Kostenoptimierte Prozessketten für duromere Class-A CFK Sichtbauteile in Großserienprozessen

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades

Dr.-Ing.

eingereicht an der

Mathematisch-Naturwissenschaftlich-Technischen Fakultät

der Universität Augsburg

von

Dominik Maria Christian Metzger

Augsburg, Dezember 2021

Universität
Augsburg
University

Erstgutachter: Prof. Dr. Siegfried R. Horn

Zweitgutachter: Prof. Dr. Markus Sause

Tag der mündlichen Prüfung: 21.02.2022

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungen III

1. Thematische Einführung und Motivation 1

2. Stand der Anwendungen 3

2.1. Herstellverfahren für Class-A CFK Bauteile und Herstellkostenverteilung im Nasspressverfahren 3

2.2. Oberflächenveredelung im Fahrzeugexterieur 8

2.3. Oberflächenanforderungen im Fahrzeugexterieur 9

2.3.1. Optische Wahrnehmung von Oberflächen 9

2.3.2. Begriffsherkunft „Class-A“ und Ableitung einer Definition 13

2.4. Oberflächencharakteristika von Class-A Faserverbundbauteilen 15

2.5. Primäre und Sekundäre Faserdurchzeichnungen (PPT und SPT) 18

2.6. Methoden der Oberflächenbewertung von Faserdurchzeichnungen 23

2.6.1. Bewertung der Faserdurchzeichnung mit Methoden für lackierte Fahrzeugoberflächen 24

2.6.2. Bewertung der Faserdurchzeichnung mit Methoden der Oberflächentopografiemessung 27

2.6.3. Physikalische Kennwerte für die Quantifizierung der Faserdurchzeichnung 30

2.7. Fazit 40

3. Zielsetzung und Vorgehensweise 43

4. Theoretische Betrachtung der Einflussgrößen auf die Oberflächenglätte von Class-A CFK Bauteilen im Nasspressprozess 45

4.1. Einfluss der textilen Halbzeuge auf die Oberflächenglätte 47

4.2. Einfluss des Harzsystems und der Prozessparameter auf die Oberflächenglätte 55

4.3. Optimierung der Oberflächenglätte durch Beschichtungen 59

4.4. Methoden zur numerischen Vorhersage der Oberflächentopografie 64

5. Methodik 66

5.1. Betrachtete Prozesskette und Versuchswerkzeug 66

5.2. Methode zur prozesskettenbegleitenden Quantifizierung der Oberflächentopografie von Class-A CFK 69
5.2.1. Quantifizierung der primären und sekundären Faserdurchzeichnung textiler Halbzeuge mittels Lasertriangulation 71
5.2.2. Quantifizierung primärer Faserdurchzeichnungen entlang der Prozesskette mit Hilfe eines Weißlicht Profilometers (WLP) 77
5.2.3. PPT-Grenzwerte für Class-A-fähige Halbzeuge und Bauteile 83
5.3. FE-Modell eines repräsentativen Class-A CFK-Dachausschnitts 85
6. Steigerung der Produktivität (Output) von Class-A CFK Bauteilen 87
6.1. Motivation und Versuchsaufbau 87
6.2. Numerische Betrachtung Öffnungsfaktor zu PPT-Ausprägung 90
6.3. Einfluss Öffnungsfaktor auf Oberflächenwelligkeit im Textil 93
6.4. Einfluss Öffnungsfaktor auf PPT-Ausprägung im CFK-Bauteil 97
6.5. Ausgleich des PPT-Effekts durch kalthärtende Beschichtungen 110
6.6. Fazit 119
7. Prozesskettenverkürzung durch trennmittelfreie Bauteile 123
7.1. Motivation Entfall der Lack- und Klebevorbehandlung 123
7.2. Prozessintegrierter Einsatz von Trennfolien in Nasspress Werkzeugen 125
7.3. Prüfung der direkten Überlackierbarkeit und Absicherung der Klebfestigkeit 129
7.3.1. Prüfung der direkten Lackierbarkeit 129
7.3.2. Prüfung der direkten Verklebbarkeit 132
7.4. Wirtschaftlichkeitsbetrachtung 141
7.5. Fazit 145
8. Schlussfolgerungen 148
9. Zusammenfassung und Ausblick 158
Literaturverzeichnis 160
Abbildungs- und Tabellenverzeichnis 170
Danksagung 177

Abkürzungen

3k	Roving bestehend aus 3.000 Filamenten
12k	Roving bestehend aus 12.000 Filamenten
50k	Roving bestehend aus 50.000 Filamenten
Abb.	Abbildung
BMW	Bayerische Motorenwerke
CF	Carbonfaser
CFK	Carbonfaserverstärkter Kunststoff
CO2	Kohlenstoffdioxid
CTE	Coefficient of thermal expansion (thermischer Ausdehnungskoeffizient α_T)
DIN	Deutsche Industrie Norm
DOI	Distinctness of Image
Einh.	Einheiten, hier Stückzahl
EN	Europäische Norm
FEM	Finite Elemente Methode
F-Operator	Entfernt Formanteile von der Primärfläche (DIN EN ISO 25178-2)
FPT	Fiber Print-Through (Faserdurchzeichnung)
FVG	Faservolumengehalt
FVK	Faserverbundkunststoff
IMC	In-mold Coating
Intens.	Intensität
ISO	Internationale Organisation für Normung
Kap.	Kapitel
LCM	Liquid Compression Molding (auch NP/WCM)
L-Filter	DIN EN ISO 25178-2 Oberflächenfilter, entfernt Anteile größer Skala
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NP	Nasspressverfahren oder Nasspressprozess (auch LCM/WCM)
OEM	Original Equipment Manufacturer
P0-P2	Primärfläche 0-2 (BMW interne Kategorisierung)
PPT	Primary Print-Through (Primäre Faserdurchzeichnung der Sichtlage)
Q_{Tex}	Textilhomogenität
RTM	Resin Transfer Molding
S1-2	Sekundärfläche 1-2 (BMW interne Kategorisierung)
S-Filter	DIN EN ISO 25178-2 Oberflächenfilter, entfernt Anteile kleiner Skala
SPT	Secondary Print-Through (Sekundäre Faserdurchzeichnung innerer Lagen)
Tab.	Tabelle

T_{cure}	Aushärtetemperatur
T_g	Glasübergangstemperatur
T_{Wz}	Werkzeugtemperatur
UV	Ultraviolet
VARI	Vacuum Assisted Resin Infusion
VDA	Verband der Deutschen Automobilindustrie
WCM	Wet Compression Molding (auch NP/LCM)
α_T	Thermischer Ausdehnungskoeffizient (auch CTE)
α	Aushärtegrad
λ	Wellenlänge
λc	Profilfilter Übergang Rauheit zu Welligkeit (DIN EN ISO 4287)
λf	Profilfilter Übergang Rauheit zu kürzeren λ (DIN EN ISO 4287)
λs	Profilfilter Übergang Welligkeit zu Formabweichung (DIN EN ISO 4287)

1. Thematische Einführung und Motivation

„Der Leichtbau wird neben alternativen Antrieben und Kraftstoffen, der Antriebstechnik und der Informations- und Kommunikationstechnologie als ein maßgeblicher Technologiebaustein zur mittelfristigen Reduzierung der CO2-Emissionen angesehen. Dem Leichtbau im Fahrzeugbau wird bis zum Jahr 2030 ein CO2-Einsparpotenzial von bis zu 14% eingeräumt. Das entspricht in etwa dem Potenzial der Antriebstechnik.“ [1]

Faserverbundkunststoffe (FVK) wie Carbonfaserverstärkte Kunststoffe (CFK) haben aufgrund ihrer guten mechanischen Eigenschaften bei gleichzeitig niedriger Dichte ein enormes Leichtbaupotential. Durch eine lastgerechte Auslegung kann im Vergleich zu Aluminium bei nahezu gleichen mechanischen Eigenschaften eine Gewichtsreduktion von 30%, im Vergleich zu konventionellen Stählen sogar von 50% erreicht werden. [2]

Trotz dieses hohen Leichtbaupotentials war der Einsatz von endlosfaserverstärkten CFK-Bauteilen aufgrund der hohen Material- und Prozesskosten bisher hauptsächlich der Luft- und Raumfahrt und einigen automobilen Kleinstserien wie Super-Sportwagen vorbehalten. Dabei wecken vor allem CFK-Applikationen, bei denen das eingebettete Carbonfasertextil sichtbar bleibt (sogenanntes Sichtcarbon) bei potenziellen Kunden Begehrlichkeiten und bieten für Automobilhersteller die Möglichkeit der Differenzierung. Dies ist gerade im Premium Segment ein Anreiz, die Wirtschaftlichkeit der Herstellprozesse von Sichtcarbonbauteilen kontinuierlich zu verbessern und so die steigende Nachfrage befriedigen zu können.

Die Abb. 1 zeigt den Einsatz von CFK-Bauteilen am Beispiel der BMW Group von 1999 bis heute.

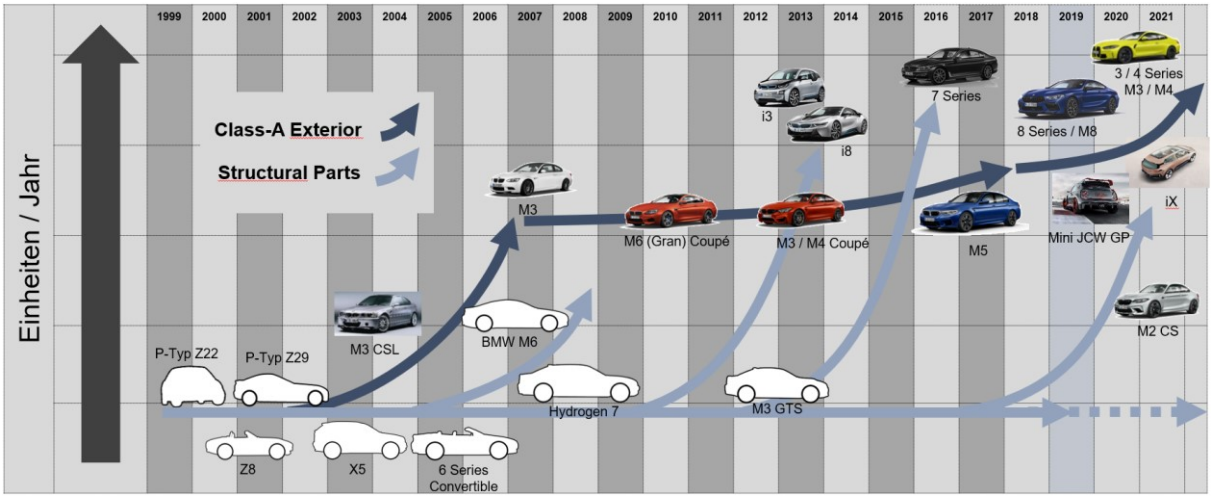


Abb. 1 Einsatz von CFK in der Struktur und als Class-A Bauteile am Beispiel der BMW Group. Sowohl Struktur- als auch Sichtbauteile wurden über die Zeit zunächst nur in Prototypen über Sondermodelle bis hin zu Großserienfahrzeugen eingesetzt. Mit dem 8er G15 bietet BMW seit 2018 ein Class-A Sichtcarbondach für ein nicht M-Fahrzeug an. [3]

Aufgrund der Weiterentwicklung der Herstellprozesse für duromere CFK-Strukturbauteile des BMW i3 und BMW 7ers, ist auch eine kontinuierliche Steigerung der Stückzahlen von Class-A CFK Bauteilen zu verzeichnen. Während für Strukturbauteile im RTM- und Nasspressverfahren Stückzahlen von bis zu 64.300 Einheiten im Jahr (BMW 7er) möglich sind, sind aufgrund der hohen Oberflächenanforderungen für Class-A CFK Bauteile, wie CFK-Dächer, mit den gleichen Grundprozessen maximal 20.000 Einheiten im Jahr (BMW 8er, BMW M8) erreichbar [4, 5]. Der geringere Output entsteht durch längere Zykluszeiten und einen nachträglichen Lackprozess, um die Oberflächenanforderungen für Class-A Bauteile zu erfüllen. Ein Hauptgrund für diesen Mehraufwand sind sog. Faserdurchzeichnungen (engl. Fiber Print-Through, kurz FPT). Diese äußern sich in Gestaltabweichungen an der Oberfläche von Faserverbundkunststoffen im Muster der eingebetteten Textilstruktur und stören das optische Erscheinungsbild bedeutend. Optisch verstärkt wird dieser Effekt vor allem, wenn ein flächiges Faserverbundbauteil angrenzend an monolithische, lackierte Blechbauteile oder nicht faserverstärkte Kunststoffbauteile montiert wird. [3, 6] Um das Leichtbaupotential von CFK-Sichtbauteilen auch bei höheren Stückzahlen voll ausschöpfen zu können, müssen also die Einschränkungen durch die hohen Anforderungen an Class-A Karosseriebauteile technisch überwunden werden.

Die Hauptmotivation dieser Arbeit liegt daher in der Analyse und Optimierung der Stellhebel der Material- und Prozessparameter von Class-A CFK Bauteilen, um die Produktivität (Output) bei gleichzeitigem Erfüllen der Oberflächenanforderungen zu erhöhen. Das Ziel ist dabei, eine kostenoptimierte Abstimmung der eingesetzten Halbzeuge, des Prozessaufwands und der resultierenden Oberflächenqualität zu erarbeiten. Dabei wird die Prozesskette für Class-A Sichtcarbonbauteile als Ganzes betrachtet – vom textilen Halbzeug bis zum fertigen Endbauteil.

2. Stand der Anwendungen

2.1. Herstellverfahren für Class-A CFK Bauteile und Herstellkostenverteilung im Nasspressverfahren

Je nach Anforderung, geometrischer Komplexität und Stückzahl sind für das Herstellen von CFK Bauteilen unterschiedliche Prozesse wirtschaftlich. Die Abb. 2 zeigt eine Übersicht der etablierten CFK-Herstellprozesse von der Einzelstückfertigung bis zur Großserie.

Abb. 2 Übersicht der etablierten Herstellverfahren für CFK Bauteile. Mit steigenden Stückzahlen sinkt der Anteil manueller Arbeitsvorgänge. Mit den automatisierten RTM- und Nasspressverfahren sind Class-A Bauteile, wie CFK-Dächer in Stückzahlen von über 20.000 Einheiten im Jahr realisierbar. Mit den Verfahren sind deutlich höhere Stückzahlen (>70.000 Einheiten / Jahr) möglich, jedoch erfüllen die Bauteile dann die Class-A Anforderungen nicht, können aber ohne weiteres als Strukturbauteile eingesetzt werden. Nach [3]

Für Einzelstücke bis hin zu Stückzahlen <50 Einh./Jahr sind Prozesse mit einfachen und günstigen Werkzeugen mit einem hohen Anteil manueller Arbeit am weitesten verbreitet. Prozesse wie Handlaminieren, Vakuuminfusionsverfahren (Vakuum Assisted Resin Infusion - VARI), aber auch das Legen von Prepregs eignen sich sowohl für Prototypen als auch für Bauteile in geringen Stückzahlen. Da es keine „harte“ Taktzeitvorgabe gibt, um eine definierte Stückzahl zu erreichen, können die Bauteile so lange nachgearbeitet werden, bis sie die geforderte Qualität erfüllen. Der hohe manuelle Anteil erlaubt dabei eine deutlich höhere Bauteilkomplexität als bei hochautomatisierten Prozessen. [7] Eine größere Stückzahl ist in den Prozessen über das simultane Fertigen von Bauteilen in mehreren Werkzeugen gleicher Geometrie möglich. Werden zusätzlich noch Autoklaven verwendet, die ein Aushärten unter definiertem Druck und Prozesstemperaturen ermöglichen, sind Stückzahlen von bis zu 5000 Einh./Jahr möglich. [7 bis 9] Höhere Stückzahlen sind aktuell nur mit automatisierten Prozessen und massiveren, aber gleichzeitig deutlich teureren Werkzeugen möglich. Für

duromere Class-A CFK Bauteile in hohen Stückzahlen werden nachfolgend das RTM-Verfahren und das Nasspressverfahren näher betrachtet.

Resin Transfer Molding - RTM Verfahren

Das Resin Transfer Molding Verfahren, kurz RTM Verfahren gehört zu den etablierten Herstellverfahren für CFK Bauteile in der Großserie. Das RTM-Verfahren eignet sich für komplexe und große Struktur- und Mehrkomponentenbauteile. Hierbei werden zunächst einzelne Lagen textiler Flächengebilde auf Abrollanlagen übereinandergeschichtet und auf das nötige Maß zugeschnitten. Zum Einsatz kommen hauptsächlich Gewirke, Gewebe und Vliese. Das so erzeugte textile Halbzeug wird als Stack (Engl. für Stapel) bezeichnet. Vor dem eigentlichen Pressvorgang werden die Stacks dann in einem separaten Prozessschritt vorgeformt (Preforming). Für sehr große Bauteile, wie beispielsweise die Seitenrahmen des BMW i3 und i8, werden mehrere Einzelpreforms zusammengelegt. Dies erlaubt eine lastgerechte Faserorientierung und eine optimierte Materialeinsatzquote. Für einfache Bauteilgeometrien, wie Dächer, gibt es kostenoptimierte Prozessvarianten, bei denen die Drapierung im RTM-Werkzeug selbst stattfindet. Nachdem der Preform in das beheizte Werkzeug eingelegt wurde, wird die Kavität über einen Pressenhub geschlossen und mit einem Harz-Härtergemisch kontrolliert gefüllt. Je nach Prozessvariante wird die Kavität während der Aushärtereaktion des Harzes nur geschlossen gehalten oder mit definierter Kraft zugepresst. Für eine Entformbarkeit müssen sog. Trennmittel eingesetzt werden. Diese können entweder dem Harzsystem zugemischt (internes Trennmittel) oder vor dem Einlegen des Preforms auf die Werkzeugoberfläche appliziert werden (externes Trennmittel). Das Trennmittel bildet während des Prozessvorgangs eine temporäre Trennschicht zwischen Bauteil und Werkzeugoberfläche. Nach der Bauteilentnahme muss das Trennmittel für eine Lackierung und/oder Verklebung durch abrasive Verfahren entfernt werden.

