergebnisse, Anwendungen, Tagungsbuch, Regensburg: Otti-Kolleg, 2004
4. Hauert, R., Hug, P., Adhäsion als Grenzflächenproblem, in: Kleben- 16. Internationales Symposium Swissbonding, 1ff, Schindel-Bidinelli, E. (Hrsg.), Rapperswill, Schweiz, 2002
5. Heßland, A., Hennemann, O.-D., Qualitätssichernde Maßnahmen in der Klebtechnik, Adhäsion Kleben und Dichten, 38, 10ff, 1994
6. Davis G. D., Contamination of Surfaces: Origin, Detection and Effect on Adhesion, Surface and Interface Analysis 20 (1993), 368-372
7. Wilken, R., Hennemann, O.-D., Silikonkontaminationen: Qualitative und Quantitative Charakterisierung, Adhäsion Kleben & Dichten, 1-2, 36ff, 2002
8. Wilken R., Buchbach, S., Hennemann, O.-D., Wann schädigen Silikonkontaminationen Haftklebungen und Lackierungen?, Adhäsion Kleben & Dichten, 1-2, 26ff, 2005
9. Czarnecki, J. v., Hayek-Boelingen, M. v., Gudladt, H.-J., Schenkel, H., Kontaminationstolerantes Kleben – aktueller Stand der Entwicklung, Adhäsion Kleben & Dichten, 4, 36ff, 2004
10. Fricke, A., Untersuchung des Einflusses silizium-organischer Kontaminationen auf die Adhäsionseigenschaften polymerer Werkstoffe, Diplomarbeit, TU-Clausthal, 2007
11. Parker, B. M., Waghorne, R., Testing Epoxy Composite Surfaces for Bondability, Surf. Interf. Anal., 17, 471ff, 1991
12. Beer, T., Feßmann, J., Spot-Feinreinigung in der Mikrotechnik, MO, 55 (11), 16ff, 2001
13. Beer, T., Feßmann, J., Nicht nur sauber, sondern rein, MO, 56 (4), 19ff, 2002
14. Behring, S., Prozessintegrierte Messung der Oberflächenreinheit, JOT, 8, 48ff, 2004
15. Mundwiler, R., Anthamatten, B., Determination and Influence of the Cleanness of Surfaces in the Adhesion Process, Swiss Aircraft and Systems Company (SF), 1996
16. Neubauer, A., Kluge, R., Erfassung von Restschmierstoffen auf Blechoberflächen, JOT, 4, 64-70, 2003
17. Schaller, A., Reinigungskontrolle in Sekunden, JOT, 7, 54ff, 2003
18. Krauth, P. J., Nicoli, H., Krannich, S., Pogmore, C. E., Hanström, S., Montan, S., Österholm, L. H., Online measurement of the surface cleanliness of steel strips Analytical techniques for processes products and the environment, Final Report, European Commission, EUR 19893 EN, 2001

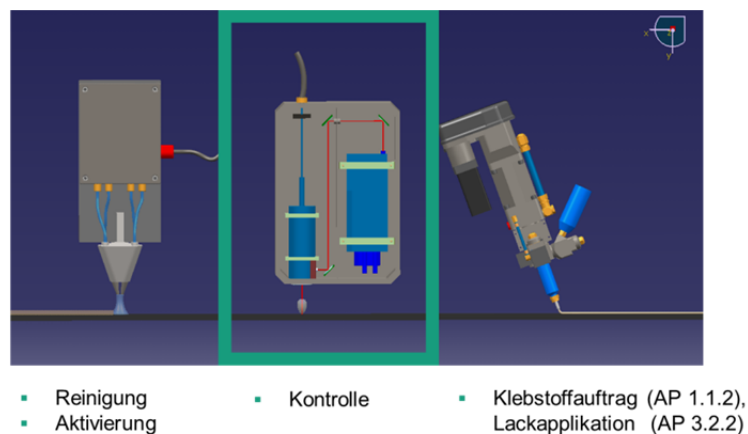
19. Smith, T., Surface Quality Unit for Inspection by Nondestructive Testing (SQUINT), National Sample Technical Conference, 576-587, 1983
20. Shlanger, S., Epstein, G., Optically Stimulated Electron Emission (OSEE): A Non-Invasive Technique for Contamination Detection, Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, 10, 589-595, 1991
21. Miasik, J., Measurement of surface cleanliness of steel strip on-line Phase 1: Development of design concepts, Final Report, European Commission, EUR 15813 EN, 1996
22. Markus, S., Wilken, R., Dieckhoff, S., Fehlervermeidung durch In-line-Monitoring des Oberflächenzustands, Adhäsion Kleben & Dichten, 4, 20ff, 2006
23. Markus, S., Meyer, U., Wilken, R., Dieckhoff, S., Hennemann, O.-D., Detection of Contaminants on Polymer Surfaces Using Laser Induced Breakdown Spectroscopy (LIBS), in: Polymer Surface Modification: Relevance to Adhesion, Mittal, K. L. (Ed.), (4), Utrecht: VSP, 2007 (in Press)
24. Markus S., R. Wilken, S. Dieckhoff, O.-D. Hennemann, Quality Monitoring of CFRP Surfaces in Bonding and Coating Processes, European Coatings, 7, 7 ff, 2007
25. Markus S., Die Laser Induced Breakdown Spectroscopy (LIBS) als Inline-Verfahren zur Detektion von Oberflächenkontaminationen im Bereich der Klebtechnik, Dissertation, Shaker Verlag, Aachen 2008
26. Gesang T., S. Markus, J. Haberland, Inline Nachweis kritischer Oberflächenkontaminationen beim SMD-Leitkleben mittels LIBS zur Qualitätssicherung, in: PLUS, 12/2009; 2831 ff, 2009
27. Wilken R., S. Markus, M. Amkreutz, C. Tornow, A. Seiler, S. Dieckhoff, U. Meyer, Prüfverfahren und Prüfvorrichtung, DE 102005027106 B3 (2007-01-04), FhG zur Förderung der angewandten Forschung e.V.
28. Müller-Reich C., R. Wilken, S. Kaprolat, „Trotz Trennmittelrückständen bestens verbunden“, Adhäsion, Kleben & Dichten 6 (2011), 32 -37
29. Michael Noeske, Jost Degenhardt, Silke Strudthoff and Uwe Lommatzsch, „Plasma jet treatment of five polymers at atmospheric pressure: surface modifications and the relevance for adhesion“, J. Adhes. Adhes., 24 (2004), 171 – 177
30. „Klebevorbehandeln von Kunststoffen“, <http://cleanlaser.de/wDeutsch/anwendungen/klebevorbehandeln-kunststoffe.php?navanchor=2110057>
31. Schulz D. „Gut gereinigt ist halb geklebt“, Adhäsion, Kleben & Dichten 7-8 (2010), 18 - 22
32. Minin E., G. Wisner, M. Frauenhofer, K. Dilger „Welche Vorbehandlung wirkt am besten?“, Adhäsion, Kleben und Dichten 6 (2011), 38 – 43
33. Wilken R., „Aspekte zum qualitätsgesicherten Kleben von CFK-Komponenten“, lightweight design 3 (2011), 33 - 37
34. Meer T. „AD-Plasma Vorbehandlung für das strukturelle Kleben von CFK Flugzeugstrukturen“ Deutscher Luft- und Raumfahrt Kongress 2014
35. Tracey, A. et. al. „Improving Adhesive Bonding Through Surface Characterization“ FAA JAMS 2014 Technical Review Meeting
36. M. Kanerva et al., “The peel ply surface treatment for adhesive bonding of composites, International Journal of Adhesion & Adhesives 43 (2013) 60–69

## 2 Eingehende Darstellung der Projektergebnisse

In den beiden Hauptarbeitspunkten AP1.1.2 und AP3.2.2 des Teilvorhabens QualiVor mit den zugehörigen Schwerpunkten zur Vorbehandlung verschiedener Luftfahrtwerkstoffe vor dem Kleben und vor dem Lackieren wurden die nachfolgend dargestellten wissenschaftlich-technischen Ergebnisse im Rahmen des übergeordneten Gesamtvorhabens CORINNA erzielt.

