

PROJEKT-ABSCHLUSSBERICHT  
**CFK COMPLETE**

Intelligente Komplettbearbeitung und Versiegelung  
von CFK-Bauteilen für die Großserie



GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium  
für Bildung  
und Forschung

PROJEKT-ABSCHLUSSBERICHT

# CFK COMPLETE

## Intelligente Komplettbearbeitung und Versiegelung von CFK-Bauteilen für die Großserie

### **Ansprechpartner**

Dr. Marco Schneider  
Bereichsleiter Fertigungs- und Prozesstechnik  
Abteilungsleiter Leichtbautechnologien  
Telefon +49 711 970-1535  
marco.schneider@ipa.fraunhofer.de

### **Herausgegeben von**

Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Dr. h.c. Dr. h.c. Fritz Klocke  
Univ. Prof. Dr.-Ing. Thomas Bauernhansl

Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA, Stuttgart

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium  
für Bildung  
und Forschung

Dieses Forschungs- und Entwicklungsprojekt wurde durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) im Programm „Innovationen für die Produktion, Dienstleistung und Arbeit von morgen“ (Förderkennzeichen O2P14A080 bis O2P14A086) gefördert und vom Projektträger Karlsruhe (PTKA) betreut. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei der Autorin / beim Autor.

# INHALT

## **Einführung**

CFK Complete Projekt	5
----------------------	---

## **Abschlussberichte**

1 Konzeptionierung und Entwicklung Gesamtanlage (Homag)	6
2 Projektanforderung und wirtschaftliche Bewertung (Audi)	22
3 Mechanische Bearbeitung, Reinigung und Stauberfassung bei der CFK Bearbeitung (IPA)	31
4 Automatische Kanteninspektion und Qualitätsauswertung (ZEISS und IPA)	46
5 Aggregateentwicklung zur Kantenversiegelung (Krautzberger und IPA)	65
6 Vernetzungsaggregat zur Beschichtungs-aushärtung (IST METZ und IPA)	80

## **Projektpartner**

Projektpartner und Ansprechpartner	91
------------------------------------	----

## **Allgemein**

Impressum, Bildrechte	93
-----------------------	----



# CFK COMPLETE PROJEKT

## Produktionsanlagen für Wachstumsmärkte – intelligent einfach und effizient

Deutschland hat sich durch innovative Lösungen weltweit eine führende Position als Ausrüster im Maschinen- und Anlagenbau erarbeitet. Damit das so bleibt, müssen die Anbieter von Maschinen und Anlagen sowie deren Zulieferer sich den ständig ändernden Herausforderungen der Märkte stellen und technisch und kommerziell wettbewerbsfähige Produkte anbieten.

Erreicht werden kann das durch die Erforschung und Umsetzung neuer Konzepte für Produktionsanlagen sowie durch innovative Lösungen zur Optimierung bestehender Anlagen. Die wachsende Komplexität von Produktionsanlagen gilt es ebenso zu beherrschen wie die Sicherstellung eines hohen Maßes an Nachhaltigkeit sowohl bei der Herstellung als auch beim Betrieb von Produktionsanlagen. Moderne Produktionsanlagen bilden die Basis für die Einführung von neuen Technologien, Produkten und Dienstleistungen. Die Entwicklung von Produktionsanlagen für Wachstumsmärkte bietet dabei für den Standort Deutschland die Möglichkeit, diese Kernkompetenzen im Bereich der Produktion intelligent einfach und effizient weiter auszubauen.

## CFK Complete

Die Gewichtsreduzierung bewegter Massen ist eines der primären Zukunftsziele im Automobil- und Luftfahrtbereich. Kohlenstofffaserverstärkte Kunststoffe (CFK) bieten aufgrund ihrer hervorragenden gewichtsbezogenen Steifigkeiten ein enormes Potenzial dieses Ziel zu erreichen. Allerdings sind die Herstellungs- und Bearbeitungskosten dieser Bauteile noch unwirtschaftlich hoch. Weiterhin gibt es kaum deutsche Unternehmen, welche Maschinen dediziert für die spanende CFK-Werkstoffbearbeitung anbieten, wodurch in der Entwicklung von CFK-Bearbeitungszentren ein erhebliches wirtschaftliches Potenzial steckt. Auch in technologischer Sicht existiert aufgrund der besonderen Werkstoffeigenschaften von CFK ein hoher Bedarf an der Integration notwendiger Prozessschritte. Diese können in die vier Prozessgruppen Bearbeiten, Messen,

Reinigen und Versiegeln eingeteilt werden. Um die Integration dieser Prozessschritte in einer Werkzeugmaschine realisieren zu können, ist ein innovatives modulares Maschinenkonzept erforderlich.

Ziel des Vorhabens war die Konzeption und Realisierung einer innovativen, modularen, auf die speziellen Anforderungen der spanenden CFK-Bauteilbearbeitung optimierten Werkzeugmaschine. Durch die Integration der vier Prozessmodule Bearbeiten – Messen – Reinigen – Versiegeln in einen einzigen Maschinengang wird eine hauptzeitparallele Komplettbearbeitung realisiert. Durch diese innovative Funktionsintegration soll die spanende Bearbeitung und Versiegelung von Multimaterialsystemen um 50% wirtschaftlicher werden. Mit Hilfe der entwickelten Hochleistungsanlagen werden die Material- und Energieeffizienz in der Automotive-Serienfertigung systematisch und nachhaltig im Sinne der Lean Production gesteigert.

Nach einer erfolgten Anforderungsanalyse und aufbauend auf den Vorarbeiten in der Entwicklung einzelner Maschinenkonzepte, wurden im Rahmen dieses Projekts die gewonnenen Erkenntnisse genutzt und in eine modulare Maschinenplattform überführt. Zeitgleich wurden die zu integrierenden Aggregate der jeweiligen Prozessmodule Bearbeiten, Messen und Versiegeln entwickelt. Anschließend wurden diese in die prototypische Maschinenplattform eingebaut und vernetzt. Darauf folgten experimentelle Untersuchungen an einem Demonstratorbauteil, um die Funktionsfähigkeit zu verifizieren und die hohe Wirtschaftlichkeit nachzuweisen.

Nach erfolgreicher Umsetzung bietet die entwickelte Anlage die Möglichkeit, gewonnene Erkenntnisse auf weitere Leichtbauwerkstoffe auszuweiten. Weiterhin bieten die Ergebnisse des Vorhabens Potenzial für den Transfer auf Branchen außerhalb des klassischen Leichtbaus. Auf die effiziente Möbelherstellung lassen sich die Forschungs- und Entwicklungsergebnisse beispielsweise ebenso übertragen wie auf die Bearbeitung von Werkstoffen aus der Sportgeräteindustrie.

# 1 KONZEPTIONIERUNG UND ENTWICKLUNG GESAMTANLAGE (HOMAG)

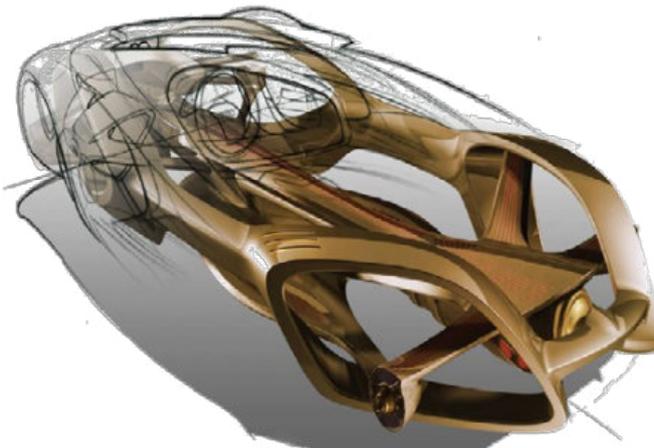

GEFÖRDERT VOM  
 Bundesministerium für Bildung und Forschung

Produktionsanlagen für Wachstumsmärkte – intelligent einfach und effizient  
**Projekt-Abschlusspräsentation Composite Europe 19**



---

**Intelligente Komplettbearbeitung und Versiegelung von CFK-Bauteilen für die Großserie**



Referent: Dipl.-Ing. Martin Gringel  
 Fa. Homag GmbH

---








BEITRAG VOM  
1


GEFÖRDERT VOM  
 Bundesministerium für Bildung und Forschung

Produktionsanlagen für Wachstumsmärkte – intelligent einfach und effizient  
**Projekt-Abschlusspräsentation Composite Europe 19**

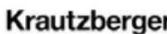


---

**Vorstellung des Verbundes**

<p><b>AUDI AG</b></p> <p>Branche           Automobil</p> <p>Produkte           Fahrzeuge</p> <p>Anzahl Mitarbeiter   ca. 77.000</p> <p>Umsatz            53.787 Mio. EUR</p> <p>Problemlage</p> <p>Zielstellung</p>	<p>Derzeit ist der massive Einsatz von kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffen wegen der hohen manuellen Aufwände nicht wirtschaftlich</p> <p>Verstärkter Einsatz von CFK für ressourceneffizienten Leichtbau. Das Hauptthema (die hohen Kosten) soll – nachgewiesen durch die Wirtschaftlichkeitsberechnung – behoben werden, in dem die Bearbeitung von CFK-Bauteilen automatisiert wird, Qualitative Probleme beim Einsatz CFK wie Kontaktkorrosion sollen prozesssicher vermeidbar werden.</p>	
---	---	---

---





BEITRAG VOM  
2

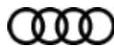
### Vorstellung des Verbundes

#### IST METZ GmbH, Nürtingen

Branche	Trocknungsanlagen
Produkte	Entwicklung, Produktion und Vertrieb von Trocknungsanlagen, insbesondere UV-Trocknungsanlagen aller Art, einschließlich des Handels mit branchenüblichem Zubehör
Anzahl Mitarbeiter	ca. 290
Umsatz	56,7 Mio. EUR
Problemlage	Roboterführung von UV-Strahler bisher nicht prozesssicher im Einsatz, LED-Technologie nur sehr begrenzt einsetzbar
Zielstellung	Neue Anlagenkonzepte zur Führung von UV-Strahlern für 3D-Bauteile, Einsatz der LED-Technologie zur Kantenversiegelung



Krautzberger



HE HOMAG



Fraunhofer

IPA

BEIHEFT VOM

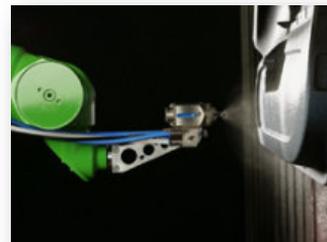


3

### Vorstellung des Verbundes

#### Krautzberger GmbH, Eltville am Rhein

Branche	Metallverarbeitende Industrie
Produkte	Lackieranlagen, Spitzgeräte, Airbrush-Zerstäuber
Anzahl Mitarbeiter	ca. 80
Umsatz	10,4 Mio EUR
Problemlage	Oversprayfreie Beschichtung der Kante, Abschottung der Beschichtung von der Bearbeitungsanlage
Zielstellung	Neue Beschichtungstechnik für Kanten, die in Komplettbearbeitungen integrierbar ist. Oversprayfreie Beschichtungssysteme werden unabhängig von der Gesamtmaschine einen großen Markt darstellen (z.B. Möbelbranche mit dekorativen Mehrfarbenbeschichtungen und beim funktionellen Kantenschutz)



Krautzberger



HE HOMAG



Fraunhofer

IPA

BEIHEFT VOM



4

**Vorstellung des Verbundes**

**Carl Zeiss Automated Inspection GmbH & Co. KG, Öhringen**

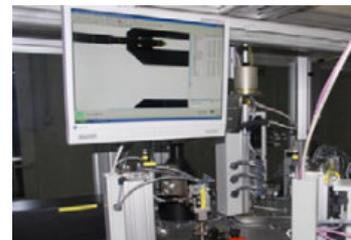
Branche Industrielle Messtechnik, Bildverarbeitung  
 Produkte Lösungsanbieter für Inline-Messtechnik  
 Anzahl Mitarbeiter ca. 50  
 Umsatz 4,6 Mio. EUR  
 Problemlage Für die geplante Bearbeitungsmaschine existiert auf dem Markt derzeit kein geeignetes Sensor-konzept (Hardware + Software) und muss deshalb entwickelt und evaluiert werden  
 Zielstellung Vermarktung der entwickelten Sensorik und Algorithmik für die Inline-Messtechnik, primär im Karosseriebau.  
 Erweiterung des Sensor- und Algorithmikportfolios für die Inline-Messtechnik speziell im Bereich der faserverstärkten Kunststoffe



**Vorstellung des Verbundes**

**Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der angewandten Forschung e.V.**

Branche: Forschung und Entwicklung  
 Produkte: Entwicklung, Realisierung und Optimierung von Verfahren, Produkten und Anlagen bis zur Einsatz- und Marktreife.  
 Anzahl Mitarbeiter: ca. 23800  
 Umsatz: 1.944,2 Mio EUR  
 Problemlage: CFK-Bearbeitungsmaschinen sind bisher nicht im Markt verfügbar  
 Zielstellung: Umsetzung angewandter Forschungsarbeiten zur Konzeption und Technologieentwicklung von Bearbeitungs-, Mess- und Versiegelungsmodulen, die sich zukünftig auf weitere Anwendungsfälle wie Aluminium-Blechteile und Holzwerkstoffe übertragen lassen.



### Vorstellung des Verbundes

#### HOMAG GmbH

Branche: Maschinenbau

Produkte: Entwicklung, industrielle Herstellung und der Vertrieb von Maschinen, Maschinenanlagen und einschlägigen Problemlösungen, insbesondere für die Holzbearbeitung und die Holzverarbeitung



Anzahl Mitarbeiter: 6.593 (HOMAG Group)

Umsatz: 1.298 Mio. EUR (HOMAG Group)

Problemlage: CFK-Bearbeitungsmaschinen sind bisher nicht im Produktportfolio verfügbar

Zielstellung: Entwicklung und Umsetzung einer modularen Maschinen- und Steuerungsplattform

Ansprechpartner: Dipl.-Ing. Martin Gringel, Email: martin.gringel@homag.com

### Problemstellung des Verbundes

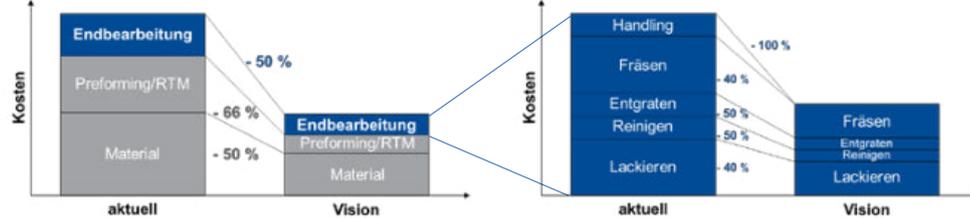
- Ein Klimaziel der Bundesregierung ist die Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen von mindestens 40 % bis 2020 gegenüber 1990 (Status bei Antragstellung im Jahr 2015!).
- CFK steht heute vor dem Sprung in die Großserienanwendung, weil die Senkung des Fahrzeuggewichts enorme Wichtigkeit besitzt, dieses Klimaziel zu erreichen.
- Trotz endkonturnaher Bauteilherstellung ist eine Nachbearbeitung nötig.
- Viele Prozessschritte der Nachbearbeitung erfolgen bisher manuell und sequentiell mit hohen Fertigungszeiten und -kosten.

### Zielstellung des Verbundes

Senkung der Herstell- und Bearbeitungskosten von CFK-Bauteilen zwischen „RTM-Pressen und Bauteilmontage“ um 50% durch:

- Prozessintegration: Bearbeiten-Messen-Reinigen-Versiegeln mit hauptzeitparalleler Komplettbearbeitung
- Vermeidung nicht-wertschöpfender Prozesse wie zeitintensiver Handhabungsschritte

➔ Konzeption und Realisierung einer innovativen modularen Bearbeitungsmaschine für die spanende CFK-Bearbeitung und -Lackierung



Forschungsprojekt „CFKComplete“ - Intelligente Komplettbearbeitung und Versiegelung von CFK-Bauteilen für die Großserie



#### Ziele

- » Ziel des Verbundvorhabens ist die Entwicklung einer innovativen, modularen und auf die speziellen Anforderungen der spanenden CFK-Bauteilbearbeitung optimierten CNC-Maschinenbaureihe
- » Durch die Integration der vier Prozessmodule Bearbeiten-Messen-Reinigen-Versiegeln in einen einzigen Maschinengang wird eine hauptzeitparallele Komplettbearbeitung von CFK-Bauteilen realisiert.
- » Entwicklungsschwerpunkte: CNC-Maschinenkonzept, Bearbeitungsstrategien, Aggregatetechnik für die Prozessmodule mit Steuerungsentwicklung, Aufspanntechnik, Entsorgung/Absaugung/Sicherheitstechnik, Verfahrenstechnik

#### Ergebnisse

- » Demonstratormaschine mit erweiterter Aggregatetechnik und neuartigem Absaug- und Sicherheitskonzept für CFK-Bearbeitung

#### Kundenvorteil

- » Komplettbearbeitung von CFK-Bauteilen inkl. Versiegelung

#### Perspektiven

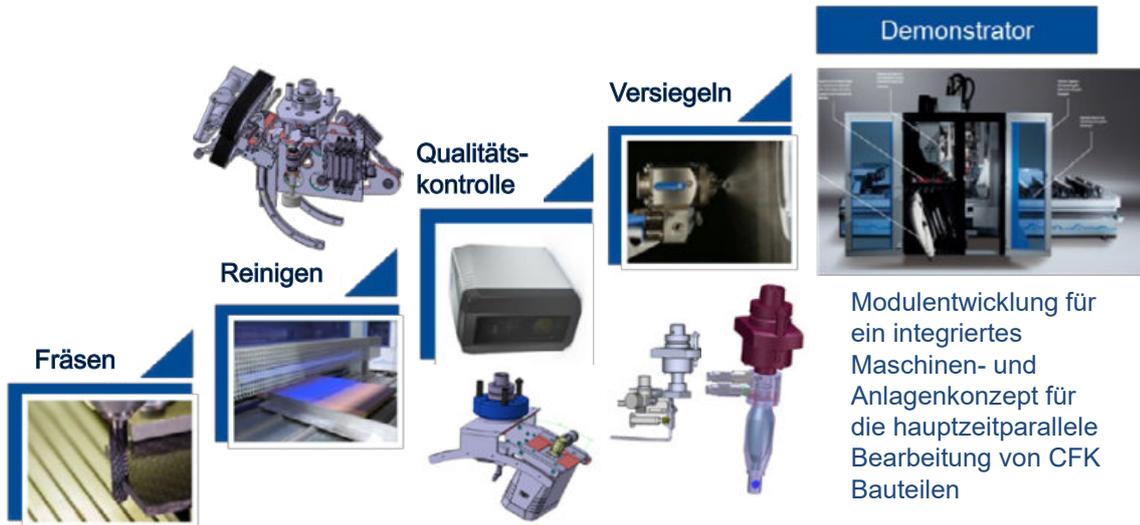
- » Vielseitiger Anwendungsbereich (z.B. auch im Möbelbereich)

BMBF-Fördermaßnahme „Produktionsanlagen für Wachstumsmärkte“



Dürr Group, R&D Annual Report 2018, R&D Projekte, WMS 2018

**Vorgehensweise des Verbundes**



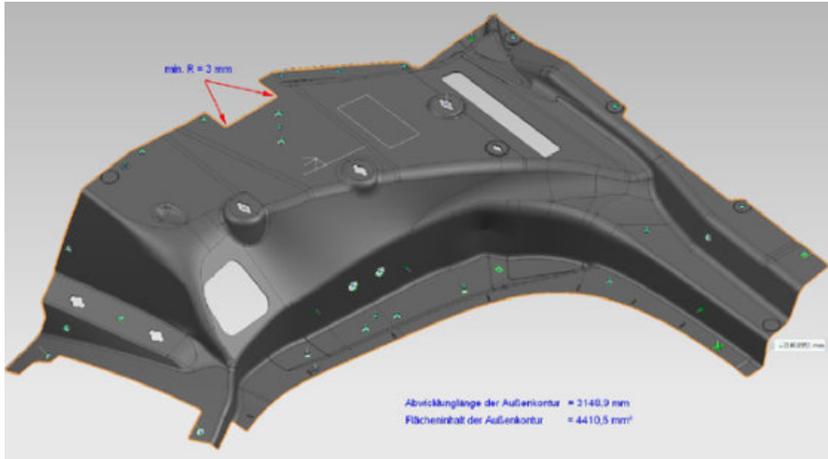
**Anforderungsanalyse und Spezifikation**

Strukturbauteile und Sichtbauteile im Karosseriebereich mit hohen Stückzahlen, 50000 Bauteile in 7 Jahren

Bauteilklasse	Sicht-CFK	Class-A	Strukturbauteil
Bauteilbeispiel			
Differenzierungsmerkmal	Designbauteile mit Strukturgewebeatoptik	Außenbauteile in Wagenfarbe lackiert mit Class-A Oberflächenqualität	Strukturell tragende Bauteile mit hohen mechanischen Anforderungen
Lackierung	Klarlack Grat unzulässig	Mehrschichtlack Metalliclack Grat unzulässig	Unlackiert Werkzeugtrennung und Nähte >0,05mm

Als Referenzbauteil für die Anforderungsanalyse wurde vom Projektkonsortium eine **B-Säule** eines Sportwagenmodells ausgewählt.

**Anforderungsanalyse und Spezifikation**



Operation	Bezeichnung	Darstellung
1	Bohrung Ø 7	
2	Bohrung Ø 8	
3	Bohrung Ø 8,5	
4	Bohrung Ø 9	
5	Bohrung Ø 10	
6	Bohrung Ø 11	
7	Bohrung Ø 14	
8	Ausschnitt 1	
9	Ausschnitt 2	
10	Clipschnitt 1	
11	Clipschnitt 2	
12	Langloch	
13	Teilaußenkontur	

=> Lastenhefte wurden erstellt

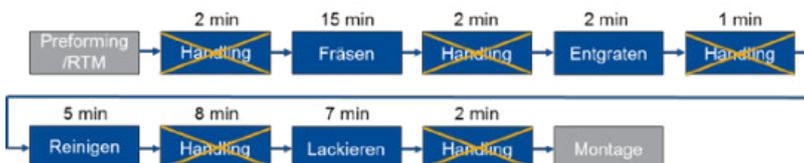
B-Säulenteil

**Anforderungsanalyse und Spezifikation**

Bisher anfallende Prozessschritte in chronologischer Reihenfolge (Prozessfolgeplan).



Durch die Integration aller Bearbeitungsschritte in einen einzigen Maschinengang entfallen die Handhabungsschritte. Darüber hinaus ermöglicht die Integration der Bearbeitungsschritte in einen Maschinengang die hauptzeitparallele Bearbeitung im Vergleich zum bisher seriellen Bearbeitungsprozess. Daher verkürzt sich die Durchlaufzeit.



### Anforderungsanalyse und Spezifikation

Hauptzeitparallelität erfordert die gleichzeitige Ausführung der Bearbeitungsschritte an einem oder mehreren Werkstücken, ohne dass Nebenzeiten entstehen.

#### Ansätze:

##### Modulares, leistungsskalierbares Maschinenkonzept

- Ein oder mehrere Werkstücke - dann zeitparallel - in Bearbeitung durch Mehrspindeltechnologie in Verbindung mit Mehrtischmaschinen
- Hohe Achsdynamik der Vorschubachsen für hohe Arbeitsgeschwindigkeiten der Führungsmaschine

##### Entwicklung einer optimierten Verfahrenstechnik

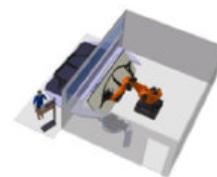
- 5-Achs-Fräs-, Bohr-, Sägebearbeitung hinsichtlich geeigneten Werkzeugen, Programmierung usw.
- Reinigungsfunktion hinsichtlich Reinigungswirkung und Arbeitsgeschwindigkeit
- Messfunktion hinsichtlich Erfassung und Arbeitsgeschwindigkeit
- Versiegelungsfunktion hinsichtlich Auftragsgenauigkeit und Vernetzung und Arbeitsgeschwindigkeit

##### Minimierung von Nebenzeiten

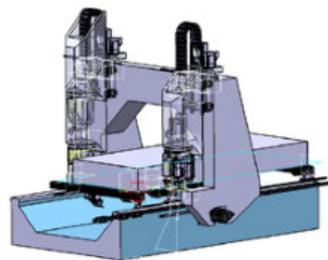
- Nachbearbeitungsaggregat(e) mit minimaler Wechselzeit
- Zusammenfassung von Arbeitsschritten in einen Arbeitsgang durch Kombi-Aggregate
- Vermeidung von Werkstückumspannungen durch intelligente Spannvorrichtungen

### Maschinenkonzeptentwicklung (Kinematikanalyse)

- 5 Achs CNC: HOMAG
  - **Spindel:** fahrbar -> Gantry
  - **Spindelanzahl:** 1 / 2 / 3 / 4
  - **Aufspanntisch:** fest / fahrbar / 3D Spannsystem
  - **Tischanzahl:** 1 / 2 / 3
  - **Sicherheit:** Portal (mit Sensorik/Abzäunung) / teilweise Kapselung / komplette Kapselung
- Industrieroboter: KUKA, Dürr, Mitsubishi, Stäubli,...
  - **Spindel:** fest / am Endeffektor
  - **Spindelanzahl:** 1
  - **Roboteranzahl:** 1 / 2 / 3 / 4
  - **Aufspanntisch:** fest / drehend / fahrbar / 3D Spannsystem / robotergeführt
  - **Tischanzahl:** 1 / 2 / 3 / 4
  - **Sicherheit:** teilweise Kapselung / komplette Kapselung



### Demonstratormaschine



- Fahrportalmaschine BMG611
- kartesischer 5-Achskopf
  - für WZ und Aggregate
  - Rastertisch,
  - Vakuumpanssystem

### Aufspanntechnik (Tischkonzept, modulares automatisiertes 3D-Spannsystem)

#### Anforderungen an 3D-Aufspannsysteme:

#### Stabile Werkstückspannung

Die beim Fräsen entstehenden Zerspanungskräfte sowie Eigenspannungen in dem zu bearbeitenden Bauteil müssen von der Aufspannvorrichtung sicher aufgenommen werden. Zur Erzielung einer hohen Bearbeitungsqualität sind deshalb hohe Steifigkeiten und eine geringe „Schwingsneigung“ der Aufspannvorrichtung notwendige Voraussetzungen.