Abwandlungen des RTM Verfahrens sind das „Niederdruck-RTM-Verfahren“, bei dem die Kavität vor der Harzinjektion evakuiert wird und das „Hochdruck-RTM-Verfahren“, bei dem das Harz mit hohem Druck in die Kavität eingeschossen wird. Für Class-A Bauteile eignet sich vor allem die Kombination der beiden Varianten, um makellose Oberflächen zu erzeugen. Die Vorteile liegen vor allem bei der hohen Rohteilqualität und Geometriestabilität über die Werkzeuglebensdauer. Da die Werkzeuge sehr komplex, groß und damit teuer sind, ist das RTM-Verfahren vor allem für die Produktion von Stückzahlen >10.000 Einh./Jahr wirtschaftlich. [10]

Nasspressverfahren oder Wet / Liquid Compression Molding (WCM bzw. LCM)

Das Nasspressverfahren ähnelt in den Grundzügen dem RTM-Verfahren, es werden für das fertige CFK-Bauteil jedoch weniger Prozessschritte benötigt. Der Preformvorgang entfällt. Die

Drapierung, also das Anpassen des flächigen Stacks an die Kavitätsgeometrie, erfolgt beim Einlegen und hauptsächlich im Pressvorgang selbst. (Abb. 3)

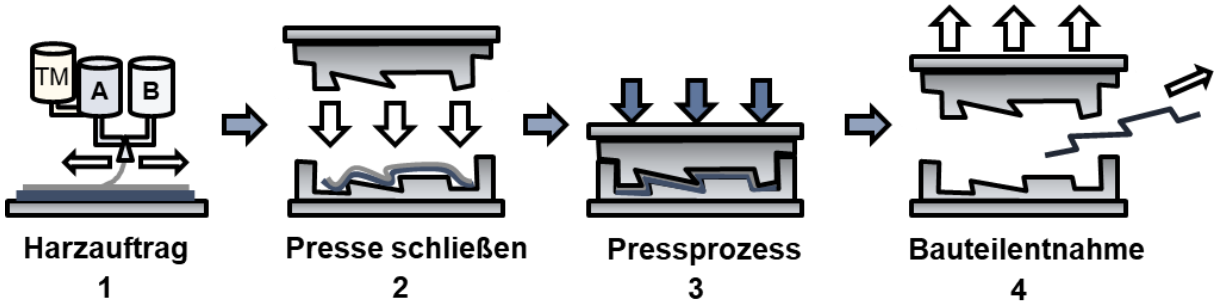


Abb. 3 Nasspressprozess. (1) Über eine robotergeführte Düse wird das mit Trennmittel versetzte Epoxidharzsystem definiert auf das CF-Halbzeug appliziert. (2) Nachdem das beharzte Halbzeug automatisiert in die Presse eingelegt wurde, wird die Presse geschlossen und das Halbzeug final imprägniert und drapiert. (3) Das Harzsystem härtet unter definiertem Druck und Temperatur während dem Pressprozess aus. (4) Nachdem das Bauteil ausgehärtet ist, wird das Bauteil automatisiert entnommen. Nach [3, 11, 12]

Zunächst wird über eine robotergeführte Düse das Harz flächig auf den Stack aufgetragen. Der beharzte Stack wird in die Presse eingelegt und die Presse geschlossen. Das Stoffgemisch reagiert unter hohem Druck und Hitze zu einem fertigen CFK-Bauteil aus. Durch das Auslagern des Beharzungsvorgangs sind deutlich kürzere Taktzeiten als beim RTM Verfahren möglich. Zudem entstehen geringere Investitionskosten durch einfachere Werkzeuge. Die Bauteilqualität ist dabei vergleichbar. Für hohe Stückzahlen mit einfachen Geometrien ist das Nasspressverfahren im Vergleich zum RTM-Verfahren schneller, günstiger und kann somit auch wirtschaftlich sinnvoller sein. [10]
Erst durch das Nasspressverfahren ist es möglich, dass neben dem BMW M8 auch der seit 2018 erhältliche BMW 8er mit einem Sichtcarbondach ab Werk (Sonderausstattung) erhältlich ist [12]. Auch für das Nasspressverfahren mit Epoxidharzmatrix müssen interne oder externe Trennmittel eingesetzt werden. Um eine Lack- und Klebstoffhaftung zu gewährleisten, muss auch hier das Trennmittel mit abrasiven Methoden wie einem Bauteilschliff vor der Lackierung bzw. Verklebung entfernt werden. [10, 12]

Verteilung der Herstellkosten für Class-A CFK Bauteile (Nasspressverfahren)

Die Entscheidung für ein Herstellverfahren ist bei Class-A CFK Bauteilen vor allem abhängig von der Stückzahl und der geforderten Qualität. Wie bereits beschrieben, sind für verschiedene Stückzahlgrenzen bestimmte Herstellverfahren etabliert. Diese Arbeit widmet sich der Kostenoptimierung von Class-A CFK Bauteilen mit Stückzahlen >10.000 Einh./Jahr hergestellt im Nasspressverfahren. Für das Nasspressverfahren können die direkten Herstellkosten ohne eingerechneten Einmalaufwand für Anlagen und Werkzeuge in die folgenden drei Kategorien eingeteilt werden:

- Material- und Fertigungskosten (Stacken) für das Textile Halbzeug
- Material- (Harzsystem) und Fertigungskosten im Pressprozess
- Material- und Fertigungskosten bei der Lackierung/Beschichtung

Die Abb. 4 zeigt die Verteilung der Herstellkosten für ein Class-A CFK-Dach hergestellt im Nasspressprozess. [3, 6, 11]

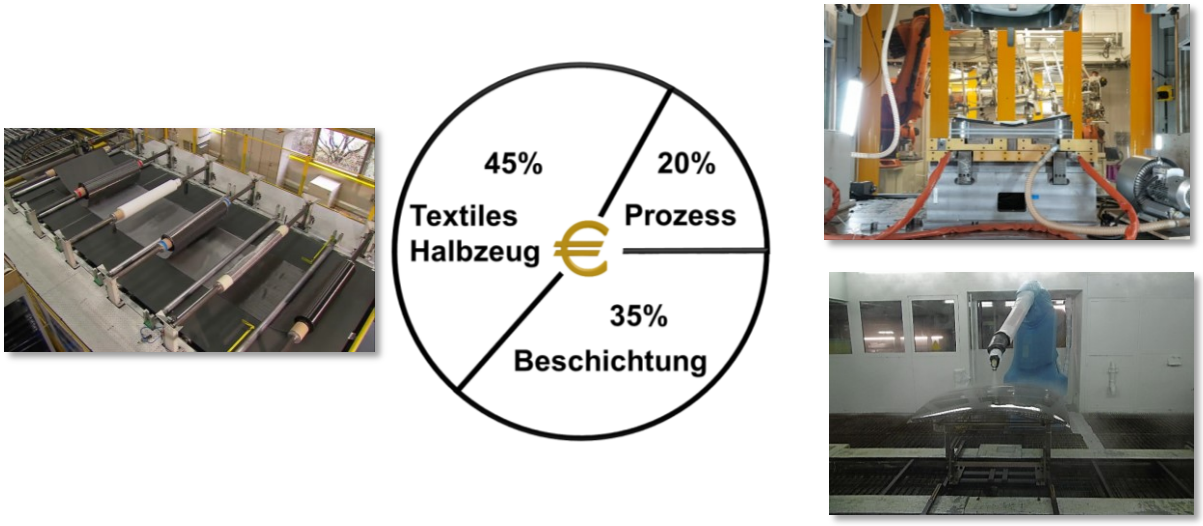


Abb. 4 Verteilung der Herstellkosten für ein Class-A CFK-Dach hergestellt im Nasspressprozess. [3, 6, 12]

Mit 45% verursacht das textile Halbzeug annähernd die Hälfte der Herstellkosten eines Class-A CFK-Dachs. Der Grund liegt in den sehr hohen optischen Anforderungen an textile Halbzeuge für Class-A Anwendungen. Da die oberste Lage im späteren Bauteil sichtbar ist, muss das Textil, in diesem Fall ein 3k CF-Leinwandgewebe, eine fehlerfreie und gleichmäßige Webstruktur aufweisen. Es sind keine Fehlerstellen und Verunreinigungen zulässig. Dies führt zu einem deutlich höheren Prüfaufwand und Ausschuss bei der Herstellung, was sich in den Kosten niederschlägt. Ähnlich verhält es sich bei den mechanischen Zwischenlagen (gewirktes Biaxialgelege), die aufgrund der optischen Anforderungen deutlich feiner und dadurch teurer sein müssen, als in Strukturbauteilen ohne dabei einen mechanischen Vorteil zu liefern. Um über einen symmetrischen Lagenaufbau einen Bauteilverzug zu vermeiden, werden für die Rückseite von Class-A CFK Bauteilen ebenfalls Leinwandgewebe eingesetzt, allerding aus 12k Rovings. Dies erhöht die Materialkosten ebenfalls. [3, 6, 12]

Der Pressprozess verursacht inklusive der Materialkosten für das Harzsystem ca. 20% der Gesamtherstellkosten. Den größten Anteil haben hierbei die Fertigungskosten aufgrund der für die Aushärtung des Harzsystems benötigten Verweilzeit in der temperierten Presse. Die

Verweilzeit ist dabei länger als bei Strukturbauteilen, da für kurze Aushärtezeiten hohe Prozesstemperaturen notwendig sind, die jedoch eine zu starke Ausprägung der Faserdurchzeichnung verursachen und somit auch mit Lackierung keine Class-A Oberfläche erreichen würden. [3, 6, 11]

Mit 35% hat die Oberflächenveredelung durch einen automatisierten Lackierprozess einen größeren Anteil an den Gesamtherstellkosten als die Bauteilherstellung selbst. Das liegt an den hohen Anforderungen an Class-A Exterieurbauteile im Automobilbau. Die Klarlackierung von Sichtcarbonbauteilen erzeugt nicht nur optische Eigenschaften wie eine hochglänzende Oberfläche, sie dient auch dem Schutz des Bauteils vor Umwelteinflüssen. Hier sei vor allem der Schutz vor UV-Strahlung genannt, die bei einer ungeschützten Epoxidmatrix zu einer oxidativen Vergilbung führen kann. [3, 6, 11]

Ohne nachträglicher Lackierung sind nach heutigem Stand der Technik keine Class-A CFK Bauteile im Nasspressverfahren marktverfügbar. Da die Außenhaut jedoch das Erscheinungsbild des Fahrzeugs und damit auch die Wahrnehmung potentieller Kunden definiert, wird die aufwendige Oberflächenveredelung mit einer Klarlackierung für eine hochwertige Anmutung und eine ausreichende Haltbarkeit des Class-A Bauteils in Kauf genommen.

2.2. Oberflächenveredelung im Fahrzeugexterieur

Oberflächen von Werkstücken werden veredelt, um die Eigenschaften der Oberfläche bezüglich ihrer Funktion (z.B. Tribologie, Alterungsbeständigkeit usw.) und ihres Erscheinungsbildes (Farbe, Glanz usw.) zu verbessern. Hierfür werden einzelne oder mehrere Verfahren eingesetzt, bei denen Materialschichten auf- bzw. abgetragen werden. Das Lackieren von Automobilen stellt dabei samt aller Zwischenschritte eine Oberflächenveredelung dar, die sowohl funktional als auch dekorativ ist. In einer konventionellen Automobillackiererei, wie sie bei den bekannten OEMs (Original Equipment Manufacturer) in der Produktion zu finden ist, wird die Karosserie zunächst in verschiedenen Tauchbecken vorbehandelt. Dabei wird die Karosse zunächst gereinigt, um in Vorprozessen eingesetzte Öle und andere mögliche Kontaminationen zu entfernen. Anschließend folgen Schritte der funktionalen Oberflächenveredelung, bei denen vor allem der Korrosionsschutz im Fokus steht. Die Karossen werden (Zink-)phosphatiert und anschließend mit einer kathodischen Tauchlackierung überzogen, die in einem Trocknerofen bei ca. 165-195°C eingebrannt wird. Die nun bräunliche Karosse wird mit Plastisolen abgedichtet, um Blechüberlappungen zu schützen. Zum Schluss folgt die Deck- und Klarlackierung der Karosserie. Diese hat neben funktionalen vor allem dekorative Eigenschaften, da die Farbe und der Glanz das Erscheinungsbild des Fahrzeugs entscheidend prägen. Der Lack wird bei Temperaturen zwischen 130-145°C eingebrannt. Abhängig vom Qualitätsanspruch des jeweiligen Herstellers unterscheiden sich die Oberflächenanforderungen an die lackierte Außenhaut und damit der Aufwand, der in die Oberflächenveredelung von Fahrzeugen investiert wird. [13, 14]

Auch Faserverbundwerkstoffe werden aus ästhetischen und funktionalen Gründen mit einer Lackierung veredelt. Zum einen um die Oberflächenqualität optisch zu verbessern, aber auch um das Bauteil vor physikalischen und chemischen Einflüssen zu schützen. Allerdings ist es gerade bei Sichtcarbonbauteilen nicht möglich, diese Online, also in der oben beschriebenen Karosserie-Lacklinie zu lackieren, da die Trocknertemperaturen zu hoch sind, um Class-A Oberflächen zu erzeugen. Class-A CFK-Bauteile werden offline in eigenen Lacklinien mit Niedertemperaturtrocknern (ca. 90°C) veredelt. Bei der manuellen Lackierung werden Oberflächenfehler wie Faserabzeichnungen oder Poren vor der eigentlichen Lackierung über ein abwechselndes Füllern und Schleifen ausgeglichen. Der Aufwand ist abhängig von der Oberflächenqualität des Rohbauteils und kann einige Stunden in Anspruch nehmen. Für die Lackierung von Class-A CFK Dächern im RTM- oder Nasspressverfahren werden die Rohbauteile vollständig automatisiert lackiert. Dies erhöht zwar die Anforderungen an die Fehlerfreiheit der Rohbauteiloberfläche, ermöglicht dabei jedoch die notwendigen Zykluszeiten für einen Output von über 10.000 Einh./Jahr. [3, 6, 12]

2.3. Oberflächenanforderungen im Fahrzeugexterieur

Die Anforderungen an Fahrzeugbauteile und -oberflächen wachsen gemeinsam mit der technologischen Weiterentwicklung der Herstellverfahren. Neben der physikalischen und chemischen Beständigkeit ist vor allem das visuelle Erscheinungsbild der Fahrzeugoberflächen, in der Fachsprache „Appearance“ genannt, das Bewertungskriterium mit der höchsten Kundenrelevanz. Die Widerstandsfähigkeit von Oberflächen kann mit standardisierten Messverfahren sehr gut geprüft werden. Das Bewerten der Appearance ist deutlich schwieriger, da die optische Qualität von Oberflächen vielmehr eine subjektive Interpretation des Betrachters ist und sich damit deutlich schwieriger quantifizieren lässt als beispielsweise mechanische Kennwerte. [15]
Dies führt dazu, dass die Oberflächenanforderungen stark abhängig vom Kundenanspruch des jeweiligen Produktsegments und auch der Vertriebsregion sind. Als Einstieg in dieses Kapitel wird daher zunächst auf die Wahrnehmung von Oberflächen durch das menschliche Auge eingegangen. Danach wird der Begriff der „Class-A“ Oberfläche erläutert und die im Automobilbau etablierten Grenzwerte vorgestellt.

2.3.1. Optische Wahrnehmung von Oberflächen

Um Methoden zu entwickeln, die eine Quantifizierung der optische Oberflächenqualität von Class-A Bauteilen ermöglichen, ist es notwendig sich zunächst mit dem Zusammenhang der visuellen Wahrnehmung von Oberflächen und der tatsächlich auftretenden (messbaren) Struktur zu befassen. Die meisten bisherigen Arbeiten zu dem Thema Class-A und Lack Appearance beschäftigten sich in unterschiedlicher Tiefe mit der menschlichen Physiologie hinter der Wahrnehmung von Oberflächenstrukturen. Einige Beispiele sind in [6, 15 bis 18, 18 bis 26] zu finden. Hervorzuheben ist hier die 1989 verfasste Dissertation von H. Schene, der in besonderer Weise die Korrelation der Wahrnehmung der automobilen Lackstruktur und der Physiologie des menschlichen Auges betrachtet hat. Die Arbeit war Wegbereiter für bis heute geltende Appearance Standards in der Automobilindustrie und Appearance Messgeräte, wie den WaveScan von BYK-Gardner.[27] Zusammen mit Schene kommen alle Autoren einheitlich zu dem Schluss, dass das optische Erscheinungsbild von Körperoberflächen hauptsächlich von dessen Lichtreflexionseigenschaften (Glanzgrad, Farbe) und der geometrischen Form geprägt wird.
Die wahrgenommene Farbe einer Körperoberfläche hängt von dem Verhältnis reflektierter und absorbierter Wellenlängen des sichtbaren Lichts ab und ist unabhängig von der Oberflächentopografie [28]. Der Glanzgrad wird hingegen maßgeblich von der Ausprägung von mikro- und makroskopischen Gestaltsabweichungen der Oberfläche und der Betrachtungsposition (Abstand und Winkel) beeinflusst [27]. Bei einer subjektiven Beurteilung

einer Oberfläche spielt zudem die refraktive Sehfähigkeit und visuelle Sensibilität des Betrachters eine große Rolle. Ein erfahrener Lackprüfer kann beispielsweise charakteristische Einzelheiten einer Lackoberfläche besser erkennen und analysieren als ein ungeübter Laie. [23] Je glatter und makelloser eine Oberfläche ist, desto glänzender wird sie wahrgenommen. Im Fall einer ideal glatten Oberfläche ist der Einfallwinkel des Lichts gleich dem Ausfallwinkel und die empfangene Lichtintensität entspricht der gesendeten Intensität (Reflexionsgesetz). Hat die Oberfläche eine Struktur, wird das Licht je nach Ausprägung und Wellenlänge gestreut. Der Glanzgrad einer Oberfläche ist messbar und setzt sich aus der Schärfe des Spiegelbildes und der Eigenschaft, einfallendes Licht gerichtet zu reflektieren, zusammen. [15, 18]
Wird, wie in Abb. 5 dargestellt, das Spiegelbild einer gerichteten Lichtquelle auf einer Oberfläche vom Betrachter fokussiert, so erhält er einen Eindruck über die Abbildungseigenschaften der Oberfläche (engl. Distinctness of Image, kurz DOI). Die Reflexion der Lichtquelle wird entweder als brillant oder matt wahrgenommen. Wird vom Betrachter die Oberfläche selbst fokussiert, so erhält er Informationen bezüglich der Größe und Gestalt sichtbarer Strukturen, die noch innerhalb des Auflösungsvermögens des menschlichen Auges liegen. [22]

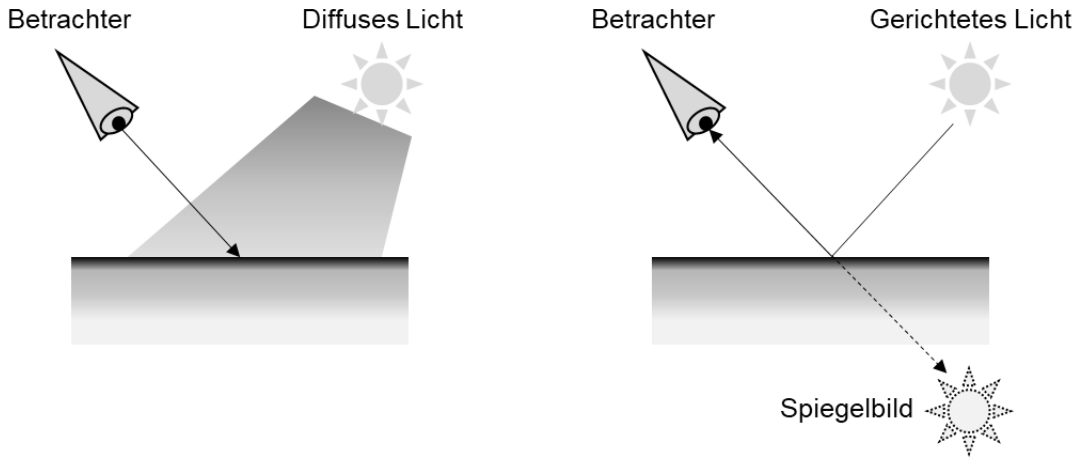


Abb. 5 Fokussierte Betrachtung einer Oberfläche nach [22]: links Fokus auf die Oberflächenstruktur, rechts auf das Spiegelbild.

Sehr feine Strukturen mit Wellenlängen $\lambda < 0{,}1$mm, die das Auge nicht mehr getrennt auflösen kann, verringern den wahrgenommenen Glanz und verursachen ein unscharfes Spiegelbild von kontrastreichen Objekten und Lichtquellen [19]. De La Rie et al. bezeichnen den Glanz daher treffend als Funktion der Rauheit. Bei steigender Rauheit wird das einfallende Licht immer diffuser gestreut und die Oberfläche erscheint dem Betrachter immer dunkler und matter. [20] Der Einfluss von kurz- und langwelligen Gestaltsabweichungen ist in Abb. 6 dargestellt.