### 2.1 Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele

Die nachfolgende Darstellung bezieht sich jeweils auf die beiden Hauptarbeitspunkte des Teilvorhabens mit den Schwerpunkten der Oberflächenvorbehandlung verbunden mit angepasster Qualitätskontrolle vor dem anschließenden Kleben und Lackieren (AP1.1.2 und AP3.2.2)<sup>2</sup>, siehe Konzept in **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** Diese Entwicklungsarbeiten wurden für verschiedene Luftfahrtwerkstoffe durchgeführt. Der zugrundeliegende Ansatz der Entwicklungen basiert auf der Idee, eine Kombination aus automatisierter Oberflächenvorbehandlung mit einer geeigneten Inspektion des Behandlungserfolges vor der Applikation des Klebstoffes oder Lackes zu etablieren.



**Abbildung 1:** Projektidee zur Vorbehandlung mit Prozessüberwachung durch Oberflächen-Monitoring vor dem Kleben oder Lackieren von Bauteilen in der Flugzeugfertigung

### 2.2 AP1.1.2 Vorbehandlung und Eigenschaften von Klebungen

Diese Arbeiten dienen der Charakterisierung der Vorbehandlungseffekte zur bedarfsgerechten, qualitätsgesicherten Vorbehandlung von CFK-Bauteilen vor dem Kleben.

Dazu wurden Untersuchungen zur Auswahl von Oberflächenvorbehandlungsverfahren und von Methoden zur Qualitätssicherung der Oberflächeneigenschaften vor dem Kleben durchgeführt. Zudem erfolgte eine Bewertung der Anwendungsreife der qualitätsgesicherten Vorbehandlung von CFK-Bauteilen vor dem Kleben.

Die folgende Tabelle 1 gibt eine Übersicht über das mit Airbus abgestimmte Untersuchungsprogramm, das für die zwei ausgewählten CFK-Substratmaterialien (Substrat A und Substrat

<sup>2</sup> Die Bezeichnung AP1.1.2 und 3.2.2 entspricht der Nummerierung der Arbeitspakete des übergeordneten Gesamtprojektes CORINNA.

B) ausgelegt wurde. Zudem wurden die für die CFK-Herstellung notwendigen Hilfsstoffe und Materialien betrachtet. Dazu gehören zwei verschiedene Abreißgewebe (trockenes Peel Ply und nasses Peel Ply), zwei ausgewählten Trennmittel (wasserbasiert und lösemittelbasiert), sowie eine Trennfolie.

**Tabelle 1:** Untersuchungsmatrix mit ausgewählten Materialien und Oberflächenzuständen

Anwendungsfall	CFK-Substrat A	CFK-Substrat B
Abreißgewebe trocken (Subst. A) nass (Subst. B)	<b>Ziel:</b> -Analyse des Plasmaeffekts auf die Klebung nach Entfernen des Abreißgewebes -Untersuchung der Eignung von Plasmabehandlung bei überschrittener Offenzeit anstelle von Schleifen	
	- Übertragbarkeit der Ergebnisse von Substrat B auf A prüfen	-Probenherstellung und Plasmabehandlung -Identifikation geeigneter Prozessparameter über XPS-Analyse und mechanische Prüfung geklebter Proben über G <sub>1C</sub> -Auswertung und Zusammenfassung der Ergebnisse (inkl. DoE)
Trennmittel lösemittelbasiert wasserbasiert	<b>Ziel:</b> -Untersuchung der Eignung des Reinigungsverfahrens zur Entfernung der starken, ungleichmäßigen Kontaminationen -Analyse des Plasmaeffekts auf die Klebfestigkeit	
	- Übertragbarkeit der Ergebnisse von Substrat B auf A prüfen	-Herstellung kontaminierter Proben mit beiden Trennmitteln -Identifikation geeigneter Prozessparameter für Kombinationsverfahren über XPS, Zug-Scher- und G <sub>1C</sub> -Proben -Auswertung und Zusammenfassung der Ergebnisse
Trennfolie	<b>Ziel:</b> -Untersuchung der Eignung der Plasmabehandlung zur Entfernung der leichten, gleichmäßigen Kontaminationen -Analyse des Plasmaeffekts auf die Klebfestigkeit	
	- Übertragbarkeit der Ergebnisse von Substrat B auf A prüfen	-Herstellung kontaminierter Proben -Identifikation geeigneter Prozessparameter über Testen der Benetzungseigenschaften und XPS -Auswertung und Zusammenfassung der Ergebnisse

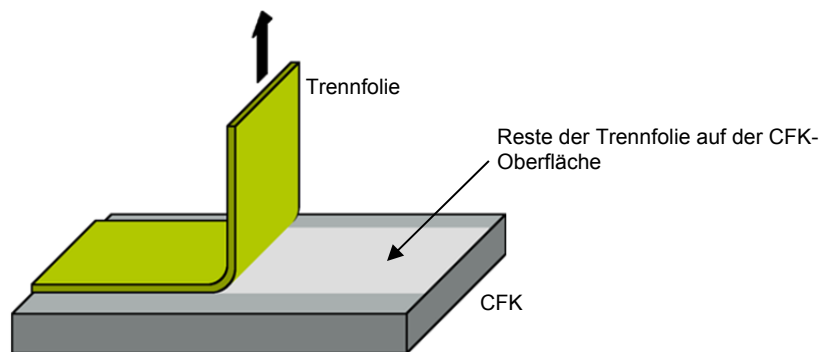


## Exemplarische Darstellung der Arbeit von Untersuchungen zur Vorbehandlung von CFK-Bauteilen

Neben den Untersuchungen an CFK-Bauteilen, die mit dem Einsatz von Trennmitteln und Abreissgeweben (Peel Plys) gefertigt werden, wurden auch CFK-Bauteile betrachtet, die mit Hilfe von Trennfolien hergestellt werden.

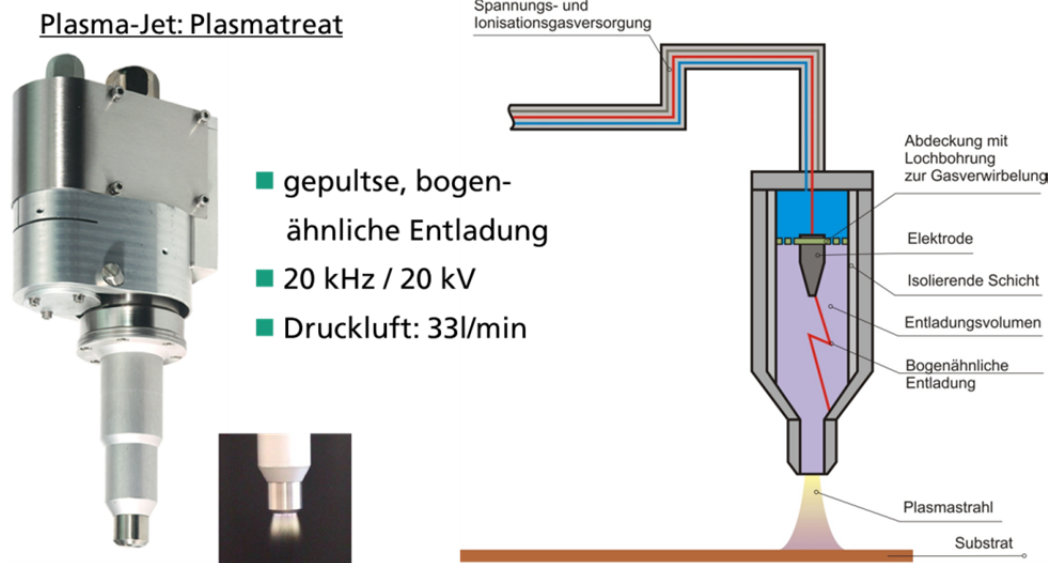
Nachfolgend werden exemplarisch für die verschiedenen Untersuchungen die Ergebnisse zu den mit Trennfolien hergestellten CFK-Bauteilen dargestellt.