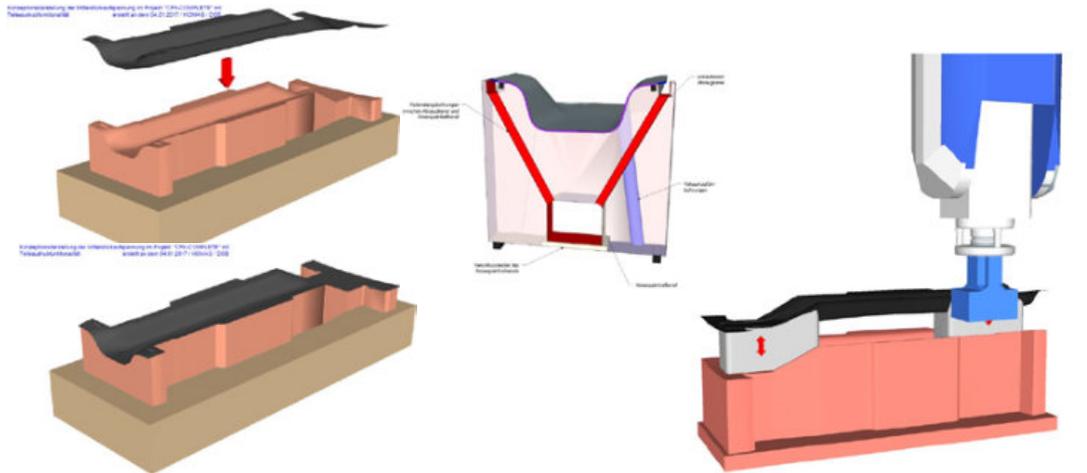
#### Integrierte Absaugung

Zusatzfunktionen wie integrierte Absaugkanäle im Bereich der Fräsbahn tragen zu einer effektiveren Erfassung der Späne bei (Reduzierung des Verschmutzungsgrades am Werkstück bzw. im Bearbeitungsraum der Maschine).

#### Zugänglichkeit an der Bauteilunterseite

Schaffung der Zugänglichkeit für weitere Bearbeitungsschritte an der Bauteil-Unterseite (für die Funktionen Reinigen, Qualitätssicherung durch Messen, Versiegelung der Fräskanten) in einer Aufspannung. Typischerweise treten bei diesen Bearbeitungen geringe bis keine Prozesskräfte auf.

**Aufspanntechnik (Tischkonzept, modulares automatisiertes 3D-Spannsystem)**



**Aufspannung für Fräsbearbeitung mit integrierter Absaugung    Aushubfunktion „Nachbearbeitung“**

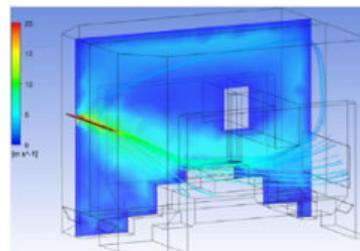
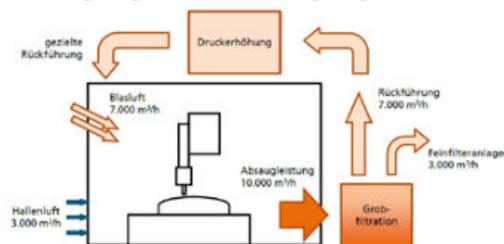
**Absaugtechnologie, Werkzeugintegrierte Absaugung, Raumabsaugung**

Innovatives Absaugkonzept gemeinsam mit Fa. Schuko:

- Erhöhung der Absaugleistung durch Kreislaufführung
- Innovatives Konzept mit einer Kopplung der Blasluft mit einer großen Reichweite und Luftabsaugung
- Bessere Späneerfassung
- Deutliche Energieeinsparung

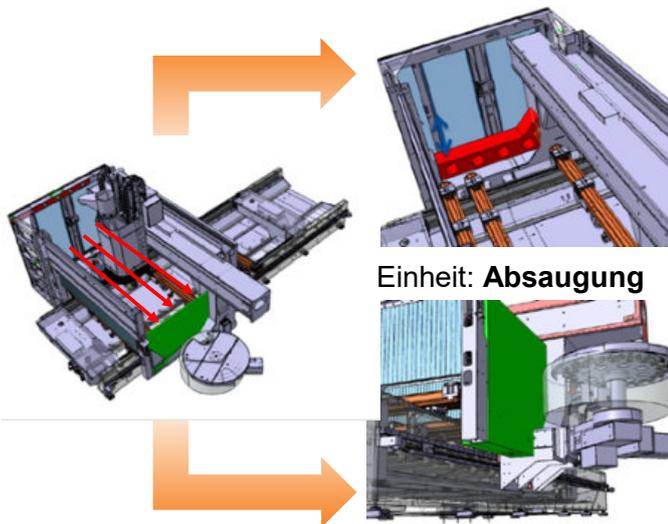
Kombination der Absaugung mit Umhausung als Konzept für den betrieblichen Umweltschutz:

- C-Fasern haben hohes Gefährdungspotenzial für Mensch und Maschine
- Umhausung bietet beste Schutzausrüstung gegen Staubbelastung
- Absaugkonzept erlaubt betretbaren Arbeitsraum



CFD-Simulation der Luftführung

**Raumabsaugung**

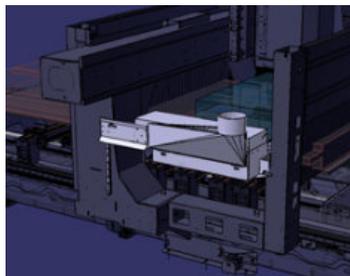


- Unterbringung der Blaseinheit in Teilkapselung
- Führung über Rastbolzen, Linearführung oder ähnliches
- Durchflutung parallel zur Y-Achse gerichtet auf Absaugstelle

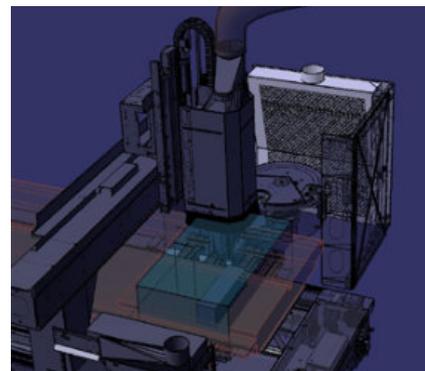
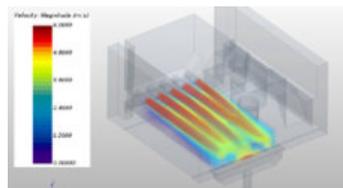
**Einheit: Absaugung**

- Gegenstück zu Blasdüsenunit auf anderer Seite
- Integration mit Absaugung
- Spanleitblech verstellbar
- Fangstelle für luftgetragene Partikel

**Absaugtechnologie, Werkzeugintegrierte Absaugung, Raumabsaugung**



Einblasdüsen



Kollektor

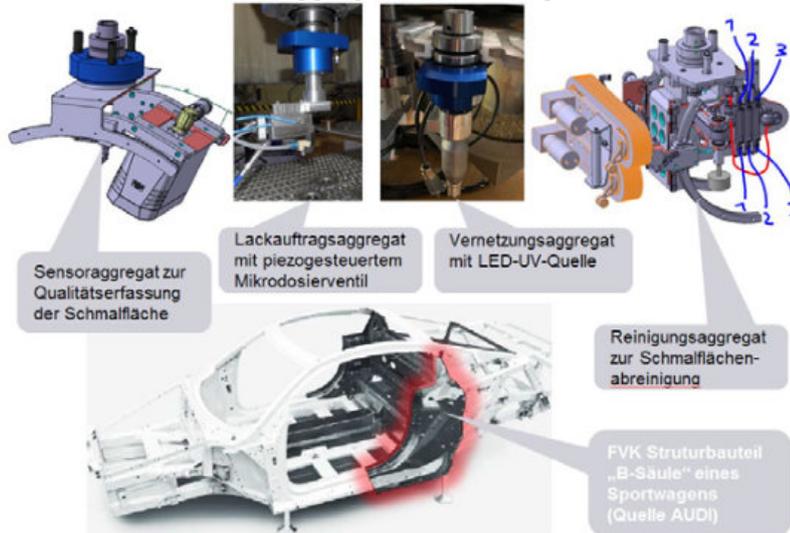
### Absaugtechnologie, Werkzeugintegrierte Absaugung, Raumabsaugung

Mit einem Eindüsvolumenstrom von ca. 2.000 m<sup>3</sup>/h ergibt sich in dieser Anordnung über die Lauflänge des Strahles eine Luftgeschwindigkeit von ca. 6 m/s und erfüllt somit die Anforderung.

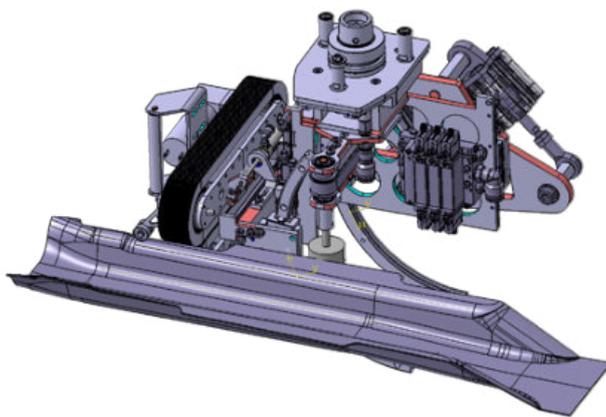
Es wird davon ausgegangen, dass ca. 80% des Eindüsvolumenstromes im Systemkreislauf verbleiben und ca. 20% abgesaugt und über das Filtersystem gereinigt werden. Dies ist gegenüber konventionellen Absaugsystemen mit ca. 10.000 m<sup>3</sup>/h ein Bruchteil hiervon.

Die Luftstrahlen generieren außerhalb des Strahls Wirbelgebiete, die zu Partikel-Verwirbelung im gesamten Raum führen können. Ein Teil des auf die Absaugeinheit auftreffenden Strahles wird nach oben abgelenkt. Die Optimierung der Düsen- bzw. Absaugeinheit unter Berücksichtigung der Beeinflussung der Strömungsverhältnisse durch das Werkstück ist derzeit in Bearbeitung.

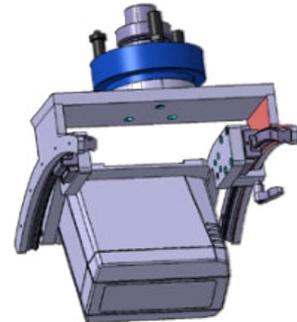
### Aggregateentwicklung



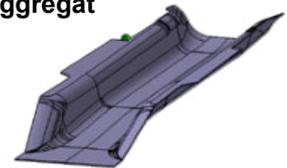
Aggregateentwicklung



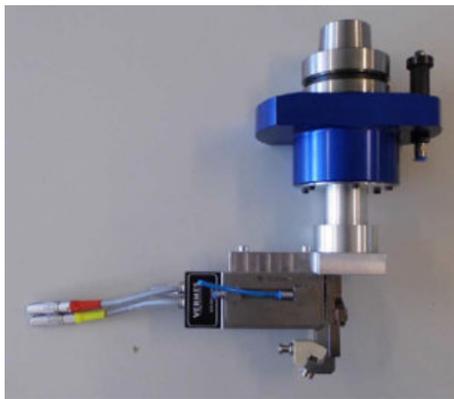
Reinigungsaggregat



Sensoraggregat



Aggregateentwicklung



Versiegelungsaggregat

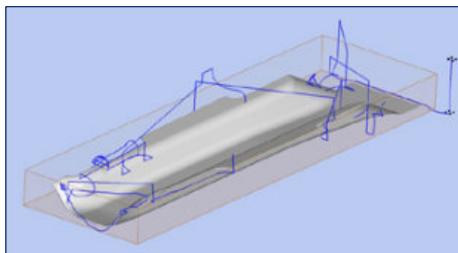


Vernetzungsaggregat

### Steuerungstechnik: Bahngenerierung für die CNC-Steuerung

#### Herausforderungen

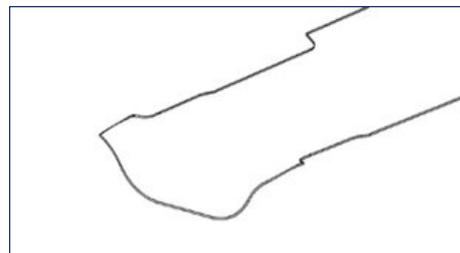
- 3D-Modell liegt als Shape-Design vor
- Die Oberfläche weist Unstetigkeiten im Bereich einiger 1/100 mm auf
- Bahngenerierung durch CAM-Software nicht ohne Aufbereitung möglich



Unstetige Werkzeugbahnen am Ausgangsmodell

#### Maßnahmen

- Zu bearbeitende Flächen (Kante) wurde als Flächenband neu modelliert
- Konvertierung zu solid-Modell durch geringfügige Extrusion des Flächenbandes

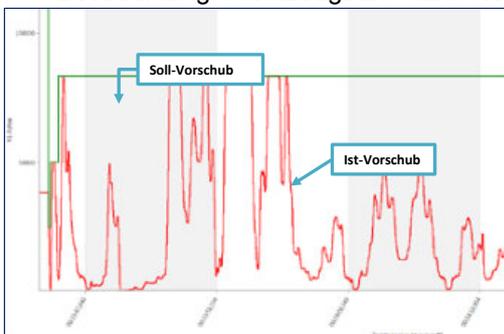


Neumodellierung der Werkstückkante

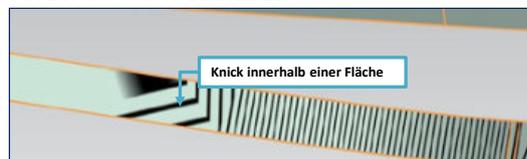
### Steuerungstechnik: Bahngenerierung für die CNC-Steuerung

#### Anforderungen

- Hohe Werkzeug-Standzeit erfordert Einhaltung des Nennvorschubs
- Dabei geringe Toleranz (Herstellervorgabe  $\pm 10\%$ )
- Beobachtung: Werkzeugbahn kann Nennvorschub nicht einhalten



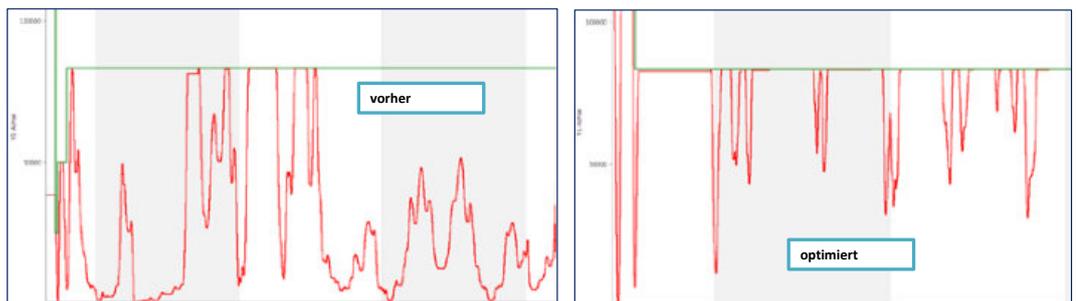
Aufzeichnung des Vorschubverlaufes beim Fräsen



Ursache: Fräsflächen sind nicht krümmungsstetig

### Steuerungstechnik: Bahngenerierung für die CNC-Steuerung Anpassungen zur Vorschuboptimierung:

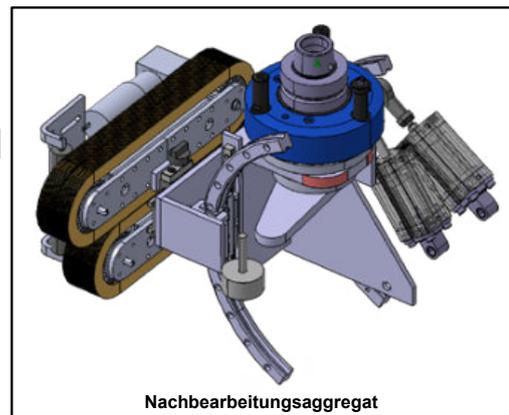
- Anpassung des CAD-Modells: Kleine Radien bei fertigungsgerechter Konstruktion vermeiden
- Optimierung der Maschinendynamik: Beschleunigungszeiten reduziert
- Bahnglättung durch CNC eingesetzt (B-Spline-Interpolation)
- 3-Achs-Betrieb der Maschine (global oder an geeigneten Stellen)



### Steuerungstechnik: Steuerungsanbindung Bearbeitungsaggregate

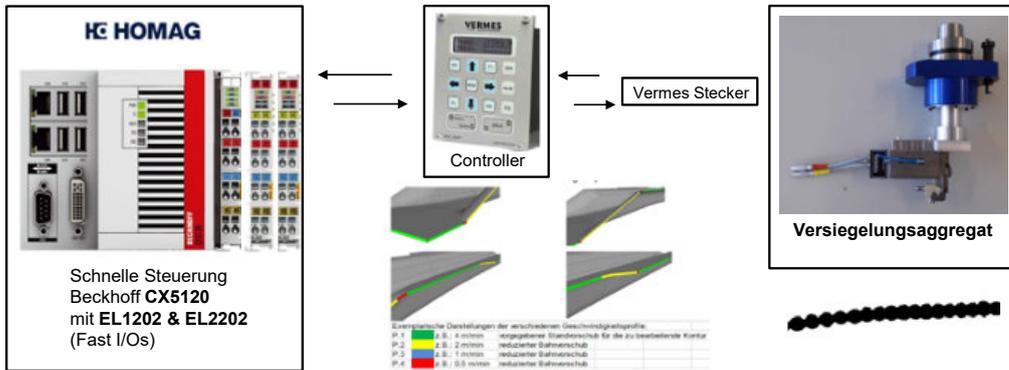


Harting Stecker



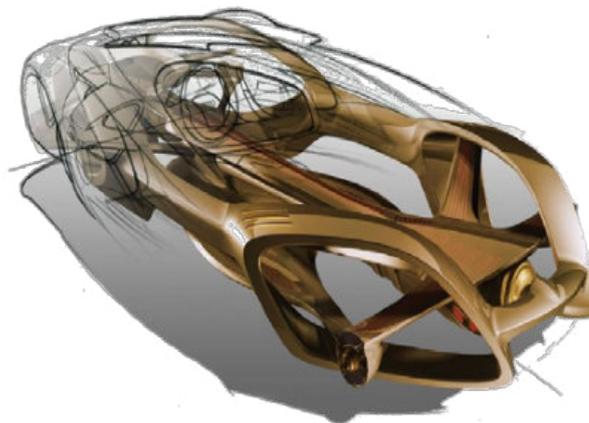
- Ansteuerung von:
  - 3 x Pneumatik Zylinder (6 Ventile)
  - 2 x 24V DC-Motoren (Umlaufbürsten)

**Steuerungstechnik: Steuerungsanbindung Bearbeitungsaggregate**



- Schnelle autarke Steuerung mit geringer Tasklaufzeit (50µs bis 100µs)
- Schnelle Triggerung durch kurze Verzögerungs- und Schaltzeiten (1 µs)
- Geschwindigkeitsabhängige Mengenumschaltung anhand von aktueller Bahngeschwindigkeit (4 Stufen)

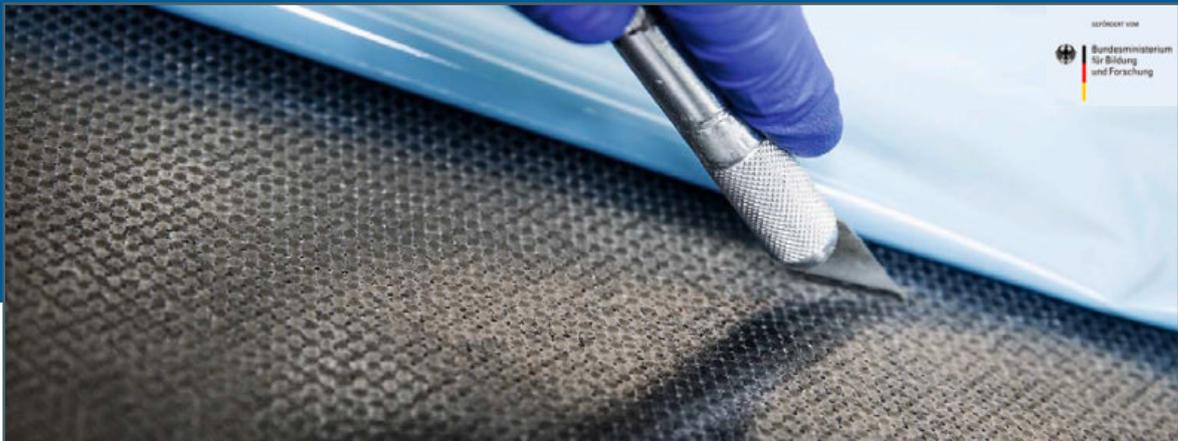
**Video  
 Demonstrator**



**Vielen Dank für  
 ihre Aufmerksamkeit!**

Referent: Martin Gringel

## 2 PROJEKTANFORDERUNG UND WIRTSCHAFTLICHE BEWERTUNG (AUDI)



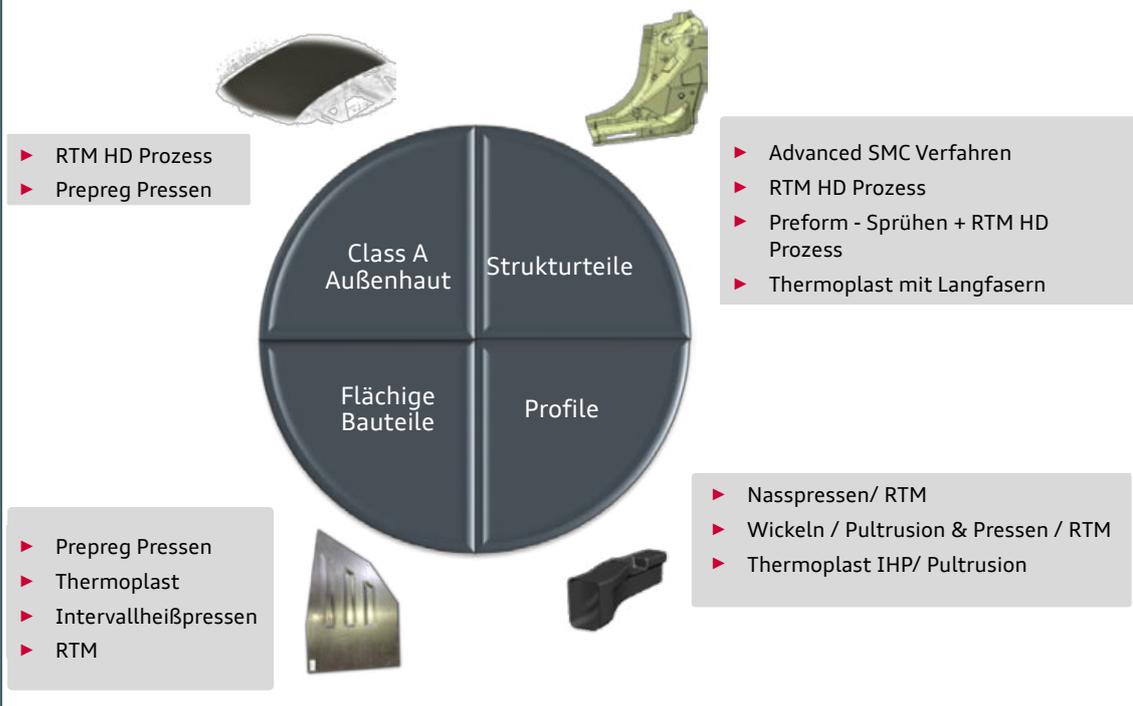
### Projektergebnisse CFK Complete aus Sicht der AUDI AG Stuttgart (11.09.2019)

I/PG-T5 Thomas Heußer



2 AUDI AG I/PG-T5 Thomas Heußer Projektergebnisse CFK Complete aus Sicht der AUDI AG Stuttgart 11.09.2019

### Faserverstärkte Kunststoffe (FVK) – Fertigungsverfahren



## Unterschiedliche Anforderungen an FVK-Bauteile

Bauteilklasse	Sicht-CFK	Class-A	Strukturbauteil
Bauteilbeispiel			
	R8 Sideblade	RS3 Kotflügel	LB 724 B-Säule
Differenzierungsmerkmal	Designbauteile mit Strukturgewebeatoptik	Außenbauteile in Wagenfarbe lackiert mit Class-A Oberflächenqualität	Strukturell tragende Bauteile mit hohen mechanischen Anforderungen
Lackierung	Klarlack Grat unzulässig	Mehrschichtlack Metalliclack Grat unzulässig	Unlackiert Werkzeugtrennung und Nähte >0,05mm

## Qualitätskriterien Fertigteil

- › Keine Delamination im Schnittbereich
- › Faseraustritt an den Schnittkanten und Bauteiloberflächen nicht zulässig
- › Keine Schädigung der Bauteilkante, Keine Brüche an der Bauteilkante
- › Keine Beschädigung der Bauteiloberfläche
- › Bauteiloberflächen frei von Trennmittel, Bearbeitungsrückständen und sonstigen Prozessmaterialien
- › Keine Veränderung des Verbundwerkstoffes durch thermische Einwirkung (Fräsen, keine Vergilbung, Bläschen, Brandflecken...)