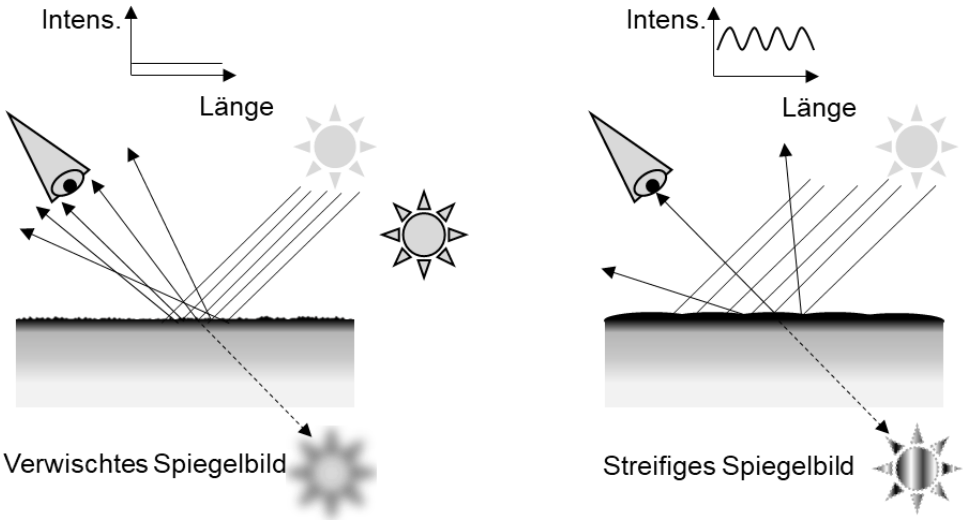


Abb. 6 Einfluss kurzwelliger (links) und langwelliger (rechts) Gestaltabweichungen auf das Spiegelbild einer gerichtet beleuchteten Oberfläche nach [22]. Bei kurzwelligen Unebenheiten (Rauheit) wird das Licht diffus gestreut, das Spiegelbild wird unscharf und schwach. Bei langwelligen Unebenheiten (Welligkeit) entsteht ein Spiegelbild mit Hell-Dunkel Muster und verzerrten Rändern. Über den Bildern ist die Lichtintensitätsverteilung über der Bauteillänge dargestellt.

Mit zunehmender Wellenlänge λ verschiebt sich der optische Eindruck des verminderten Glanzes in Richtung Sehen von Strukturen. Steigen die Wellenlängen deutlich über λ=15 mm, werden Formabweichungen immer mehr als Krümmung der Oberfläche empfunden. [23]

Ein gutes Beispiel für langwellige Gestaltabweichungen an glänzenden Oberflächen sind die Verlaufsstörungen von Automobillacken, die als Orangenhaut (engl. Orange Peel) bezeichnet werden. Typische Wellenlängen des Orange Peels lackierter Exterieurbauteile liegen zwischen λ = 0,1 mm bis maximal λ = 30 mm. [27] Die Höhenunterschiede dieser Strukturen liegen hingegen in einer Größenordnung weniger µm. Solch feine Höhenunterschiede können vom menschlichen Auge nicht mehr als eine Struktur aufgelöst werden, weshalb sie als Hell-Dunkel Muster wahrgenommen werden. Das Gehirn interpretiert das Muster wiederum als dreidimensionale Oberflächenstruktur, wodurch die Lackstruktur als Orangenhaut wahrgenommen wird. Dieses Kategorisieren der visuellen Impulse nach Mustern und dessen Interpretation ist evolutionär bedingt und ermöglicht eine effiziente Analyse der Umwelt und das räumliche Sehen. [23]

Die Eigenschaft des Gehirns, bei visuellen Reizen bevorzugt nach Mustern zu suchen, ist gerade bei Class-A CFK Bauteilen relevant. Üblicherweise werden aufgrund der optischen Erscheinung Gewebe mit sich wiederholenden Mustern eingesetzt. Da die störenden Faserdurchzeichnungen (siehe Kap. 2.5) das Muster des eingebetteten Textils aufweisen, werden diese trotz geringerer Höhenausprägungen durch die menschliche Mustererkennung einfacher wahrgenommen als die statistisch verteilte Welligkeit der Lackstruktur oder die Rauheit von Karosserieblechen.

Neben der Höhenausprägung (Amplitude) spielt physiologisch gesehen auch die Wellenlänge der Faserdurchzeichnungen für die Wahrnehmung eine Rolle. Das Auflösevermögen des menschlichen Auges ist begrenzt. Wie in Abb. 7 dargestellt, hat es bei vollem Sehvermögen eine maximale Auflösung von 35 getrennten Linien bei einem Sehwinkel <1° [19, 22]. Daher werden, je nach Betrachtungsabstand, Oberflächenstrukturen mit bestimmten Wellenlängen stärker oder schwächer wahrgenommen.

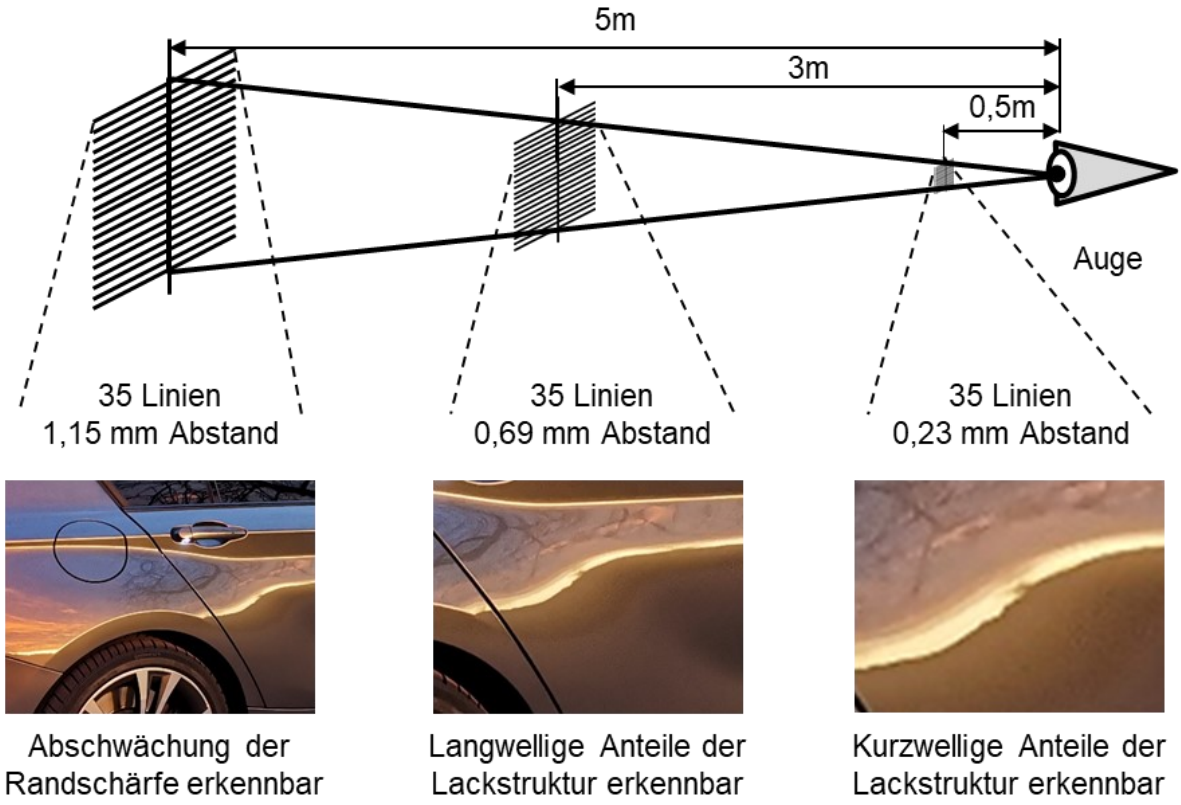


Abb. 7 Auflösungsvermögen des menschlichen Auges und Wahrnehmung unterschiedlicher Wellenlängen der Oberflächenstruktur je nach Betrachtungsabstand nach [19, 22, 23].
Bei 5m Entfernung (links) wird die Lackoberfläche als glatt empfunden, das Lichtspiel der Designelemente wird hauptsächlich wahrgenommen und die Randschärfe des gespiegelten Horizonts ist leicht abgeschwächt. Bei 3m Abstand (Mitte) erkennt man bereits langwellige Störkonturen im Spiegelbild des Horizonts. Bei naher Betrachtung von 0,5m (rechts) sind auch kurzwellige Strukturen und (mögliche) feine Lackfehler erkennbar.

Aus einer Distanz von 3 m Entfernung sind Wellenlängen im Bereich von λ>10 mm bis λ <100 mm gut sichtbar. Strukturen von λ > 1mm bis λ < 3mm können jedoch kaum mehr als Welligkeiten aufgelöst werden, was als verminderte Abbildungsqualität und schwächere Randschärfe der Hell-Dunkel Muster wahrgenommen wird. Sehr kurze Wellenlängen im Bereich λ = 0,1mm bis λ = 1mm können erst ab einer Entfernung kleiner 0,5 m vom menschlichen Auge erkannt werden. Auch bei diesem kurzen Betrachtungsabstand können Strukturen mit Wellenlängen λ < 0,1mm nicht aufgelöst werden. [27]
Die Wellenlängen der Faserdurchzeichnungen von üblichen CFK Karosseriebauteilen liegen aufgrund der 3k Gewebesichtlagen mit Fadenbreiten von ca. 2mm im Bereich von ca. λ 1,5-

2,5mm (Kap. 5.2). Somit ergibt sich eine besonders gute Wahrnehmbarkeit dieser Wellenlängen bei einem Betrachtungsabstand von ein bis zwei Metern, was einer üblichen Entfernung bei der näheren Betrachtung von charakteristischen Designelementen bei Automobilen entspricht. Dies führt dazu, dass die Faserdurchzeichnung von CFK Komponenten bei einem üblichen Betrachtungsabstand am stärksten sichtbar ist. Daraus folgen hohe Anforderungen an die Glätte und Makellosigkeit der Oberfläche von CFK Bauteilen. CFK-Bauteile, die diese Anforderungen erfüllen, werden in der Automobilindustrie als Class-A Bauteile bezeichnet.

2.3.2. Begriffsherkunft „Class-A“ und Ableitung einer Definition

Der Begriff Class-A steht in der Automobilindustrie für dekorative Bauteile mit einer sehr hohen Oberflächenqualität, ist jedoch nicht definiert. [26] Die Einstufung in Klassen (Engl. Class) und das Prädikat „A“ suggerieren, dass es niedrigere Qualitäten (B, C, …) mit geringeren Anforderungen gibt und das Class-A Bauteil somit die höchstmögliche Oberflächenqualität aufweist. Allerdings sind niedrigere Klassenbezeichnungen für dekorative Anbauteile nicht etabliert. Der Anspruch an die zu erzielende Oberflächenqualität ist eher abhängig von der Einbauposition, der Fahrzeugklasse und der Marktregion. [15, 16, 29, 30] Der Begriff leitet sich aus der im Fahrzeugdesign gebräuchlichen Einteilung der Fahrzeugoberflächen in die Klassen A bis C [31] und der Einteilung der Fahrzeugaußenhaut in Bewertungszonen A bis E [32] ab. In der Designentwicklung zählen alle sichtbaren Flächen im In- und Exterieur von Fahrzeugen zur Klasse A (Engl. Class-A). Daraus ergeben sich hohe Anforderungen an ihre Stilistik und Ästhetik, wodurch definierte Konstruktionsregeln für die Positions-, Krümmungs- und Tangentenstetigkeit gelten. Werden diese eingehalten, nimmt der Betrachter eigentliche Flächenübergänge als eine zusammenhängende Fläche wahr und empfindet diese als optisch glatt. [31]

Die Einteilung der Fahrzeugflächen bei der Qualitätsbewertung ist ähnlich der des Fahrzeugdesigns, jedoch verwendet jeder Fahrzeughersteller eigene Bezeichnungen. Wie in Abb. 8 zu sehen, hat die BMW AG beispielsweise bis 2016 die lackierten Fahrzeugflächen in die Zonen A bis E unterteilt. Heute werden die Flächen in Primär- und Sekundärflächen mit eigenen Unterkategorien eingeteilt (P0-P2, S1, S2). [33]

Abb. 8 Einteilung der Fahrzeugaußenhautflächen eines BMW Z4 in links Zone A*-B und rechts Primärflächen P0-P2. Die Abgrenzung der Flächenbereiche ist dabei identisch. [33]

Aufgrund des fehlenden Standards hat der VDA (Verband der Automobilindustrie) für dekorative Zukaufteile den VDA Band 16 herausgegeben, um eine einheitliche Kommunikation und Bewertungsgrundlage zwischen OEM und Zulieferer im Produktentstehungsprozess zu schaffen. Die Fahrzeugflächen werden in Bewertungszonen unterteilt. Die Anforderungen und Prüfbedingungen werden je nach Zone bzw. Anbauposition definiert. Dabei ist die Zone A eine unmittelbar sichtbare Fläche, die Zone B eine Fläche, die in Normalposition nicht direkt sichtbar ist und die Zone C eine nicht sichtbare Fläche (Abb. 9). [32]

Class-A CFK Bauteile werden üblicherweise in den Zonen A und B verbaut. Daher sind die Anforderungen an Class-A CFK Bauteile abhängig von ihrem Einbauort. Frontspoiler und Diffusoren (B-Flächen) haben z.T. andere Anforderungen als Dächer, Klappen und Spiegelkappen (A-Flächen). Während der Betrachter im Normalbetrieb Spiegelkappen oder das Dach (<1,7m Fahrzeughöhe) ohne große Mühe genau und häufig sieht, muss er für das genaue Betrachten von Splittern und Diffusoren in die Hocke gehen. Dementsprechend sind die optischen Anforderungen bei Frontspoilern und Diffusoren geringer als bei einem CFK-Dach. Dafür werden an Bauteile in B-Flächen höhere Anforderungen an Schlagzähigkeit (Steinschlag) oder Temperaturbeständigkeit (Auspuffgase) gestellt. Da Class-A CFK Bauteile in Sichtcarbonausführung die Aufmerksamkeit des Betrachters auf sich ziehen, müssen die dem Einbauort entsprechenden Oberflächenanforderungen z.T. überstiegen werden. Das eigenständige Erscheinungsbild der Sichtcarbonbauteile setzt sich von den umgebenden Bauteilen ab. Das bedingt noch höhere Anforderungen an die Merkmalsfreiheit und Appearance. Decklackierte Faserverbundbauteile haben hingegen die Anforderung, sich nicht von den umgebenden Bauteilen zu unterscheiden, was zu eigenen Herausforderungen führt. Die Textilabzeichnung (Fiber Print-Through) muss eliminiert werden oder aber z.B. durch geeignete Vliese so gestaltet sein, dass sie bspw. dem Reflektionsverhalten konventioneller decklackierter Bauteile (Orangepeel) ähnelt. Aufgrund der unterschiedlichen Anforderungen durch die Einbaulage und Marktanforderungen bleibt somit eine gewisse Unschärfe des Begriffs Class-A.

Im Rahmen dieser Arbeit wird der Begriff Class-A Bauteil daher wie folgt definiert:
ein Class-A Sichtcarbonbauteil muss im eingebauten Zustand mindestens die Oberflächenqualität der umgebenden Bauteile erreichen, um das Prädikat tragen zu können. Welche charakteristischen Merkmale dabei die Oberflächenqualität von CFK Bauteilen beeinträchtigen können, wird im Folgenden beschrieben.

2.4. Oberflächencharakteristika von Class-A Faserverbundbauteilen

Da ein Hauptziel dieser Arbeit die Entwicklung einer Methode zur flächigen Quantifizierung der Faserabzeichnungen ist, wird dieses Merkmal in Kap. 2.5 genauer betrachtet. Faserverbundwerkstoffe können verfahrensabhängige und -unabhängige Oberflächenfehler aufweisen. Typische Oberflächenfehler duromerer FVK Bauteile sind in [22, 26] sehr ausführlich beschrieben. Die Abb. 9 zeigt die relevantesten Oberflächenfehler von Class-A CFK Bauteilen.

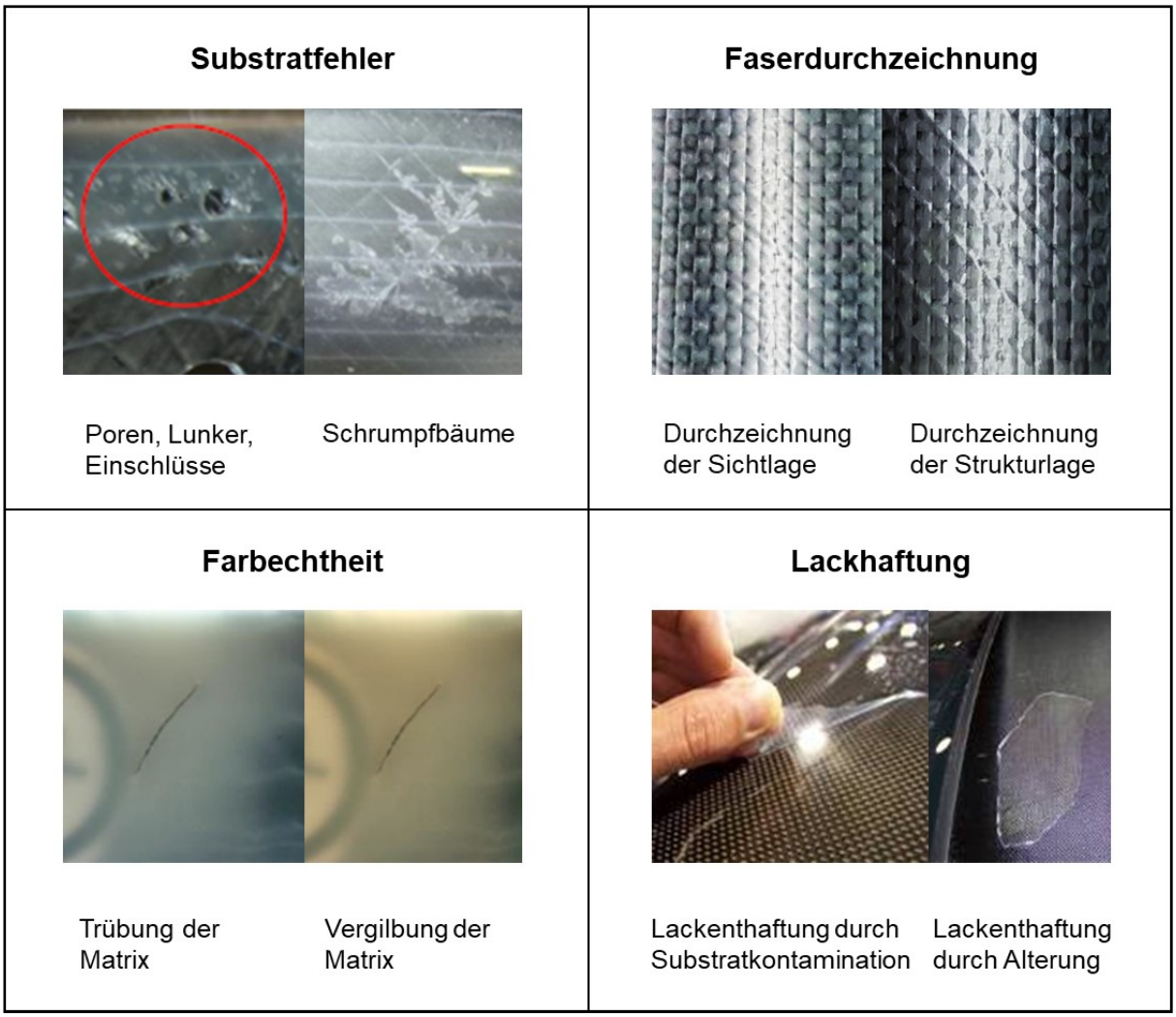


Abb. 9 Charakteristische Oberflächenfehler von Class-A CFK Bauteilen nach [34].