Die Trennfolie wird zur Abdeckung der zu fertigenden CFK-Bauteile verwendet und im Anschluss an die Aushärtung des Bauteils im Autoklaven von den CFK-Oberflächen abgezogen, oder aber auch als Bauteilschutz bis zur weiteren Verarbeitung auf der Oberfläche belassen. Anhand von oberflächenanalytischen Untersuchungen wurde den Fragen nachgegangen, ob die Trennfolien nach dem Abziehen Rückstände auf der CFK-Oberfläche hinterlassen (Abbildung 2) und wie diese Rückstände gegebenenfalls mittels CO<sub>2</sub>-Schneestrahlschmelztechnik (siehe Abbildung 4) oder der Behandlung mit Atmosphärendruckplasma (siehe Abbildung 3) entfernt oder chemisch so umgewandelt werden können, dass die behandelten CFK-Bauteile anschließend gute Adhäsionseigenschaften für nachfolgende Klebprozesse aufweisen. Die Analysen des Einflusses von Trennfolien bei der CFK-Fertigung wurden unter Verwendung der fluorpolymeren Trennfolie W durchgeführt, die vom Projektpartner Airbus ausgewählt worden ist.



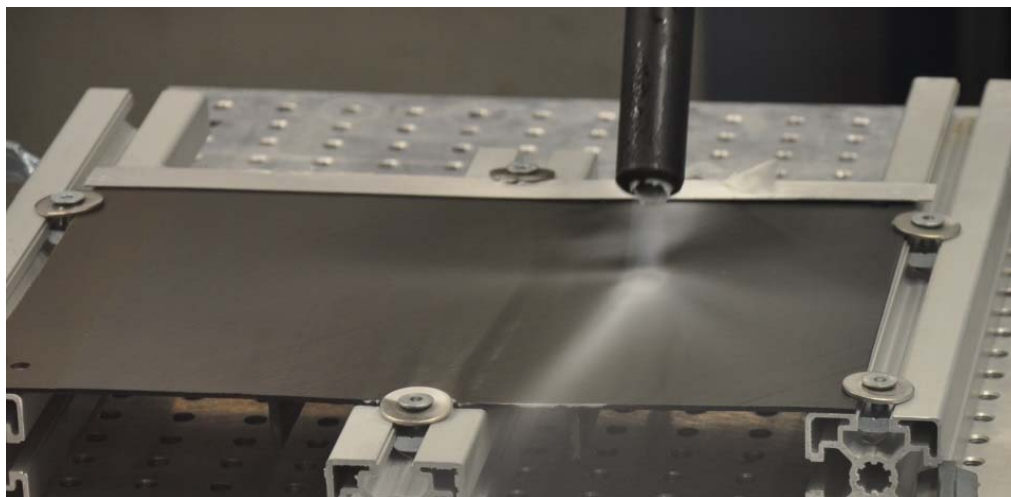
**Abbildung 2:** Das Abziehen der Trennfolie hinterlässt Rückstände auf der Bauteiloberfläche

Für die fluorpolymere Trennfolien konnte gezeigt werden, dass sehr intensive AD-Plasmaaktivierung und die dadurch induzierte Reduzierung von fluorhaltigen Rückständen der Trennfolien auf den CFK-Oberflächen durch plasmachemische Erosion zu hohen Schälfestigkeiten der Klebverbindungen (Festigkeiten gem. G1c-Test zur Bruchzähigkeit) führen. Diese Festigkeiten der Klebverbindungen sind sogar höher sind als im Fall von Vergleichsklebungen, nach mit geschliffenen Substratoberflächen hergestellt worden sind, was der aktuellen industriellen Standardvorbehandlung entspricht. Für niedrigere Behandlungsintensitäten lagen die Festigkeiten nur geringfügig über der unbehandelten Referenz. Bei mittleren Intensitäten waren sie vergleichbar mit dem Referenzzustand Schleifen, jedoch mit deutlich niedrigerer Schwankungsbreite.



**Abbildung 3:** AD-Plasma Quelle Typ RD1004 Plasmatreat

Dies deutet daraufhin, dass die AD-Plasmabehandlung nur mit hohen Intensitäten, oder aber hohen Wiederholungsraten in der Lage ist, die Fluorkontaminationen effizient zu entfernen. Aus diesem Grund wurden zusätzliche Arbeiten mit der CO<sub>2</sub>-Schneestrahls-technik (siehe Abbildung 4) zur Entfernung von fluorhaltigen Trennfolienrückständen von den CFK-Oberflächen vor der Plasmabehandlung durchgeführt. Auch in diesem Fall wurde die Effizienz der Behandlung durch XPS-Analysen nachgewiesen.



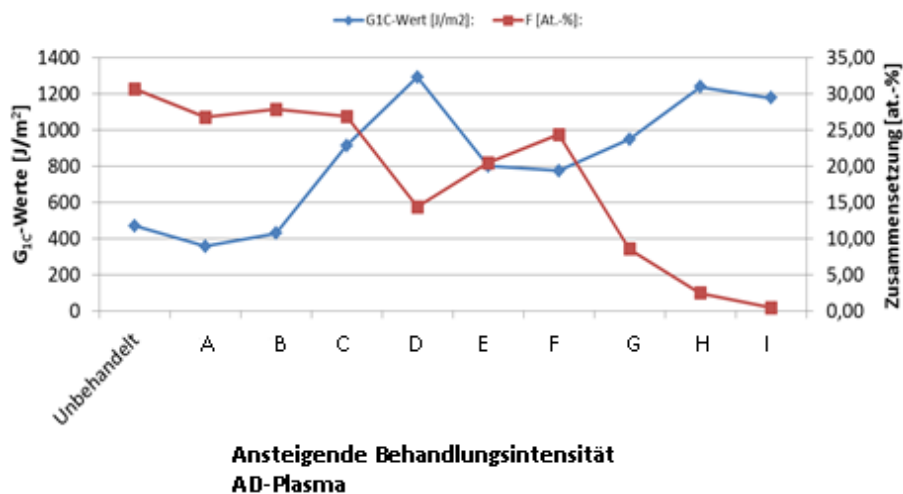
**Abbildung 4:** CO<sub>2</sub>-Schneestrahls-Reinigung einer CFK-Oberfläche mit einer CryoSnow-Runddüse

Die Oberflächenanalysen mittels Röntgenphotoelektronenspektroskopie (XPS), die in Auszügen in Tabelle 2 wiedergegeben sind, zeigen eine deutliche Reduzierung der fluorhaltigen Rückstände auf den CFK-Oberflächen durch die CO<sub>2</sub>-Schneestrahlsbehandlung, sowie insbesondere durch eine intensive Plasmabehandlung. Eine vollständige Entfernung der Rückstände ist nach dem Schleifprozess zu beobachten.