## Theoretische Betrachtung der Bearbeitungsverfahren

Merkmal	Mechanische Bearbeitung	Wasserstrahl-schneiden
Bearbeitungsqualität	-	○
Investkosten	+	○
Bearbeitungskosten	-	○
Bearbeitungsgeschwindigkeit	+	○
Werkzeugverschleiß	-	+
Komplexität der Geometrie (3D-Bearbeitung)	+	○
Automatisierbarkeit	○	○
Flexibilität	○	-

CFK Complete: Bewertung mechanische Bearbeitung in Kombination weiterer Bearbeitungsschritte

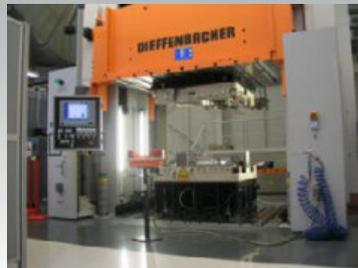
# CFK Complete

Entwicklung und Konzept angelehnt für B-Säule außen



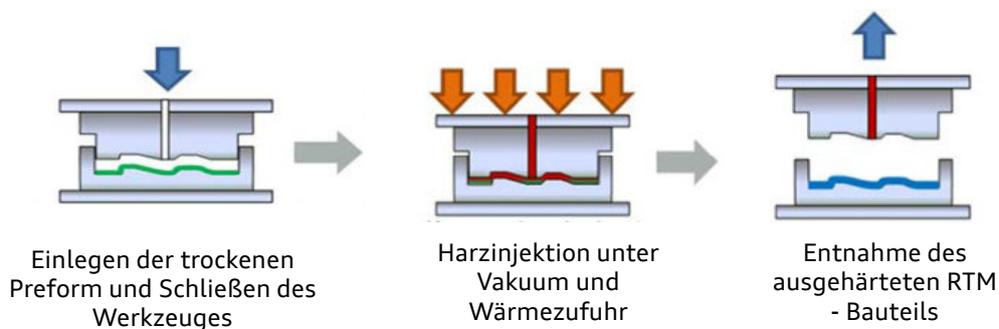
## Technologieentwicklung Faserverstärkte Kunststoffe Übersicht der Technologien und Kompetenzen

- ▶ **Automatisierter Zuschnitt**  
Topcut Bullmer Cutter
- ▶ **Automatisiertes Preforming**  
Dieffenbacher Preformanlage  
mit sequentiellen Preform  
Werkzeugen
- ▶ **Resin-Transfer-Moulding**  
Dieffenbacher 10.000 KN  
Presse  
Injektionsanlage: KraussMaffei
- ▶ **Nachbearbeitungszelle**  
Ridder  
Wasserstrahlschneidanlage
- ▶ **Versuchslabor**  
VARI-Raum

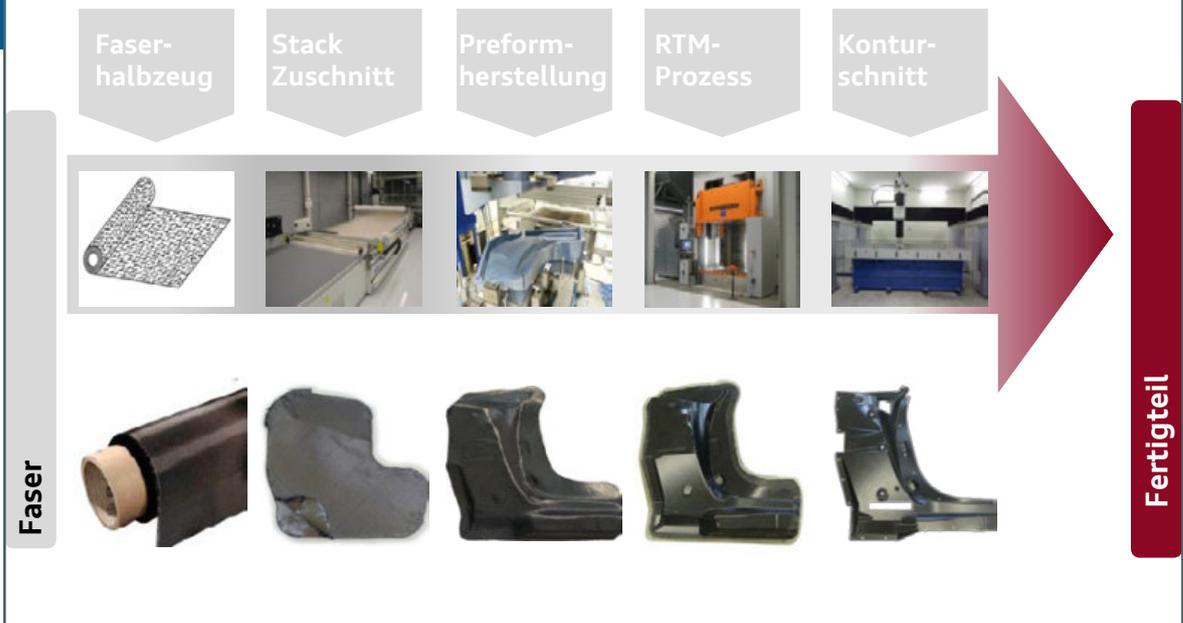


## RTM (Resin Transfer Moulding) Technikumsfertigung Säule B Außen

- › Die Fertigung erfolgt in einer zweiteiligen, beheizten Kavität
- › Matrixsysteme : hochreaktive Epoxidharz- oder Polyurethansysteme
- › Typische Werkzeugtemperaturen liegen, je nach Anwendung und Matrixsystem, zwischen 80-130° C



## Fertigung eines CFK-Bauteiles am Beispiel der B-Säule



## Bearbeitung Serienstand: Wasserstrahlschneiden

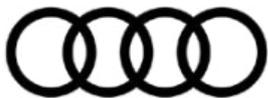
- › Die zum Schneiden mit Hochdruckwasserstrahl benötigte Anlagenkonfiguration lässt sich in drei Funktionsblöcke unterteilen:
  - › Filterstation
  - › Hochdruckpumpe
  - › Schneidstation



- › Vorteil: staubfreie Bearbeitung (maximale Arbeitsplatzkonzentration (MAK) wird erfüllt)

## Alternatives Konzept Bearbeitungsmaschine mit integrierten Verfahrensschritten

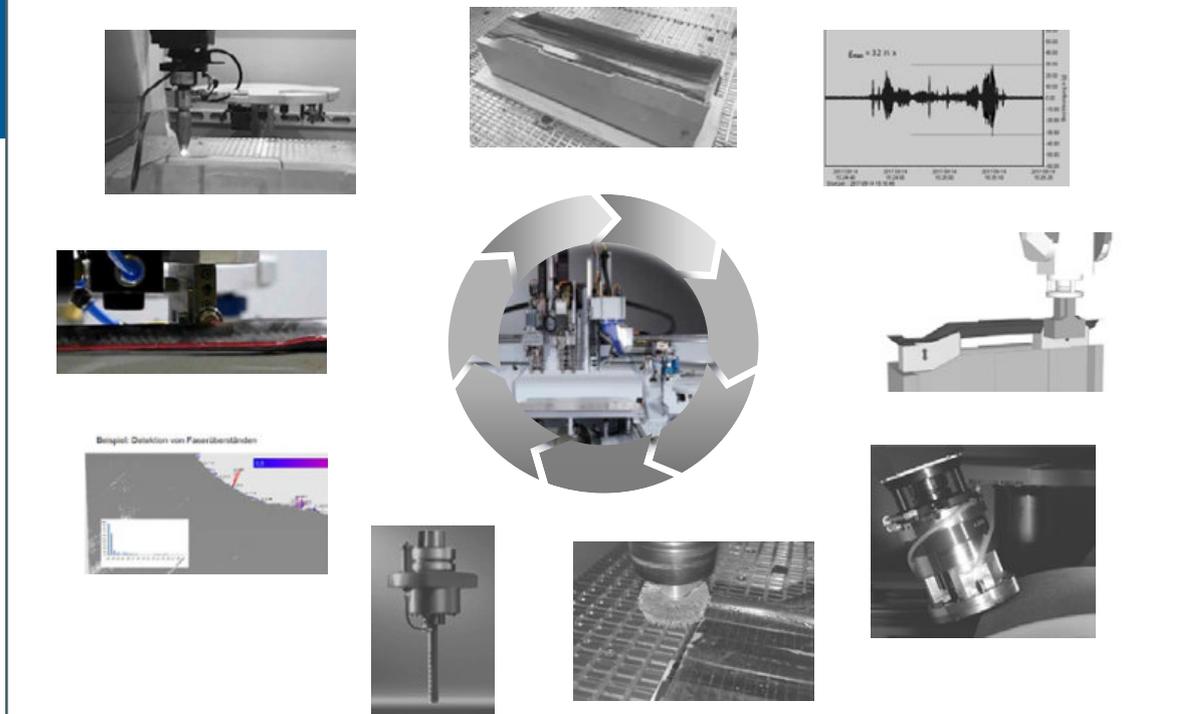
Fräsen	Messen	Kantenversiegelung	Endkontrolle
Modul positionieren	Modul positionieren	Modul positionieren	Modul positionieren
Zuführen	Reinigen	Reinigen	Reinigen
Ausrichten	Erkennen Kante	Prozessparameter	Prozessparameter
Spannen Bauteil	Messfehler vermeiden	Applikation	Applikation
Spannen Überstand	Absaugen Prozesspara.	Vernetzen	Vernetzen
Fräsen	Messen Parameter	Toleranz Kante	Toleranz Kante
Kühlen	Sensorempfindlichkeit	Toleranz Bauteil	Toleranz Bauteil
Ergebnis prüfen	Toleranzen Fräskante	Fräsüberstand	Fräsüberstand
Absaugen CFK Staub	Ergebnis erfassen	Sauberkeit	Sauberkeit
Bauteiltoleranz		Ergebnis erfassen	Ergebnis erfassen
Verzug Bauteil		Nacharbeit	
Fräsgeschwindigkeiten			
Qualität Fräser			
Qualität Kühlmittel			
Prozessparameter			



### Ergebnisse von CFK Complete

I/PG-T5 Thomas Heußer

## Prozessablauf CFK Complete



## Ergebnis Multifunktionsbearbeitung

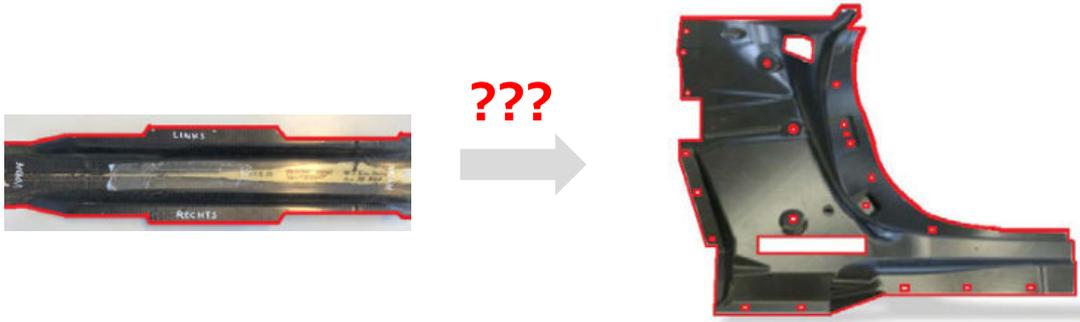
Prototyp



Zielbauteil



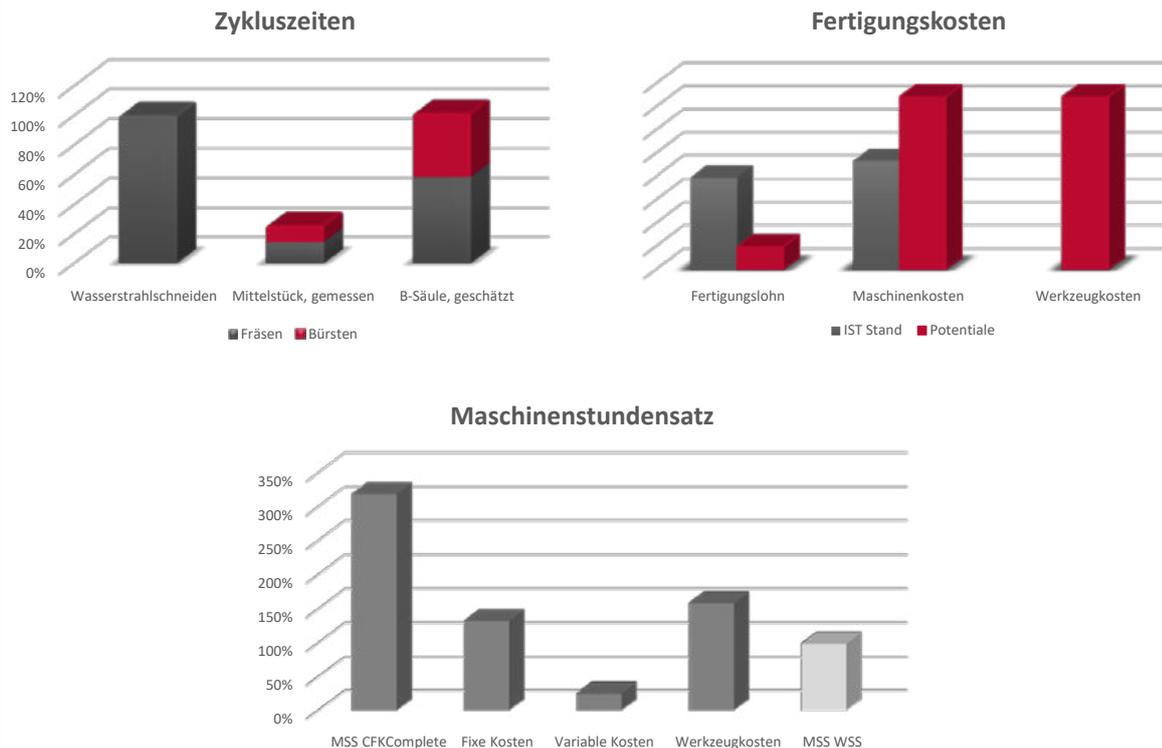
## Abschätzung der 3D-Bearbeitung auf Basis einer 2D Bearbeitung



- Vernachlässigung der langsameren Bearbeitung von Durchbrüchen
- Fräsgeschwindigkeit für Durchbrüche muss noch ermittelt/validiert werden
- B-Säulenbearbeitung erfordert 5-Achs-Fräsprogramm

**=> nur grobe Abschätzung möglich**

## Ergebnisse Wirtschaftlichkeit - Grobbewertung



## Erprobungsbedarf zur Übertragung der Ergebnisse

- › Übertragen der 2D Bearbeitung auf eine 3D Bearbeitung (Auswirkungen auf den Fertigungsprozess)
- › Konzept für kleine Bohrungen und Durchbrüche am 3D Bauteil
- › Einbringen und Reproduzierbarkeit von RPS Punkten
- › Reproduzierbarkeit der Bauteilkante (Berücksichtigung Verschleiß)
- › Umgriff der Kante, um auch mögliche Delaminationsschäden zu überdecken
- › Optimierung der Bauteileinspannung (geometrieabhängig)
- › Qualität der Bauteilkante und der Kantenreinigung (ggf. Bauteilreinigung notwendig)
- › Einfluss der Bauteilbearbeitung auf Maßhaltigkeit (freiwerdende Spannungen?)
- › Materialentwicklung Kantenversiegelung in Abhängigkeit von Substrat
- › Reproduzierbarkeit Kantenversiegelung
- › Haftung, Dauerbeständigkeit Kantenversiegelung (Abhängigkeit vom konkreten Bauteil)
- › Erprobung minimaler Krümmungsradien, Bohrungen, Hinterschnitte
- › Korrosionstest Metall –versiegelte Kanten

GEFÖRDERT VON

 Bundesministerium für Bildung und Forschung

Produktionsanlagen für Wachstumsmärkte – intelligent einfach und effizient

Audi AG I/PG-T5 Thomas Heußer

**CFK**  
Complete

**Vielen Dank !**



GEFÖRDERT VON

# 3 MECHANISCHE BEARBEITUNG, REINIGUNG UND STAUBERFASSUNG BEI DER CFK BEARBEITUNG (IPA)



Produktionsanlagen für Wachstumsmärkte – intelligent einfach und effizient  
**Von der Spanntechnik zur Stauberfassung – integriertes Bearbeitungskonzept für CFK Werkstoffe**



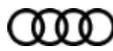
CFK Complete  
 Stuttgart, 11.9.2019 Composite Europe



Quelle: Bez, Fraunhofer IPA



Krautzberger



HE HOMAG



Fraunhofer

IPA

BEITRAG VOM



1

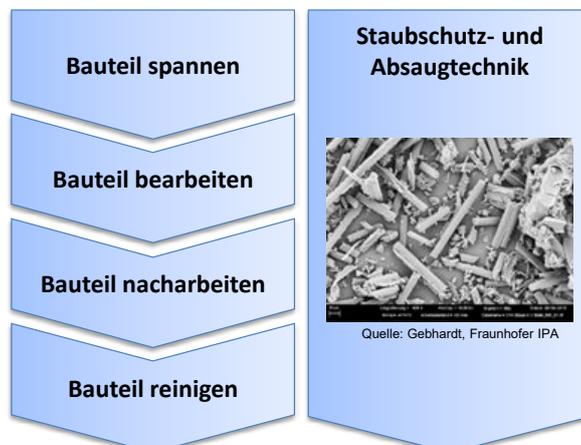


Produktionsanlagen für Wachstumsmärkte – intelligent einfach und effizient  
**Von der Spanntechnik zur Stauberfassung – integriertes Bearbeitungskonzept für CFK Werkstoffe**



## Projektvorstellung Arbeitsinhalte

- Entwicklung einer **geeigneten Spanntechnik**
- Auslegung des **Fräsprozesses**
- Auswahl geeigneter **Werkzeuge und Prozessführung**
- Entwicklung **Reinigungskonzept** / Bürsten
- Auslegung **Nachbearbeitungsaggregat**
- Entwicklung **Staubschutzkonzept**
- Auslegung der **Absaugtechnik**



Quelle: Gebhardt, Fraunhofer IPA



Krautzberger



HE HOMAG



Fraunhofer

IPA

BEITRAG VOM



2

Von der Spanntechnik zur Stauberfassung –  
 integriertes Bearbeitungskonzept für CFK Werkstoffe

**Spanntechnik**

**Anforderungen an die Bauteilauflattung**

Auflattung und Absaugung:

- Spanngenauigkeit: < 0,1 mm in x y z
- Spann(feder)steifigkeit: Bauteil darf bei auftretenden Bearbeitungskräften je max. 0,05 mm in x y z Abdrängung aufweisen

Funktionsintegration ‚A‘

- Absaugung von Staub
- Fixierung über Vakuum möglich

Schwingungsarme Spannsituation ‚B‘

- Solide Bauweise ermöglicht hohe Werkzeugstandzeit

Positionssicheres Einlegen möglich ‚C‘

- Prozesssicherheit und wiederholgenau
- Bauteilorientierung vorgegeben

Flexibilität bei Teilevarianz ‚D‘

- Umbaumöglichkeit bei Teileänderung oder Konturanpassung

Flexibilität bei Prozessvarianz (Fräsen, Bürsten, Beschichten) ‚E‘

- „Räume“ für unterschiedliche Prozesse notwendig

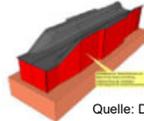
Von der Spanntechnik zur Stauberfassung –  
 integriertes Bearbeitungskonzept für CFK Werkstoffe

**Spanntechnik**

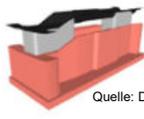
**Konzeptionierung von alternativen Ansätzen**



Quelle: Doll, Homag AG



Quelle: Doll, Homag AG



Quelle: Doll, Homag AG



Quelle: Esch, Fraunhofer IPA

**Negativ-Spannschablone (Stand der Technik):**

- + hohe Positionstreuung beim Einlegen
- + Funktionsintegriert und stabil
- Starr und unflexibel

**„Verschlankte“ Negativ-Spannschablone:**

- + hohe Positionstreuung beim Einlegen
- + Prozessraum gegeben
- Starr und unflexibel / keine Randabstützung

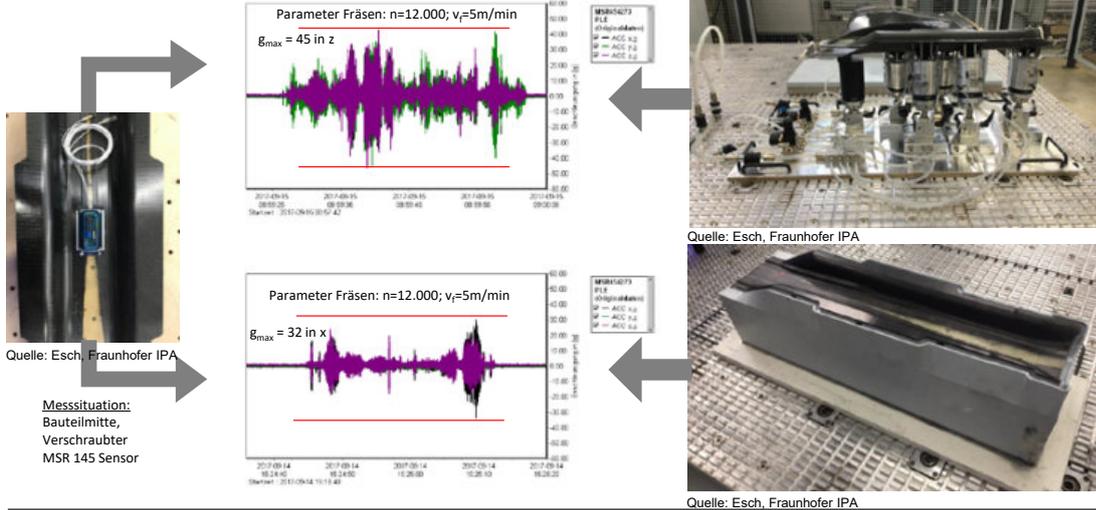
**Negativ-Spannschablone mit Aushebefunktion:**

- + Prozessraum wird gegeben durch Aushebefunktion
- + hohe Positionstreuung, Funktionsintegriert und stabil
- Starr und unflexibel

**Stößelspannsystem:**

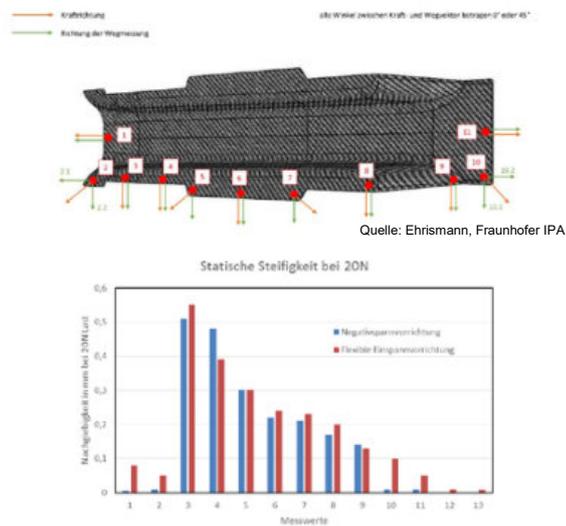
- + Prozessraum
- + Flexibilität
- instabil und ohne integrierte Funktionen

**Spanntechnik im Vergleich**  
 Schwingungsanalyse (Bauteilbeschleunigung)



**Spanntechnik im Vergleich**  
 Nachgiebigkeitsanalyse (statisch)

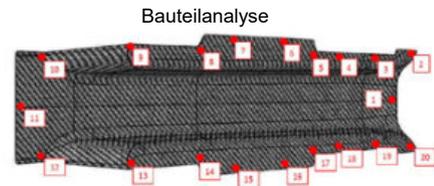
- Durchbiegung vergleichend gemessen mit 10N und 20N an 11 Messpunkten (1 Bauteilhälfte)
- Kritische Bauteilabschnitte wurden vermessen (Umorientierungen des Werkzeuges, Ecken, etc.)
- Steifigkeit ist statisch auf einem vergleichbaren Niveau
- Feststellungen:
  - Stößel stützen das Bauteil sehr gut ab und können nah an die Fräsbahn gesetzt werden
  - Nachteilig ist die reduzierte Dichte der Stößel im Vergleich zur kontinuierlichen Randabstützung der Negativspannvorrichtung



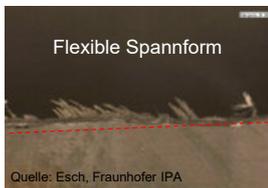
Von der Spanntechnik zur Stauberfassung –  
 integriertes Bearbeitungskonzept für CFK Werkstoffe

Spanntechnik im Vergleich  
 Qualitätsanalyse

- Qualitätskriterien (mikroskopisch): Ausfransungen und Delamination sind auf einem vergleichbaren Niveau
- Qualitätskriterien (makroskopisch): Fräsdynamik (Schwingungen) und Verspannen beim Einlegen führen zu Formabweichungen der Bearbeitungskante



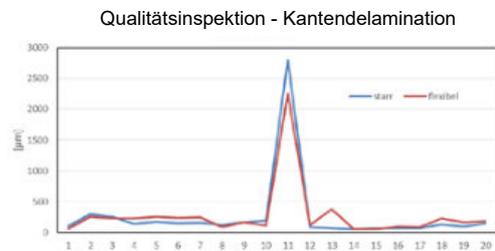
Quelle: Ehrismann, Fraunhofer IPA



Quelle: Esch, Fraunhofer IPA



Quelle: Esch, Fraunhofer IPA



Von der Spanntechnik zur Stauberfassung –  
 integriertes Bearbeitungskonzept für CFK Werkstoffe

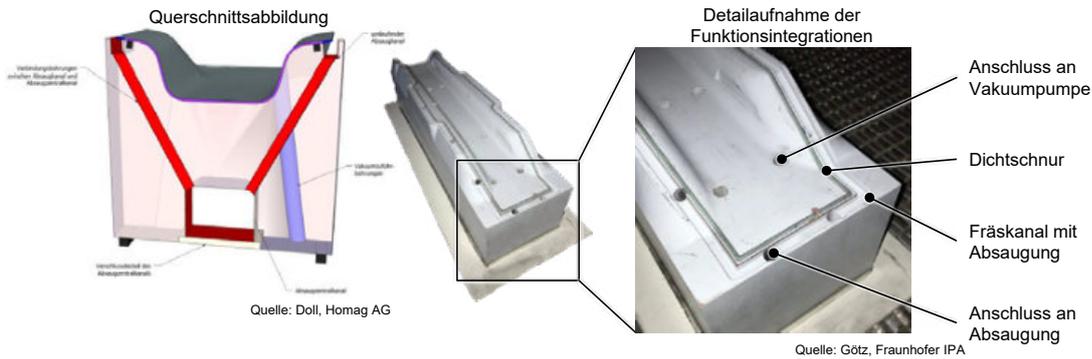
Fazit Spanntechnik  
 Konzeptbewertung Spanntechnik

	Quelle: Doll, Homag AG	Quelle: Doll, Homag AG	Quelle: Doll, Homag AG	Quelle: Esch, Fraunhofer
A	✓	✗	✓	✗
B	✓	✗	✓	✗
C	✓	✓	✓	✓
D	✗	✗	✗	✓
E	✗	✓	✓	✓

**Alternativer Fertigungsansatz  
 3D-gedruckte Spannschablone**

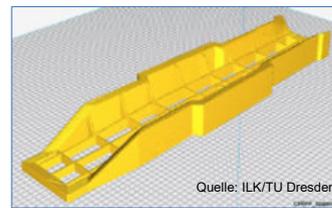
- Negativ Spannschablonen zeigen das beste Steifigkeitsverhalten und erlauben den höchsten Grad an funktionaler Integration
- Herstellbarkeit ist oft schwierig und teuer