Substratfehler

Durch eine unzureichende Prozessführung können unerwünschte Defekte, wie Poren und Lunker durch eingeschlossene Luft (Kavität nicht evakuiert, falsches Pressenprofil, schaumiges Harz usw.) entstehen. Diese können nachgearbeitet werden, was je nach Ausprägung sehr aufwendig sein kann. Verunreinigte Werkzeuge können hingegen zu Einschlüssen von Fremdkörpern in der Matrix führen. Eine Nacharbeit von Einschlüssen ist meist nicht mehr möglich. Während des Aushärtevorgangs im Werkzeug schwindet das Harz reaktionsbedingt. Ist die Prozessführung und das Werkzeug nicht an das Harzmaterial angepasst, kann die Kontraktion nicht ausgeglichen werden. Das Bauteil verliert den Kontakt zur Werkzeugoberfläche, wodurch im geschlossenen Werkzeug ein Vakuum entsteht. Durch undichte Stellen im Werkzeug wird Luft eingezogen und die charakteristischen Ast-Strukturen der sogenannten Schwindungsbäume entstehen. [26]

Ein weiterer üblicher Substratfehler ist das Verzerren oder Verziehen der Sichtlage, was bei Sichtcarbonbauteilen ebenfalls als störend empfunden wird und nicht nachgearbeitet werden kann.

Farbechtheit

Bei Sichtcarbonbauteilen ist die eingebettete Textilstruktur sichtbar, was hohe Anforderungen an die Transparenz der Matrix mit sich bringt. Gerade fettsäurenbasierte Prozesshilfsmittel, wie Trennmittel oder auch anorganische Füllstoffe können zu einer Trübung der Matrix und damit einer schlechteren Sichtbarkeit der Sichtlage führen. Epoxidharze neigen zudem zu einem Gelbstich nach der Aushärtung, vor allem bei hohen Prozesstemperaturen. Da die meisten Kunststoffe bei der Alterung vergilben, wird dies vom Betrachter als minderwertig empfunden. Wichtiger jedoch als der Grundgelbstich ist die Alterungsbeständigkeit des Initialfarbtons. Umwelteinflüsse wie hohe Temperaturen und Feuchte, vor allem aber eine starke Beanspruchung durch UV-Strahlung führen zu oxidativen Alterungsprozessen und damit zu einer Vergilbung. Daher werden Class-A CFK Bauteile zum Schutz vor Umwelteinflüssen lackiert, was gleichzeitig die Appearance verbessert. [35]

Lackhaftung

Um alle Anforderungen im Automobilen Exterieur erfüllen zu können, müssen die Oberflächen von FVK Bauteilen durch Beschichtungen veredelt werden. Sichtcarbonbauteile werden überwiegend lackiert, es gibt jedoch auch Varianten, bei denen die Deckschicht im Werkzeug aufgebracht wird (In-mold Coating, kurz IMC). Beiden gemein ist, dass die Beschichtung auf dem Substrat sicher und nachhaltig haften muss. Hierfür muss zunächst die Beschichtung mit dem Matrixmaterial kompatibel sein. Darüber hinaus muss die Bauteiloberfläche frei von Kontaminationen sein. Neben ungewollten Kontaminationen sind es vor allem Prozess-

hilfsmittel, wie Trennmittel, die zu einer zeit- und kostenintensiven Lackvorbehandlung führen. Die temporäre Trennschicht ist jedoch notwendig, um die Matrix (gerade Epoxidharze sind exzellente Klebstoffe) wieder von der Werkzeugoberfläche lösen zu können. Da das Trennmittel die Adhäsionsfähigkeit der Matrix verringert, wird folglich auch die Lackhaftung negativ beeinflusst, weshalb das Trennmittel vor dem Lackieren entfernt werden muss.
Auch bei der Lackhaftung spielt die Alterungsbeständigkeit eine wichtige Rolle. Der Lack soll die darunterliegende Matrix vor Umwelteinflüssen schützen. Ist der Schutz nicht ausreichend, oxidiert die Matrix, was an der Grenzfläche zum Lack zu einer Enthaftung führen kann. [3, 12, 35 bis 37]

2.5. Primäre und Sekundäre Faserdurchzeichnungen (PPT und SPT)

Das Phänomen der Faserdurchzeichnung an der Oberfläche von Faserverbundwerkstoffen ist ein sehr beliebter Forschungsgegenstand. Schon 1986 haben Kia et al. die Ursachen und Methoden zur Modellierung der Mechanismen von „Fiber Readout“ bei glasfaserverstärkten Kunststoffen erforscht [38]. Im Gegensatz zu der Quantifizierung von mechanischen Eigenschaften von Kunststoffen gibt es für die Oberflächenqualität von Faserverbundbauteilen jedoch keine Normen [26]. Daher gibt es für das Phänomen in der Fachwelt vergleichsweise viele Bezeichnungen. Die Abb. 10 zeigt die Häufigkeit der in der einschlägigen Literatur verwendeten Fachbegriffe.

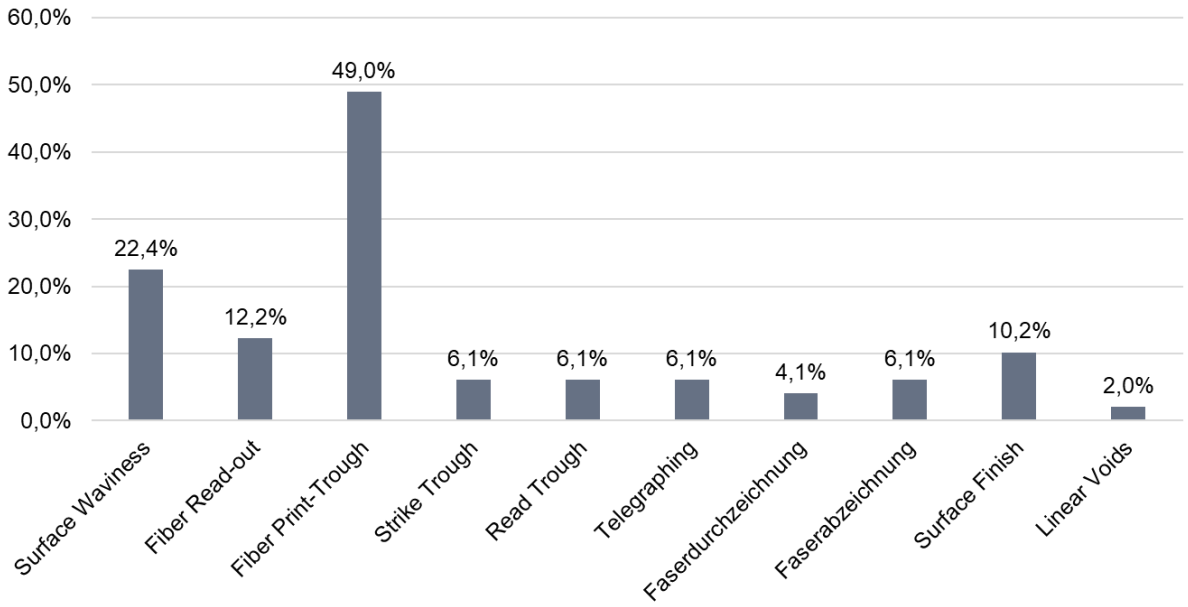


Abb. 10 Verteilung der Häufigkeit der in der Literatur verwendeten Fachbegriffe für das Phänomen der Faserdurchzeichnung bei FVK auf Basis des Literaturreviews für diese Arbeit.

Passend zum Ursprung des Werkstoffes in der Raumfahrtindustrie, findet sich eine der ersten Nennungen des heute meistverwendeten Begriffs „Fiber Print-Through“ in einem Beitrag der US amerikanischen Raumfahrtbehörde NASA von Sanfeliz et al. im Jahre 1992 [39]. Erst in den 2000er Jahren, als FVK durch ihr Leichtbaupotential verstärkt in den Fokus der Automobilindustrie rückten, mehrten sich verstärkt Forschungsarbeiten mit dem Ziel der Oberflächenverbesserung, was zur parallelen Einführung unterschiedlicher Begriffe für dasselbe Phänomen führte.

Grundsätzlich können Faserdurchzeichnungen als Gestaltabweichungen an der Oberfläche von Faserverbundkunststoffen im Muster der eingebetteten Textilstruktur definiert werden [15]. Hervorgerufen werden sie durch textilstrukturbedingte Schwankungen des Faservolumen-gehalts entlang der Bauteiloberfläche und die unterschiedlichen physikalischen und chemischen Eigenschaften von Faser und Matrix. (Abb. 11)

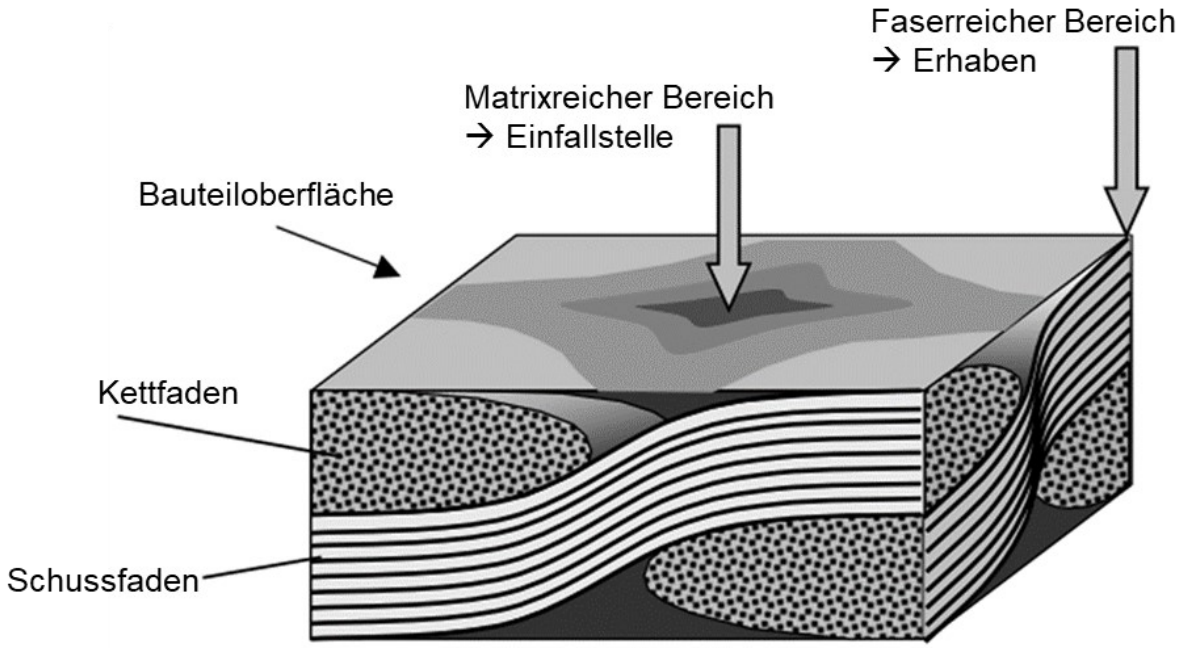


Abb. 11 Modellhaftes Schema der Faserdurchzeichnung am Beispiel einer Gewebeverstärkung mit leichten Änderungen aus Blinzler [16].

Über die Ursachen der Faserdurchzeichnungen wurde bereits viel geforscht [6 bis 8, 12, 16, 18, 22, 26, 36, 38, 40 bis 58]. Zusammengefasst ergeben sich drei Hauptursachen für das Durchzeichnen der Verstärkungsfasern bei FVK und damit auch bei Class-A CFK Bauteilen:

1. **Härtungsschrumpf bzw. chemischer Schrumpf der Matrix:**
   Im Gegensatz zu den eingebetteten Fasern, verändern reaktive Harze, wie Epoxidharzsysteme, während der Aushärtung neben dem Aggregatzustand auch ihre Dichte und ihr Volumen. Da die zunächst freibeweglichen Mono- und Oligomere zu Netzwerken reagieren, verringert sich der Abstand der Moleküle zueinander auf eine Bindungslänge. Das führt zu einer Volumenverringerung und gleichzeitig zu einer Dichteerhöhung des Reaktivharzes beim Übergang von flüssig zu fest. Dieses irreversible Verhalten wird als Härtungsschrumpf oder chemischer Schrumpf bezeichnet. [59]

2. **Delta-α_T Effekt – Unterschiedlicher thermischer Ausdehnungskoeffizient (α_T) von Matrix und Faser:**
   Während sich Kohlenstofffasern mit $\alpha_T = -3{,}8 \cdot 10^{-7}\ /K$ [60] während des temperaturinduzierten Aushärtevorgangs der Epoxidharzmatrix kaum verändern, dehnt sich die Matrix aufgrund des deutlich höheren Wärmeausdehnungskoeffizienten (engl. Coefficient of thermal expansion, kurz CTE) von $\alpha_T = 6{,}53 \cdot 10^{-5}\ /K$ [61] um das ca. 170-fache stärker aus und drückt gegen die heiße Werkzeugoberfläche. Auf der

Oberfläche des zunächst glatten Faserverbundbauteils sind nach der Entnahme aus dem Werkzeug aufgrund der Abkühlung auf Raumtemperatur Einfallstellen sichtbar. Diese entstehen aufgrund der lokal unterschiedlichen thermischen Ausdehnungskoeffizienten von matrixreichen und faserreichen Bereichen. [39] Der charakteristische Unterschied der Wärmeausdehnungskoeffizienten α_T von Matrix und Fasern kann auch als „*Delta-α_T Effekt*“ bezeichnet werden [6]. Kia et al. konnten bereits 1986 nachweisen, dass die Delta-α_T bedingte Faserabzeichnung beim erneuten Erhitzen auf die Prozesstemperatur aufgrund der Matrixausdehnung wieder ausgeglichen werden kann. Dieses Verhalten beobachteten sie sowohl bei duromeren als auch bei thermoplastischen Matrixwerkstoffen. [38] Der Delta-α_T Effekt führt dazu, dass mit steigender Prozesstemperatur auch die Ausprägung der Faserdurchzeichnung steigt.

3. **Schrumpf der Matrix durch Umwelteinflüsse (Alterung):**
   Umwelteinflüsse wie Feuchteaufnahme, Temperaturbelastung und UV-Strahlung führen zu einer Veränderung der Matrix, die als Alterung bezeichnet wird. Bei der Alterung von Epoxidharzen finden Oxidationsvorgänge statt, die bei ausreichender Belastung zum stetigen Abbau der Matrix führen können. Der Abbau führt wiederum zu Faserdurchzeichnungen. [62, 63]

Grundsätzlich ist das Muster der Faserdurchzeichnung abhängig vom Lagenaufbau des CFK-Bauteils. Es können primäre Faserdurchzeichnungen (engl. Primary Print-Through, kurz PPT) und sekundäre Faserdurchzeichnung (engl. Secondary Print-Through, kurz SPT) unterschieden werden. Der PPT wird durch die oberste textile Halbzeuglage verursacht, der SPT stammt hingegen von Durchzeichnungen tieferliegender Textillagen, die im konsolidierten Zustand nicht mehr sichtbar sind. Während die Ausprägung des PPT hauptsächlich von dem oben beschriebenen Schrumpfverhalten der Matrix abhängig ist, sind die Durchzeichnungseffekte des SPT hauptsächlich auf die Homogenität der textilen Struktur zurückzuführen. [6] Abb. 12 veranschaulicht die Gewebedurchzeichnung der Sichtlage (PPT). Die CFK-Komponenten 1 und 2 wurden bei unterschiedlichen Prozesstemperaturen T_{cure} hergestellt (Delta-α_T Effekt), wobei gilt: $T_{cure1}<T_{cure2}$. Die Textilqualität ($Q_{Tex1}=Q_{Tex2}$) ist dabei als gleich anzusehen.

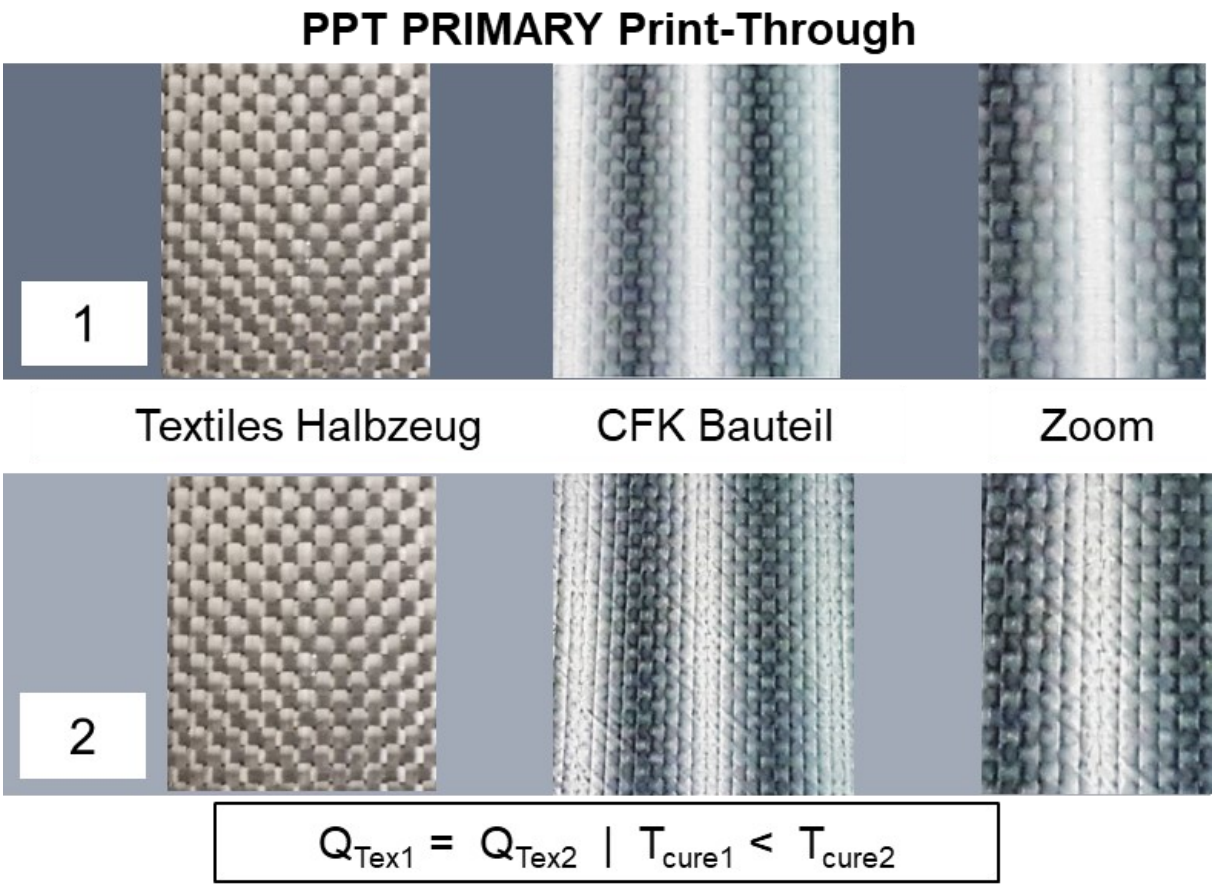


Abb. 12 PPT- Primary Print-Through. Die stärkere Ausprägung bei Komponente 2 wird durch eine höhere Prozesstemperatur verursacht. Nach [64]

Komponente 2 wurde mit einer höheren Prozesstemperatur hergestellt und weist insofern einen stärker ausgeprägten Print-Through Effekt auf als Komponente 1. Das Muster der Durchzeichnung ist eindeutig der Sichtlage zuzuordnen, weshalb die Faserdurchzeichnung als PPT kategorisiert werden kann.