**Tabelle 2:** XPS-Untersuchung von CFK-Proben, Substrat B, mit Trennfolie hergestellt, im Ausgangszustand, nach Schleifen, nach CO<sub>2</sub>-Schneestrahlsbehandlung („mittel“) und nach einer Kombinationsbehandlung aus CO<sub>2</sub>-Schneestrahls- und Plasmabehandlung: Chem. Zusammensetzungen in Atom-% (at%)

	C (at%)	O (at%)	N (at%)	Si (at%)	S (at%)	F (at%)	Cl (at%)	P (at%)	Na (at%)	Ca (at%)
CFK-Substr. B mit Trennfolie, <b>Ausgangszustand</b> , Position 1	56,5	15,7	1,2	0,9	0,4	25,3	<0,1	-	-	-
CFK-Substr. B mit Trennfolie, <b>Ausgangszustand</b> , Position 2	55,1	15,6	1,0	0,8	0,3	27,1	<0,1	-	-	-
CFK-Substr. B mit Trennfolie, <b>geschliffen</b> , Position 1	82,5	12,4	3,5	0,5	1,0	-	-	-	-	0,2
CFK-Substr. B mit Trennfolie, <b>geschliffen</b> , Position 2	83,1	11,9	3,5	0,2	1,2	-	-	-	-	<0,1
CFK-Substr. B mit Trennfolie, nur <b>CO<sub>2</sub>-Strahlen</b> , Position 1	65,8	19,2	2,8	0,4	0,9	10,6	<0,1	0,1	0,1	-
CFK-Substr. B mit Trennfolie, nur <b>CO<sub>2</sub>-Strahlen</b> , Position 2	59,4	19,3	1,1	0,8	0,4	18,8	<0,1	<0,1	<0,1	-
CFK-Substr. B mit Trennfolie, <b>CO<sub>2</sub>-Strahlen + Plasma</b> „strong“, Position 1	57,3	30,8	6,1	0,7	3,6	0,3	<0,1	0,5	0,7	
CFK-Substr. B mit Trennfolie, <b>CO<sub>2</sub>-Strahlen + Plasma</b> „strong“, Position 2	57,3	31,4	5,7	0,7	3,2	0,6	-	0,4	0,8	

Die zugehörige Untersuchung von Klebverbindungen der vorbehandelten Substrate zeigt eine deutliche Korrelation zwischen der Fluorkonzentration auf den CFK-Oberflächen und den gemessenen Schälfestigkeiten (G1c) der zugehörigen Klebungen (siehe Abbildung 5).



**Abbildung 5:** Vergleich der mechanischen Schälfestigkeit (G1c) mit dem nachgewiesenen Fluorkonzentration, als Indikator für die Trennfolienrückstände auf den CFK-Substraten (Substrat B), in Abhängigkeit von den Plasmabehandlungsparametern mit ansteigender Intensität von links nach rechts.

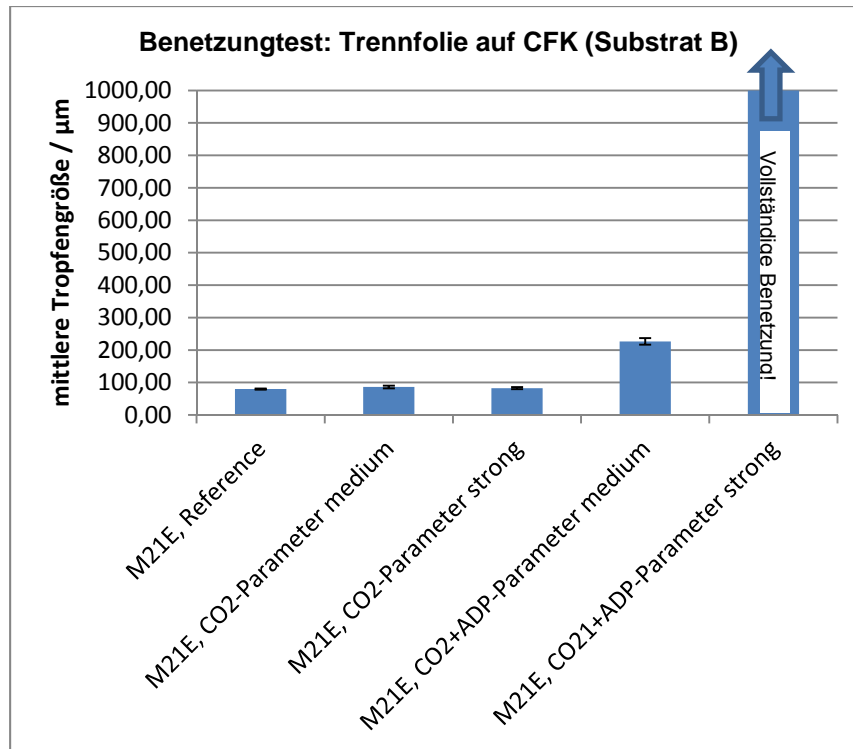
Die Ergebnisse zur mechanischen Schälfestigkeit (G1c) in Abhängigkeit von der restlichen Fluorkonzentration nach der jeweiligen Plasmabehandlungsparametern in Abbildung 5 zeigen, dass die Oberflächenvorbehandlung auf eine weitgehende Entfernung der fluorhaltigen Trennfolienreste abzielen sollte. Dies gelingt durch eine sehr intensive Plasmabehandlung oder ggf. in Kombination mit einer Vorreinigung durch CO<sub>2</sub>-Schneestrahlsverfahren (siehe Tabelle 2).

Zum Nachweis des Vorbehandlungseffektes im Hinblick auf das Benetzungsverhalten der CFK-Oberflächen wurde der Aerosol Benetzungs- (engl. Wetting) Test (AWT) verwendet. Dieses Verfahren wurde mit einer Dom-Beleuchtung ausgestattet, um ausreichende und vor allem gleichmäßige Beleuchtung der Probenoberfläche zu gewährleisten.



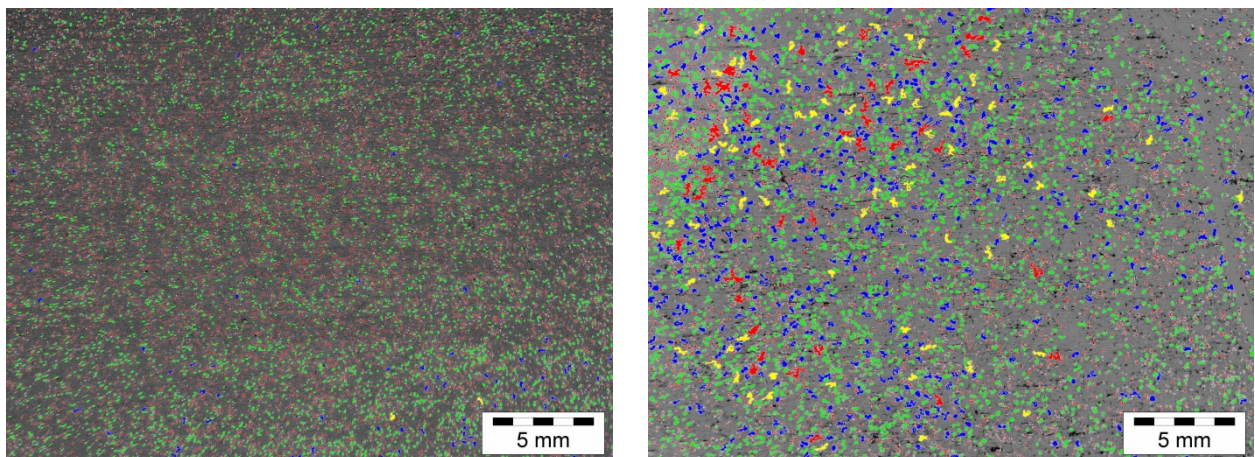
**Abbildung 6:** Aerosol-Wetting Test (AWT), Laboraufbau

Die mittels Trennfolie gefertigten CFK-Bauteile wurden im Anschluss an die Vorbehandlung mit der Aerosol-Benetzungsprüfung hinsichtlich des Vorbehandlungseffekts untersucht. Die Ergebnisse der Untersuchungen sind in Abbildung 7 als mittlere Tropfengröße dargestellt. Der Anstieg der Benetzungsfähigkeit ist deutlich nach der Kombination CO<sub>2</sub>-Reinigung und AD-Plasma-Behandlung zu erkennen. Der Effekt der Behandlung mit dem Parameter „strong“ bei CO<sub>2</sub>-Reinigung in Kombination mit AD-Plasma führt zu einer vollständige Benetzung der Probenoberfläche. Dies deutet auf einen guten Vorbehandlungseffekt hin.