→ Idee zur 3D- gedruckten Spannschablone mit hoher Ablagrate FDM

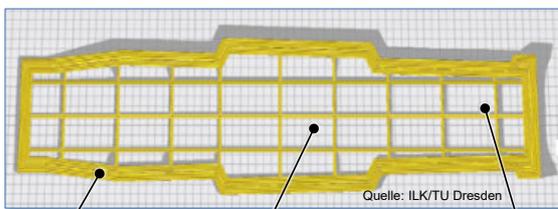


**Spannmittel auf Basis von 3D-Druckverfahren  
 Angepasste Druckstrategien**

- Vermeidung von Stützstrukturen
  - Keine Nacharbeit mehr notwendig
- Vermeidung von Materialanhäufungen
  - Reduzierung durch thermisch induzierten Verzug
- Berücksichtigung prozessrelevanter Funktionalitäten (z.B. Aufspannen des Bauteils mittels Vakuum)



Gesamtes g-Code-Einzelschichtmodell der Spannvorrichtung



- Offset als Materialzugabe für subtraktive Bearbeitung
- Aussparungen zum Anlegen von Vakuum für Aufspannen des Bauteils
- Optimierter Bahnverlauf für möglichst geringe Druck-Unterbrechungen

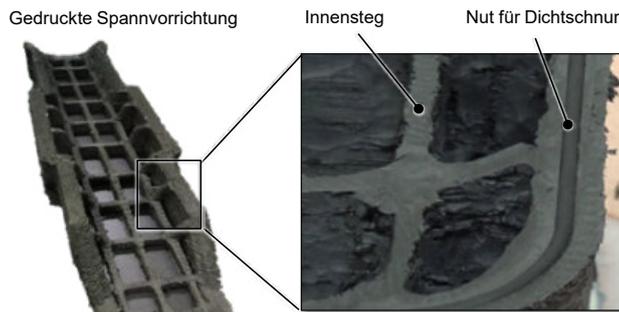
Ablage- und Prozessbedingungen:

- Schichtdicke: 0,5 mm
- Strangbreite: 2 mm
- Geschwindigkeit: 200 mm/s
- Druckzeit: 3,5 h

Von der Spanntechnik zur Stauberfassung –  
 integriertes Bearbeitungskonzept für CFK Werkstoffe

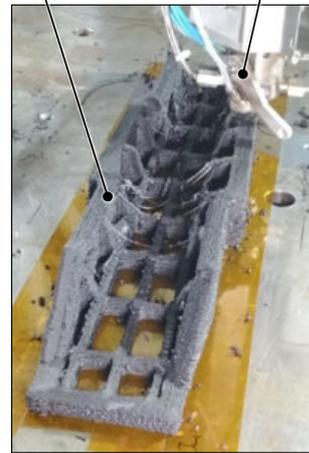
Umsetzung einer gedruckten Spannschablone  
 Demonstrator-Spannschablone

- Material PA6/CF30
- Sehr geringer thermisch induzierter Verzug
- Sehr gute Anbindung auf Druckplattform
- Offset-Zugabe für subtraktive Bearbeitung: 4 mm / Fräsbearbeitung



Quelle: IWU + ILK/TU Dresden

Gedruckte Struktur    Additiv-Einheit



Aufnahme während der additiven  
 Fertigung

Quelle: IWU + ILK/TU Dresden

Von der Spanntechnik zur Stauberfassung –  
 integriertes Bearbeitungskonzept für CFK Werkstoffe

Umsetzung einer gedruckten Spannschablone  
 Demonstrator-Spannschablone



- Spannvorrichtung  
 mit Unterdruckfeldern

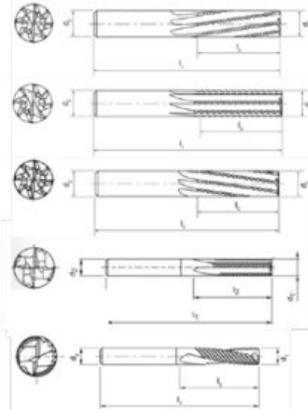
- Spannvorrichtung  
 mit eingelegtem Bauteil

Quelle: Bez, Fraunhofer IPA

## Werkzeugauswahl

### Variation der Werkzeuggeometrie

Produkt Bezeichnung	Drallwinkel Haupt-schneiden [°]	Winkel Schäl-schneiden [°]	Schneiden-anzahl z	Schäl-schneiden	Spanraum $\frac{mm^2 \cdot a_p}{z}$
WZ1	-8	82	8	Feine Verzahnung „fibre catcher“	2,0
WZ2	0	82	8	Feine Verzahnung „fibre catcher“	2,0
WZ3	8	74	8	Feine Verzahnung „fibre catcher“	2,0
WZ4	0	Kompression 45°/135°	4	grobe Verzahnung	4,1
WZ5	15	Kompression 45°/135°	2	grobe Verzahnung	5,7



## Methodisches Vorgehen

### Identifikation kritischer Fasertrennwinkel

- Qualitätsbestimmend ist die Stelle mit dem höchsten Schädigungsgrad



- Welche Faserorientierung ist für die Werkzeuge am kritischsten und führt somit zum höchsten Schädigungsgrad

- Ergebnis:** Kritische Werte liegen sowohl bei Faserüberstand, als auch bei Delamination (unabhängig ob GL oder GGL) im Bereich zwischen  $\Phi=90^\circ$  und  $\Phi=135^\circ$  mit starker Tendenz zu  $112,5^\circ$

- Die Höhe der Schadenswerte ist stark von den Prozessparametern abhängig, nicht aber der kritische Faserorientierungswinkel  $\Phi_{krit}$

### Fräspröbe zur Ermittlung des krit. Faserorientierungswinkels



#### Faserorientierung



#### Vektor der Schnittgeschwindigkeit



$\Phi$  Faserorientierungswinkel:  
Winkel zwischen dem Vektor der Schnittgeschwindigkeit und der Faserorientierung

$\Phi_{krit}$  kritischer Faserorientierungswinkel  
Faserorientierungswinkel der zur geringsten Fräskantenqualität führt

Quelle: Awe, Fraunhofer IPA

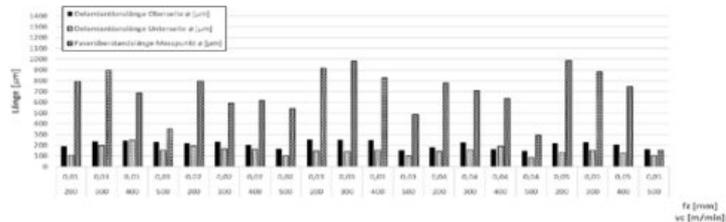
Faserorientierungswinkel	$f_n=0,1\mu m \quad v_n=200m/min$				$f_n=0,3\mu m \quad v_n=300m/min$				$f_n=0,5\mu m \quad v_n=500m/min$			
	Gegenlauf		Gleichlauf		Gegenlauf		Gleichlauf		Gegenlauf		Gleichlauf	
	FU [µm]	DEL [µm]	FU [µm]	DEL [µm]	FU [µm]	DEL [µm]	FU [µm]	DEL [µm]	FU [µm]	DEL [µm]	FU [µm]	DEL [µm]
0,0	22	23	122	32	10	37	24	9	22	18	103	16
22,5	61	44	119	49	35	51	88	47	60	69	127	27
45,0	203	111	368	137	47	113	420	162	89	79	241	79
67,5	480	204	387	236	79	119	657	137	219	114	299	159
90,0	458	238	831	230	391	114	804	171	276	211	403	299
112,5	514	180	780	269	578	115	846	283	302	235	445	254
135,0	421	63	798	237	359	122	484	62	264	159	403	205
157,5	286	72	173	24	145	14	288	28	166	112	237	160

**Von der Spanntechnik zur Stauberfassung –  
 integriertes Bearbeitungskonzept für CFK Werkstoffe**

**Werkzeugempfehlung und Prozessführung**

- Alle getesteten Werkzeuge eignen sich zur CFK Zerspanung
- Individuelle Optima konnten identifiziert werden
- GGL ist dem GL gegenüber zu bevorzugen
- Aus Performancesicht: WZ2 und WZ3

	$f_z$ optimal [mm]	$v_c$ optimal [m/min]
WZ1	0,01	200
WZ2	0,04	500
WZ3	0,04	500
WZ4	0,04	400
WZ5	0,03	500



**Von der Spanntechnik zur Stauberfassung –  
 integriertes Bearbeitungskonzept für CFK Werkstoffe**

**Nachbearbeitung  
 Verfahrensauswahl: Bürsten**

- Anforderung: Qualität sicherstellen, schnelle Bearbeitung, schonendes Nacharbeiten, Werkzeugeinsatzdauer verlängern
- Bürsten und Schleifen sind mögliche Verfahren (> 10m/min Vorschub möglich) für den abrasiven Abtrag von Ausfransungen/Faserüberständen
- Erprobung von unterschiedlichen Filament und Besatzmaterialien



Quelle: Esch, Fraunhofer IPA

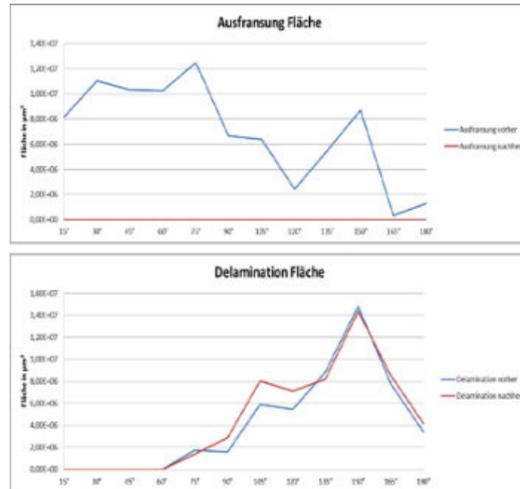


Quelle: Gies, Fraunhofer IPA

**Nachbearbeitung**

**Einstellung der optimalen Prozessführung**

- Ausfransungen können komplett beseitigt werden
- Delaminationsschäden können nicht beseitigt werden  
 → Reparaturstrategie notwendig !
- Optimale Prozessparameter:
  - Vorschub: 200 mm/s
  - Drehzahl: 6000 1/s
  - Laufrichtung: Gleichlauf
  - Eingriffstiefe: 0 mm
  - Eingriffswinkel: 0°
  - Einstellwinkel: 45°



**Automatisierte Nachbearbeitung  
 Bürstaggregat für CFK**

- Pneumatische Ausgleichskinetik zur Lastbegrenzung auf die Bauteilkante und Konturtoleranzausgleich
- Vermeidung von Überlast und Delamination
- Über Druckluft variabel regelbar



Quelle: Esch, Fraunhofer IPA



Quelle: Esch, Fraunhofer IPA



Quelle: Esch, Fraunhofer IPA

**Von der Spanntechnik zur Stauberfassung –  
 integriertes Bearbeitungskonzept für CFK Werkstoffe**

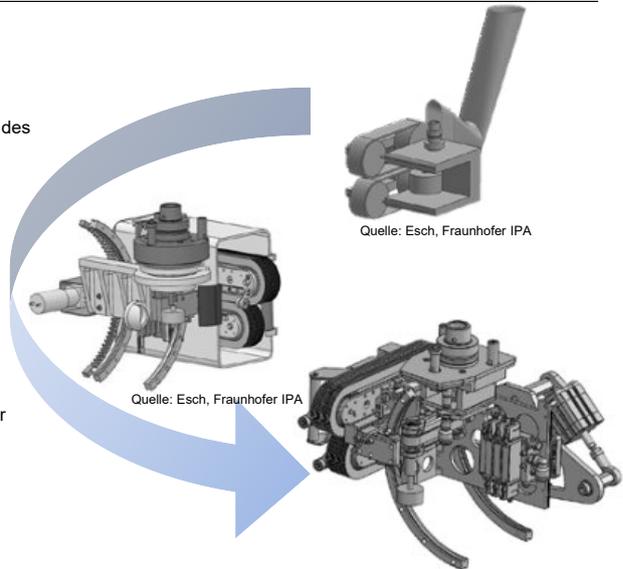
**Integriertes Nachbearbeitungsaggregat  
 Von der Idee zum Aggregat**

Anforderungen aus dem Konsortium:

- Schonende und trockene Reinigung der Kante und des Kantenbereichs
- Reinigung von Ober- und Unterseite
- Anpassung an die Bauteiltopologie
- Integration von Nachbearbeitung (Bürsten) und Reinigen (Prozesszeit)

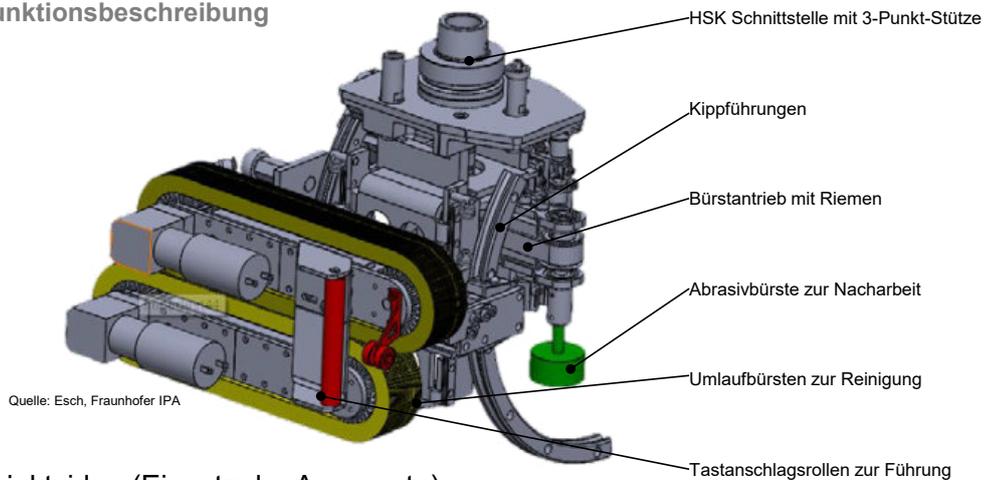
Auslegung:

- Abrasivbürsten arbeiten im Vorlauf
- Reinigungsbürsten laufen „ziehend“ ab → Effekt der „Selbstarretierung“
- Reinigungsbürsten nach bewährtem Konzept aus Automotivebranche (z.B.: Wandres)
- Tenderbauweise, um 3D Kontur optimal erfassen zu können



**Von der Spanntechnik zur Stauberfassung –  
 integriertes Bearbeitungskonzept für CFK Werkstoffe**

**Nachbearbeitungsaggregat  
 Funktionsbeschreibung**

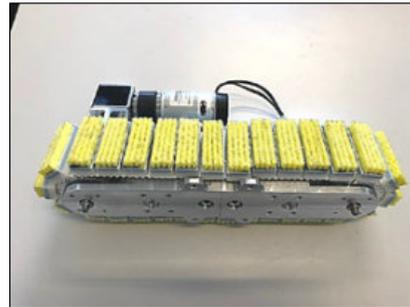
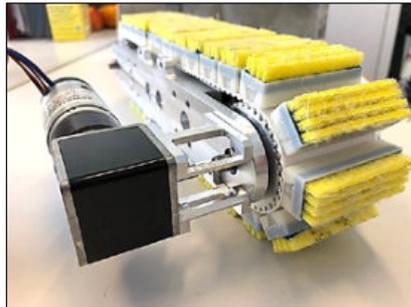
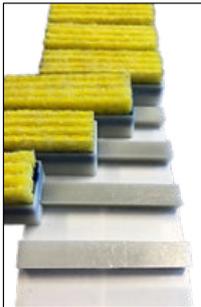


Projektvideo (Einsatz der Aggregate)

<https://www.ipa.fraunhofer.de/de/referenzprojekte/CFK.html>

### Modulares Bürstkonzept Nachhaltigkeit im Bürsteinsatz

- Besatzmaterial kann frei nach Anwendung gewählt und gewechselt werden
  - Höhe, Härte und Filamentart
- Filamentträger können bei Verschleiß einfach getauscht werden
- Bestückung ist in der Handhabung sehr einfach (Schwalbenschwanzkupplung)



Quelle: Esch, Fraunhofer IPA

### Absaugung/Staubschutz Herausforderungen in der CFK Zerspänung

- Beim Fräsen von CFK werden große Mengen feiner Stäube erzeugt, die eine Gesundheitsgefährdung darstellen können.
- Aufgrund der Gegebenheiten greifen folgende relevante Richtlinien:
  - Faserförmige Bestandteile mit „kritischen Abmessungen“, sogenannte „WHO-Partikel“
  - Granuläre biobeständige Feinstäube → TRGS 900

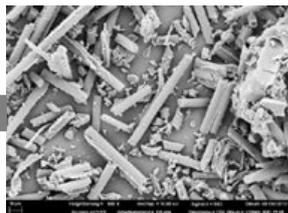
Höchstgrenzen für granuläre biobeständige Feinstäube nach Technischen Regeln für Gefahrstoffe (TRGS) 900:

- **A-Staub** mit Partikelgrößen < 10 µm für alveolengängige Partikelstäube;  
**Grenzwert 1,25 mg/m³**
- **E-Staub** mit Partikelgrößen > 10 µm, für einatembare Partikelstäube;  
**Grenzwert 10 mg/m³**



**Staubschutzmaßnahmen  
 müssen ergriffen werden**

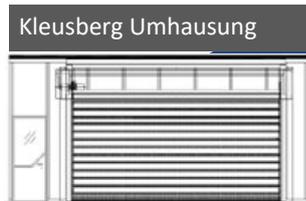
Definition WHO-Partikel	
Länge L	L > 5 µm
Durchmesser D	D < 3 µm
Schlankheitsgrad L/D	L / D > 3



Quelle: Gebhardt, Fraunhofer IPA



**Absaugsystem für CFKcomplete  
 Maßnahmenpaket**



Quelle: Kleusberg

**Airney Staubsensor**



Quelle: airney GmbH & Co. KG

**Homag Hauben/Düsen**



Quelle: Homag AG

**Schuko Absauganlage**



Quelle: Schuko GmbH

**Absaugung/Staubschutz  
 Umhausung mit intelligenter Steuerung**

- Vollständige Umhausung der Anlage
  - Arbeiten außerhalb ohne PSA
  - Arbeiten innerhalb mit PSA
- Teilkapselung bleibt erhalten
  - trägt Absaug-Systemkomponenten
  - Schusssicherheit gegen Werkzeugbruch gegeben
- Staubsensor misst die Raumkontamination, steuert die Absauganlage und gibt den Zutritt frei
  - Minimierung der Wartezeit zum Bestücken
  - Optimale und energieeffiziente Stauberfassung

Permanente Messung der  
 Staubkonzentration



Quelle: airney GmbH & Co. KG

Intelligente Steuerung  
 der Absauganlage



Quelle: Schuko GmbH

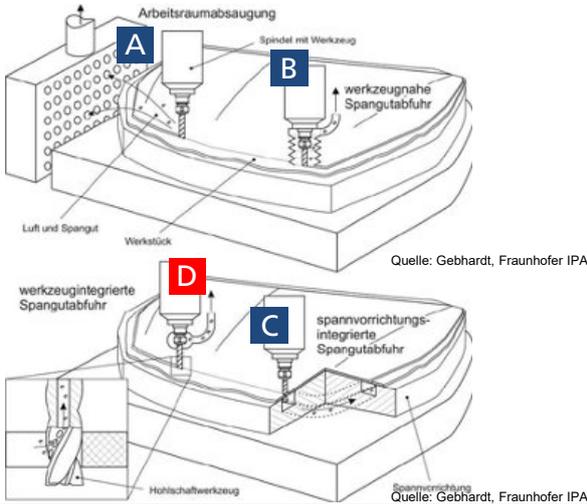
Schnellstmögliche  
 Torfreigabe für Bestücken



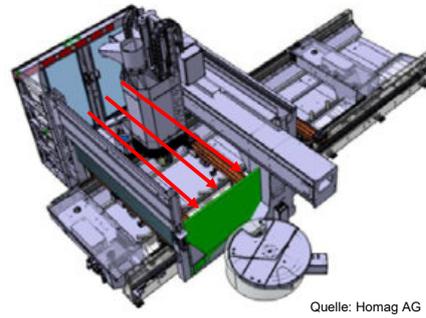
Quelle: Kleusberg

**Absaugung/Staubschutz**

**Absaugkonzepte für unterschiedliche Anwendungsfälle**

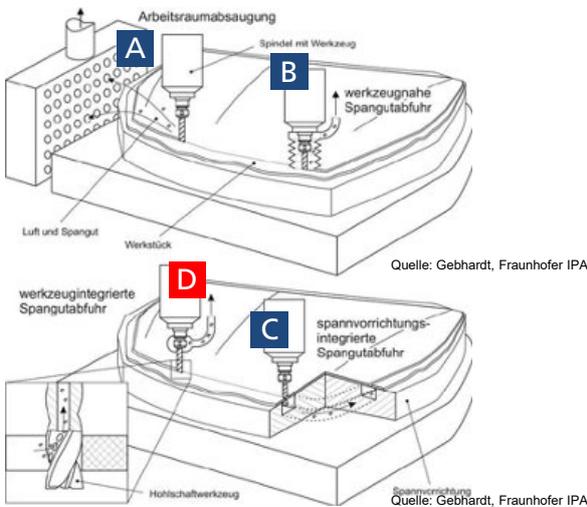


**A** Arbeitsraumabsaugung  
 → Air Return System®



**Absaugung/Staubschutz**

**Absaugkonzepte für unterschiedliche Anwendungsfälle**



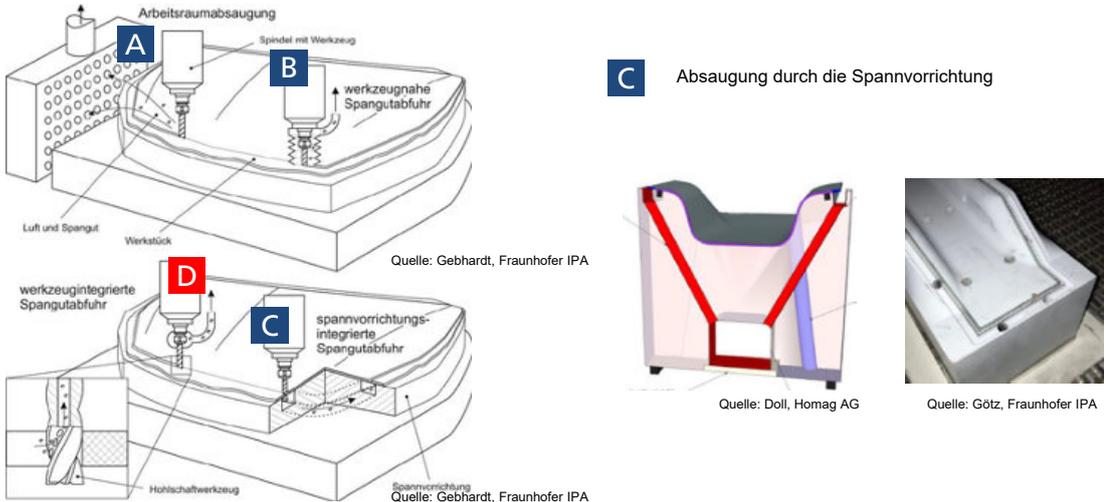
**B** Werkzeugnahe Absaugung  
 → Homag Absaughaube



**Von der Spanntechnik zur Stauberfassung –  
 integriertes Bearbeitungskonzept für CFK Werkstoffe**

**Absaugung/Staubschutz**

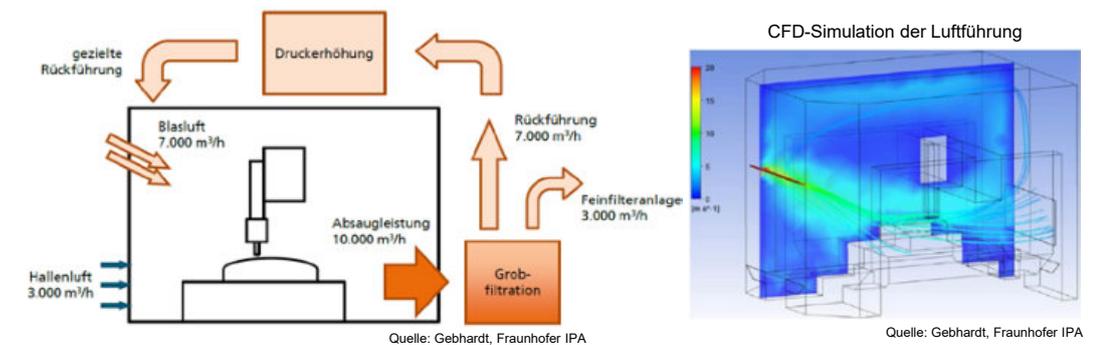
**Absaugkonzepte für unterschiedliche Anwendungsfälle**



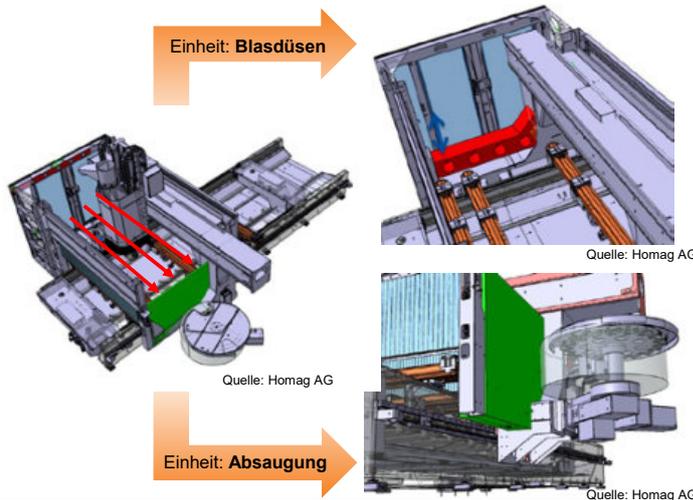
**Absaugung/Staubschutz**

**ARS (Air Return System) – Prinzip**

- Erhöhung der Absaugleistung durch Kreislaufführung
- Innovatives Konzept mit einer Kupplung der Blasluft mit großer Reichweite und Luftabsaugung (Konzept exemplarisch gezeigt)
  - Bessere Späne- und Stauberfassung
  - Deutliche Energieeinsparung



**Absaugung/Staubschutz**  
 Integration ARS in Bearbeitungsmaschine



- Unterbringung der Blaseinheit in Teilkapselung
- Führung über Rastbolzen, Linearführung oder ähnliches
- Durchflutung parallel zur Y-Achse gerichtet auf Absaugstelle