Um den SPT Effekt zu veranschaulichen, werden in Abb.13 die Proben 3 und 4 verglichen. Die Proben wurden bei derselben Prozesstemperatur ($T_{cure3}=T_{cure4}$) hergestellt, weisen jedoch unterschiedliche Textilqualitäten der innenliegenden Verstärkungslagen auf ($Q_{Tex3}>Q_{Tex4}$).

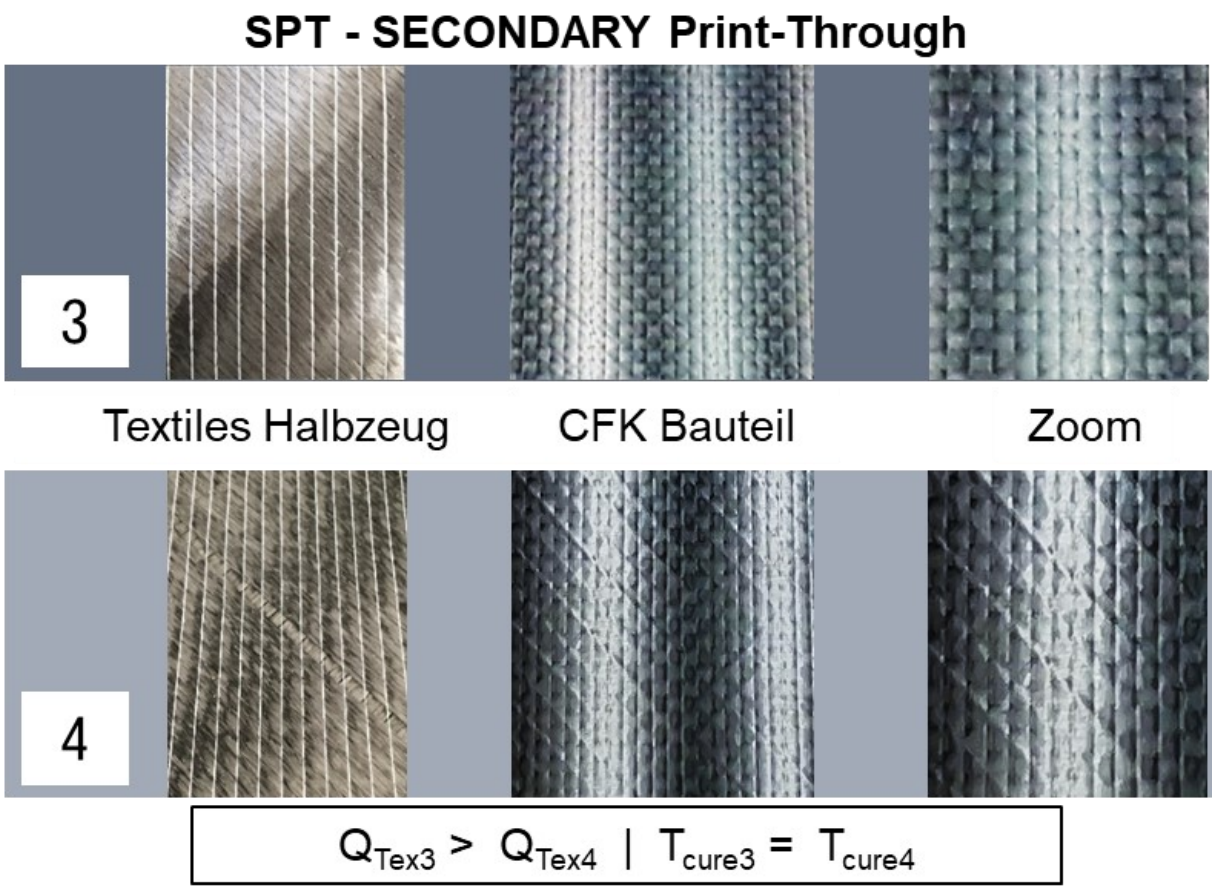


Abb. 13 SPT – Secondary Print-Through verursacht durch eine inhomogene Verstärkungslage unterhalb der Sichtlage. Nach [64]

Da das innenliegende Biaxialgelege der Probe 4 deutlich inhomogener ist als das der Probe 3, zeichnet sich neben der Sichtlage (PPT) auch die verdeckte Lage mit ihren charakteristischen 45° Linien an der Oberfläche ab (SPT). Damit wird deutlich, dass bei der Wahl der textilen Halbzeuge nicht nur die Sichtlage eine wesentliche Rolle für die Oberflächenqualität spielt, sondern auch die innenliegenden Textillagen.

Entscheidend für die Oberflächenqualität eines Class-A CFK Bauteils ist somit die passende Wahl der Materialien (homogenes Textil, Matrix mit geringem chemischen Schrumpf / CTE) und darauf abgestimmte Prozessparameter (Temperatur, Druck, Zeit). [65, 66] Zudem müssen die Bauteile vor Umwelteinflüssen geschützt werden, um die ursprüngliche Oberflächenqualität beizubehalten. Um abgeleitet aus den Erkenntnissen das (kosten-) optimale Verhältnis der erforderlichen Maßnahmen ermitteln zu können, sind Methoden notwendig, die eine Bewertung der Ausprägung der primären (PPT) und sekundären (SPT) Faserdurchzeichnung ermöglichen.

2.6. Methoden der Oberflächenbewertung von Faserdurchzeichnungen

Für das Charakterisieren der Oberflächentopografie von FVK-Oberflächen wurden in Vorarbeiten bereits verschiedene Methoden und Messgeräte eingesetzt. Abb. 14 zeigt die in der einschlägigen Literatur verwendeten Messmethoden für Faserdurchzeichnungen sortiert nach der Häufigkeit.

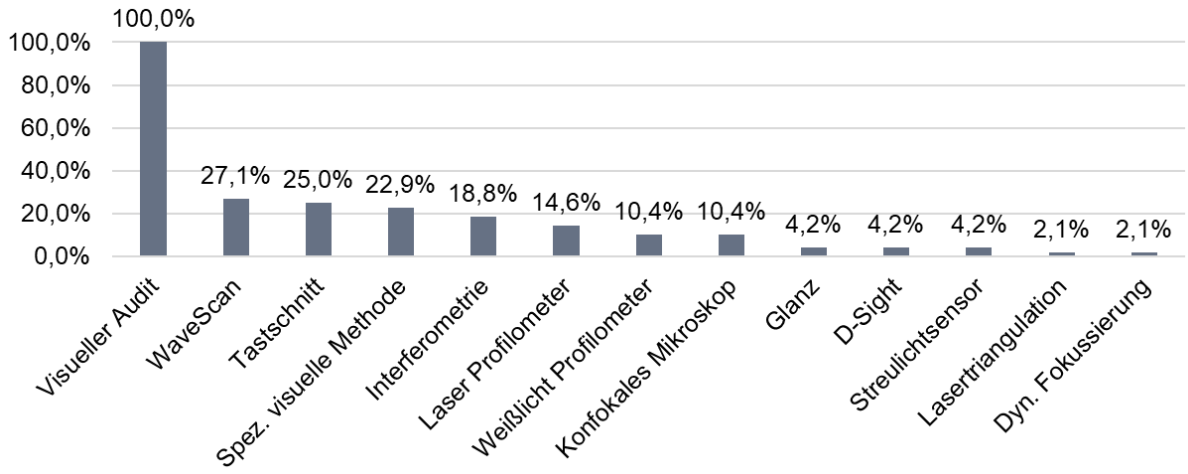


Abb. 14 Übersicht eingesetzter Messmethoden für die Bewertung von Faserdurchzeichnungen auf Basis des Literaturreviews für diese Arbeit. Neben dem visuellen Audit ist das bisher am häufigsten eingesetzte Prüfgerät das in der Automobilindustrie etablierte Lack-Appearance-Messgerät WaveScan von BYK Gardner, gefolgt von dem Tastschnittverfahren. Zudem werden immer häufiger berührungslose profilometrische Messgeräte verwendet, die es ermöglichen 3D-Topografien der gemessenen Oberfläche zu erzeugen. (Interferometer, Laser Profilometer, Weißlichtprofilometer WLP, konfokale Mikroskope).

Allen Forschungsarbeiten gemein ist eine (subjektive) visuelle Bewertung der Oberflächenglätte als Referenz. Wurde ein Messmittel eingesetzt, wird der visuelle Eindruck mit dem Messergebnis verglichen. Die am häufigsten verwendeten Messgeräte BYK Gardner WaveScan und Tastschnittverfahren sind etablierte Messmittel der Automobilindustrie. Neuere Forschungsarbeiten setzen verstärkt auf 3D-Profilometer und lichtbasierte Messgeräte.

Im Folgenden werden zunächst die in der Automobilindustrie etablierten Prüfverfahren der lackierten Karosserie erläutert. Abgeleitet von der systematischen visuellen Beurteilung durch einen Auditor wird bei den Messgeräten WaveScan und D-Sight hauptsächlich die sog. „optische Oberfläche“ gemessen, was dem visuellen Kundeneindruck der Oberfläche entsprechen soll. Danach werden Messmethoden vorgestellt, die die mechanische Oberfläche messen und eine Auswertung der Oberflächentopografie über physikalische Kennwerte ermöglichen.

2.6.1. Bewertung der Faserdurchzeichnung mit Methoden für lackierte Fahrzeugoberflächen

Auditor

Traditionell hat in der Automobilindustrie bei der Entscheidung, ob eine Fahrzeugoberfläche den eigenen bzw. den Kundenanspruch erfüllt, der Auditor das letzte Wort. Der Auditor ist ein vom Hersteller intern oder extern beauftragter Experte, der die Qualität neuer Produkte, Materialien und / oder Prozesse prüfen und gewährleisten soll. Neben Auditoren gibt es speziell ausgebildete Qualitäts-Mitarbeiter, die in den Finish Bereichen der Prozessabschnitte die Qualität der laufenden Produktion sicherstellen sollen. Wie in Kap. 2.3.1 beschrieben, ist das menschliche Auge ein hervorragendes Instrument zur Beurteilung von Oberflächen und insbesondere Glanzunterschieden. Dennoch hat die visuelle Oberflächenprüfung auch Schwächen, da auch aufwendig geschulte Experten Menschen sind, die letztendlich nie zu hundert Prozent objektiv sein können. Es können zudem abweichende oder ungenügend definierte Abmusterungsbedingungen und Merkmalskataloge vorliegen, wodurch verschiedene Prüfer dasselbe Bauteil unterschiedlich bewerten. [17] Gerade bei Prozessoptimierungen ist es essenziell, den Erfolg einer Maßnahme direkt quantifizieren zu können, weshalb Messgeräte wie der WaveScan von BYK-Gardner oder der D-Sight bzw. reflectControl mittlerweile in der Automobilproduktion etabliert sind.

WaveScan

Der WaveScan der Firma BYK-Gardner GmbH ist ein mobiles Handgerät für die Beurteilung ebener bis leicht gekrümmter Lackoberflächen. Wie mit dem menschlichen Auge wird die Oberfläche auf der Suche nach Hell-Dunkel-Mustern optisch abgetastet. Bei der Messung einer Oberfläche wird der WaveScan über eine definierte Messstrecke von 100 mm bewegt. Dabei werden Messdaten aufgezeichnet und anschließend automatisch ausgewertet. Das Messsystem überwacht die Beschleunigung und Geschwindigkeit der Messung, um reproduzierbare Messwerte zu gewährleisten. Es lassen sich hochglänzende bis mittelglänzende Oberflächen charakterisieren. Bei hochglänzenden Bauteiloberflächen wird ein „optisches“ Profil mittels eines Lasers, bei mittelglänzenden Oberflächen mittels einer Infrarothochenergie-LED aufgezeichnet. Um das Auflösungsvermögen des menschlichen Auges bei unterschiedlicher Entfernung bestmöglich zu imitieren, wird das optische Profil durch mathematische Filterung in mehrere Wellenlängenbereiche von Wa ($0{,}1\text{mm} < \lambda < 0{,}3\text{mm}$) bis We ($10\text{mm} > \lambda > 30\text{mm}$) aufgeteilt. Zudem kann das optische Profil in den Spektren des Longwave (LW) und Shortwave (SW) ausgegeben werden. Da die Auswertung der WaveScan Kurven nicht trivial ist, hat jeder Automobilhersteller zur Vereinfachung eigene Bewertungsskalen eingeführt. Diese Skalen, bei der BMW AG bspw. Bewertungsnote „N1“ für 1m Betrachtungsabstand und „N3“ für 3m Bewertungsabstand, sind empirisch ermittelte,

einfache Kennwerte, die den Ansprüchen des jeweiligen Herstellers angepasst wurden. [17, 27, 67]

Zudem ermöglicht das Messsystem eine sog. Dullnessmessung (Dullness engl. für Mattheit/Stumpfheit). Hierbei wird das von Feinstrukturen mit Wellenlängen $\lambda < 0{,}1$ mm verursachte diffuse Streulicht mittels CCD Kamera erfasst. Dabei gilt: je höher die Ausprägung der Feinstrukturen, desto matter wird das Erscheinungsbild wahrgenommen. [25]

Eignung für die Oberflächenbewertung von Faserverbundbauteilen

Da ein großer Teil der Vorarbeiten den WaveScan für die Beurteilung der Faserdurchzeichnung eingesetzt hat [16, 22, 36, 40, 44, 47, 48, 53, 55, 68], wurde im Rahmen dieser Arbeit dessen Eignung, Sichtcarbonbauteile zu vermessen und deren Ausprägung der Faserabzeichnung zu quantifizieren, geprüft.

Der Vorteil des WaveScan ist die schnelle und einfache Inspektion von glänzenden decklackierten Karosserieoberflächen. Das Gerät imitiert das menschliche Auge und soll möglichst den visuellen Eindruck einer Oberfläche quantifizieren. Daher wird nicht die Oberflächentopografie selbst gemessen, sondern ein optisches Profil der Reflektion erzeugt. Das Profil wird mathematisch so ausgewertet, dass die üblicherweise statistisch verteilte Ausprägung und Wellenlängen der Lackstruktur mit einfachen Kennwerten bewertet werden können. Die Kennwerte sind relative Werte, die sich auf ein z.T. OEM-spezifisches Kalibriernormal beziehen. Ein Vergleich zu normierten, absoluten Welligkeits- oder Rauheitskennwerten ist nicht möglich. Siehe dazu auch die Ergebnisse in [69]. Für die Bewertung von lackierten, glänzenden Oberflächen nach „hauseigenen“ Kriterien ist das Gerät somit gut geeignet. Daher ist der Versuch Class-A CFK Sichtbauteile mit dieser Methode auf ihre Oberflächengüte zu untersuchen naheliegend.

Die Faserdurchzeichnung von Class-A Sichtcarbonbauteilen hat im Gegensatz zur statistisch verteilen Struktur von Lacken ein sich wiederholendes Muster der eingebetteten Textilstruktur. Bei Class-A CFK Bauteilen handelt es sich zumeist um Gewebe mit Leinwand- oder Köperbindung. Die Messbreite einer einzelnen Linienmessung mit einem Wavescan ist deutlich schmaler als die Roving- bzw. Gassenbreite der Sichtlage, die die wahrgenommene Oberflächenwelligkeit verursacht. Es wird somit nur ein zufälliger Teilbereich des Gesamtmusters gemessen. Eine zweite Messung direkt neben der ersten kann zu stark unterschiedlichen Werten führen. Ein Rückschluss von einer Messung auf die Qualität des Gesamtbauteils ist somit nicht möglich. Müller et al. haben diese Tatsache untersucht und nachgewiesen, dass erst durch das zehnfache Vermessen derselben Linie statistisch relevante Ergebnisse erzeugt werden können [53]. Eine solch hohe Anzahl von Wiederholungsmessungen relativiert jedoch den Vorteil des WaveScans, flexibel und schnell Messergebnisse zu erzeugen.

Ein weiteres Manko stellt der für eine Messung benötigte hohe Glanzgrad der Oberfläche dar. Matte Oberflächen können mit dem WaveScan nicht geprüft werden. CFK-Großserienwerkzeuge sind in der Regel nicht spiegelglanzpoliert, weshalb die Bauteile ohne Lack kaum glänzen und somit nicht vermessen werden können. [70, 71] Hierdurch beschränkt sich die Methode auf lackierte Bauteile oder Bauteile aus nichtseriennahen, spiegelglanzpolierten Werkzeugen. Problematisch ist hierbei, dass sich die Wellenlängenbereiche der Lackstruktur (0,1 mm -30 mm) und der Faserdurchzeichnung von üblichen Sichtcarbonbauteilen (3k Leinwandbindung bspw. 1,5 mm – ca. 3mm) überschneiden. Daher ist es nach dem Lackieren kaum möglich, die einzelnen Einflüsse von Rohteil und Lackprozess auf die vom WaveScan ermittelten Kennwerte klar zu trennen. Folglich muss für ein signifikantes Messergebnis der Welligkeitsunterschied der CFK-Rohteile deutlich höher sein als die Schwankung der Lackqualität.
Da heutzutage im RTM oder Nasspressverfahren bereits sehr glatte Rohteiloberflächen erzeugt werden, ist die Sensibilität des WaveScans zu gering, um weitere Optimierungsmaßnahmen bewerten zu können. [70] Aufgrund der geringen Sensitivität und der Ausgabe relativer Oberflächenwerte wird der WaveScan für diese Arbeit daher nicht verwendet.

D-Sight

Sowohl Dyckhoff [26], Blinzler [16] als auch Reuter [22] nennen als weitere Möglichkeit, Oberflächenfehler, wie Faserdurchzeichnungen, auf großen Flächen zu detektieren, das D-Sight Messsystem der Fa. Diffracto Ltd. Das D-Sight ermöglicht es durch die doppelte Spiegelung einer Lichtquelle auf der Oberfläche Lackfehler im µm-Bereich zu detektieren. Hauptsächlich wurde das 1986 erstmals patentierte System für die Lackfehlerdetektion eingesetzt. Ein tatsächlicher Einsatz für das Identifizieren und Quantifizieren von Faserdurchzeichnungen wird jedoch nicht beschrieben. [22, 54, 72, 73]
Eine mögliche Weiterentwicklung des Systems ist beispielsweise im Werk München der BMW AG im Einsatz. Die automatisierte In-Line Oberflächeninspektion (AOI) der lackierten Karosserie erzeugt über Streifenlichtbildschirme ein Linienmuster auf der Oberfläche. Eine auf das Spiegelbild gerichtete Kamera detektiert selbstständig durch Lackierfehler und Einschlüsse verursachte Verzerrungen des Linienmusters und markiert diese Fehlstellen, sodass die Mitarbeiter an der Linie direkt Fehler beheben können, ohne diese vorher suchen zu müssen. [74, 75] Auch dieses System wird aktuell nicht für die Detektion oder Quantifizierung von Faserdurchzeichnungen von Class-A CFK Bauteilen eingesetzt, könnte aber durch Erweiterungen dazu befähigt werden, grobe Faserdurchzeichnungen automatisiert zu erkennen.