**Abbildung 7:** Zusammenfassung der Ergebnisse der Aerosol-Benetzungsprüfung als Nachweis der Vorbehandlung von CFK-Bauteilen, die mittels Trennfolie W entformt wurden.

Der Effekt der verbesserten Benetzungsfähigkeit der CFK-Oberfläche ist exemplarisch auch in Abbildung 8 dargestellt. Abgebildet sind jeweils die Tropfenmuster der benetzten Oberflächen. Auf der linken Seite ist der unbehandelte Referenzzustand eines CFK-Bauteils abgebildet. Rechts ist der Zustand nach kombinierter  $\text{CO}_2$ -Reinigung und AD-Plasma-Aktivierung mit dem Parameter „medium“ zu sehen. Bereits ohne Auswertesoftware ist die Vergrößerung der mittleren Tropfendurchmesser, aufgrund der besseren Benetzungseigenschaften nach der Oberflächenvorbehandlung zu erkennen.



**Abbildung 8:** Benetzungstest (CFK, Substrat B, mit Trennfolie gefertigt): Vergleich der mittleren Tropfengrößen, links: unbehandelte Referenz, rechts: Zustand nach  $\text{CO}_2$ -Reinigung und AD-Plasmaaktivierung mit dem Parameter „medium“. Die verschiedenen Tropfengrößenklassen sind jeweils farblich dargestellt.

## **Zusammenfassende Bewertung der Anwendungsreife der Vorbehandlungsprozesse für das Kleben inkl. Qualitätssicherung (AP1.1.2)**

Oberflächenvorbehandlungsverfahren:

- Für die beiden untersuchten CFK-Substrate A und B konnten geeignete Parameter für eine kombinierte Oberflächenvorbehandlung zur Entfernung von Resten der verwendeten Fertigungshilfsmittel (Trennmittel, Reste von Trennfolien) gefunden werden.
- Insgesamt lieferte die Kombination aus CO<sub>2</sub>-Schneestrahl-Reinigung und AD-Plasmaaktivierung unabhängig von der Art der Kontaminationen (Trennmittel M / D, Trennfolie W) und für die beiden ausgewählten CFK-Substrate (A und B) eine deutliche Erhöhung der Klebfestigkeiten im Vergleich zum manuellen Schleifen
- Durch die Automatisierung der Verfahren kann neben der erhöhten Festigkeit auch eine erhöhte Prozesssicherheit erreicht werden, die sich auch in der Reduzierung der Streuung der G1C-Werte zeigt.
- Die Kosten für die Installation einer CO<sub>2</sub>-Schneestrahl-Reinigung und der AD-Plasmaaktivierung können durch die gleichzeitige Implementation eines automatisierten Klebprozesses gesenkt werden. So könnten mit einem einzigen Roboter die Prozesse zum Reinigen und Aktivieren der CFK-Oberfläche, sowie die anschließende Inline-Qualitätssicherung und der nachfolgende Klebstoffauftrag durch einen Tool-Changer nacheinander auf einander abgestimmt erfolgen und kosteneffizient realisiert werden.
- Aufgrund der höheren Klebfestigkeiten, die durch die neuen Vorbehandlungsverfahren erreichbar sind, werden zudem neue Designmöglichkeiten und damit die Aussicht auf eine weitere Gewichtsreduzierung geschaffen.

Qualitätssicherungsverfahren:

- Zur Bewertung der Benetzungseigenschaften konnte mit der Aerosol-Benetzungsprüfung für die beiden untersuchten CFK-Substratmaterialien eine geeignete Prüftechnik gefunden werden, um den Erfolg der Oberflächenvorbehandlung nachzuweisen. Damit ist der Effekt der Vorbehandlung durch CO<sub>2</sub>-Reinigung oder AD-Plasma nachweisbar und darüber hinaus auch eine Unterscheidung der verschiedenen Oberflächenzustände möglich.
- Die Methode der Aerosol-Benetzungsprüfung ist geeignet, um mit Hilfe eines automatischen Handhabungssystems (Roboter) betrieben zu werden. Je nach Anwendung kann bei Bedarf jederzeit ein stationärer Aufbau verwendet werden.
- Darüber hinaus ist für die Auswertung der Aerosol-Benetzungsprüfung ein Mustererkennungsverfahren erfolgreich getestet worden, das für den Einsatz eine schnelle und robuste Handhabung verspricht.
- Die objektive Bewertung des Oberflächenzustandes schafft die notwendigen Voraussetzungen für eine Anwendbarkeit der Prüftechnik als Qualitätssicherungsverfahren im Klebprozess. Die Aerosol-Benetzungsprüfung erlaubt somit eine Steigerung der Prozesssicherheit in der klebtechnischen Fertigung von CFK-Bauteilen im Flugzeugbau.

Im Sinne einer qualitätsgesicherten Vorbehandlung vor dem Kleben von CFK-Bauteilen zeigen die Ergebnisse insgesamt die industrielle Anwendbarkeit der untersuchten Kombination aus Oberflächenvorbehandlungsverfahren und Inspektionstechniken zur Qualitätssicherung. Diese Kombination setzt sich aus einer CO<sub>2</sub>-Schneestrahl-Reinigung und einer AD-Plasmaaktivierung sowie der entsprechenden Qualitätssicherung mittels Aerosol-Benetzungsprüfung zusammen und erfüllt die Aufgabenstellung im Hinblick auf die nachweisbare Entfernung von Resten verschiedener Fertigungshilfsmittel (Trennmittel, Trennfolie, Peel-Ply) auf den ausgewählten CFK-Bauteilen.

### 2.2.1 Zu AP3.2.2 „Prozess- und Testmethodenentwicklung für das Lackieren“

Der Schwerpunkt der Aktivitäten dieses Arbeitspaketes lag in der Erforschung, Entwicklung und Adaptierung geeigneter Vorbehandlungsverfahren für die Lackierung von duromeren und thermoplastischen Faserverbundwerkstoffen, sowie Titanmaterialien für unterschiedliche Anwendungsszenarien.

Dazu wurden geeignete Vorbehandlungsverfahren und Methoden zur Qualitätssicherung von Oberflächeneigenschaften vor dem Lackieren ausgewählt, untersucht, optimiert und abschließend bewertet.

Zur Untersuchung der ausgewählten Materialien (siehe Tabelle 3) im Hinblick auf die Anforderungen an die Lackierung wurden nach Vorgabe durch wasserbasierte Lacksysteme für den Interieur- und Exterieur-Bereich ausgewählt, bestehend aus Primer und ggf. zusätzlichem Decklack (Top-Coat).

**Tabelle 3:** Verwendete Materialien, Behandlungszustände

Material	System	Behandlungszustand
Duromer CFK	Prepreg A, Prepreg A + Surface Master	Entformungsprozess: Zwei Trennmittel (Typ: Tr.m.D und Tr.m.M) mit diversen betriebsrelevanten Kontaminationsgraden werden untersucht  Top-Coat lackierte CFK Proben für Wiederlackierung
Thermoplast CFK	TP A, TP B	•umgeformte thermoplastische Proben mit Trennmittel (Typ C). •Variation und Analyse der Trennmittelkontamination
Titan	Ti6Al4V	•SAA anodisiert, Cetylalkohol-kontaminiert •Anlieferungszustand (gewalzt, geschmiedet)

Im Rahmen der Untersuchungen von Decklacken (Top-Coat) konnte gezeigt werden, dass die Kombinationen einer Lösemittelvorreinigung mit einer AD-Plasmaaktivierung zu einer sehr guten Lackhaftung führt, die aufwendige Schleifprozesse ersetzen kann. Dazu waren die entsprechende Erforschung der plasmachemischen und thermischen Wechselwirkung mit den jeweiligen Polymeroberflächen und Lackadditiven notwendig. Durch eine Adaption der Behandlungsintensität konnte so ein Parametersatz identifiziert werden, der für alle drei getesteten Lacksysteme (A, M, P) geeignet war (Tabelle 4 rechts APP-L3).