- Gegenstück zu Blasdüseneinheit auf anderer Seite
- Integration mit Absaugung
- Spanleitblech verstellbar
- Fangstelle für luftgetragene Partikel

**Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit**

Philipp Esch  
 Projektleiter

Fraunhofer-Institut für  
 Produktionstechnik und Automatisierung IPA  
 Abteilung Leichtbautechnologien

Nobelstraße 12 | 70569 Stuttgart  
 Telefon +49 711 970-1557  
 Fax + 49 711 970-717-1557

[philipp.esch@ipa.fraunhofer.de](mailto:philipp.esch@ipa.fraunhofer.de)  
[www.ipa.fraunhofer.de](http://www.ipa.fraunhofer.de)



## 4 AUTOMATISCHE KANTENINSPEKTION UND QUALITÄTSAUSWERTUNG (ZEISS UND IPA)

GEFÖRDERT VOM  
 **Bundesministerium für Bildung und Forschung**

**Produktionsanlagen für Wachstumsmärkte – intelligent einfach und effizient**

**CFK**  
Complete

---

# Automatisierte Qualitätskontrolle der Schnittkanten

**10. bis 12. September 2019**  
**Composites Europe, Messe Stuttgart**

Andreas Wawak,  
Carl Zeiss Automated Inspection GmbH

Andreas Frommknecht,  
Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA

---

**IST** **Krautzberger**  **ZEISS**  **HE HOMAG**  **Fraunhofer IPA** BEIHEFT VOM  **PIKA** Projektträger Karlsruhe Kooperations Institute für Technologie 1

GEFÖRDERT VOM  
 **Bundesministerium für Bildung und Forschung**

**Produktionsanlagen für Wachstumsmärkte – intelligent einfach und effizient**

**CFK**  
Complete

---

# Übersicht

---

- 1 Einordnung in Gesamtprojekt
- 2 Motivation
- 3 Entwickelte Sensorik
- 4 Messstrategie
- 5 Algorithmen zur Inline-Qualitätskontrolle der Fräskante
- 6 Ergebnisse

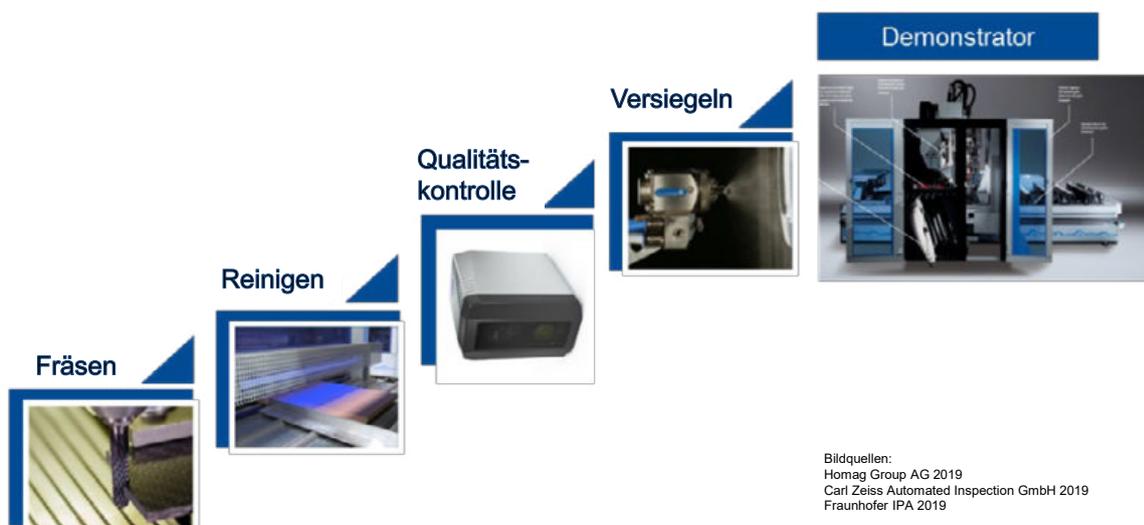
---

**IST** **Krautzberger**  **ZEISS**  **HE HOMAG**  **Fraunhofer IPA** BEIHEFT VOM  **PIKA** Projektträger Karlsruhe Kooperations Institute für Technologie 2

# Übersicht

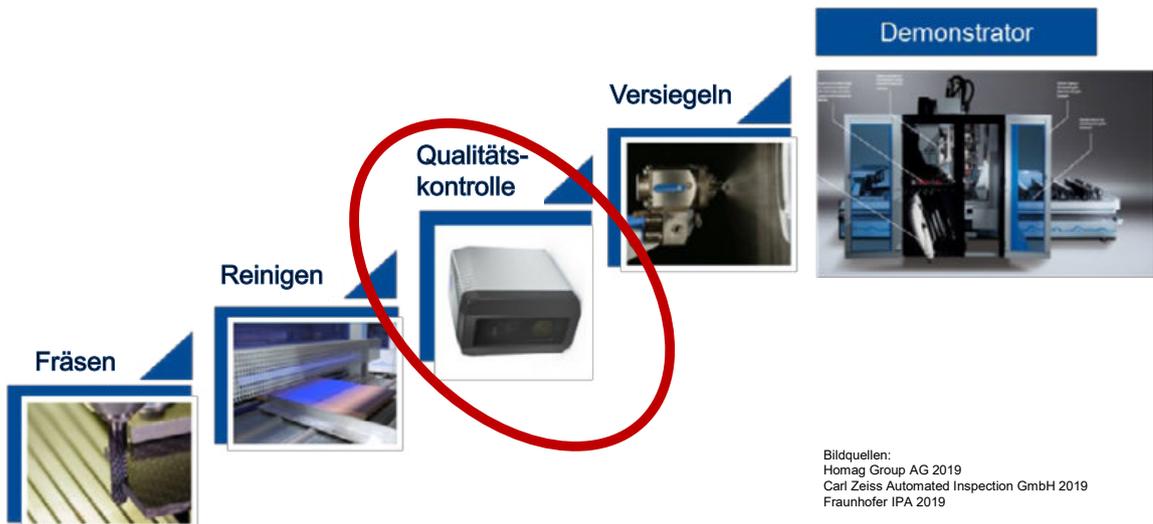
- 1 Einordnung in Gesamtprojekt
- 2 Motivation
- 3 Entwickelte Sensorik
- 4 Messstrategie
- 5 Algorithmen zur Inline-Qualitätskontrolle der Fräskante
- 6 Ergebnisse

## Einordnung in Gesamtprojekt



Bildquellen:  
Homag Group AG 2019  
Carl Zeiss Automated Inspection GmbH 2019  
Fraunhofer IPA 2019

## Einordnung in Gesamtprojekt



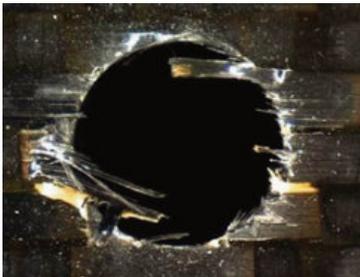
## Übersicht

- 1 Einordnung in Gesamtprojekt
- 2 Motivation
- 3 Entwickelte Sensorik
- 4 Messstrategie
- 5 Algorithmen zur Inline-Qualitätskontrolle der Fräskante
- 6 Ergebnisse

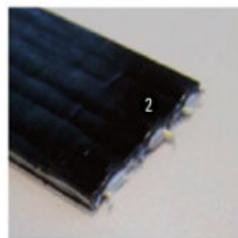
**Motivation**

Typische Fehler bei Fräsbearbeitung von CFK:

- Anhaftung
- Faserüberstände/Ausfransung
- Delamination
- Grattbildung
- Kantenausbrüche



Quelle: Peter Königsreuther, CFK sorgloser zerspanen, MM MaschinenMarkt online, 2017



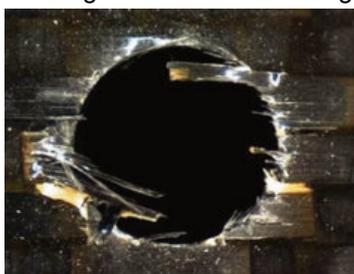
- 1 Anhaftung
- 2 Ausfransung
- 3 Delamination
- 4 Grattbildung
- 5 Kantenausbruch

Quelle: Spanende Bearbeitung von Leichtbauwerkstoffen, e-mobil BW GmbH, Fraunhofer IPA, MfWBW, MWFKBW, 2012

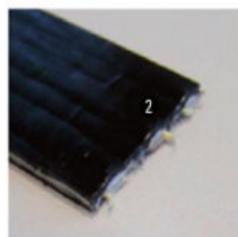
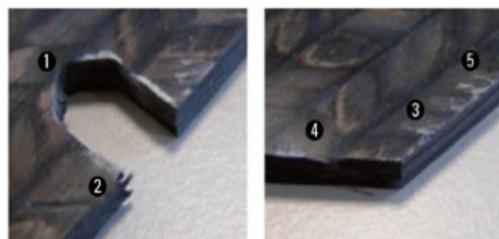
**Motivation**

Notwendigkeit von:

- optischer Inline-Inspektion der Bearbeitungsstellen (Fräskanten)
- Bestimmung der Bearbeitungsqualität durch 3D Datenverarbeitung
- kontinuierliche Dokumentation der erzeugten Qualität
- Identifizierung von Nachbearbeitungsstellen



Quelle: Peter Königsreuther, CFK sorgloser zerspanen, MM MaschinenMarkt online, 2017



- 1 Anhaftung
- 2 Ausfransung
- 3 Delamination
- 4 Grattbildung
- 5 Kantenausbruch

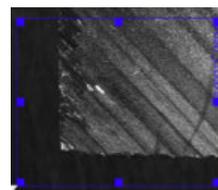
Quelle: Spanende Bearbeitung von Leichtbauwerkstoffen, e-mobil BW GmbH, Fraunhofer IPA, MfWBW, MWFKBW, 2012

# Übersicht

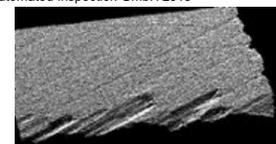
- 1 Einordnung in Gesamtprojekt
- 2 Motivation
- 3 Entwickelte Sensorik
- 4 Messstrategie
- 5 Algorithmen zur Inline-Qualitätskontrolle der Fräskante
- 6 Ergebnisse

## Entwickelte Sensorik

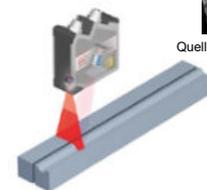
- Entwicklung von Streifenprojektionssensor
- Eignung:
  - schnelle, flächige Aufnahme von Merkmalen
  - sowohl für Fräskanten, als auch Bohrungen einsetzbar
- Alternative Lichtschnittsensor, weist Probleme auf:
  - Beachtung von Augenschutzmaßnahmen
  - starke Einbindung in Ablaufprogramm für flächige Daten
  - nur sinnvoll bei 100% Kontrolle aller Fräskanten
- Andere 3D Sensoren nicht inlinefähig (bspw. Fokusvariation) oder zu ungenau (bspw. Time of Flight)



Quelle: Carl Zeiss Automated Inspection GmbH 2019



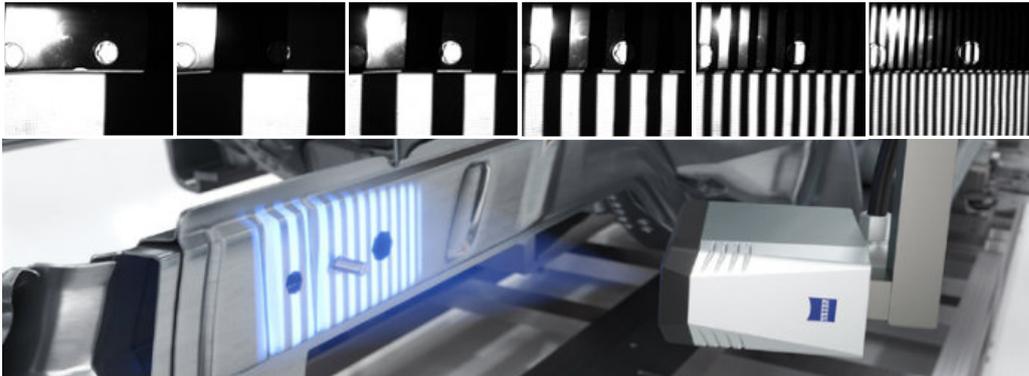
Quelle: Carl Zeiss Automated Inspection GmbH 2019



Quelle: Micro-Epsilon Messtechnik GmbH & Co. KG 2018

**Entwickelte Sensorik:  
 Eigenschaften des ZEISS AIMax Cloud Sensors**

- Fortschrittliche Projektionstechnologie (DLP™) optimiert für In-Line Messtechnik
- Extrem schnell (~0,5 sec) mit strukturierter Beleuchtung und Phasenshiftverfahren
- Hohe Dichte & Qualität der Punktwolken
- Kompakter Sensor für hohe Zugänglichkeit
- Bandpassfilter zur Fremdlichtunterdrückung, "ruggedized" Objektiv



Quelle: Carl Zeiss Automated Inspection GmbH 2019

**Entwickelte Sensorik:  
 Eigenschaften des ZEISS AIMax Cloud Sensors**



Quelle: Carl Zeiss Automated Inspection GmbH 2019

- Kamera:** 4MP Auflösung
- Projektor:** 1MP Auflösung
- Single Board Computer:** Steuerung
- Arbeitsabstand:** 165mm
- Meßvolumen:** 80x80x40mm
- Beleuchtung:** 3 LEDs (R, G, B)
- Gewicht:** < 3 kg
- Dimensionen:** 96 x 168 x 145 mm
- Messzeit:** < 500 msec, typ. 300 msec
- Genauigkeit:** x,y < 5µm, z < 10µm

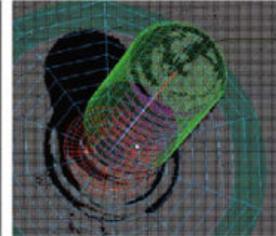
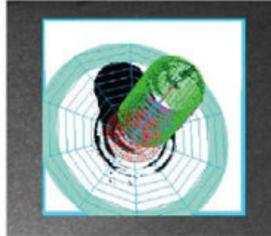
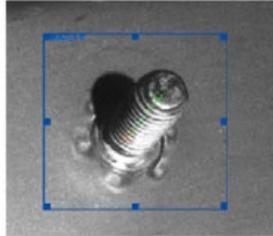
## Entwickelte Sensorik: Eigenschaften des ZEISS AI-Max Cloud Sensors

Auswahl des zu messenden  
 Merkmals im 2-D-Bild.

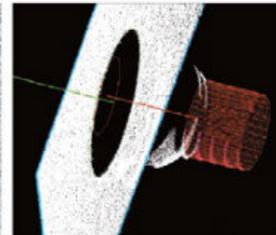
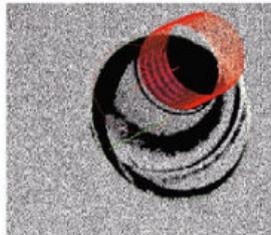
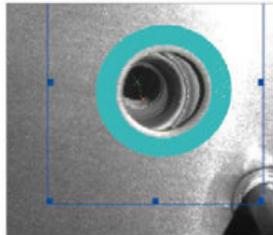
Ein Algorithmus generiert die  
 3-D-Punktwolke.

Das Messergebnis wird sofort visualisiert.

Beispiel Bolzen



Beispiel  
 Mutter hinter  
 einem Blech



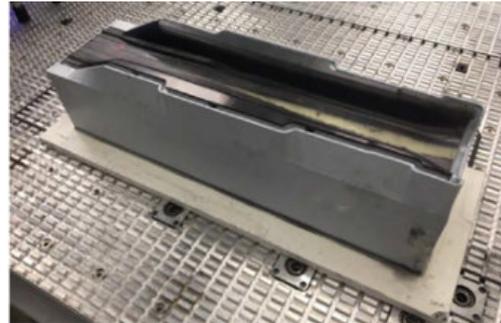
Quelle: Carl Zeiss Automated Inspection GmbH 2019

## Übersicht

- 1 Einordnung in Gesamtprojekt
- 2 Motivation
- 3 Entwickelte Sensorik
- 4 **Messstrategie**
- 5 Algorithmen zur Inline-Qualitätskontrolle der Fräskante
- 6 Ergebnisse

## Messstrategie: Bauteillage

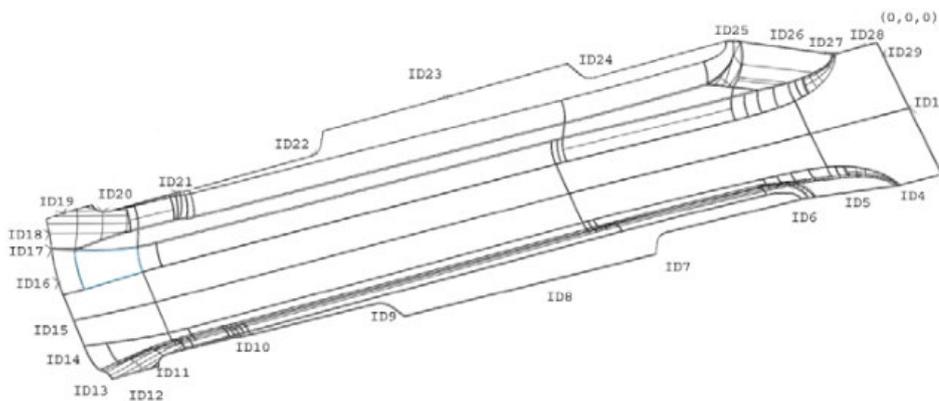
Lage des zu prüfenden Bauteils durch Negativspannvorrichtung vorgegeben



Bildquellen:  
 Audi AG 2018  
 Homag Group AG 2018  
 Fraunhofer IPA 2018

## Messstrategie: Messpositionen

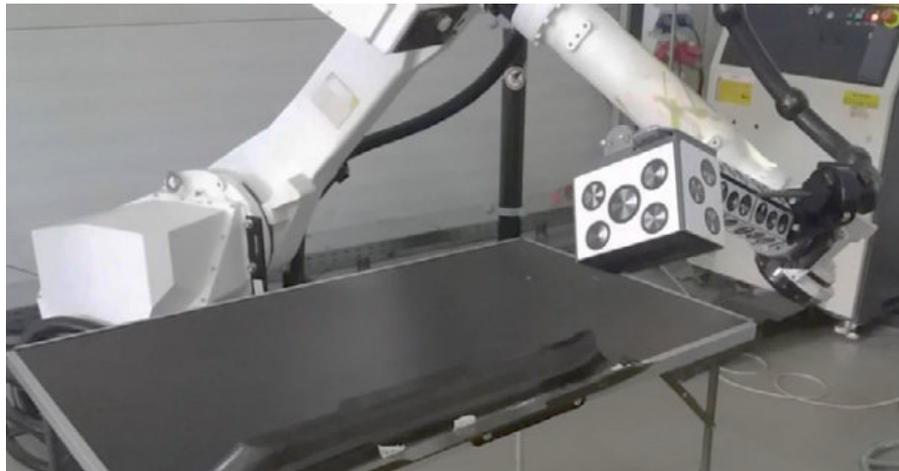
29 kritische Bearbeitungsposition wurden als Messpositionen für Demonstrator-Bauteil definiert.



Bildquelle:  
 Homag Group AG 2018  
 Fraunhofer IPA 2018

### Messstrategie: Ermittlung Posen

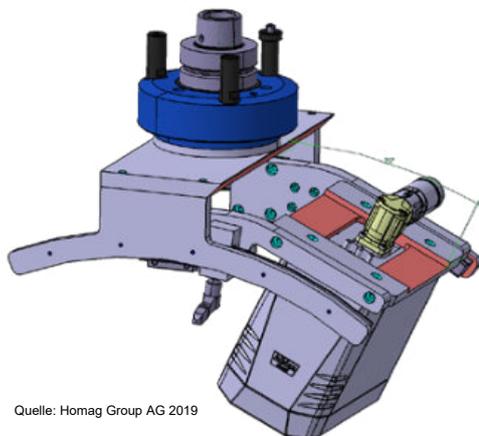
- Ermittlung idealer Messpositionen mit Roboter
- Posen nicht auf 5 Achswerkzeugmaschine übertragbar



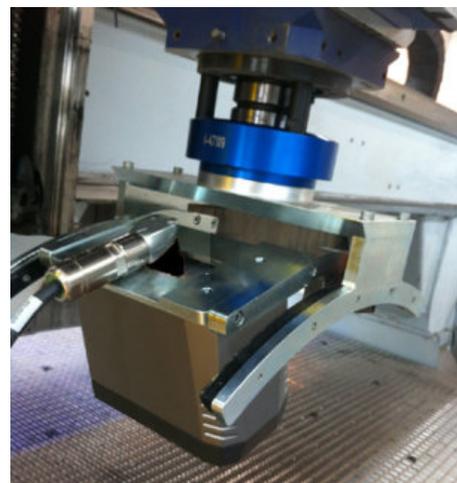
Quelle: Carl Zeiss Automated Inspection GmbH 2019

### Messstrategie: Achskompensation

- Kompensation fehlender Achse über Adapter
- Manuelle Anpassung des Winkels möglich



Quelle: Homag Group AG 2019



Bildquellen:  
 Fraunhofer IPA 2019  
 Carl Zeiss Automated Inspection GmbH 2019

## Messstrategie: Sensorfahrt



Bildquellen:  
Fraunhofer IPA 2019  
Carl Zeiss Automated Inspection GmbH 2019  
Hornag Group AG 2019  
Kniff Projektagentur GBR 2019

## Übersicht

- 1 Einordnung in Gesamtprojekt
- 2 Motivation
- 3 Entwickelte Sensorik
- 4 Messstrategie
- 5 Algorithmen zur Inline-Qualitätskontrolle der Fräskante
  - 5.1 Ausgangsdaten und Zielsetzung
  - 5.2 Geometrische Abweichungen
  - 5.3 Bestimmung von Faserüberständen
- 6 Ergebnisse

# Übersicht

- 1 Einordnung in Gesamtprojekt
- 2 Motivation
- 3 Entwickelte Sensorik
- 4 Messstrategie
- 5 Algorithmen zur Inline-Qualitätskontrolle der Fräskante

## 5.1 Ausgangsdaten und Zielsetzung

- 5.2 Geometrische Abweichungen
- 5.3 Bestimmung von Faserüberständen

- 6 Ergebnisse

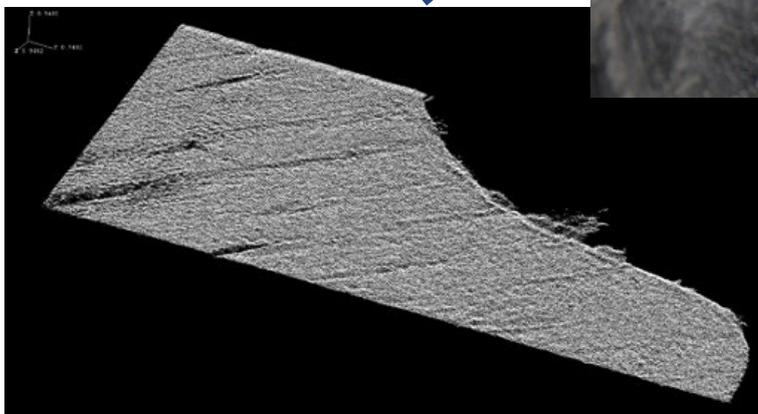
## Algorithmen: Datenbasis

### 3D Punktwolke

Quelle: Carl Zeiss Automated  
Inspection GmbH 2019

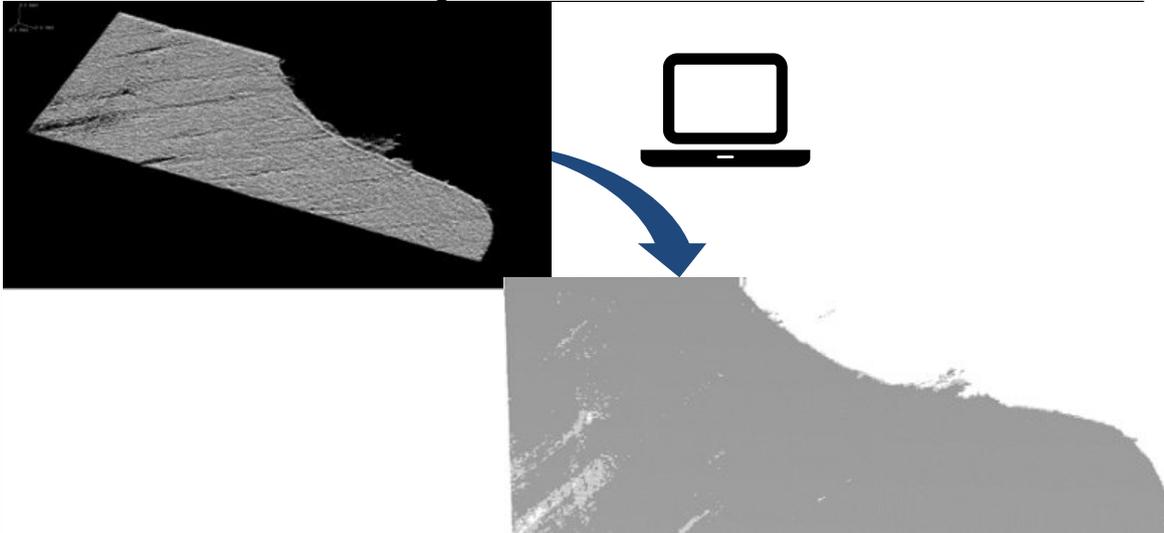


Quelle: Fraunhofer IPA 2019



Quelle: Fraunhofer IPA 2019

Algorithmen:  
 Konvertierung von 3D Punktwolke in 2D Grauwertbild



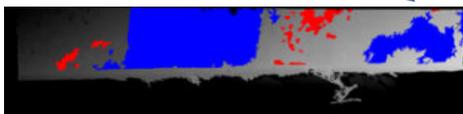
Motivation: Nutzung etablierter 2D Bildverarbeitungsalgorithmen

Quelle: Fraunhofer IPA 2019

Algorithmen: Auswertemodule



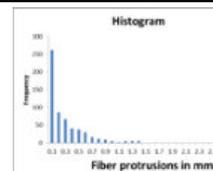
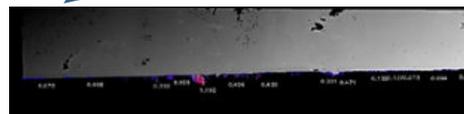
Formabweichungen  
 (Delaminationen, Ausbrüche)