2.6.2. Bewertung der Faserdurchzeichnung mit Methoden der Oberflächentopografiemessung

Insbesondere für die Quantifizierung der Ausprägung von Faserabzeichnungen, die eine geometrische Abweichung der Oberfläche verursachen, erscheint es sinnvoll die „mechanische Oberfläche“ zu erfassen, was mit berührenden und optischen Messsystemen möglich ist. [19] Hierbei steht eine große Vielfalt an Methoden zur Messung der Oberflächentopografie zu Verfügung. Definiert werden sie in der DIN EN ISO 25178-6. Es werden berührende und nicht berührende Messverfahren unterschieden, die gleichermaßen eine Auswertung nach der Profil- und/oder flächenhaften Topographiemethode ermöglichen. Das wahrscheinlich älteste Messverfahren ist das manuelle Tastschnittverfahren. Hierbei wird eine sehr feine Messspitze (d < 5µm) berührend über eine Oberfläche geführt. Die durch die Oberflächentopografie entstehende Schwingung des Messarms wird in ein Messsignal umgewandelt und aufgezeichnet. [76] Es entsteht eine Profillinie, die nach den Regeln der DIN EN ISO 4287 ausgewertet werden kann. Moderne Geräte sind mit Verfahrtischen ausgerüstet und können so auch Flächen messen. Das Tastschnittverfahren wird vor allem für Metalloberflächen verwendet, weshalb die Kennwerte auf die Bewertung von charakteristischen Bearbeitungsspuren ausgelegt sind. Neben Schubel et al. [77] wird gerade auch bei älteren Arbeiten [8, 16, 42, 44, 49, 50, 58] für die Ermittlung der Oberflächenrauheit von FVK das Tastschnittverfahren eingesetzt und so versucht, die Faserabzeichnung über Profillinien zu quantifizieren.

Mittlerweile sind einige optische Messverfahren erhältlich, die deutliche Vorteile gegenüber dem Tastschnittverfahren bieten. Die Oberflächentopografie wird berührungslos ermittelt, was ein Zerkratzen von Oberflächen verhindert. Die 2012 veröffentlichte Norm DIN EN ISO 25178-2 standardisiert die flächenhafte Auswertung solcher Messsysteme. Die Systeme selbst sind in den weiteren Teilen der DIN EN ISO 25178-601 bis 607 standardisiert beschrieben.

Es werden grundsätzlich drei Grundarten optischer 3D-Messsysteme unterschieden, bei denen die Oberflächentopografie entweder über Unterschiede der Intensität des reflektierten Signals, Unterschiede der Laufzeit eines Signals oder aber eine aktive bzw. passive Triangulation ermittelt werden. Diese und weitere Systeme zur automatisierten Sichtprüfung von Oberflächen sind ausführlich im Buch „Automatisierte Sichtprüfung“ von Beyerer et al. beschrieben. [24]

Im Folgenden werden die aktive Lasertriangulation und die Weißlicht Profilometrie mit einem chromatischen Weißlichtsensor erläutert, da sie die Basis für die in Kapitel 5.2 beschriebene Messmethode zur Prozessbegleitenden Quantifizierung der Oberflächentopografie von Class-A CFK Bauteilen darstellen.

Weißlicht Profilometrie (WLP) mit einem chromatischen Weißlichtsensor

Weißlicht Profilometer (kurz WLP) eignen sich zur hochauflösenden, berührungslosen optischen Messung von sehr feinen Oberflächentopografien. Geräte mit einem chromatischen Weißlichtsensor arbeiten nach dem chromatisch konfokalen Prinzip, das im Folgenden näher erläutert wird. Während des Messvorgangs wird eine Probe mit fokussiertem Weißlicht beleuchtet. Hierfür wird, wie in Abb. 15 dargestellt, ein Objektiv mit starker chromatischer Aberration verwendet, wodurch das eingestrahlte Licht am Rand der Linse in dessen Spektralfarben gestreut und je nach Wellenlänge (Farbe) in unterschiedlichen Ebenen fokussiert wird. [78, 79]

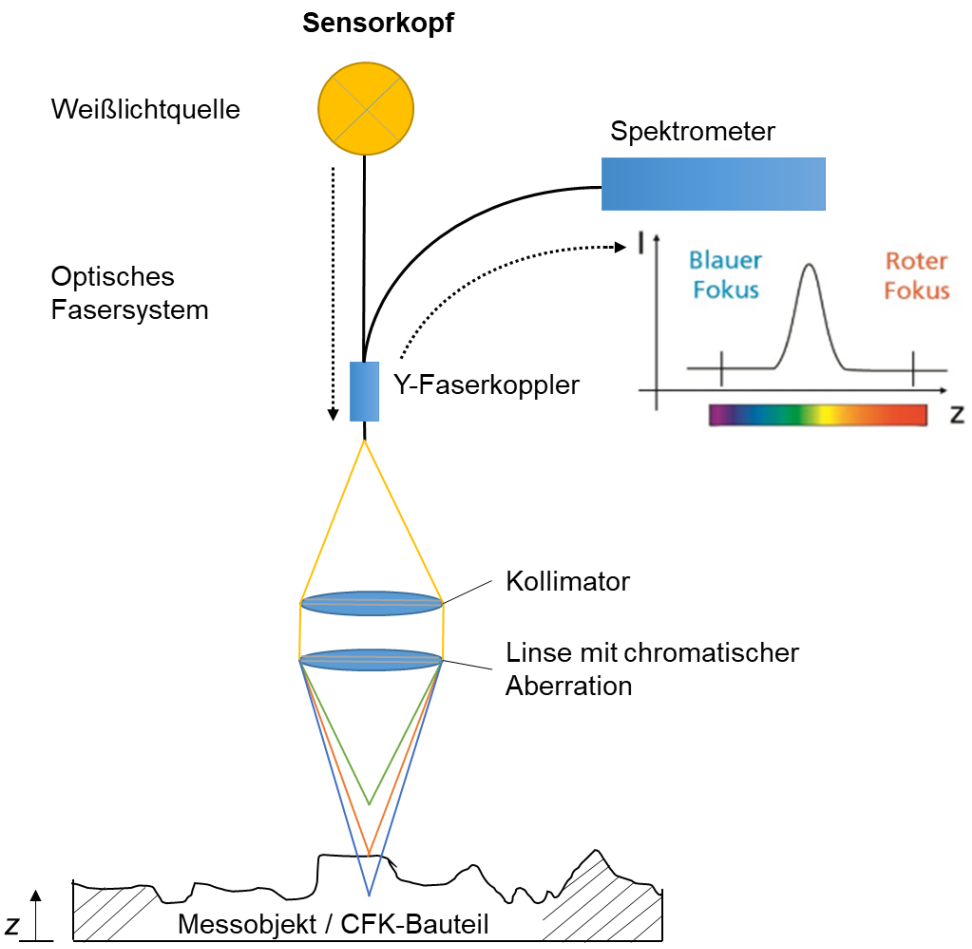


Abb. 15 Schema eines chromatischen Weißlichtsensors zur Oberflächentopografiemessung nach [78, 79]

Das von der Probenoberfläche reflektierte Licht wird durch die gleiche Optik aufgenommen und mittels eines Glasfaserkabels in ein Miniaturspektrometer geleitet. Das örtliche Intensitätsmaximum auf dem Sensor entspricht der Wellenlänge (Farbe) mit optimaler Fokussierung und somit der Entfernung des Messpunktes z. Durch eine Kurvenanpassung an die diskreten Messpunkte mittels einer Regressionsrechnung lässt sich die Höhe z mit einer

Auflösung im nm-Bereich bestimmen. [24] Die Auswertung der so erhaltenen 3D-Topografiedaten wird in Kap. 5.2 beschrieben.

Lasertriangulation

Bei der Lasertriangulation wird ein Laserstrahl auf die Oberfläche eines Objekts fokussiert. In unmittelbarer Nähe der Lichtquelle befindet sich ein Sensor – meist eine ortsauflösende Photodiode oder ein CCD-Sensor – der die von der Messoberfläche reflektierten Lichtstrahlen detektiert. Sobald sich die Entfernung zwischen Messobjekt und Sensor ändert, verändert sich auch der Winkel, unter dem das Lichtsignal aufgenommen wird. Folglich ändert sich auch die Position des Objektabbildes auf dem Fotoempfänger. Anhand der Winkelfunktionsberechnung kann nun die Entfernung des Messobjektes zum Laserprojektor ermittelt werden [24] (Abb. 16).

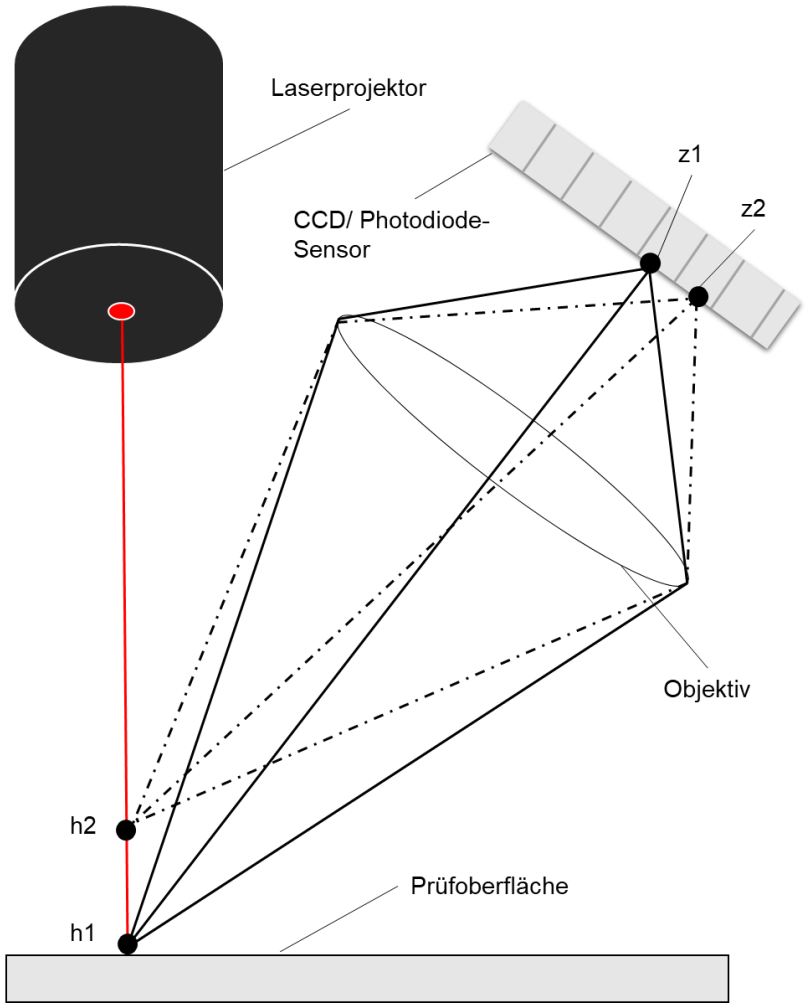


Abb. 16 Prinzip der Lasertriangulation nach [24].

Im Gegensatz zur Weißlicht Profilometrie, die für sehr feine Strukturen ausgelegt ist, ist es mit der Lasertriangulation möglich deutlich größere Flächen zu vermessen. Die Auswertung der so erhaltenen 3D-Topografiedaten wird in Kap. 5.2 beschrieben.

2.6.3. Physikalische Kennwerte für die Quantifizierung der Faserdurchzeichnung

Betrachtet man einen physikalischen Körper, wird dieser hauptsächlich durch dessen Oberfläche definiert. Die Oberfläche begrenzt den Körper nach außen hin und trennt ihn von dem ihn umgebenden Medium. [80] Da die Oberflächen von physikalischen Körpern niemals ideal glatt sind, wurden gerade für technische Erzeugnisse Standards für (zulässige) Gestaltsabweichungen in der Normenreihe der „Geometrischen Produkt Spezifikationen“ (kurz GPS) festgeschrieben. Die GPS Normenreihe legt u.a. die Benennungen und Prüfmethoden für die Oberflächenbeschaffenheit von technischen Oberflächen fest. Da auch die optischen Eigenschaften von Fahrzeugoberflächen, wie Class-A CFK Sichtbauteilen, auf den dort definierten Kenngrößen der Oberflächentopografie beruhen, werden die wichtigsten im Folgenden erläutert.

Nach DIN EN ISO 4760 gibt es, wie in Abb. 18 zu sehen, für technische Erzeugnisse vier relevante Ordnungen der Gestaltabweichungen: [81]

Gestaltabweichung	**Art der Abweichung**
1. Ordnung: Formabweichung	Geradheits-, Ebenheits-, Rundheitsabweichungen der Gesamtfläche
2. Ordnung: Welligkeit	Periodisch wiederkehrende Wellen mit einem Wellenabstand zu –tiefe Verhältnis von 1000:1 bis 100:1
3. Ordnung: Rauheit	Rillen mit einem Rillenabstand zu – tiefe Verhältnis von 100:1 bis 5:1
4. Ordnung: Rauheit	Statistisch verteilte Riefen, Schuppen, Kuppen mit einem Abstand zu Tiefe Verhältnis von 100:1 bis 5:1

Abb. 17 Ordnungen der Gestaltabweichungen nach DIN EN ISO 4760 (5. und 6. Ordnung irrelevant) nach [81].

Geradheits-, Ebenheits- und Rundheitsabweichungen werden als Gestaltabweichung 1. Ordnung (Formabweichung) bezeichnet. Als Gestaltabweichung 2. Ordnung, auch Welligkeiten genannt, werden größtenteils periodisch auftretende Abweichungen bezeichnet, deren Wellenperioden meist erkennbar sind. Das Verhältnis der Wellenabstände zur

Wellentiefe liegt zwischen 1000:1 und 100:1. Gestaltabweichungen ab 3. Ordnung werden als Rauheit bezeichnet. Diese meist unregelmäßig auftretenden feinen (λ<1mm [17]) Gestaltabweichungen weisen ein Verhältnis der Abstände zur Tiefe von 100:1 bis 5:1 auf.

Bei näherer Betrachtung der in der Literatur verwendeten Kennwerte in Abb. 18 ist erkennbar, dass viele Arbeiten Rauheitskennwerte verwenden, obwohl gerade Faserabzeichnungen von Gewebestrukturen nach der DIN EN ISO 4760 eindeutig periodische Welligkeiten sind.

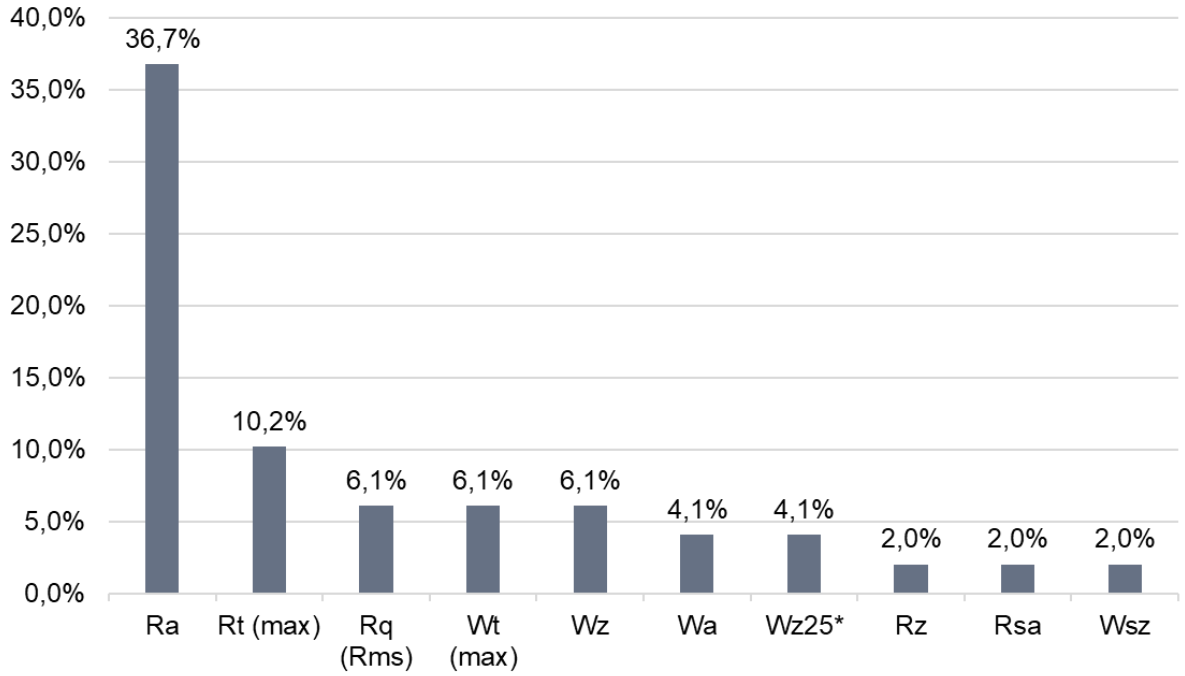


Abb. 18 Übersicht eingesetzter Kennwerte für die Bewertung von Faserdurchzeichnungen auf Basis des Literaturreviews für diese Arbeit. Eine deutliche Tendenz zur Auswertung von Profilen und dem Verwenden von Rauheitskennwerten ist erkennbar. Neuere Arbeiten verwenden immer häufiger Welligkeitskennwerte. Das Auswerten der Fläche nach der DIN EN ISO 25178-2 wurde bisher noch nicht behandelt. Der Kennwert Wz25* ist ein Sonderkennwert in der Analysesoftware FRT Mark III und damit in keiner Norm enthalten.

Zu diesem Schluss kommt auch Hildebrandt [18] und verwendet in seiner Arbeit Welligkeitskennwerte. Die meisten Autoren werten ausschließlich einzelne Profillinien nach der DIN EN ISO 4287 aus. Auch Arbeiten, die nach dem Erscheinen der DIN EN ISO 25178-2 für das flächenhafte Auswerten von Oberflächentopografien im Jahre 2012 veröffentlicht wurden, verwenden oft noch die „alte“ Norm. Nachfolgend werden die wichtigsten Kennwerte der DIN EN ISO 4287 und DIN EN ISO 25178-2 in Bezug auf Faserdurchzeichnungen von Class-A CFK Bauteilen erläutert.

DIN EN ISO 4287:2010-07

In der DIN EN ISO 4287:2010-07 werden die Begriffe und Kenngrößen für lineare Oberflächenprofile definiert. Die Norm bezieht sich auf die Auswertung des weit verbreiteten Tastschnittverfahrens [76], kann aber auch für Oberflächenprofile angewandt werden, die mit optischen Messverfahren erzeugt wurden. Durch Filterung des messtechnisch erfassten Primärprofils zwischen Rauheits- und Welligkeitsprofilen, ist eine fokussierte Auswertung der Gestaltabweichung in der benötigten Ordnung möglich. Die Filter werden in λs (kleinste Wellenlänge), λc (Übergang Rauheit zu Welligkeit) und λf (Übergang Welligkeit zu langwelliger Krümmung) unterteilt. Nachdem der relevante Wellenlängenbereich gefiltert wurde, können die erzeugten Profillinien mit den in DIN EN ISO 4287 spezifizierten physikalischen Kenngrößen quantifiziert werden. Abb. 19 zeigt ein gefiltertes Rauheitsprofil mit den üblicherweise für FVK verwendeten Oberflächenkennwerten.