**Tabelle 4:** Lackhaftung auf lackierten Oberflächen ermittelt durch Gitterschnitttest (Gt) vor (dry) und nach Wasserauslagerung (wet) in Abhängigkeit des Lacksystems und der AD-Plasmaparameter

Prozess	APP-L1		APP-L2		APP-L3	
	Dry	Wet	Dry	Wet	Dry	Wet
Lack A	0	3-4	0	3	0	0
Lack M	0	3	0	0	0	0
Lack P	0	3	0	0	0	0

Die Vorbehandlung von duromeren, trennmittelkontaminierten CFK Materialien mittels CO<sub>2</sub>-Schnee und AD-Plasma führte bei moderaten, technischen Kontaminationsgraden mit dem siliziumorganischen Trennmittel M zu guten Lackhaftungsergebnissen (Tabelle 5).

**Tabelle 5:** Lackhaftung auf CFK, ermittelt durch Gitterschnitttest, CFK-A G-M / primer 313-02

Parameter	Trockenhaftung GT (Req. <1)			Nach 14 Tagen Wasserauslagerung GT (Req. ≤ 1)		
P4+PL1	0	0-1	0	0-1	0-1	0
P5+PL1	0-1	0	0	0-1	0-1	0-1
P6+PL1	0	0		0-1	0-1	

Bei sehr hohen Kontaminationen des Trennmittels D stieg jedoch die erforderliche Strahlintensität bei der Reinigung so stark an (P1, P2, P3, Tabelle 6), dass die Kosten und die Flächenleistung für eine Anwendung vor einer Lackierung nicht mit einem manuellen Schleifprozess konkurrieren konnten.

**Tabelle 6:** Lackhaftung auf CFK, ermittelt durch Gitterschnitttest, CFK-A C-D / Primer 313-02

Parameter	Trockenhaftung GT (Req. <1)			Nach 14 Tagen Wasserauslagerung GT (Req. ≤ 1)		
P1+PL1	0	1	0	1-2	1	1-2
P2+PL1	0-1	0-1	0-1	1	0	0
P3+PL1	0-1	0	0-1	0-1	0	1
P4+PL1	1	1	1	4	3	5
P5+PL1	1	1	2	5	4	5
P6+PL1	1	3	4	5	5	5
P1+PL2	1	0-1	0	2	1	1
P4+PL2	0-1	0-1	1	3	2-3	4
P5+PL2	0	1	0-1	5	4	2
P6+PL2	2	1-2	1	5	5	5

Da jedoch der Einsatz des Trennmittels D im Gegensatz zum Trennmittel M bei Airbus favorisiert wird, ist ein Einsatz der Kombination des Schneestrahlers mit AD-Plasmaaktivierung zum jetzigen Zeitpunkt nicht vorgesehen. Jedoch kann die Einführung neuer Trennmittel und verbesserter Applikation und Trennprozesse die technische Anwendung in den nächsten Jahren durchaus möglich und wirtschaftlich machen.

Für thermoplastische Kleinbauteile konnte im Rahmen des Projektes gezeigt werden, dass die Aktivierung mittels Niederdruck-Plasma zu sehr guten Lackhaftungsergebnissen führt. Auch hier wurde deutlich, dass die Art der Entformung, bzw. Umformung der Bauteile sowie die Menge und Art der Applikation des eingesetzten Trennmittels die Vorreinigungsaufwand bestimmt und die erreichbare Lackhaftung begrenzen kann.

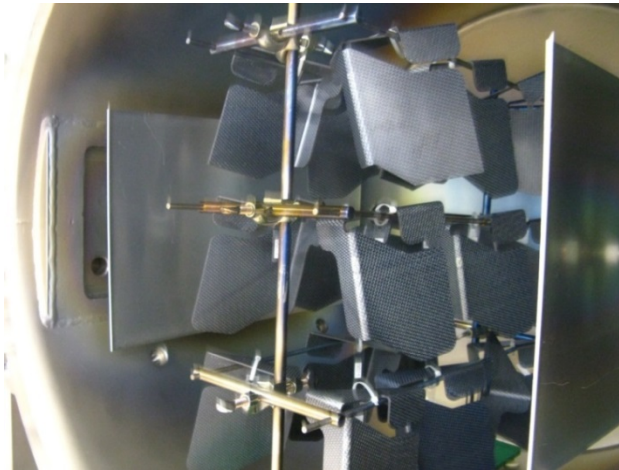
Es wurden Versuche mit unterschiedlichen manuell eingesetzten Reinigern durchgeführt und in Kombinationen mit umfangreichen Parametervariation und Plasmaexperimenten konnten so auch sehr gute Lackhaftungsergebnisse für wasserbasierte Lacke realisiert werden, was mit Schleif- oder Strahlprozessen nicht erreicht werden konnte.



Jedoch zeigten auch hier Proben mit starken siliziumorganischen Ausgangskontaminationen, die auf nicht optimierte Entformungs- und Umformprozesse zurückzuführen sind, deutliche schlechtere Lackhaftungsergebnisse nach Wasserauslagerungen. Aus diesem Grund sind weitere bilaterale Arbeiten zwischen Airbus und IFAM geplant, um die ND-Plasmaaktivierung durch nicht-manuelle Vorreinigungen zu einer sicheren Prozesslösung zu entwickeln.

Nachfolgend werden die Ergebnisse zur Oberflächenvorbehandlung inkl. und Qualitätssicherung der thermoplastischen Klein-Bauteile dargestellt.

Zur Vorbehandlung von formkomplexen Bauteilen wurden verschiedene Behandlungsintensitäten bzw. Behandlungszeiten im Niederdruckplasma (ND-Plasma, siehe Abbildung 9) untersucht. Dabei wurden die Behandlungszeiten zwischen 10 min und 45 Minuten variiert.



**Abbildung 9:** Kleinvolumige ND-Plasma-Anlage mit hohem Bauteilfüllgrad

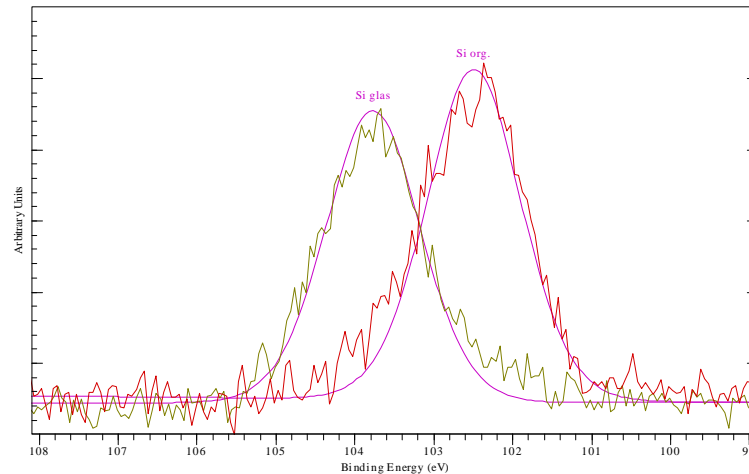
Vor der eigentlichen Behandlung im Niederdruckplasma wurden die Bauteile manuell mit dem Reiniger Diestone DLS vorgereinigt.