Defect 1: positive vertical deviation defect  
 defect\_area\_pixels: 3881  
 defect\_area\_absolute: 6.2096  
 defect\_height\_sum: 3183.96  
 height\_average: 0.820396  
 height\_max\_abs: 1.63927  
 volume\_absolute: 5.09433

Faserüberstände

Quelle: Fraunhofer IPA 2019



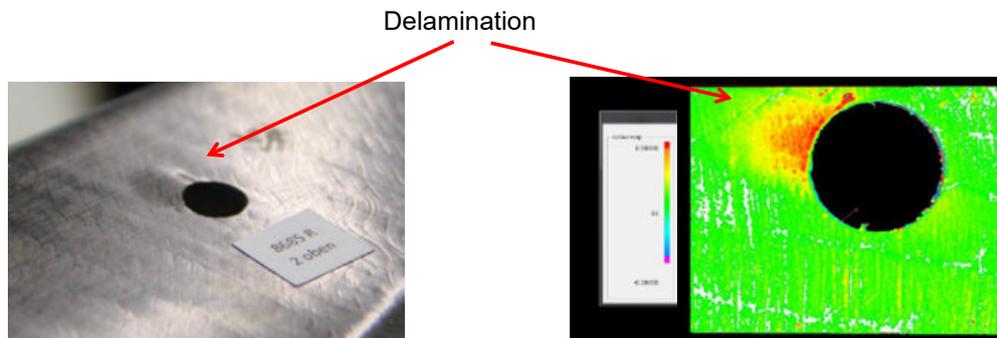
Quelle:  
 Fraunhofer IPA 2019

# Übersicht

- 1 Einordnung in Gesamtprojekt
- 2 Motivation
- 3 Entwickelte Sensorik
- 4 Messstrategie
- 5 Algorithmen zur Inline-Qualitätskontrolle der Fräskante
  - 5.1 Ausgangsdaten und Zielsetzung
  - 5.2 Geometrische Abweichungen
  - 5.3 Bestimmung von Faserüberständen
- 6 Ergebnisse

## Algorithmen: Geometrische Abweichungen

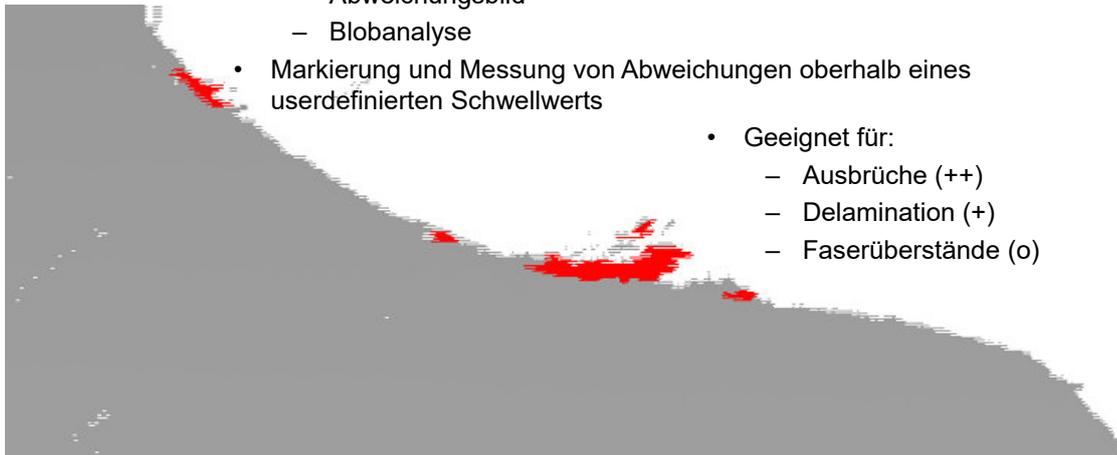
- Fit von Regelgeometrien, wie bspw. Ebene, Zylinder, Kegel
- Formabweichung wird festgestellt
- Fehlbereich wird markiert und gemessen



Quelle: Fraunhofer IPA 2019

## Algorithmen: Erkennung von geometrischen Abweichungen

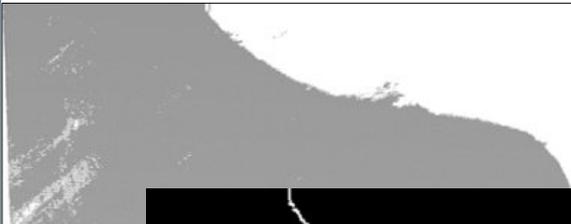
- Algorithmus:
  - Einpassung regelgeometrischer Elemente => Erstellung Abweichungsbild
  - Blobanalyse
- Markierung und Messung von Abweichungen oberhalb eines userdefinierten Schwellwerts
  - Geeignet für:
    - Ausbrüche (++)
    - Delamination (+)
    - Faserüberstände (o)



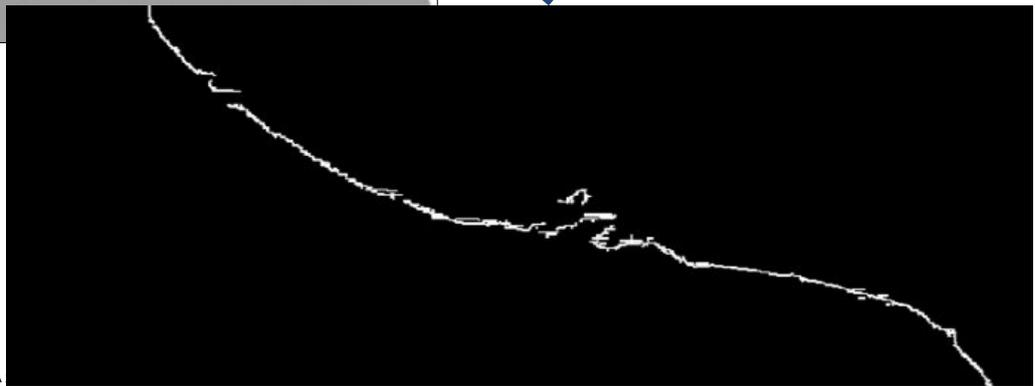
Quelle: Fraunhofer IPA 2019

## Übersicht

- 1 Einordnung in Gesamtprojekt
- 2 Motivation
- 3 Entwickelte Sensorik
- 4 Messstrategie
- 5 Algorithmen zur Inline-Qualitätskontrolle der Fräskante
  - 5.1 Ausgangsdaten und Zielsetzung
  - 5.2 Geometrische Abweichungen
  - 5.3 Bestimmung von Faserüberständen
- 6 Ergebnisse



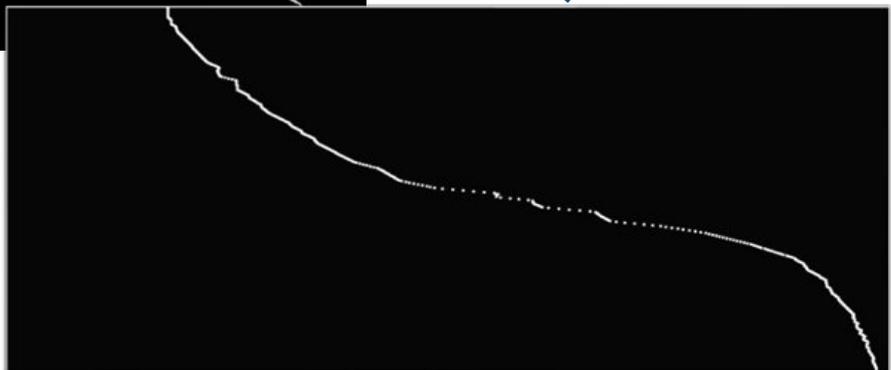
Canny Edge Detector



Quelle: Fraunhofer IPA



Filterung und  
Glättung



Quelle: Fraunhofer IPA 2019

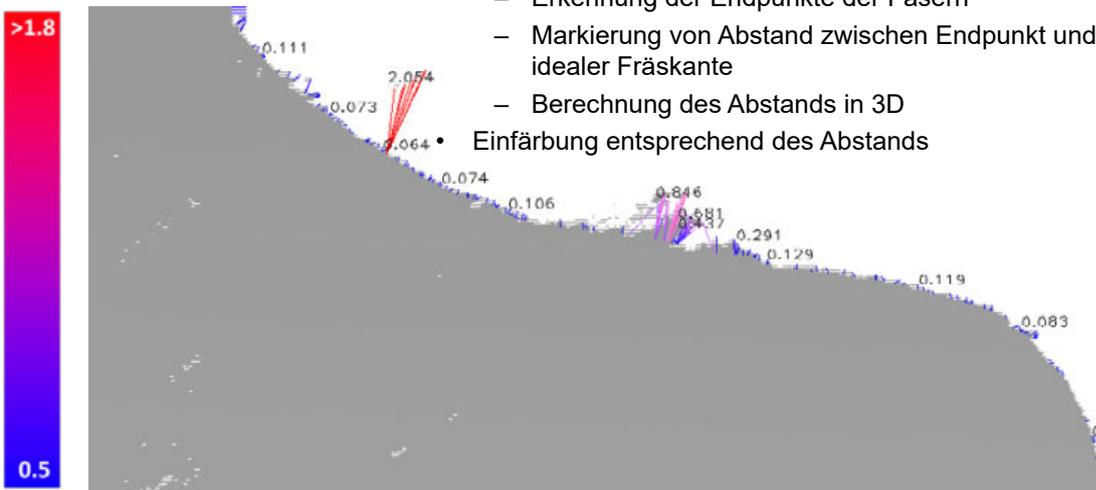
**Algorithmen:  
 Identifizierung von Punkten außerhalb des Materials**



Quelle: Fraunhofer IPA 2019

**Algorithmen: Messung von Faserüberständen**

- Algorithmus:
  - Erkennung der Endpunkte der Fasern
  - Markierung von Abstand zwischen Endpunkt und idealer Fräskante
  - Berechnung des Abstands in 3D
  - Einfärbung entsprechend des Abstands



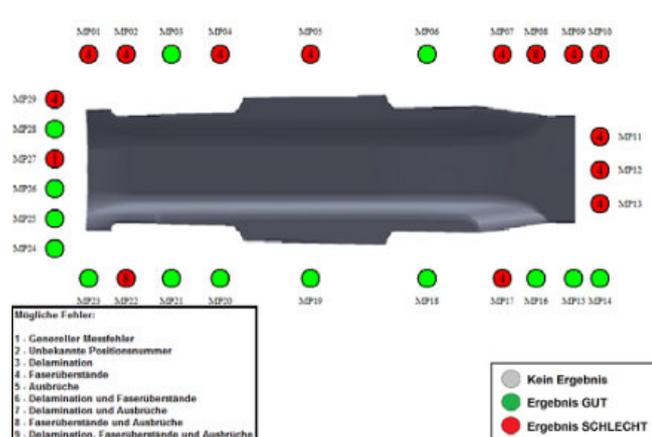
Quelle: Fraunhofer IPA 2019

# Übersicht

- 1 Einordnung in Gesamtprojekt
- 2 Motivation
- 3 Entwickelte Sensorik
- 4 Messstrategie
- 5 Algorithmen zur Inline-Qualitätskontrolle der Fräskante
- 6 Ergebnisse

# Ergebnisse

- Einbindung in Zeiss AIMax Cloud Software
- Erfassung und Speicherung der Qualitätsdaten



Quelle: Carl Zeiss Automated Inspection GmbH 2019

Ergebnisse:

Detektion und Messung geometrischer Abweichungen

Defekt- nummer	Durchschnittliche Höhe [mm]	Maximale Höhe [mm]	Fläche [mm <sup>2</sup> ]	Volumen [mm <sup>3</sup> ]
1	0,083529	0,169224	0,1708	0,014267
2	0,151175	0,266466	0,0524	0,007922
3	0,112127	0,243839	0,0484	0,005427
4	0,154102	0,454639	0,7164	0,110399
5	0,094030	0,239381	0,0628	0,005905

- Weitere bestimmbare Werte: Position der Defekte
- Geeignet für:
  - Ausbrüche (++)
  - Delamination (+)
  - Faserüberstände (o)



Krautzberger



HE HOMAG



Fraunhofer

IPA



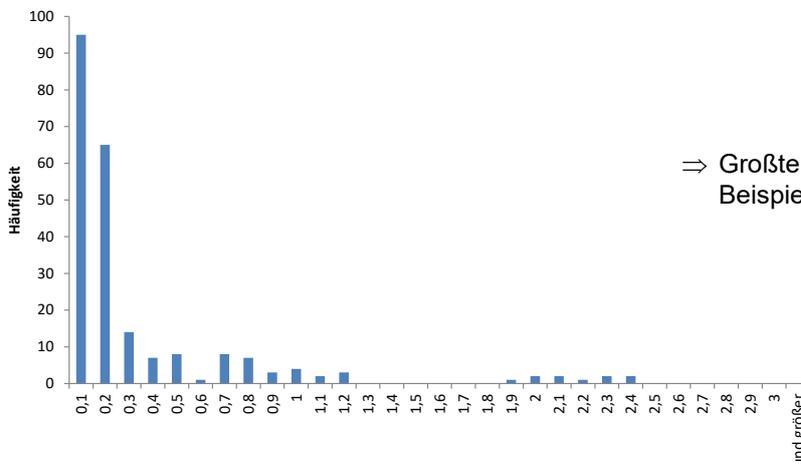
PTKA  
 Projektträger Karlsruhe  
 Karlsruher Institut für Technologie

35

Ergebnisse:

Erkennung und Messung von Faserüberständen

Histogramm



⇒ Großteil der Faserüberstände im Beispiel haben niedrige Längen

Faserüberstände in mm

Quelle: Fraunhofer IPA 2019



Krautzberger



HE HOMAG



Fraunhofer

IPA



PTKA  
 Projektträger Karlsruhe  
 Karlsruher Institut für Technologie

36

## Ergebnisse

Notwendigkeit der Entfernung der Faserüberstände

- Verbesserung des Fräsprozesses (Parameter, Fräsprogramm, Werkzeug, ...)
- Reinigungsprozedur unter Verwendung einer Abrasiv-Bürste



Bildquellen:  
Homag Group AG 2019  
Carl Zeiss Automated Inspection GmbH 2019  
Fraunhofer IPA 2019

# 5 AGGREGATEENTWICKLUNG ZUR KANTENVERSIEGELUNG (KRAUTZBERGER UND IPA)

Produktionsanlagen für Wachstumsmärkte – intelligent einfach und effizient

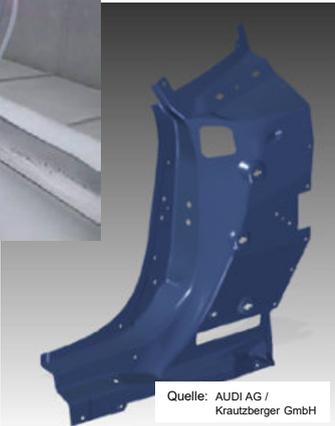
**CFK Complete**

Intelligente Komplettbearbeitung und Versiegelung von CFK-Bauteilen für die Großserie (CFKComplete)

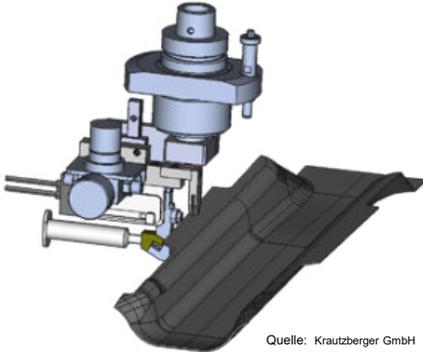
**Teilprojekt:**  
Entwicklung Versiegelungstechnik



Quelle: Krautzberger GmbH



Quelle: AUDI AG / Krautzberger GmbH



Quelle: Krautzberger GmbH

COMPOSITES EUROPE, 11.09.2019

IST Krautzberger ZEISS Audi HOMAG Fraunhofer IPA PIKA Projektträger Karlsruhe

Produktionsanlagen für Wachstumsmärkte – intelligent einfach und effizient

**CFK Complete**

Intelligente Komplettbearbeitung und Versiegelung von CFK-Bauteilen für die Großserie (CFKComplete)

**Agenda**

- kurze Firmenvorstellung,
- Zusammenfassung von Möglichkeiten der Kantenbeschichtung im Allgemeinen und der angewandten Technologie im Besonderen,
- zu bearbeitende Aufgaben mit ihren spezifischen Projektzielen,
- Umsetzung und das Projektergebnis für die Kantenversiegelung

Referent: Dipl. Ing. (FH) Jörg Blumrich  
Krautzberger GmbH  
Stockbornstrasse 13  
D – 65343 Eltville am Rhein

Tel. : +49 (6123) 698-233  
Fax : +49 (6123) 698-250  
[j.blumrich@krautzberger.com](mailto:j.blumrich@krautzberger.com)  
<http://www.krautzberger.com>

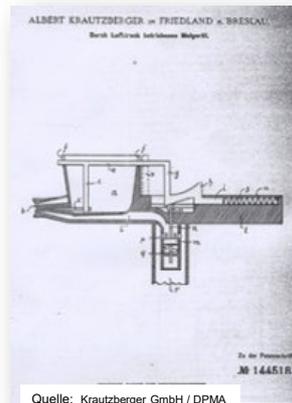
IST Krautzberger ZEISS Audi HOMAG Fraunhofer IPA PIKA Projektträger Karlsruhe

**Intelligente Komplettbearbeitung und Versiegelung von CFK-Bauteilen  
 für die Großserie (CFKComplete)**

**Firmengeschichte**



Quelle: Krautzberger GmbH



Quelle: Krautzberger GmbH / DPMA



Quelle: Krautzberger GmbH / DPMA

Albert Krautzberger aus Friedland bei Breslau meldete am 9. Oktober 1902 ein „...durch Druckluft betriebenes Malgerät“ zum Patent an.

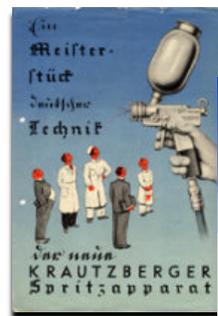
**Intelligente Komplettbearbeitung und Versiegelung von CFK-Bauteilen  
 für die Großserie (CFKComplete)**

**Firmengeschichte**

- Industrielle Fertigung ab 1903
- Enteignung des Betriebsvermögens nach dem 2. Weltkrieg
- 1948 Neuaufbau in Eltville am Rhein
- 1979 Neubau eines Büro- und Fertigungsgebäudes
- 2006 Erweiterung und Umbau des hauseigenen Technikums
- 2011 Gewinn des Technologiepreises „Hermes Award“

Krautzberger GmbH, aktuell

- Eigene Niederlassungen in Frankreich und Tschechien
- Kunden weltweit 77 Ländern
- Bis heute in Familienbesitz
- Produktionsstandorte Eltville am Rhein und Leipzig-Holzhausen
- An beiden Standorten ca. 80 Mitarbeiter
- Konsolidierter Umsatz ca. 10,4 Mio €
- Exportanteil etwa 35%



Quelle: Krautzberger GmbH



**Intelligente Komplettbearbeitung und Versiegelung von CFK-Bauteilen  
 für die Großserie (CFKComplete)**

**Produkte der Krautzberger GmbH**



Spritzapparate

Lackieranlagen

Materialbehälter

Hubgeräte

Pumpen

Regler / Armaturen

Lüftungstechnik



Quelle: Krautzberger GmbH



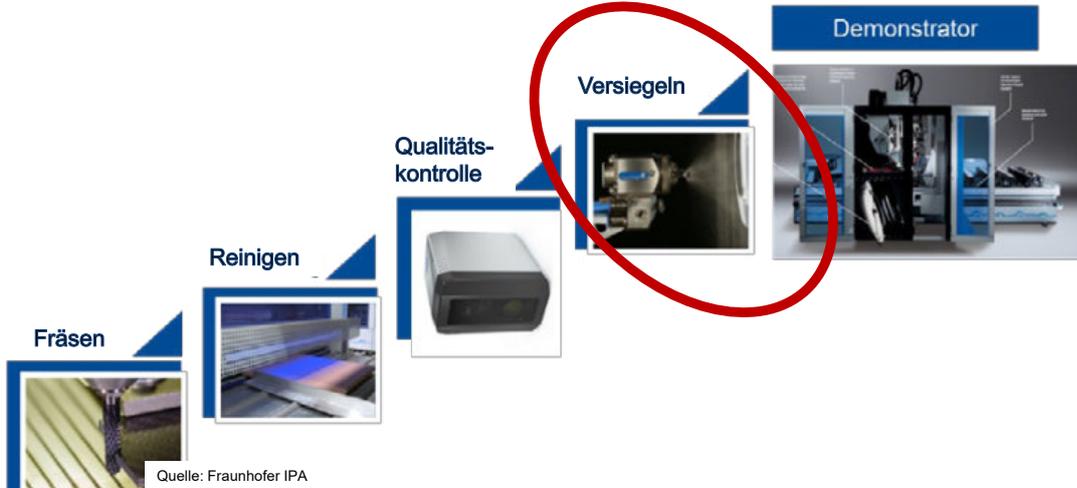
Quelle: Krautzberger GmbH



Krautzberger



**Intelligente Komplettbearbeitung und Versiegelung von CFK-Bauteilen  
 für die Großserie (CFKComplete)**



Quelle: Fraunhofer IPA



Krautzberger



**Intelligente Komplettbearbeitung und Versiegelung von CFK-Bauteilen für die Großserie (CFKComplete)**

**Zusammenfassung von Möglichkeiten der Kantenbeschichtung**

Möglichkeit der Versiegelung		Verfahren	Vorteile	Nachteile
Allgemeine Technologien	Kantenberühend	Aufrollen	Komplette Abdeckung der Kante	Kleine Radien der Kante
		Bestreichen	Auch innenliegende kanten erreichbar z.B. Bohrungen	Überbeschichten der Randbereiche
	berührungslos	Sprühen, Druckluft unterstützt	Feiner Auftrag möglich	Overspraybehaftete Beschichtung
		Sprühen, ohne Druckluft	keiner	Overspraybehaftete Beschichtung
angewandte Technologie		impulsgesteuert Dosieren	Zielgenaue Beschichtung	Zugänglichkeit in Bohrungen schwer

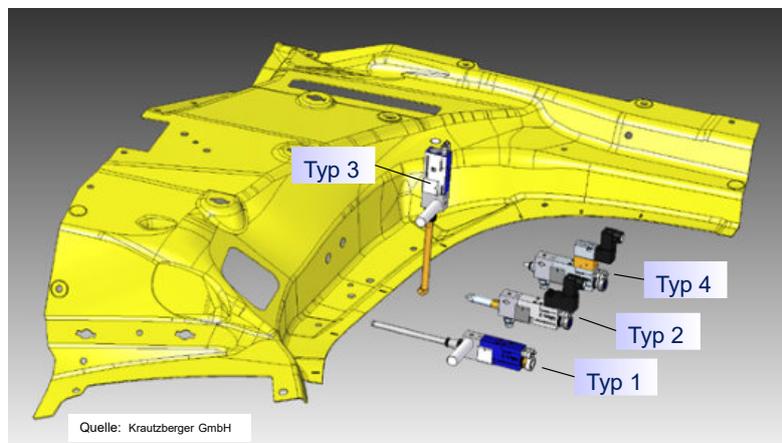
**Intelligente Komplettbearbeitung und Versiegelung von CFK-Bauteilen für die Großserie (CFKComplete)**

**Allgemeines berührungsloses Technologieverfahren**

Die rechts im Bild ersichtlichen Applikatoren zeigen Anwendungsmöglichkeiten bei druckluftunterstütztem Sprühen.

Diese pneumatisch bzw. elektromagnetisch gesteuerten Applikatoren sind für eine oversprayfreie und kurz getaktete Schaltdauer für diese Art von Kantenbeschichtung nur bedingt bis gar nicht geeignet.

- Typ 1: gerader Rundstrahl
- Typ 2: pneum. Dosiereinheit mit Wegeventil
- Typ 3: abgewinkelter Rundstrahl
- Typ 4: Feinst-Dosiereinheit mit Wegeventil



## Intelligente Komplettbearbeitung und Versiegelung von CFK-Bauteilen für die Großserie (CFKComplete)

### Aufgabenstellung

Ziel des Verbundvorhabens CFKComplete ist die Entwicklung, der Bau und die Erprobung einer innovativen, modularen und auf die speziellen Anforderungen der spanenden CFK-Bauteilbearbeitung optimierten Werkzeugmaschine. Durch die Integration der vier Prozessmodule Bearbeiten, Messen, Reinigen und Versiegeln in einer einzigen Maschine wurde eine hauptzeitparallele Komplettbearbeitung realisiert. Hinsichtlich dieser Funktionsintegration und den dadurch verbundenen Wegfall von manuellen Handhabungsschritten sollte die spanende Bearbeitung und Versiegelung von Multimaterialsystemen, hier speziell die Bauteilkante, um 50% wirtschaftlicher werden.

Ziel des Teilprojektes „Versiegelungstechnik“ ist es, neue Lackierkonzepte für komplexe Bauteile zu entwickeln, welche gezielt oversprayfrei beschichten. Somit wird eine Abdecken oder Maskierung des Randbereiches hinfällig.

Ein weiterer Aspekt der Kantenversiegelung ist die notwendige Verbesserung des Korrosionsschutzes um eine Kontaktkorrosion mit angrenzenden Metallen im Verbund der Bauteilmontage zu unterbinden.

## Intelligente Komplettbearbeitung und Versiegelung von CFK-Bauteilen für die Großserie (CFKComplete)

### Voraussetzung zum Vorhaben

Die dem Vorhaben zur Verfügung stehenden Ressourcen, für das Prozessmodul Versiegeln, wurden durch die Krautzberger GmbH im Verbundprojekt begleitet. Eingebunden waren, durch eine enge Verzahnung der Themen Applizierung und Härten,

- das Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA, Abteilung Beschichtungssystem- und Lackiertechnik in Stuttgart und
- die IST METZ GmbH aus Nürtingen als weiterer Projektpartner.

Die Krautzberger GmbH mit seinen vielfältigen Einsatzbereichen, konnte seine verfahrenstechnischen Erfahrungen in dem Projekt der Versiegelung mit einbringen. Das Fraunhofer-Institut, Beschichtungssystem- und Lackiertechnik vertrat die Applizierbarkeit und deren Analyse und IST Metz GmbH zeichnete sich verantwortlich für das nachgeschaltete Härteverfahren mittels LED-Bestrahlung.