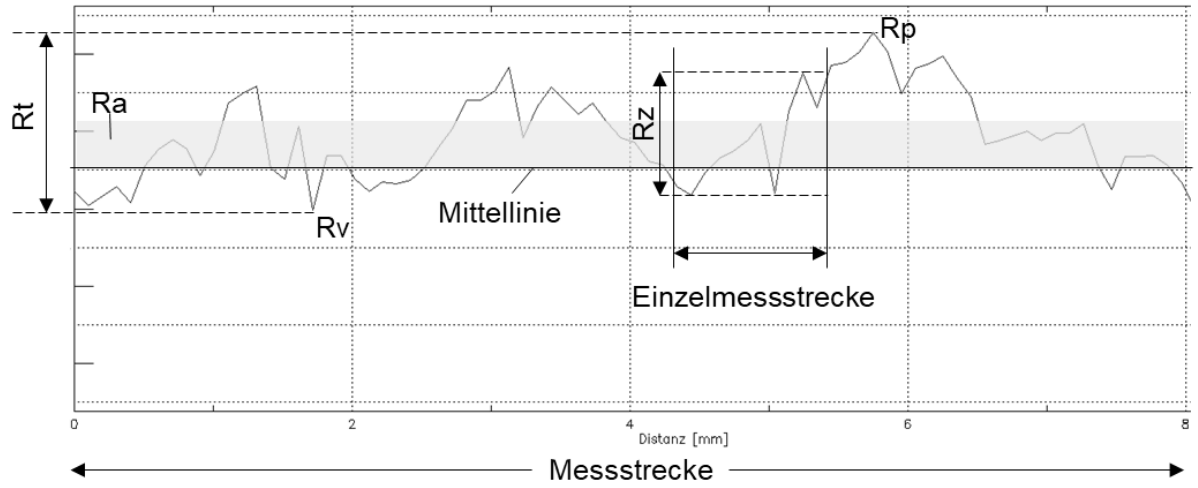


Abb. 19 FVK-relevante Rauheitskennwerte nach DIN EN ISO 4287 [80]. Rp = höchste Profilspitze, Rv = tiefstes Profiltal, Rt = Rp + Rv der gesamten Messstrecke, Rz = Summe höchste Spitze und tiefstes Tal einer definierten Einzelmesstrecke, die maximal der Messstrecke entsprechen kann (dann Rz = Rt), Ra = arithmetischer Mittelwert der Rauheit.

Wird das gleiche Profil nicht nach der Rauheit, sondern nach der Welligkeit gefiltert, entsteht das Profil aus Abb. 20. Die Kennwerte werden dann nicht mehr mit „R“ sondern „W“ abgekürzt, die Berechnungsweise und Bedeutung ist jedoch dieselbe.

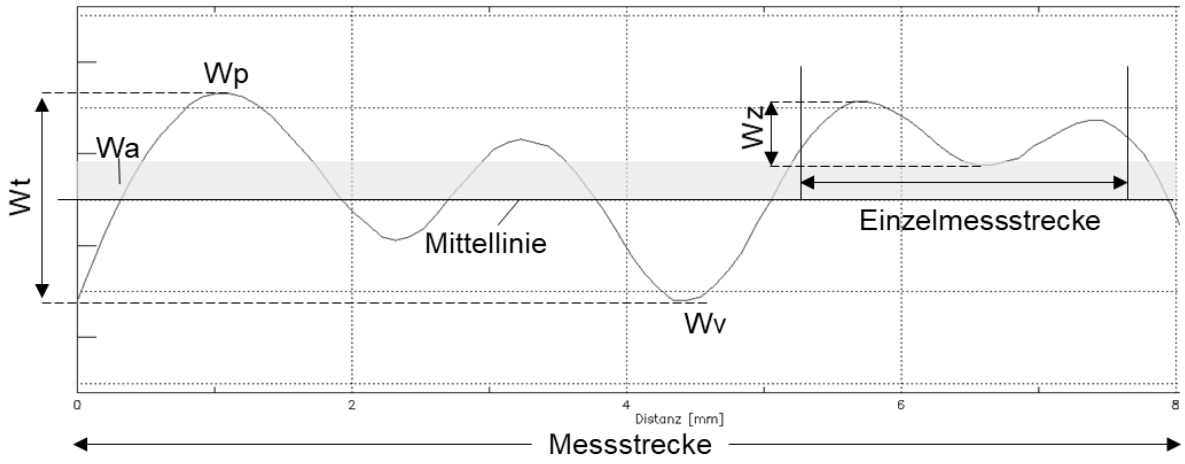


Abb. 20 FVK-relevante Welligkeitskennwerte nach DIN 4287 [80]. Wp = höchste Profilspitze, Wv = tiefstes Profiltal, Wt = Wp + Wv der gesamten Messstrecke, Wz = Summe höchste Spitze und tiefstes Tal einer definierten Einzelmesstrecke, die maximal der Messstrecke entsprechen kann (dann Wz = Wt), Wa= arithmetischer Mittelwert der Welligkeit.

Gerade bei Geweben, die ein periodisch wiederholendes Muster haben, ist der Kennwert Ra bzw. Wa im Vergleich zu Rt/Wt und Rz/Wz gut geeignet, da er vor allem auf die mittlere Amplitudenhöhe reagiert. Ra bzw. Wa ist der „arithmetische[r] Mittelwert der Beträge der Ordinatenwerte Z(x) innerhalb einer Einzelmessstrecke l“ [80] und entspricht der Fläche, die der Betrag der Profillinie über der Mittellinie einnimmt [80]:

$$Ra = Wa = \frac{1}{l}\int_0^l |Z(x)|dx$$

Das heißt

$$Ra = Wa = \frac{\sum_0^i |Z_1, \dots, Z_i|}{l}$$

Der Kennwert reagiert somit stark auf Amplitudenschwankungen, jedoch nicht auf Veränderungen der Wellenlänge.

Die Abb. 21 zeigt einen Vergleich von vier Sinuskurven, welche idealisiert der Profillinie eines Leinwandgewebes entsprechen könnten. Die Kurven unterscheiden sich in der Wellenlänge λ und der Amplitude y_0. Kurve 1 hat λ = 2 und y_0 = 2; Kurve 2 λ = 2 und y_0 = 4; Kurve 3 λ = 4 und y_0 = 2; Kurve 4 λ = 4 und y_0 = 4.

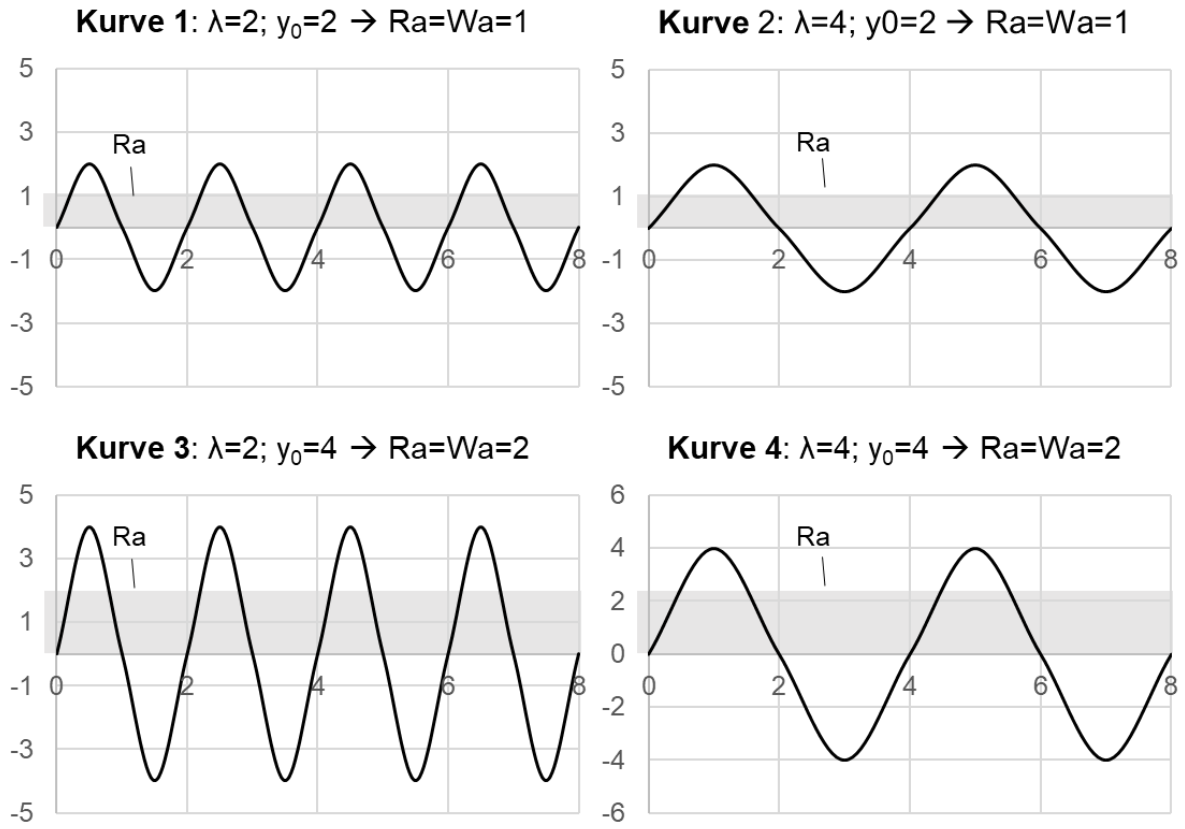


Abb. 21 Veranschaulichung der Reaktion des Kennwertes Ra bzw. Wa auf die Verdopplung der Wellenlänge λ (von links nach rechts) und der Amplitude y_0 (von oben nach unten). Eine Veränderung der Wellenlänge verändert den Kennwert nicht. Im Gegensatz dazu verdoppelt sich der Wert bei doppelter Amplitude.

Die Kurven 1 und 2 erzeugen trotz unterschiedlicher Wellenlänge gleichermaßen einen Ra bzw. Wa-Wert von 1. Hingegen verdoppelt sich der Ra bzw. Wa-Wert der Kurven 3 und 4 auf 2, da sie die doppelte Amplitude aufweisen. Eine Verdopplung der Wellenlänge verändert auch hier den Ra bzw. Wa-Wert nicht. Neben der Sensitivität auf Amplitudenschwankungen werden gerade bei einer großen Anzahl an Messpunkten pro Messstrecke einzelne, durch Prozess- bzw. Materialtoleranzen verursachte Ausreißer herausgemittelt und die vom Gewebe erzeugte periodische Faserdurchzeichnung kann ermittelt werden.

Hierfür wird allerdings ein essenzieller Schritt benötigt: die Filterung des Primärprofils, um tatsächlich den Effekt der Faserdurchzeichnung zu messen und andere Effekte zu unterdrücken. Hochalter et al. haben über eine spektrale Leistungsanalyse die Hauptwellenlänge der Faserdurchzeichnungen des von ihnen geprüften Textils charakterisiert und den Bereich von λs=2,26µm bis λc=1,0mm gewählt. Damit wurde die gesuchte Wellenlänge herausgefiltert und die untersuchten Material- und Prozesseinflüsse konnten gezielt ausgewertet werden. Da die geprüften Textilien sehr fein waren, wurde in diesem Fall von einer Rauheit gesprochen. [45]

Schubel et al. verwenden in [55] auch einen Filter bei der Auswertung von Profildaten. Allerdings wird aufgrund der Fokussierung auf die Rauheit ein „Cut-off“ der Wellenlängen bei

λc = 0,8mm durchgeführt. Dieser Cut-off Wert wurde auch bei wechselnden Textilien (3k, 6k, 12k Köper und SMC) nicht angepasst, weshalb der Einfluss, der mit steigender Filamentanzahl gröberen und damit langwelligen Textilien nicht sicher ermittelt werden konnte. Die Übertragung verschiedener Werkzeugrauheiten konnte jedoch aufgrund der dafür korrekten Filterung sehr zuverlässig ermittelt werden. Schubel et al. haben gezeigt, dass für ein Class-A Bauteil keine spiegelglanzpolierten Werkzeuge notwendig sind. [55]

Hildebrandt et al. haben 2015 den Einfluss des textilen Halbzeugs auf die Oberflächenqualität erforscht. Es wurden verschiedene Filamentdurchmesser und Maschenweiten sowie deren Einfluss auf die Oberflächentopografie im konsolidierten Bauteil untersucht. Vermessen wurden die Proben mit einem Weißlicht Profilometer FRT MicroProf mit CWS Sensor. Für die Auswertung wurde festgelegt, dass die Cut-Off Wellenlänge λc 90% der theoretischen Wellenlänge der jeweiligen Textilstruktur entspricht. Aufgrund der Kennwerte Wz und Wz25 ist davon auszugehen, dass die Wellenlängen >λc betrachtet werden. Auf Basis der Ergebnisse konnte zum einen bestätigt werden, dass das Textil nicht nur einen Einfluss auf das Muster hat, sondern wie die Matrix, auch auf die Ausprägung der Faserdurchzeichnung. Zum anderen wurde ein variothermes Prozessmodell für Organobleche über die Quantifizierung von Faserdurchzeichnungen mit physikalischen Kennwerten validiert und optimiert. Trotz der Möglichkeiten der verwendeten FRT MARK III Software wurde die Oberflächentopografie über Profile und nicht flächig ausgewertet. [82]

Kunze et al. haben 2016 mit einem Weißlichtinterferometer den Einfluss von Faservolumengehalt, Halbzeugart, Prozesstemperatur, Füllstoffkonzentration (SiO2) und einem Gelcoating für CFK Bauteile untersucht. Es wird zwischen Rauheit und Welligkeit unterteilt. Allerdings wird die Welligkeit mit einem WaveScan von BYK Gardner untersucht und die Rauheit mit einem Weißlichtinterferomter (Ra und Rq). Auch Kunze et al. bestätigen den Einfluss von Textilarchitektur, Schrumpfverhalten der Matrix, Prozesstemperatur und nachträglichen Beschichtungen durch einen Gelcoat auf die Oberflächenqualität. [48] Jedoch ist zu beachten, dass sehr extreme Einstellungen/Parameter gewählt wurden, die schon visuell zu stark unterschiedlichen Ergebnissen führen und nicht zwangsläufig eine messtechnische Bestätigung erfordern. Die tatsächlich zu detektierenden Qualitätsunterschiede bei Class-A CFK Bauteilen sind deutlich feiner und bei Zwischenprodukten visuell schwieriger zu differenzieren, was zu höheren Anforderungen bei der Messung und Auswertung führt.

Einfluss des Profilfilters auf das Messergebnis

Wie aufgezeigt, sind Kennwerte wie Ra oder Wa amplitudensensitiv, jedoch nicht wellenlängenabhängig. Der Profilfilter verändert jedoch neben der Wellenlänge auch die Amplitude. Daher ist eine Filterung der Oberfläche nach dem relevanten Wellenlängenspektrum essenziell, um korrekte Kennwerte zu erzeugen.

Um die Wichtigkeit, Profilfilter richtig anzuwenden und bei der Profilauswertung immer mit anzugeben, herauszustellen, wird in Abb. 22 derselbe Ausschnitt eines CFK Bauteils mit verschiedenen Filtereinstellungen nach DIN EN ISO 4287 ausgewertet. Dabei wird als Übergang von Rauheit zu Welligkeit jeweils der Cut-Off bei der Wellenlänge λc gewählt. Wird der Wert der Rauheit Ra angegeben, werden die Wellenlängen < λc betrachtet, bei der Welligkeit Wa sind es die Wellenlängen > λc.

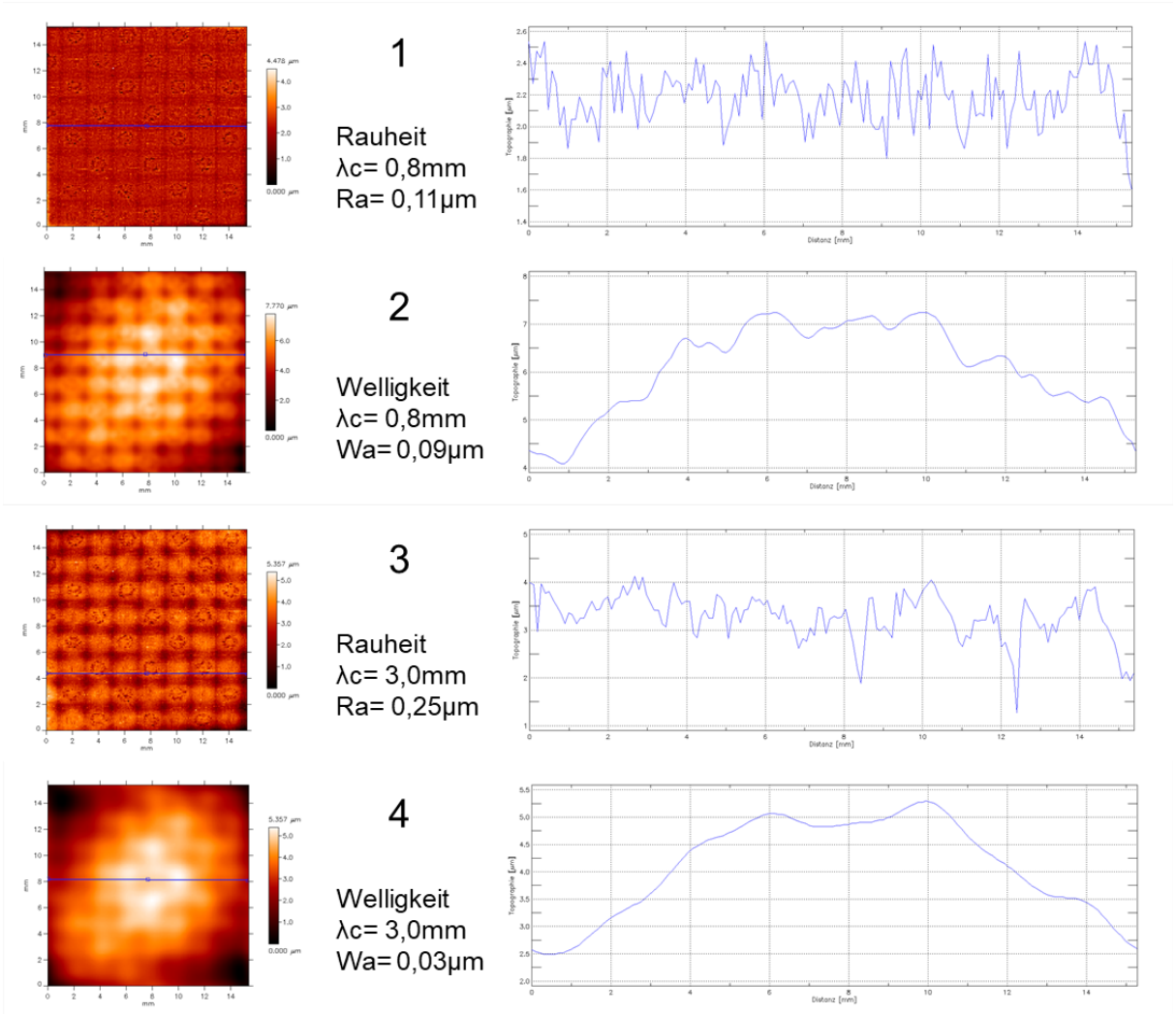


Abb. 22 Einfluss der Filtereinstellung bei der Auswertung von Profilmessungen eines CFK Bauteils mit 3k Leinwand Sichtlage aufgenommen mit einem FRT MicroProf 200. Bild 1 und 3 gefiltert nach Rauheit (Ra), Bild 2 und 4 nach Welligkeit (Wa). Zudem wurde bei Bild 1 und 2 der Cut-Off Filter bei λc= 0,8mm gesetzt und bei Bild 3 und 4 λc= 3,0mm. Alle vier Ergebnisse desselben Ausschnitts unterscheiden sich sowohl in den Kennwerten als auch visuell deutlich.

Die Messdaten im oberen Abschnitt 1 der Abb. 22 werden nach der Rauheit gefiltert, sodass alle Wellenlängen größer λc=0,8mm ausgeblendet werden. Abschnitt 2 hat denselben Cut-off von λc=0,8mm, allerdings werden nur Wellenlängen ausgewertet, die größer λc sind (Welligkeit). Abschnitt 3 und 4 sind analog, allerdings mit einem λc=3,0mm. Zu beachten ist, dass es sich in Abb. 22 immer um dieselbe Messung und denselben Ausschnitt handelt. Trotzdem ergeben sich sowohl in den Kennwerten Ra bzw. Wa als auch bei Betrachtung der Profillinie unterschiedliche Ergebnisse. Es ist daher empfehlenswert, den Auswertebereich bewusst zu definieren, da ansonsten die Analysesoftware der Messgerätehersteller die Grenzen selbstständig und eventuell falsch setzen könnte.