Die Veränderung der Oberflächenchemie wurde durch XPS-Messungen jeweils vor und nach Niederdruckplasmabehandlung (NDP) abgebildet. Tabelle 7 zeigt zusammengefasst die Auswertung der XPS-Untersuchungen.

**Tabelle 7:** XPS-Ergebnisse vorbehandelter thermoplastischer-Bauteile nach Reinigung mit Diestone und nach unterschiedlicher Behandlungszeit im Niederdruckplasma (NDP). Angaben in Atomprozent (at%)

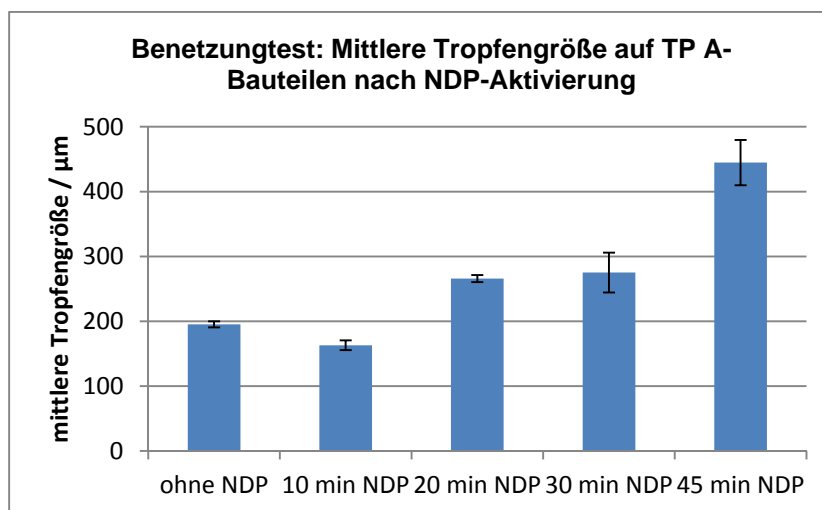
	O	N	C	S	Si	Al
TP A Nr. 6 nach Reinigung mit Diestone	4,5	0,4	83,3	10,9	1,0	-
TP A Nr. 16 nach Reinigung mit Diestone	12,5	0,2	73,1	6,4	7,9	-
TP A Nr. 6 nach Reinigung mit Diestone und 30 min NDP	37,3	3,5	44,6	10,9	1,0	2,8
TP A Nr. 12 nach Reinigung mit Diestone und 10 min NDP	26,9	2,5	63,0	5,2	2,0	0,6
TP A Nr. 16 nach Reinigung mit Diestone und 20 min NDP	32,7	2,6	49,8	8,6	5,3	1,0
TP A Nr. 25 nach Reinigung mit Diestone und 45 min NDP	35,3	3,1	46,1	10,4	2,6	2,6

Deutlich zu erkennen ist der gestiegene Sauerstoffanteil (O) bei den vorbehandelten Bauteilen. Die Auswertung der Si2p-Detailspektren zeigt zudem, dass die Umwandlung von silikonartigen, organischen Si-Verbindungen (Bindungsenergie 102,5 eV) zu haftungsunschädlichen silikatischen, glasartigen Spezies (Bindungsenergie 103,7 eV) stattgefunden hat. Dies ist exemplarisch in Abbildung 10 dargestellt. Im Ergebnis konnten Behandlungsparameter identifiziert werden, die zu einer sehr guten Lackhaftung führen.



**Abbildung 10:** XPS Si-2p Detailspektrum der Probe Nr. 6 vor und nach NDP-Aktivierung. Deutlich zu erkennen ist die Umwandlung von organischen Silikonspezies (BE 102,5 eV) zu glasartigen Silikonspezies (BE 103,7 eV)

Um den Effekt der Niederdruckplasmaaktivierung von thermoplastischen Kleinbauteilen nachzuweisen, wurde das Benetzungsverhalten der Oberflächen mittels Aerosol-Benetzungsprüfung untersucht. Hierzu wird ein Wasseraerosol mit einer Ultraschallzerstäuberdüse erzeugt und auf die zu prüfende Oberfläche gebracht. Die an der Oberfläche entstehende Tropfgrößenverteilung gibt Aufschluss über die Benetzbarkeit der Oberfläche.



**Abbildung 11:** Auswertung der mittleren Tropfengrößen in Abhängigkeit der Behandlungszeit mit Niederdruckplasma (NDP).

In Abbildung 11 sind die mittels Aerosol-Benetzungsprüfung ermittelten mittleren Tropfengrößen an den vorbehandelten Bauteilen dargestellt. Zu erkennen ist eine Vergrößerung der mittleren Tropfengrößen mit ansteigender Behandlungsintensität. Dieses Ergebnis belegt die Verbesserung des Benetzungsverhaltens der Thermoplast-Oberflächen durch die Plasmabehandlung und die prinzipielle Einsatzmöglichkeit einer Qualitätssicherung der Vorbehandlung mit Hilfe der Aerosolbenetzungsprüfung. Abschließend konnte die Aerosol-Benetzungsprüfung in der derzeitigen Ausbaustufe jedoch im Fall der Bauteile nicht erfolgreich getestet werden, weil das Erscheinungsbild dieser Werkstoffoberflächen teilweise sehr großen Schwankungen unterworfen war, deren Kontrastunterschiede zu Schwierigkeiten bei der Bildauswertung der Benetzungsmuster führten. Eine zusätzlich untersuchte Bildauswertung mittels Mustererkennung könnte diese Kontrastproblematik ggf. umgehen. Jedoch wäre hier zunächst eine grundlegende Anpassung des Inspektionsverfahrens und der Auswerterroutine auf die Substratoberfläche TP A notwendig, die aufgrund des geschätzten Entwicklungsaufwandes von ca. 6-8 Personenmonaten nicht mehr im Rahmen des Projektes erfolgen konnte.

### **Zusammenfassende Bewertung der Anwendungsreife der Vorbehandlungsprozesse für das Lackieren inkl. Qualitätssicherung (AP3.2.2)**

- Auf thermoplastischen Kleinbauteilen konnte bei geeigneter Applikation des Trennmittels C und Niederdruck-Plasmaprozesszeiten von 10-20 min die Anforderungen an die Lackhaftung vor und nach Wasserauslagerung erfüllt werden. Es sind für starke Ausgangskontaminationen jedoch noch verbesserte Vorreinigungsprozesse notwendig.
- Die Aktivierung von Decklacken (Top-Coats) für anschließende Überlackierung mittels AD-Plasma konnte erfolgreich gezeigt werden, so dass aktuell entsprechende Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen für Testkomponenten bei Airbus unternommen werden.
- Auf duromeren CFK-Systemen konnten die prinzipielle Nutzbarkeit der CO<sub>2</sub>-Schneereinigung in Verbindung mit einer AD-Plasmaaktivierung für wasserbasierte Lacksysteme gezeigt werden. Die erforderlichen CO<sub>2</sub>-Strahlintensitäten, -Zeiten und die zugehörigen Kosten hängen jedoch stark von Kontaminationsgrad ab, wodurch die Wirtschaftlichkeit stark variiert.
- Die Arbeiten zum Vakuumsaugstrahlen von Titanverbindungselementen wurden im Berichtszeitraum durch Untersuchungen mittels IR-Laser ersetzt. Dies wurde auf Wunsch des Projektpartners Airbus notwendig, da Die Laserbehandlung aufgrund der hohen Anwendungsattraktivität bei einigen Airbus-Standorten großes Interesse stieß. Das Laserbehandeln von Titanoberflächen bietet eine gute badfreie Möglichkeit zur lokalen Behandlung vor Kleb-, Dicht- und Lackierprozessen. Aufgrund der Nutzung eines kommerziellen Lasersystems mit einer steuerbaren Scanneroptik kann die Anwendungsreife als hoch eingestuft werden.