Unter den Vorgaben der Anforderungen seitens Fa. AUDI an die Beschichtung, ist eine Anforderungsanalyse für den Prozessschritt Versiegeln erstellt worden, die die Grundlage

- für die Auswahl von geeigneten Lacken und
- der Versiegelungstechnik darstellt.

Parallel galt es die entsprechende Applikationseinrichtung zu bestimmen.

**Intelligente Komplettbearbeitung und Versiegelung von CFK-Bauteilen für die Großserie (CFKComplete)**

Vorgaben Versiegeln 1/9	Anforderungen & Eigenschaften	Soll-Werte & Soll-Test-Beständigkeiten	Prüfnorm
1. Eigenschaften Lackmaterial	Haftung	Gitterschnitt-Kennwert $\leq 1$ Steinschlag-Kennwert $\leq 2,0$	Gitterschnittprüfung gemäß DIN EN ISO 2409 Steinschlagprüfung gemäß DIN EN ISO 20567-1 jeweils nach Klimawechsel
	Klimawechseltest	keine sichtbaren Veränderungen Haftung noch gegeben	gemäß PV 1200 mit 20 Zyklen
	Kondenswasserprüfung	Feuchtigkeitsbeständigkeit keine sichtbaren Veränderungen Haftung noch gegeben	gemäß DIN EN ISO6270-2 240h

**Intelligente Komplettbearbeitung und Versiegelung von CFK-Bauteilen für die Großserie (CFKComplete)**

Vorgaben Versiegeln 2/9	Anforderungen & Eigenschaften	Soll-Werte & Soll-Test-Beständigkeiten	Prüfnorm
1. Eigenschaften Lackmaterial	Transparenz	Transparent	Sichtprüfung
	Materialeigenschaft	TG > 120°C (offline)	DSC-Prüfung
2. Eigenschaften Lackverarbeitung	Siegellack auftragen (Acrylat)	Gute Oberflächenbenetzung	Querschliff
	Nicht klebend		
	Rheologie	Geringe Elastizität, gutes Standvermögen	Rotationsviskosimeter rotierend
	Dicke der Versiegelung	120 – 150 µm	Mikroskop

**Intelligente Komplettbearbeitung und Versiegelung von CFK-Bauteilen  
für die Großserie (CFKComplete)**

Vorgaben Versiegeln 3/9	Anforderungen & Eigenschaften	Soll-Werte & Soll- Test- Beständigkeiten	Prüfnorm
2. Eigenschaften Lackverarbeitung	Vernetzungsgrad	Ausreichende Vernetzung der Kantenversiegelung (in der Tiefe und an der Oberfläche)	DSC ? (UV-DSC)
	Oberflächenhärte	Hohe Oberflächenhärte	Mikrohärte- Vergleichsmessungen zum Serienlack
3. Beständigkeit allgemein	Korrosionsbeständigkeit	Keine Lackenthaftung, - verfärbung oder Auskreidung Kontaktkorrosion verhindern	INKA

**Intelligente Komplettbearbeitung und Versiegelung von CFK-Bauteilen  
für die Großserie (CFKComplete)**

Vorgaben Versiegeln 4/9	Anforderungen & Eigenschaften	Soll-Werte & Soll- Test- Beständigkeiten	Prüfnorm
3. Beständigkeit allgemein	Kontaktkorrosion	Kontaktkorrosion z.B. CFK-Aluminium verhindern	Prüfung der Korrosionsbeständigkeit nach mechanischer Beschädigung gemäß PV 3.17.1
	Kratzbeständigkeit	V >= 1 gemäß Reflow	Waschstraßentest- Kratzfestigkeit gemäß PV 3.3.3
	UV-Beständigkeit	Frei von Rissbildung	Nach PV 1502 (Prüfdauer 1.000 h)

**Intelligente Komplettbearbeitung und Versiegelung von CFK-Bauteilen für die Großserie (CFKComplete)**

Vorgaben Versiegeln 5/9	Anforderungen & Eigenschaften	Soll-Werte & Soll-Test-Beständigkeiten	Prüfnorm
4. Beständigkeit gegen Umwelteinflüsse	Beständigkeit – Freibewitterung	Feucht-warm & trocken-heiß- Jahreszyklustest, danach Haftung immer noch gegeben Keine sichtbaren Veränderungen (Farbton, etc.)	PV 3930 (feucht-warm, Florida)/ PV 3929 (trocken-heiß, Kalahara/Arizona), Prüfdauer: 2 Jahreszyklen bzw. 3 JZ bei Karosseriebauteile
	Beständigkeit – Licht	Vergilbungsbeständigkeit	Visuelle Prüfung auf weißem Lack aufgetragen – Verfärbung?

**Intelligente Komplettbearbeitung und Versiegelung von CFK-Bauteilen für die Großserie (CFKComplete)**

Vorgaben Versiegeln 6/9	Anforderungen & Eigenschaften	Soll-Werte & Soll-Test-Beständigkeiten	Prüfnorm
5. Beständigkeit	Wärmelagerung	Keine sichtbaren Veränderungen GSK- und DST-Werte nach wie vor einhalten	Lagerung in Umluft bei 90°C für 240h, im Anschluss min. 30min akklimatisieren bei RT
	Kältelagerung	Keine sichtbaren Veränderungen	Nach der Wärmelagerung mit denselben Proben die Kältelagerung durchzuführen -40°C für 24h, im Anschluss min. 30min akklimatisieren bei RT

**Intelligente Komplettbearbeitung und Versiegelung von CFK-Bauteilen  
für die Großserie (CFKComplete)**

Vorgaben Versiegeln 7/9	Anforderungen & Eigenschaften	Soll-Werte & Soll- Test- Beständigkeiten	Prüfnorm
5. Beständigkeit	Thermische Beständigkeit	Standverhalten ohne Verformungen oder Ausgasungen	100°C für min. 2h
	Temperatur-beständigkeit des ausgehärteten Systems	max. Einsatztemperatur Angabe Hersteller keine Vergilbung	visuelle Beurteilung
	KTL-Fähigkeit	keine Risse keine Schäden am Lack Haftung noch gegeben	30 min bei 205°C
	Bäderverträglichkeit	keine Verunreinigung der Bäder	Test KTL- Bäderverträglichkeit

**Intelligente Komplettbearbeitung und Versiegelung von CFK-Bauteilen  
für die Großserie (CFKComplete)**

Vorgaben Versiegeln 8/9	Anforderungen & Eigenschaften	Soll-Werte & Soll- Test- Beständigkeiten	Prüfnorm
6. Beständigkeit Chemikalien	Chemikalienverträglichkeit	Beurteilung nach 1h bei RT - keine sichtbaren Veränderungen	Lack auf Blechsubstrat aufbringen - nach DIN EN ISO 2812-4 Prüfen Chemikalienauswahl je nach Bedarf (z.B. Dieseldieselkraftstoff, Salzsäure, Baumharz, etc.)
		Dann Beurteilung nach 2 h 60 °C Reflowlagerung - keine sichtbaren Veränderungen	
7. Qualität der Fräskante	Haptik	Vorhandene Grate dürfen nach der Lackierung nicht spürbar bleiben	
	max. Ausfransungslänge	0,2 mm nach Nacharbeit	
	max. Delamination	z + 150µm pro Oberfläche	

**Intelligente Komplettbearbeitung und Versiegelung von CFK-Bauteilen für die Großserie (CFKComplete)**

Vorgaben Versiegeln 9/9	Anforderungen & Eigenschaften	Soll-Werte & Soll-Test-Beständigkeiten	Prüfnorm
8. Qualität der Fräskante	Delamination max. Schadenstiefe	1mm	
	max. Abplatzer	bis 10 mm x 5 mm bei max. einmaligem Auftreten je 100 mm Kantenabschnitt	

Die 29 verschiedenen Anforderungen an die Versiegelung stellen einen hohen Anspruch an das Lackmaterial. Um diese Anforderungen abzudecken, wurden UV-Lacke der Firmen Berlac, Delo, Henkel und Mäder durch umfangreiche Versuche mit den Projektpartnern Fraunhofer IPA und Fa. IST Metz GmbH als Vorversuche durchgeführt. Die insgesamt 10 Materialien mit ihren unterschiedlichen Eigenschaften kamen in die Erprobung. Die vorrangigen Faktoren waren

- Aushärtung
- Verarbeitbarkeit
- Schicht-/ Oberflächeneigenschaften

**Intelligente Komplettbearbeitung und Versiegelung von CFK-Bauteilen für die Großserie (CFKComplete)**

**Ergebnisse der Lackerproben**

Lack	Applizierbarkeit (Fraunhofer IPA)	Härtungsver-suche (Fa. IST Metz)	Kantenbeschichtung (Fraunhofer IPA)
Henkel Loctite AA 5884	<ul style="list-style-type: none"> <li>Material sehr elastisch, schlechter Tropfenabriss, zeitl. lange Fäden</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>UV Aushärtung des Lacks bislang nicht gegeben</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Applikation auf Kante zufriedenstellend möglich</li> <li>Lack läuft nicht oder ausnehmend wenig von Kante ab</li> <li>Erhöhte Temperatur bringt Verbesserung bei Kantenabdeckung und Verlauf</li> </ul>
Delo Photobond FB4 175	<ul style="list-style-type: none"> <li>Einzeltröpfenerzeugung bei Raumtemperatur nicht möglich, sofortige Düsenverstopfung</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Aushärtungsversuche erfolgreich</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Nicht durchgeführt, da nicht zielführend</li> </ul>
Delo Photobond GE368 Photobond FB437	<ul style="list-style-type: none"> <li>Bei höheren Temperaturen starker Fädenzug, Verschmutzung und Verstopfen der Düse sowie Abscheuern von Düsenring</li> <li>Insgesamt nicht processierbar</li> </ul>		
Berlac BiancoF 1K/UV Porentfller 53-0011-345	<ul style="list-style-type: none"> <li>Material sehr elastisch, bei Raumtemperatur schlechter Tropfenabriss, zeitl. lange Fäden</li> <li>Höhere Temperaturen bringen Verbesserung im Vergleich niedrigeren Temperaturen</li> <li>Bildung einzelner Tropfen nicht (Raumtemperatur) bzw. u. U. nicht processierbar (erhöhte Materialtemperatur) möglich</li> <li>Sofort Tropfen erzeugt werden können, schlechte Tropfenabdeckung und wenig Energie bei Ausstritt</li> <li>Anwendbarkeit bei horizontaler Applikation fragwürdig</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Aushärtungsversuche erfolgreich</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Applikation auf Kante zufriedenstellend möglich</li> <li>Lack läuft nicht oder ausnehmend wenig von Kante ab</li> <li>Erhöhte Temperatur bringt Verbesserung bei Kantenabdeckung und Verlauf</li> </ul>

Lack	Applizierbarkeit (Fraunhofer IPA)	Härtungsver-suche (Fa. IST Metz)	Kantenbeschichtung (Fraunhofer IPA)
Delo Photobond AD471 Photobond AD494 Photobond AD465	<ul style="list-style-type: none"> <li>Materialien allgemein sehr elastisch, bei Raumtemperatur schlechter Tropfenabriss, zeitl. lange Fäden</li> <li>Höhere Temperaturen bringen Verbesserung im Vergleich niedrigeren Temperaturen</li> <li>AD465 in Hinsicht auf Verarbeitbarkeit und UV-Härtung bestes Material</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Aushärtungsversuche erfolgreich, erreichbarer Verschmutzungsgrad Material abhängig</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Applikation auf Kante zufriedenstellend möglich</li> </ul>

Am Ende der Tests wurde der Lack AD465 der Firma Delo mit den besten Ergebnissen für die Applikation im Demonstrator festgelegt.

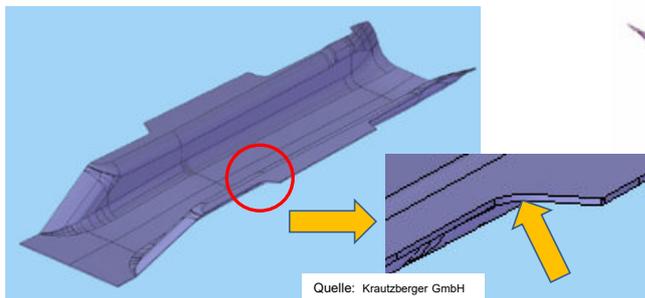
Die durchgeführten Vorversuche ergaben eine komplette Kantenabdeckung in einem Arbeitsgang. Die Standfestigkeit, d.h. kein Verlassen des Lacks von der Kante, sowie die gute UV-Aushärtung mittels LED waren gegeben.

**Intelligente Komplettbearbeitung und Versiegelung von CFK-Bauteilen für die Großserie (CFKComplete)**

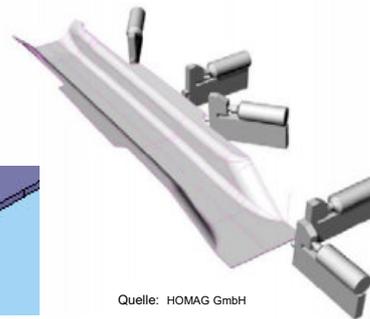
**Bahnkontur und seine Anforderungen**

Des Weiteren mussten die Anforderungen des oversprayfreien Beschichtens und die komplexe Bauform des Werkstückes für die Auswahl des Versiegelungsaggregates berücksichtigt werden.

Um die zu beschichtende Kante, mit einer gleichmäßigen Lackdicke reproduzierbar auszustatten, gab es weitere Herausforderungen. Es galt die Fahrbahn des Applikators mit einer möglichst konstanten Geschwindigkeit und unter Berücksichtigung des notwendigen Abstandes exakt durch die programmierte Bahnführung an der Kante abzufahren. Außerdem mussten die Aufspanntoleranzen des Bauteils ausgeglichen werden. Mögliche Kollisionen des Applikators galt es auszuschließen.



Quelle: Krautzberger GmbH



Quelle: HOMAG GmbH

**Intelligente Komplettbearbeitung und Versiegelung von CFK-Bauteilen für die Großserie (CFKComplete)**

Die Machbarkeitsbetrachtung der CFK-Kantenbeschichtung hat im Fortgang des Projektes gezeigt, dass die Komplexität mit prozessgesteuerten Applikationen vorrangig zu betrachten ist.

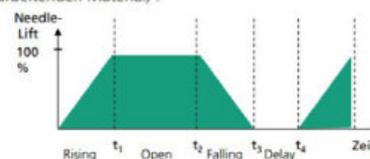
Das ausgewählte Mikrodosiersystem wurde in Absprache mit Fraunhofer IPA ausgewählt.

**VERMES MDV 3200A-HS:**

- Applikation erfolgt mittels kontaktloser Dosierung freifliegender Materialtropfen
- Zu dosierendes Material wird über eine Druckleitung zur Düse gefördert und durch Öffnen und Schließen der Düse tropfenweise ausgestoßen
- Typischer Applikationsabstand 5-10 mm
- Einstellbare Parameter (abhängig vom zu verarbeitenden Material):
  - Nadelöffnung (Needle Lift) [%]
  - Öffnende Flanke (Rising) [ms]
  - Schließende Flanke (Falling) [ms]
  - Haltezeit offen (Open) [ms]
  - Pause zwischen den Pulsen (Delay) [ms]
  - Materialdruck [bar]



MDV 3200A-HS mit Heizung



Schaltparameter

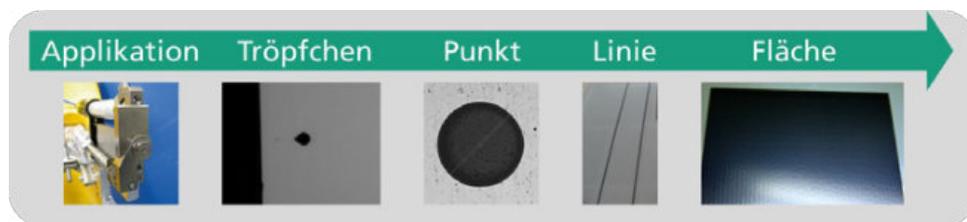
Quelle: Fraunhofer IPA

- System beheizbar
- Düsengrößen zwischen 50 µm und 700 µm

### Intelligente Komplettbearbeitung und Versiegelung von CFK-Bauteilen für die Großserie (CFKComplete)

■ **Technologieansatz: Drop on Demand (DoD)**

- Erzeugung kurzer Dosierimpulse mittels Piezoventil (~1ms)
- Zielgenaue Applikation durch einige Zentimeter frei fliegende Tröpfchen
- Verschiedenste Materialien (Dispersionen, Lösungen, auch abrasive möglich)
- Steuerbarkeit der Tröpfchengröße und -impuls durch Öffnungszeit (Pulsform), Materialdruck P, Öffnungshöhe, ...
- Erzeugung von Einzeltröpfchen, Linien oder Flächen/Geometrien möglich



Quelle: Fraunhofer IPA

### Intelligente Komplettbearbeitung und Versiegelung von CFK-Bauteilen für die Großserie (CFKComplete)

Die senkrechte Ausrichtung des Applikators zur Kante, wie auch unter einem Applikationswinkel bis zu 45°, zeigte zufriedenstellende Ergebnisse. Die finale gute Oberfläche mit ihrer geforderten Haftung konnte mit dem gewählten Versiegelungsaggregat gut appliziert werden. Die Anforderung der KTL-Tauglichkeit aus der Automobilindustrie wurde durch den gewählten Delo-Lack AD465 ebenfalls erreicht.



Quelle: Fraunhofer IPA / IST METZ GmbH



Quelle: Fraunhofer IPA / IST METZ GmbH



Quelle: Fraunhofer IPA / IST METZ GmbH

Kantenapplikation im Technikum unter verschiedenen Applikationswinkeln

**Intelligente Komplettbearbeitung und Versiegelung von CFK-Bauteilen  
 für die Großserie (CFKComplete)**

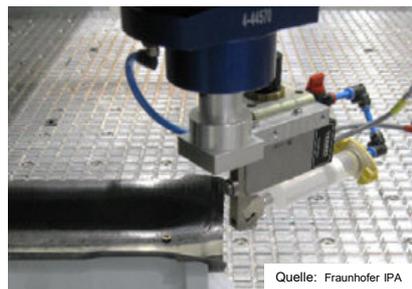
**Automatisierungslösung**

Die Adaption des Versiegelungsaggregats im Demonstrator der Homag Maschine wurde gemäß der ausgearbeiteten Konzeption umgesetzt und durch Abfahren einer geraden Kante in einem ersten Test verifiziert.



Quelle: Fraunhofer IPA

Versiegelungsaggregat



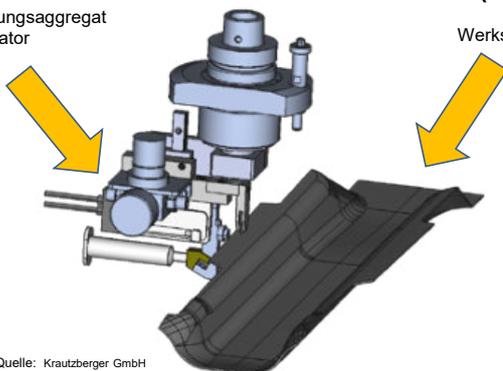
Quelle: Fraunhofer IPA

Versiegelungsaggregat im Demonstrator

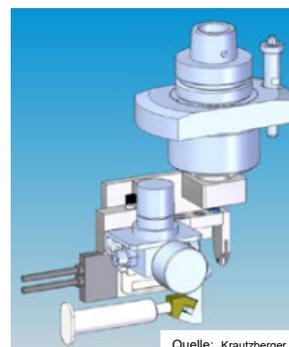
**Intelligente Komplettbearbeitung und Versiegelung von CFK-Bauteilen  
 für die Großserie (CFKComplete)**

Versiegelungsaggregat  
 mit Applikator

Werkstück



Quelle: Krautzberger GmbH

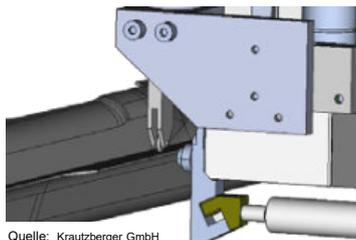


Quelle: Krautzberger GmbH

Die Strategie zur Bahnplanung wurde durch eine offline-Bahnprogrammierung festgelegt und umgesetzt. Da mit dem Controller des Versiegelungsaggregats zwischen vier verschiedenen Parametersätze umgeschaltet werden kann, werden an Hand der Bahnprogrammierung Bahnabschnitte konstanter Geschwindigkeit identifiziert und für diese die geeigneten Dosierparameter verwendet. Die Umsetzung des Signalaustausches zwischen der Maschinensteuerung und dem Controller des Versiegelungsaggregats erfolgt durch die SPS-Steuerung des Demonstrators.

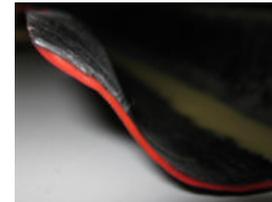
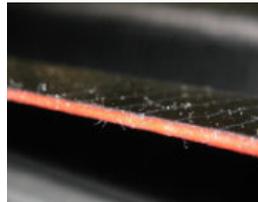
### Intelligente Komplettbearbeitung und Versiegelung von CFK-Bauteilen für die Großserie (CFKComplete)

Um die Bauteil- und Aufspanntoleranzen des Bauteils, sowie die Fixierungsverspannungen auszugleichen, wurde ein federunterstützendes Rollensystem zur zwanghaften Ausrichtung des Versiegelungsaggregates, zum zusätzlichen Verfahren im Achssystem vom Demonstrator, eingesetzt. Eine exakte Führung war somit gewährleistet. Reproduzierbare Versiegelungsergebnisse brachten daraufhin den Erfolg.



Quelle: Krautzberger GmbH

Rollensystem an der Kante



erfolgreich versiegelte Kanten



Quelle: Fraunhofer IPA

### Intelligente Komplettbearbeitung und Versiegelung von CFK-Bauteilen für die Großserie (CFKComplete)

Eine Beurteilung der versiegelten Kante unterzog sich der Reproduzierbarkeit und Qualität der Kante. Gerade die Kanten im geraden Bereich waren gut zu applizieren. Durch das federunterstützende Rollensystem konnte eine präzise Beschichtung durchgeführt werden.

#### Projektergebnis

Die Verwertbarkeit der Ergebnisse aus diesem Projekt kann gezielt der oversprayfreien Beschichtungstechnik für eine Kantenversiegelung von CFK-Produkten angewandt werden. Darüber hinaus sind andere Bereiche, wie Leichtbau (Luftfahrt, Möbelindustrie etc.), denkbar. Für die Entwicklung von automatisch agierenden Lacksystemen kann auf die gewonnenen Kenntnisse und ihre Potenziale zurückgegriffen werden.

**Intelligente Komplettbearbeitung und Versiegelung von CFK-Bauteilen  
für die Großserie (CFKComplete)**

**Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit**

Referent: Dipl. Ing. (FH) Jörg Blumrich  
Krautzberger GmbH  
Stockbornstrasse 13  
D – 65343 Eltville am Rhein

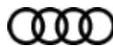
Tel. : +49 (6123) 698-233  
Fax : +49 (6123) 698-250  
[j.blumrich@krautzberger.com](mailto:j.blumrich@krautzberger.com)



<http://www.krautzberger.com>



Krautzberger



HE HOMAG



Fraunhofer

IFA



BEITRUG VOM

PTKA  
Projektträger Karlsruhe  
Kollaborierendes Institut für Technologie

29

# 6 VERNETZUNGSAGGREGAT ZUR BESCHICHTUNGS- AUSHÄRTUNG (IST METZ UND IPA)

gefördert von  
 **Bundesministerium für Bildung und Forschung**

Produktionsanlagen für Wachstumsmärkte – intelligent einfach und effizient

**CFK Complete**

---

## Kantenversiegelung CFK – Entwicklung Aushärtetechnik

10. bis 12. September 2019  
Composites Europe 2019, Messe Stuttgart

Thomas Kirschner **IST**  
IST METZ GmbH

---

**IST** **Krautzberger**  **ZEISS**  **HOMAG** **Fraunhofer IPA**  **PIKA** Projekträger Karlsruhe  
Kooperations Institute für Technologie 1

gefördert von  
 **Bundesministerium für Bildung und Forschung**

Produktionsanlagen für Wachstumsmärkte – intelligent einfach und effizient

**IST** Einordnung im Gesamtprojekt

**CFK Complete**

---

**Verbundprojekt CFKComplete:  
Intelligente Komplettbearbeitung und  
Versiegelung von CFK-Bauteilen  
für die Großserie**

**Fräsen**



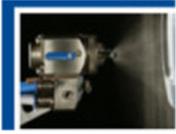
**Reinigen**



**Qualitäts-  
kontrolle**



**Versiegeln**



**Aushärtetechnik**



**Demonstrator**



Bildquellen:  
Homag Group AG 2019  
Carl Zeiss Automated Inspection GmbH 2019  
Fraunhofer IPA 2019

Bildquelle:  
IST METZ GmbH 2019

---

**IST** **Krautzberger**  **ZEISS**  **HOMAG** **Fraunhofer IPA**  **PIKA** Projekträger Karlsruhe  
Kooperations Institute für Technologie 2

Gerhard und Renate  
**METZ STIFTUNG**

---

**METZ HOLDING**

**550+**  
 Mitarbeiter weltweit



**ISTmetz**  
 A METZ HOLDING COMPANY

**1977**   **13381**   **92**  
 Gründungsjahr   verkaufte Anlagen   Exporte 2018 in %

 **IST METZ STIFTUNG**  
 ZEIT FÜR MENSCHEN

[www.zeit-fuer-menschen.de](http://www.zeit-fuer-menschen.de)

VALUE CHAIN  
 NETWORK



SALES & SERVICES  
 NETWORK



Bildquellen:  
 IST METZ GmbH 2019



[Link zur IST-Homepage](#)



Bildquellen:  
 IST METZ GmbH 2019

[Link zum YouTube-Video](#)



[Link zu IST-Produkten](#)



**Grafische Industrie**

- Offset-Druck
- Tiefdruck
- Flexo-Druck
- Siebdruck
- Tampon-Druck
- Inkjet-Druck
- Buchdruck



**Converting**

- Silikonisierung
- Klebvernetzung
- Oberflächenbeschichtung
- Oberflächenmodifikation



**Automobil- und industrielle Anwendungen**

- Pulver- und Lackhärtung auf 2D- u. 3D-Teilen
- Lackhärtung auf Automobil-Bauteilen
- Elektronikindustrie , z.B. Displays
- Kleber, Schutzlacke und Vergussmassen
- Reinigungsprozesse
- Oberflächenaktivierung



Bildquellen: IST METZ GmbH 2019

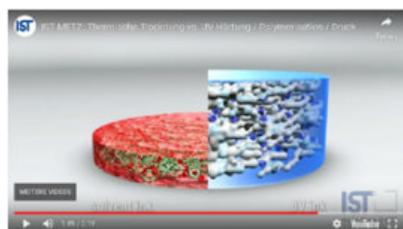


Bildquellen: IST METZ GmbH 2019

**Allgemeine Vorteile der UV-Technologie:**

- Prozesszeiteinsparung durch sofortige Aushärtung
- Hohe Lackauftragsstärken möglich
- Robustheit gegen mechanische und chemische Belastungen
- Keine Schrumpfung während der Aushärtung
- Lange Bereitschaftszeit
- Umweltfreundliche Technologie – lösemittelfrei

**Thermische Trocknung vs. UV-Vernetzung**



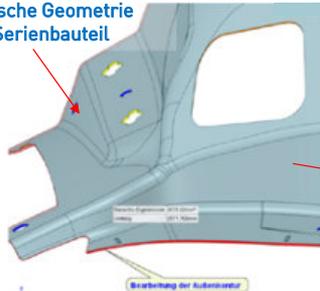
[Link zum YouTube-Video](#)

**Zusätzliche Vorteile von LED-UV:**

- Niedrigere Temperaturbelastung der Bauteile
- Designfreiheit (z.B. Fokussierung)
- Bessere Anpassbarkeit an Materialeigenschaften (z.B. Wellenlängen)
- Besser geeignet für bewegte Systeme (kompakte Abmessungen, einfache Kühlung)
- Niedrigerer Energieverbrauch
- Quecksilberfrei

**Kantenbeschichtung von CFK-Bauteilen**

Typische Geometrie für Serienbauteil



Bildquellen:  
 Audi AG 2019  
 Homag Group AG 2019



Referenzbauteilgeometrie für Versuche



Bildquelle: heise online 2019

**Workshop – Fragenkatalog Kantenversiegelung**

**Anforderungen an die Aushärtetechnik**

23.03.2016, Sitzung mit Fraunhofer IFA, IST METZ Solter und Krautberger  
 Fraunhofer IFA, IST METZ Solter und Krautberger

Fragekategorie	Fragestellung	Beantwortung	Beantwortung	Beantwortung	Beantwortung
CFK-Material	Materialauswahl	Welche Materialauswahl?	Welche Materialauswahl?	Welche Materialauswahl?	Welche Materialauswahl?
	Verarbeitung	Welche Verarbeitung?	Welche Verarbeitung?	Welche Verarbeitung?	Welche Verarbeitung?
	Geometrie	Welche Geometrie?	Welche Geometrie?	Welche Geometrie?	Welche Geometrie?
	Maßnahmen	Welche Maßnahmen?	Welche Maßnahmen?	Welche Maßnahmen?	Welche Maßnahmen?
Aufgaben	Maßnahmen	Welche Maßnahmen?	Welche Maßnahmen?	Welche Maßnahmen?	Welche Maßnahmen?
	Optik und Messung	Welche Optik und Messung?			
	Maßnahmen	Welche Maßnahmen?	Welche Maßnahmen?	Welche Maßnahmen?	Welche Maßnahmen?
	Maßnahmen	Welche Maßnahmen?	Welche Maßnahmen?	Welche Maßnahmen?	Welche Maßnahmen?