Zur Qualitätssicherung der Vorbehandlung der verschiedenen Werkstoffoberflächen vor dem Lackieren kommen zwei Verfahren im Hinblick auf eine mögliche industrielle Anwendung in Frage.

- Zur Qualitätssicherung des Vorbehandlungserfolges von thermoplastischen Werkstoffoberflächen vor dem Lackieren konnte die Aerosol-Benetzungsprüfung in der derzeitigen Ausbaustufe abschließend nicht erfolgreich getestet werden, weil das Erscheinungsbild der Werkstoffoberflächen sehr große Schwankungen aufwies, deren Kon-

trastunterschiede zu Schwierigkeiten bei der Bildauswertung der Benetzungsmuster führten. Eine zusätzlich untersuchte Bildauswertung mittels Mustererkennung könnte diese Kontrastproblematik ggf. umgehen. Jedoch wäre hier zunächst eine grundlegende Anpassung des Inspektionsverfahrens und der Auswerteroutine auf die Substratoberfläche notwendig, die aufgrund des geschätzten Entwicklungsaufwandes von ca. 6-8 Personenmonaten nicht mehr im Rahmen des Projektes erfolgen konnte.

- Als Alternative zur Aerosol-Benetzungsprüfung ist daher das Verfahren der laserinduzierten Plasmaspektroskopie (LIBS) erfolgreich getestet worden. Vor einem Einsatz zur automatischen Inline-Prüfung von Bauteiloberflächen sind bei diesem Verfahren zusätzliche Maßnahmen zur Arbeitssicherheit in der Fertigungsumgebung zu beachten, da hier eine gepulsten Laserquelle verwendet wird.
- Die Eignung der Aerosol-Benetzungsprüfung (AWT) als aussagekräftige Testmethode zur Bewertung des Benetzungsverhaltens von ausgewählten CFK-Substraten zum Lackieren, konnte gezeigt werden.
- Ebenfalls wurde die Eignung der Streulichtmessung zur Bewertung der Mikrorauigkeit der von Titan-Oberflächen, die für die Adhäsionseigenschaften von besonderer Bedeutung ist, gezeigt.

Damit ist im Sinne der Aufgabenstellung die Anwendbarkeit der ausgewählten Oberflächenvorbehandlungsverfahren (Vorreinigung, Vakuumsaugstrahlen, ND-Plasma) sowie der entsprechenden Qualitätssicherung mittels Aerosol-Benetzungsprüfung, LIBS und Streulichtverfahren im Hinblick auf die Entfernung von Resten verschiedener Fertigungshilfsmittel auf den jeweiligen Bauteiloberflächen vor dem Lackieren gezeigt worden (siehe Tabelle 8).

**Tabelle 8:** Zusammenfassenden Ergebnisdarstellung der verwendeten Materialien sowie der geeigneten Behandlungsverfahren und der Prüfmethode für eine qualitätsgesicherte Vorbehandlung vor dem Lackieren

Material	Geeignete Behandlung zur Entfernung von Fertigungsrückständen	Anwendbare Prüfmethode zur Qualitätssicherung
CFK Duromere (Epoxide)	<u>Große Bauteile:</u> CO <sub>2</sub> -Schnee-Reinigung kombiniert AD-Plasma-Aktivierung: benötigte Reinigungsintensität abhängig von Fertigungsverfahren  <u>Kleine Bauteile:</u> manuelle Vorreinigung: Diestone DLS bzw. Akzo 96100 Plasmaaktivierung Niederdruck 13.56MHz Sauerstoff-Plasma	Aerosolbenetzungstest
Thermoplast	Manuelle Vorreinigung: mit Reinigern (Diestone, etc.)  Plasmaaktivierung Niederdruck: 13,56MHz Sauerstoff-Plasma	Laser Induced Break-down Spectroscopy (LIBS)
Titan (Ti6Al4V)	Vakuumsaugstrahlen IR-Laserbehandlung	Streulichttechnik

### 2.2.2 Wesentliche Erfahrungen

Die Bereitstellung und der Nachweis der erforderlichen Qualität von Bauteiloberflächen stellt im Hinblick auf einen nachfolgenden Klebstoff- oder Lackauftrag eine zentrale Herausforderung an die Oberflächentechnik und die Oberflächenanalytik dar. Die Oberflächenqualität von Faserverbundwerkstoffen wird durch den stark variierenden Einsatz von Trennmitteln sowie auch durch die Umformprozesse von thermoplastischen Flugzeugkomponenten bestimmt.

Die untersuchten Plasmaaktivierungsmethoden, sowohl im Fall des Niederdruck- (ND) als auch des Atmosphärendruck-Plasmas (AD), führen auf definierten Bauteiloberflächen zu sehr guten Ergebnissen bzgl. der Haftfestigkeit von Klebstoffen und Lacken. Die zentrale Herausforderung liegt jedoch in der Sicherstellung einer dauerhaft verlässlichen Oberflächenbehandlung zur Erzeugung sauberer Oberflächen, die lediglich ein geringes Maß an Kontaminationen durch organische und siliziumorganische Substanzen aufweisen dürfen. Hier hat die Vorbehandlung mittels manueller Lösemittelreinigung Defizite, sowohl in der Effizienz, als auch bzgl. der Reproduzierbarkeit. Daher sollen hier in einem nachfolgenden F&E-Projekt automatisierte Lösemittel-Reinigungsprozesse z.B. mit Ultraschall-Unterstützung untersucht werden.

Die Reinigung mittels CO<sub>2</sub>-Schneestrahlfverfahren liefert für die Vorbehandlung von Klebproben sehr gute Resultate und führt in Kombination mit der AD-Plasma-Aktivierung zu Verbundfestigkeiten, die deutlich oberhalb der Werte liegen, die mit geschliffenen Substraten gem. des aktuellen Standes der Technik erreicht werden.

Für starke Kontaminationen oder hohe Variationen in den Kontaminationsgraden ist die CO<sub>2</sub>-Schneestrahlsreinigung für große Flächen vor einer AD-Plasma-Aktivierung für Lackierprozesse zum Teil zu kostenintensiv. Hier kann durch eine verbesserte Entformungstechnik oder innovative Trennmittel die Wirtschaftlichkeit und Flächenrate der Kombinationen von CO<sub>2</sub>-Strahl- und AD-Plasma-Technik für wasserbasierte Lacksysteme deutlich gesteigert werden.

## 3 Zusammenfassung

Innerhalb des Teilprojektes QualiVor sollten Konzepte für eine qualitätsgesicherte Vorbehandlung vor dem Kleben und dem Lackieren von ausgewählten Leichtbaumaterialien entwickelt werden, die nachfolgend für innovative Leichtbauweisen eingesetzt werden können, um damit eine weitere Gewichts- und Kostenreduktion von Flugzeugstrukturen zu ermöglichen.

Im Ergebnis konnte eine qualitätsgesicherte Vorbehandlung für das Kleben der untersuchten und mit verschiedenen Fertigungshilfsmitteln (Trennmittel, Trennfolie, Peel-Ply) hergestellten CFK-Bauteile erfolgreich entwickelt werden. Diese besteht aus einer kombinierten Oberflächenvorbehandlung mittels CO<sub>2</sub>-Schneestrahlsreinigung und AD-Plasmaaktivierung und einer angepassten Qualitätssicherung durch die Aerosol-Benetzungsprüfung. Im Hinblick auf die Entfernung von Resten verschiedener Fertigungshilfsmittel auf verschiedenen Bauteiloberflächen vor dem Lackieren konnte die Anwendbarkeit der ausgewählten Oberflächenvorbehandlungsverfahren (Vorreinigung, Vakuumsaugstrahlen, ND-Plasma, IR-Laser-Behandlung), sowie der entsprechenden Qualitätssicherung mittels Aerosol-Benetzungsprüfung, LIBS und Streulichtverfahren gezeigt werden.