Bildquelle:  
 IST METZ GmbH 2019

- 1. Bauteilparameter:**
  - Erreichbarkeit der Bauteilkante (z.B. minimale Radien)
  - Geometrie (z.B. 3D / gebogen)
  - Abmessungen (z.B. Ausschnitte, Maßtoleranzen)
- 2. Lackparameter:**
  - optische Leistung bzw. Peak und Dosis
  - spektrale Empfindlichkeit bzw. Wellenlänge(n)
- 3. Maschinenparameter:**
  - Flexibilität (z.B. Anzahl Achsen)
  - Störkonturen
  - Bahn- und Aufspanntoleranzen
  - Schnittstellen

**Anforderungsspezifikation an Versiegelungsmaterial**

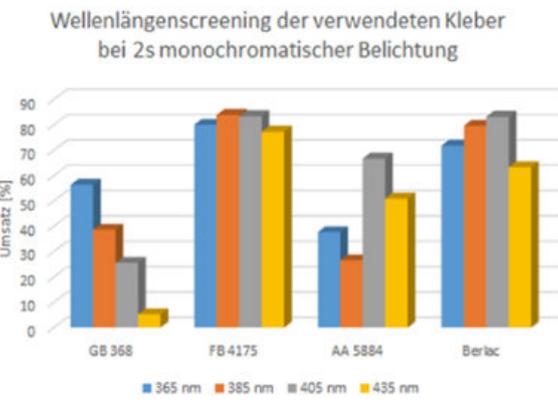
Lackprüfungen auf flächigen Substraten erforderlich  
 Kantensprüfung bei einzelnen Tests wie INKA, Kondenswasserprüfung, Klimawechsel zusätzlich erforderlich

Themen	auftraggeber & Eigenschaften	Substrat & Test-Methoden/Verfahren	Prüfkriterium	Durchführung	Ist-Zustand	
					Stärke / Beschaffenheit	Art / Zustand
Eigenschaften Lackmaterial	Eigenschaften	Substrat	Prüfkriterium	Durchführung	Stärke	Stärke
					Art	Art
					Stärke	Art
Eigenschaften Lackverwendung	Eigenschaften	Substrat	Prüfkriterium	Durchführung	Stärke	Art
					Art	Art
					Stärke	Art

Themen	antraggeber & Eigenschaften	Substrat & Test-Methoden/Verfahren	Prüfkriterium	Durchführung	Ist-Zustand
Eigenschaften Lackmaterial	Eigenschaften	Substrat	Prüfkriterium	Durchführung	Stärke
					Art
					Stärke
Eigenschaften Lackverwendung	Eigenschaften	Substrat	Prüfkriterium	Durchführung	Stärke
					Art
					Stärke

Bildquellen:  
 IST METZ GmbH 2019

**Versiegelungsmaterial – erstes Screening**



Bildquelle: IST METZ GmbH 2019



Bildquelle:  
 IST METZ GmbH 2019

**IST-SpotCure  
 mit LWL**



**Messgerät für den  
 Vernetzungsgrad**

Bildquelle:  
 Bruker Corporation 2019

Labortests, Probenherstellung und -tests

CFK-Complete - Labortests, Probenherstellung	Lackmaterial	Probe	Ergebnis
<b>Beschichtung</b> Kafel ca. 100 g/m <sup>2</sup> Vorbeschichtung, anschließend Oberseite mit Coatinglagen und Festigung mit H-Ingeln	Barco, Easycure DELTA 42479	3-7 8-16	OK OK
<b>Vernetzung</b> UV-LED 365nm, ca. 400m	Barco, Easycure DELTA 42479	1-20	siehe F 100-40 ausgabe
<b>Sichtprüfung</b> Verfärbung, Vortiefen	Barco, Easycure DELTA 42479	3-7 8-14	keine Verfärbung, Beschichtungsrand, guter Verlauf keine Verfärbung, guter Verlauf, sichtbarer Verlauf, Rillen vom Rand
	DELTA 42447	23	keine Verfärbung, gut verträgliches Material, jedoch durch die UV-Bestrahlung nicht angedockt
	Markal "max"	10-21	keine Verfärbung, guter Verlauf, sichtbarer Verlauf, Rillen vom Rand
<b>Oberfläche</b> Festigkeit	Barco, Easycure DELTA 42479	1	starke Fälligkeit, leicht nach, aber gute Durchdringung
	DELTA 42447	8	schlechte, aber gute Durchdringung
	DELTA 42440	24	schlechte Befestigung, aber gute Durchdringung
	Markal "max"	15	schlechte an Oberfläche, schlechte Durchdringung, sehr schlecht
<b>Haftung</b> qualitative Haftungs-test AEE: Differenztest hier leider nur begrenzt aussagefähig	Barco, Easycure DELTA 42479	1	100% maximal anhaftendes 30mm schicht, 10g gewicht
	DELTA 42447	8	100% anhaftendes 30mm schicht, 10g gewicht
	DELTA 42440	26	100% maximal anhaftendes 30mm schicht, 10g gewicht Veränderung mit 10mg und 20mg, 10g
	Markal "max"	16	100% maximal anhaftendes 30mm schicht, 10g gewicht 100% anhaftendes 30mm schicht, 10g gewicht
<b>Vernetzungsgrad</b> FTIR - Bänder Alpha	Barco, Easycure DELTA 42479	2	Überseite 21,3%, Unterseite 28,6%
	DELTA 42440	9	66,1% Überseite
	DELTA 42447	14	65,5% Überseite
	Markal "max"	14	64,8% Überseite

Bildquelle: IST METZ GmbH 2019



Bildquelle:  
 IST METZ GmbH 2019

IST-Laboranlage  
 für flächige  
 Probenbestrahlung

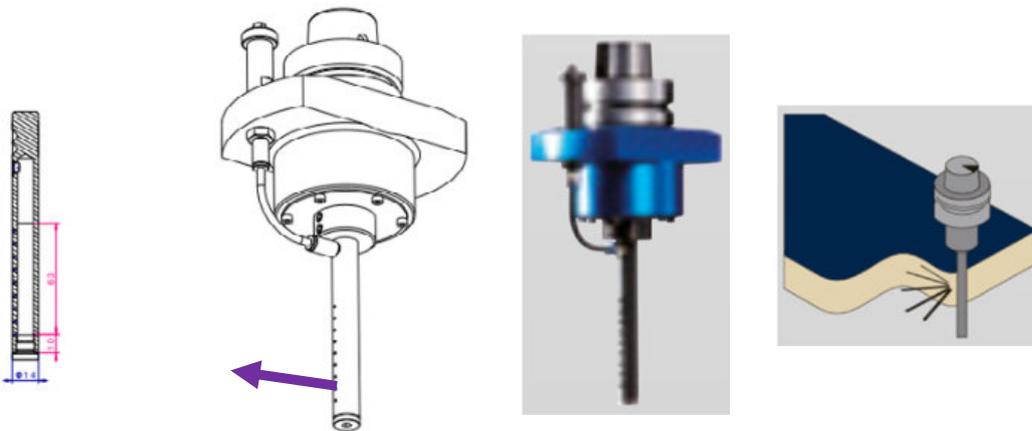
z.B. Gitterschnitttest



Bildquellen: Kern GmbH 2019

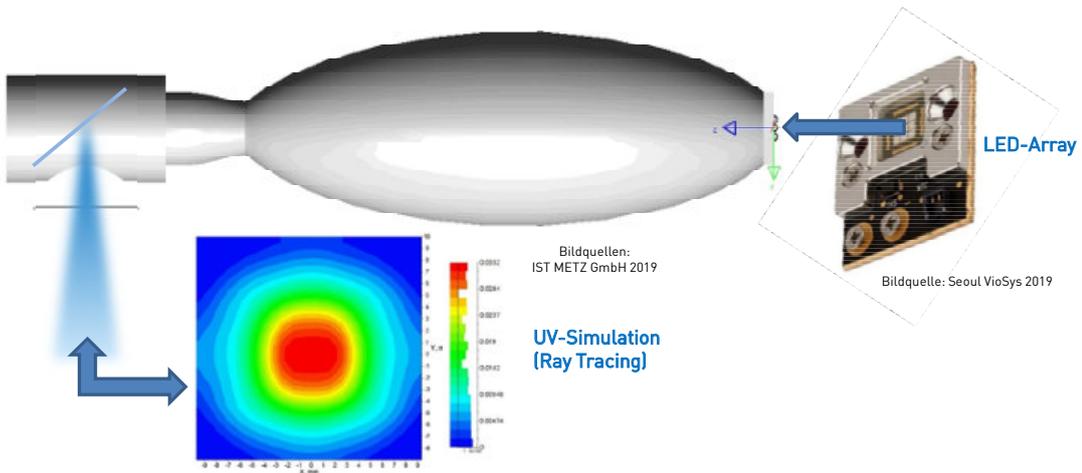
Konzept für UV-Aushärteaggregat

Geometrie ähnlich HOMAG-„Abblasdüse“ und Nutzung desselben Maschinenadapters / Aggregateträgers

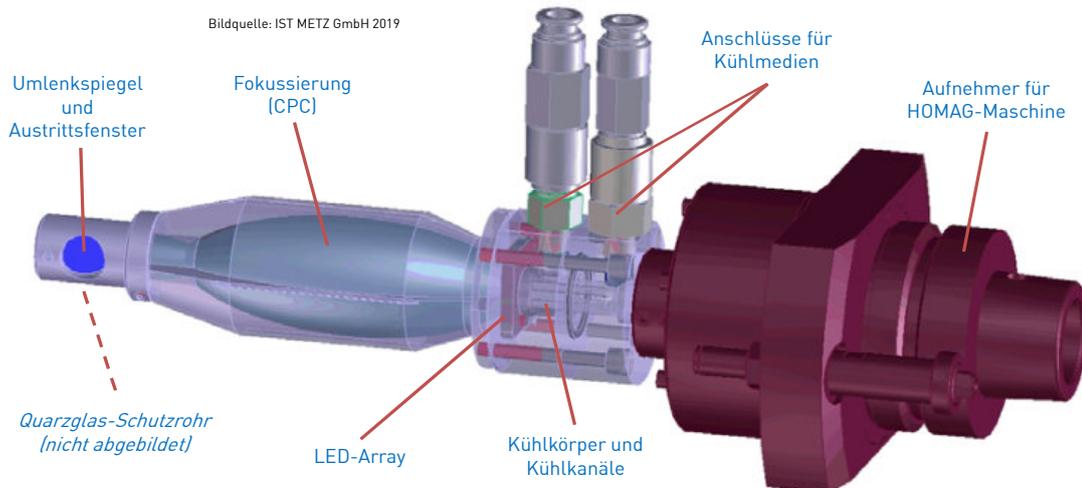


Bildquelle: Homag Group AG 2019

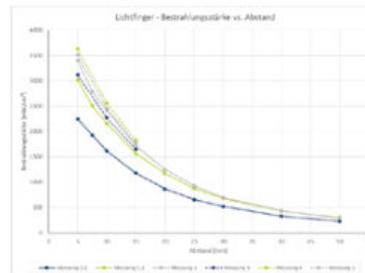
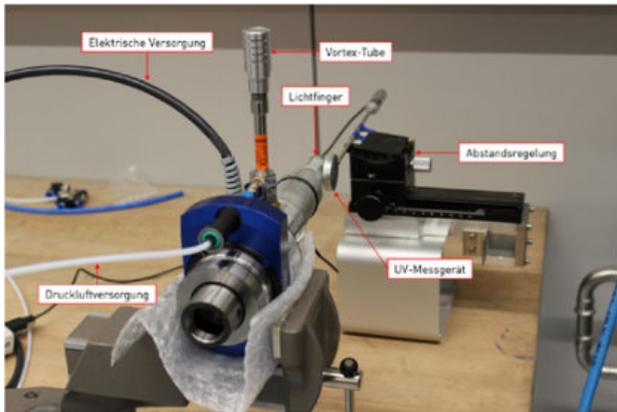
**Konzept für UV-Aushärteaggregat**  
 CPC = Compound Parabolic Concentrator (= „Zusammengesetzter Parabolischer Konzentrator“)



**Aufbau und Funktion Aushärteaggregat**

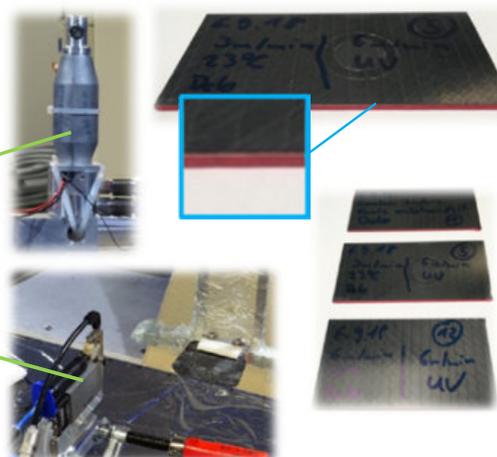
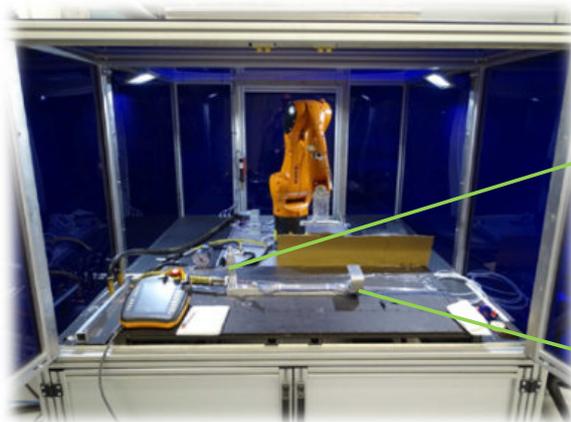


Laborvermessung Prototyp Aushärteaggregat („Lichtfinger“)  
 mit unterschiedlichen Kombinationen von Reflektorbeschichtungen



Bildquellen: IST METZ GmbH 2019

Testbeschichtungen in Roboterzelle  
 Inkjet-Applikator und Aushärteaggregat in stationärem Betrieb, Proben mittels Roboter bewegt

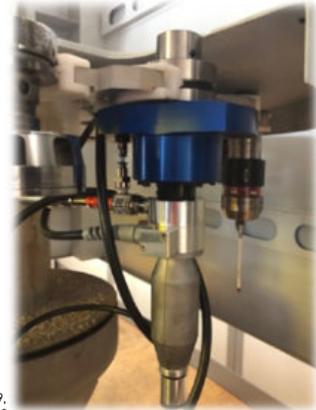


Bildquellen: IST METZ GmbH 2019

Aushärteaggregat – Maschinenintegration



Bildquelle: Homag Group AG 2019



Bildquellen:  
 Fraunhofer IPA 2019,  
 IST METZ GmbH 2019

Aushärtungsaggregat im Werkzeugwechsler

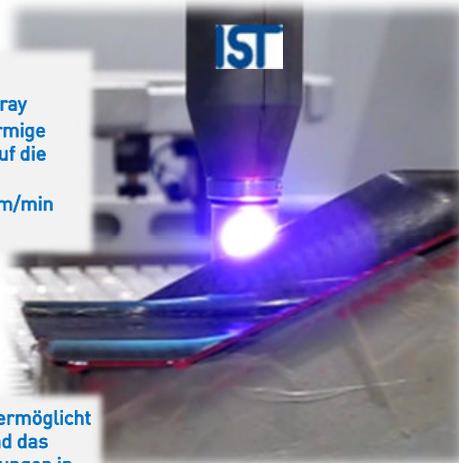
Aushärteaggregat – Zusammenfassung



UV-Aggregat:

- Strahlungsquelle: LED-Array
- Reflektorsystem: Punktförmige Strahlungsfokussierung auf die CFK-Bauteilkante
- Arbeitsgeschwindigkeit: 6m/min
- Arbeitsabstand: 5mm

Bildquellen:  
 Homag Group AG 2019,  
 IST METZ GmbH 2019,  
 Fraunhofer IPA 2019



Die universelle, kompakte Bauform ermöglicht das Abfahren kleiner Innenradien und das Eintauchen in kleine Bauteilaussparungen in dreidimensional beweglichen Systemen.

### Aushärtetechnik – Projektergebnisse (1 / 2):

- **Allgemein: hervorragende Zusammenarbeit aller Projektpartner und optimale Betreuung durch den Projektträger PTKA**
- **Auswahl Versiegelungsmaterial:**
  - ☑ favorisiertes DELO Dualbond AD465 ist mit LEDs bei 385nm gut vernetzbar
  - ☑ als mechanischer Kantenschutz für CFK-Bauteile grundsätzlich geeignet, erfüllt KTL-Anforderungen
  - ☒ Optimierungspotenzial Versiegelungsmaterial:
    - ☒ Haftung auf CFK-Kante verbessern, geeignetes Testverfahren entwickeln
    - ☒ allgemein: Versiegelungsmaterial muss stets material- und anwendungsspezifisch angepasst werden
- **Konzept, Simulationen, Konstruktion:**
  - ☑ weitgehende Übereinstimmung der Simulations- mit den Messergebnissen
  - ☒ Optimierungspotenzial Technik:
    - ☒ Integration (Kombination) von Applikations- und Aushärteaggregat → Zeitersparnis
    - ☒ Aushärteaggregat: Bauform / Abmessungen, Wellenlänge(n) → Flexibilität, Performance

### Aushärtetechnik – Projektergebnisse (2 / 2):

- **Tests in IST-eigener Roboterzelle:**
  - ☑ Lackapplikation: genaue Bahnführung ermöglicht einfachere Handhabung des Inkjet-Applikators
  - ☑ UV-Vernetzung: gute Durchhärtung bei max. Geschwindigkeit 6m/min
- **Dauertest IST-interner Prototyp:**
  - ☑ keine messbare Alterung der LEDs innerhalb > 5.000 Stunden Dauerbetrieb
  - ☑ keine messbare Verschlechterung der Reflektoreigenschaften
- **Integration in HOMAG-Versuchsmaschine:**
  - ☑ Bahnsteuerung erfolgt analog zum Lackapplikator
  - ☑ elektrische Versorgung, Kühlung, Steuerung, Überwachung wurden erfolgreich in die Maschinensteuerung implementiert
- **Erprobung auf HOMAG-Versuchsmaschine:**
  - ☑ UV-Vernetzung der Kantenbeschichtung funktioniert entsprechend den Anforderungen
  - ☑ Ergebnisse in der Versuchsmaschine entsprechen den IST-internen Tests

## Aushärtetechnik – Ausblick / mögliche Folgeprojekte:

- ☒ Vermarktung und Anwendungsentwicklung:
  - ☒ CFK-Kantenversiegelung im Automotive-Bereich weiter verfolgen
  - ☒ CFK-Kantenversiegelung auf andere Anwendungsbereiche z.B. Aerospace übertragen
  - ☒ auf andere Materialien z.B. GFK-, Holz-, Kunststoff-, Sandwich-Bauteile ausweiten
- ☒ Technische Weiterentwicklung:
  - ☒ Anpassungen an unterschiedliche Anforderungen z.B. Bauteilgeometrien, Bauteilwerkstoffe, Versiegelungsmaterialien
  - ☒ Integration (Kombination) von Applikations- und Aushärteaggregat
  - ☒ Leistungserhöhung, Baugrößenreduzierung, Wellenlängen-Mix, Variantenentwicklung

# Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!

Thomas Kirschner  
Leiter Komponentenentwicklung  
[thomas.kirschner@ist-uv.com](mailto:thomas.kirschner@ist-uv.com)  
+49 7022 6002 925

IST METZ GmbH  
Lauterstraße 14 – 18  
D-72622 Nürtingen  
<https://www.ist-uv.de/de/>

## PROJEKTPARTNER UND ANSPRECHPARTNER



**HOMAG GmbH**  
72296 Schopfloch  
[www.homag.com](http://www.homag.com)  
Martin Gringel  
Senior Manager  
[Martin.Gringel@homag.de](mailto:Martin.Gringel@homag.de)



**AUDI AG**  
85057 Ingolstadt  
[www.audi.de](http://www.audi.de)  
Thomas Heußer  
Leiter Technologieentwicklung Werkstoffe/Vefahren  
[thomas.heusser@audi.de](mailto:thomas.heusser@audi.de)



**Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik  
und Automatisierung IPA**  
70569 Stuttgart  
[www.ipa.fraunhofer.de](http://www.ipa.fraunhofer.de)  
Dr. Marco Schneider  
Bereichsleiter Fertigungs- und Prozesstechnik  
Abteilungsleiter Leichtbautechnologien  
[marco.schneider@ipa.fraunhofer.de](mailto:marco.schneider@ipa.fraunhofer.de)



**Carl Zeiss Automated Inspection GmbH**

74613 Öhringen

[www.zeiss.de](http://www.zeiss.de)

Andreas Wawak

Softwareingenieur, ZEISS Industrial Quality Solutions

[Andreas.Wawak@zeiss.com](mailto:Andreas.Wawak@zeiss.com)



**Krautzberger GmbH**

65343 Eltville am Rhein

[www.krautzberger.com](http://www.krautzberger.com)

Jörg Blumrich

Leiter Konstruktion/Entwicklung

[j.blumrich@krautzberger.com](mailto:j.blumrich@krautzberger.com)



**IST METZ GmbH**

72622 Nürtingen

[www.ist-uv.de/de/](http://www.ist-uv.de/de/)

Thomas Kirschner

Leiter Komponentenentwicklung

[Thomas.Kirschner@ist-uv.com](mailto:Thomas.Kirschner@ist-uv.com)

# IMPRESSUM, BILDRECHTE

## IMPRESSUM

### Herausgeber

Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Dr. h.c. Dr. h.c. Fritz Klocke  
Univ. Prof. Dr.-Ing. Thomas Bauernhansl

Fraunhofer-Institut für  
Produktionstechnik und Automatisierung IPA  
Nobelstraße 12  
70569 Stuttgart  
Deutschland

**Erscheinungsjahr** 2019

## BILDER

Die Bildrechte aller Bilder, die in den Abschlusspräsentationen verwendet wurden, liegen bei den jeweiligen Unternehmen.

Die Bildrechte für verwendete Logos liegen ebenfalls beim jeweiligen Unternehmen.

Das Bildrecht für das Titelbild liegt bei Fraunhofer IPA.

Eine Weiterverwendung ohne vorherigen Genehmigung ist nicht erlaubt.

### Ansprechpartner

Dr. Marco Schneider  
Bereichsleiter Fertigungs- und Prozesstechnik  
Abteilungsleiter Leichtbautechnologien  
Fraunhofer-Institut für  
Produktionstechnik und Automatisierung IPA  
Nobelstraße 12  
Telefon +49 711 970-1535  
marco.schneider@ipa.fraunhofer.de

### Referenten/Autoren

Dipl.-Ing. Martin Gringel, Homag GmbH  
I/PG-T5 Thomas Heußer, Audi AG Stuttgart  
Philipp Esch, Fraunhofer IPA  
Andreas Wawak, Carl Zeiss Automated Inspection GmbH  
Andreas Frommknecht, Fraunhofer IPA (Mitautor  
Abschlussbericht Carl Zeiss Automated Inspection GmbH)  
Dipl. Ing. (FH) Jörg Blumrich, Krautzberger GmbH  
Thomas Kirschner, IST Metz GmbH