Einfluss der Messposition auf das Messergebnis

Wie schon Blinzler 2002 schrieb, ist es problematisch, aus der Eigenschaft einer Linie auf die Charakteristik einer Fläche zu schließen. Hierbei können sich Fehler bei der Erhebung, Auswertung und Interpretation der Daten ergeben. [16]

Abb. 23 zeigt den Einfluss der Linienposition und Messrichtung bei der Auswertung von Profilen nach DIN EN ISO 4287 auf derselben Probe.

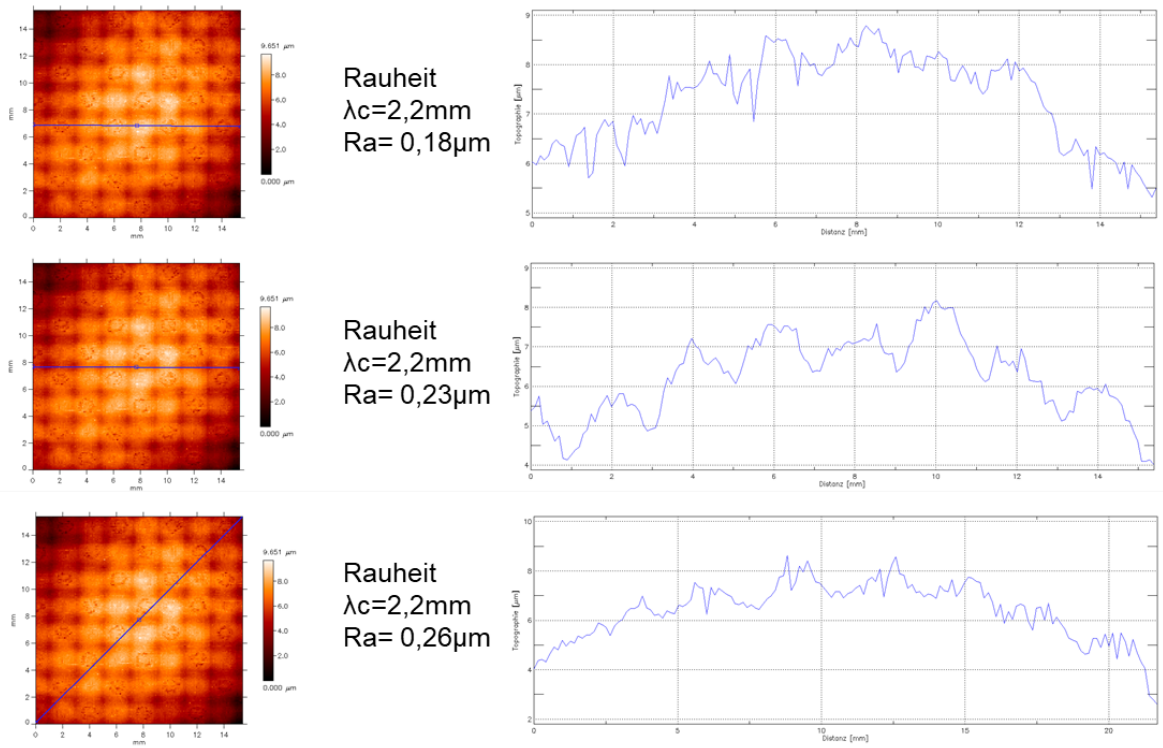


Abb. 23 Einfluss der Messposition: Profilmessungen eines CFK Bauteils mit 3k Leinwand Sichtlage mit einem FRT MicroProf 200. Trotz derselben Filtereinstellung nach DIN EN ISO 4287 in allen drei Bildern, ist sowohl visuell auf der rechten Seite als auch an den Ra-Kennwerten ein deutlicher Unterschied zu erkennen. Der Unterschied zwischen dem oberen Bild (Ra=0,18µm) und dem unteren (Ra=0,26µm) beträgt ca. 44%.

Auch in diesem Beispiel wurde immer wieder dieselbe Messung ausgewertet. Die Schwankung der Ra-Werte der Profillinienmessung beträgt nur durch Veränderung der Messrichtung bei einem Ausschnitt von 15 x 15 mm bereits ca. 44%. Berücksichtigt man, dass es neben Textil- und Bauteiltoleranzen bei einer solch kleinen Fläche für das menschliche Auge kaum möglich ist, die Welligkeiten durch Faserdurchzeichnungen als solche aufzulösen, ist eine Korrelation der Ergebnisse einer Profillinienauswertung mit der visuellen Wahrnehmung größerer Flächen nicht sicherzustellen. Weiter ist ein signifikanter Unterschied zwischen verschiedenen Bauteilen nur sicher messbar, wenn diese sich deutlich stärker voneinander unterschieden als die Messungenauigkeit innerhalb eines Bauteils. Die Unterschiede sind dann jedoch so groß, dass sie mit Leichtigkeit von jeder Testperson erkannt werden, und somit keine Messmittel nötig sind. Ein Lösungsweg, die Schwankung der Messergebnisse auszugleichen, ist eine ausreichende Menge an Messungen, die gemittelt werden, wie es Müller et al. bei dem Linienscan mit dem WaveScan ebenfalls vorschlagen. [53] Da jedoch in den neuesten Arbeiten durchweg Messsysteme eingesetzt werden, die flächenhaft messen und auswerten können [6, 18, 47, 54, 83, 84], bietet es sich an, nach der DIN EN ISO 25178-2 direkt Flächen auszuwerten, anstatt etliche Linienmessungen durchzuführen.

DIN EN ISO 25178-2:2012

Die DIN EN ISO 25178 ist die neueste Normenreihe der Geometrischen Produkt Spezifikationen (GPS). Der 2012 veröffentlichte Teil 2 enthält Begriffe und Kenngrößen für die flächenhafte Charakterisierung von Oberflächentopografien. Mit Hilfe der Kenngrößen ist es möglich, die 3D-Profildaten aus modernen Oberflächentopografiemessgeräten standardisiert auszuwerten. Die Kennwerte basieren auf den bekannten Kenngrößen der Profillinien-auswertung, beziehen sich jedoch auf ganze Flächen und nicht Linien. Die Kennwerte werden anstatt mit R oder W mit dem Buchstaben S für Surface abgekürzt. Der für diese Arbeit wichtigste Kennwert der Norm ist Sa. [85]

Sa ist der „arithmetische Mittelwert der absoluten Ordinatenwerte innerhalb des Definitionsbereichs“ [85] und damit das flächige Pendant zu Ra und Wa. Grundsätzlich ist die Berechnung ähnlich, allerdings wird ein Doppelintegral auf die Definitionsfläche bezogen [85]:

$$Sa = \frac{1}{A}\iint_A |z(x,y)|dxdy$$

Auch der Sa-Wert ist amplitudensensitiv und vor allem für periodische Oberflächenmuster, wie Faserdurchzeichnungen von Geweben, geeignet. Das Filtern der Messdaten funktioniert

analog den Profilfiltern aus der DIN EN ISO 4287, allerdings werden hierbei andere Abkürzungen verwendet. Es wird eine sogenannte skalenbegrenzte Oberfläche erzeugt, wobei der „S-Filter“ laterale Anteile kleiner Skala (Cut-Off von kleineren Wellenlängen) entfernt. Der „L-Filter“ hingegen entfernt laterale Anteile großer Skala (Cut-Off von größeren Wellenlängen). Der „F-Operator“ entfernt Formanteile der Primärfläche, wird in dieser Arbeit jedoch nicht eingesetzt. In dieser Arbeit wird nur der S- und L-Filter verwendet, was laut Norm DIN EN ISO 25178-2:2012 als „skalenbegrenzte S-L-Oberfläche“ bezeichnet wird. [85]

Aufgrund der flächenhaften Auswertung ist es möglich deutlich größere Messbereiche in einem Schritt auszuwerten. Dies hat zum einen den Vorteil, dass technisch nicht zu verhindernde Material- und Prozesstoleranzen über eine größere Fläche ausgemittelt werden können, was stabilere Kennwerte erzeugt. Zum anderen vereinfacht es die Korrelation zu visuellen Wahrnehmung von Oberflächen, weil es möglich ist den identischen Bereich von beispielsweise Class-A Oberflächen visuell und quantitativ zu bewerten. Der Kennwert Sa ermöglicht in Verbindung mit nicht berührenden Messsystemen, wie dem Weißlicht Profilometer oder der Lasertriangulation, die Oberflächentopografie vom trockenen Textil über beharzte Rohteile bis hin zu lackierten Endbauteilen zu quantifizieren.

2.7. Fazit

Der Trend Leichtbau mit Class-A CFK Bauteilen in Sichtoptik emotional zu inszenieren, nimmt weiter zu. Der Begriff Class-A steht in der Automobilindustrie für dekorative Bauteile mit einer sehr hohen Oberflächenqualität, ist jedoch nicht definiert, weshalb die resultierenden Ansprüche markt- und segmentabhängig sind. Folglich erfüllt ein CFK Bauteil die Class-A Anforderungen, wenn es im eingebauten Zustand mindestens die Oberflächenqualität der angrenzenden Bauteile erreicht. Je nach Qualitätsanspruch, geometrischer Komplexität und Stückzahl sind für das Herstellen von Class-A CFK Bauteilen unterschiedliche Prozesse wirtschaftlich. Für Kleinserien mit geringen Stückzahlen werden vor allem Prozesse mit günstigen Werkzeugen und hohem Anteil an manueller Arbeit bevorzugt, da bei geringem Einmalaufwand eine hohe Flexibilität in Bezug auf das Design und die Bauteilgeometrie erreicht wird. Eine Stückzahlerhöhung ist in diesem Fall nur durch das simultane Fertigen von Bauteilen in mehreren Werkzeugen gleicher Geometrie möglich.
Für eine Großserienfertigung sind hingegen hochautomatisierte Prozesse mit massiven, beständigen und gleichzeitig teureren Werkzeugen notwendig. Es werden mit einem Werkzeug Stückzahlen deutlich über 10.000 Einh./Jahr erreicht, was aufgrund der Kostendegression eine höhere Investition in Werkzeuge und Anlagentechnik ermöglicht. Gleichzeitig sind bei Großserienprozessen die geometrische Komplexität und Designfreiheit aufgrund der automatisierten Abläufe stärker eingeschränkt. Für die Herstellung duromerer Class-A CFK Bauteile mit Großserienstückzahlen eignen sich hauptsächlich Varianten des RTM-Verfahrens und das Nasspressverfahren. Die erreichbaren Stückzahlen werden im Vergleich zu Strukturbauteilen, trotz der Fertigung in denselben Produktionsanlagen, durch die hohen Anforderungen an Class-A Oberflächen stark eingeschränkt. Für Faserverbundbauteile liegt dabei die größte technische Herausforderung in dem Vermeiden oder Ausgleichen von Faserdurchzeichnungen.
Faserdurchzeichnungen sind Gestaltabweichungen an der Oberfläche von Faserverbund-kunststoffen. Trotz zahlreicher Forschungsarbeiten in verschiedenen Fachgebieten ist der Begriff selbst nicht normiert, weshalb es gerade im englischen Sprachgebrauch eine Vielfalt an Bezeichnungen für dasselbe Phänomen gibt. Da die Gestaltabweichung das Muster der eingebetteten Textilstruktur aufweist, und somit aus dem Inneren des Bauteils kommt, ist der Begriff Faserdurchzeichnung oder Englisch Fiber Print-Through die treffendste Beschreibung. Bei Mehrschichtverbunden können primäre Faserdurchzeichnungen der Sichtlage (engl. Primary Print-Through, kurz PPT) und sekundäre Faserdurchzeichnungen tieferliegender Textillagen (engl. Secondary Print-Through, kurz SPT) unterschieden werden. Aufgrund des sich wiederholenden Musters und der Wellenlänge der Faserdurchzeichnungen sind diese für

das menschliche Auge auch bei Abzeichnungstiefen im einstelligen Mikrometerbreich sehr gut wahrnehmbar.

Das Merkmal selbst wird durch textilstrukturbedingte Schwankungen des Faservolumengehalts entlang der Bauteiloberfläche und die unterschiedlichen physikalischen und chemischen Eigenschaften von Faser und Matrix hervorgerufen. Bei Hochdruckprozessen wie dem Nasspressverfahren begrenzt vor allem der Delta-α_T Effekt, also der unterschiedliche thermische Ausdehnungskoeffizient α_T von Matrix und Faser, die Produktivität. Die im Vergleich zur Faser deutlich stärkere Ausdehnung der Matrix schränkt die für kürzere Aushärtezeiten benötigte Werkzeugtemperatur ein, da ansonsten die Ausprägung der Faserdurchzeichnung zu stark werden würde.

Um die Class-A Anforderungen zu erreichen, ist bisher in jedem Fall eine nachträgliche Oberflächenveredelung in Form einer Lackierung notwendig. Bei Kleinserienprozessen kann die manuelle Lackierung mit Zwischenschliffen wirtschaftlich sein. Durch den manuellen Prozess kann auch eine schwankende Rohbauteilqualität ausgeglichen werden und die Anlagentechnik erfordert keiner hohen Investition. Für Großserienprozesse sind jedoch automatisierte Lackieranlagen und definierte Oberflächeneigenschaften der Rohbauteile erforderlich, um hohe Stückzahlen erreichen zu können. Aufgrund der zu hohen Ofentemperaturen (>145°C) in der Karosserielacklinie, werden Class-A CFK Bauteile offline auf speziell ausgelegten Lacklinien beschichtet und bei Ofentemperaturen <90°C ausgehärtet. Dies hat zur Folge, dass für im Nasspressverfahren hergestellte Class-A CFK-Dächer die automatisierte Oberflächenveredelung mit etwa 35% einen größeren Anteil an den Gesamtherstellkosten hat als die Bauteilherstellung (20%) selbst. Die restlichen 45% entfallen auf die speziell für Class-A Bauteile entwickelten und mit engen Toleranzen spezifizierten Carbonfaser Halbzeuge.

Aufgrund der hohen Anforderungen und Kosten werden verschiedene Bewertungsmethoden eingesetzt, um kostenoptimierte Bewertungsgrenzen für die Ausprägung der Faserdurchzeichnung von Class-A CFK Bauteilen zu ermöglichen. Am weitesten verbreitet sind dabei die visuelle Beurteilung durch einen Experten/Auditor und der Einsatz von Messmitteln der lackierten Karosserie (z.B. BYK WaveScan). Bei Forschungsarbeiten werden zudem Messmethoden zur Quantifizierung der Oberflächentopografie mit normierten physikalischen Kennwerten eingesetzt. Hierbei wird unabhängig von der Messmethode durchgehend die sog. Profillinienauswertung auf Basis der DIN EN ISO 4287 mit Rauheitskennwerten wie Ra, Rz herangezogen. Einige Arbeiten verwenden aufgrund der sich periodisch wiederholenden Form der Faserdurchzeichnungen Welligkeitskennwerte wie Wz und Wz25. Eine flächenhafte Auswertung von 3D-Topografiedaten nach DIN EN ISO 25178-2 wurde noch nicht beschrieben.

Allen Ansätzen zur Bewertung der Oberflächentopografie gemein ist der Fokus auf dem Endzustand des Produkts. Die Welligkeit oder Faserdurchzeichnung von Zwischenprodukten wird nur visuell bewertet. Da die jeweiligen Prozessschritte eines Class-A CFK Bauteils unterschiedlichen Technologien zuzuordnen sind (Textiltechnik, Faserverbundherstellung, Oberflächenveredelung), ist es bei der reinen Bewertung des Endprodukts jedoch sehr schwierig, die Wirkzusammenhänge klar voneinander zu trennen. Die Toleranzen von Vor- oder Folgeprozessen können den Einfluss auf die Endbauteilqualität bei der Auswertung von Optimierungsansätzen überlagern. Dies führt zu einer gewissen Unschärfe bei der Evaluierung von Material- und Prozesseinflüssen, was das Ausschöpfen von Optimierungspotentialen einschränkt.

3. Zielsetzung und Vorgehensweise

Diese Arbeit trägt dazu bei, ein tiefergehendes Verständnis der material- und prozesstechnischen Wirkzusammenhänge bei der großserientechnischen Herstellung von duromeren Class-A Sichtcarbon Komponenten im Automobilbau zu erreichen. Als Zielbauteil wird ein im Nasspressverfahren produziertes Class-A CFK-Dach in Sichtoptik mit vergleichsweise großer Fläche und geringer geometrischer Komplexität gewählt. Hierfür wird ein mit ebenen Messflächen und Messtechnik ausgestattetes Nasspress-Versuchswerkzeug verwendet, welches das CFK-Dach des BMW 8er G15 im Maßstab 1:2 abbildet. Die interdisziplinäre Prozesskette (Textiltechnik, Polymerchemie, Faserverbundherstellung, Oberflächenveredelung) dieses Class-A CFK Bauteils wird dabei als Ganzes betrachtet. Ziel ist es, neue Wege zu finden, die eingesetzten Material- und Prozessparameter kostenoptimal aufeinander abzustimmen. Dabei werden in dieser Arbeit drei Hauptziele verfolgt:

1. Entwicklung einer Prüfmethode zur flächenhaften Quantifizierung der Ausprägung von Faserdurchzeichnungen entlang der gesamten Prozesskette eines Class-A CFK Bauteils.
2. Erhöhung der Produktivität (Output) durch die gezielte Abstimmung von Material- und Prozessparametern bei gleichbleibender Bauteilqualität (Oberflächenglätte).
3. Reduzierung der Herstellkosten durch die Prozessintegration von Trennfolien und den damit verbundenen Entfall von kostenintensiven Lackvorbehandlungsschritten.

Dafür werden in Kap. 4 die Einflussgrößen auf die Oberflächenglätte von Class-A CFK Bauteilen im Nasspressprozess zunächst auf Basis bisheriger wissenschaftlicher Arbeiten und Erkenntnissen aus der Produktionsumgebung theoretisch betrachtet. Dabei werden bisherige Optimierungsansätze auch aus angrenzenden Verfahrensvarianten aufgeteilt nach den relevanten Prozessschritten diskutiert.
In Kap. 5 wird nach der detaillierten Beschreibung der untersuchten Prozesskette, die im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Prüfkette ausführlich erläutert. Sie ermöglicht es die Oberflächentopografie der Zwischenprodukte entlang der Prozesskette mit demselben Kennwert zu charakterisieren. Erst die entwickelte Mess- und Analysemethodik ermöglicht es den Einfluss von Material- und Prozessparametern direkt an der Stelle zu messen, an der sie tatsächlich wirken. Abgeleitet aus den Erkenntnissen der entwickelten Prüfmethodik werden Class-A Grenzwerte für die Oberflächenwelligkeit der jeweiligen Zwischenprodukte abgeleitet. Somit kann für die beschriebene Prozesskette in jedem Prozessschritt bzw. nach jeder Optimierungsmaßnahme eine Vorhersage getroffen werden, ob das Endbauteil die Class-A Oberflächenanforderungen erfüllen wird. Abschließend wird das für diese Arbeit entwickelte

Modell eines repräsentativen Volumenelements für die Simulation der Oberflächenwelligkeit eines Class-A CFK-Dachausschnitts beschrieben. Das repräsentative Volumenelement besteht dabei aus dem Anteil des Serienharzsystems und dem Anteil des Serienlagenaufbaus eines CFK-Dachs, das im Nasspressverfahren hergestellt wird.

In Kap.6 wird untersucht, ob durch das Optimieren eines Textilparameters der Gewebesichtlage die Zykluszeit beim Nasspressverfahren reduziert werden kann. Dies würde eine Produktivitätssteigerung bei gleichbleibender Oberflächenqualität ermöglichen. Der Einfluss des Textilparameters auf die Oberflächentopografie wird dabei angefangen bei der simulativen Betrachtung, über das textile Halbzeug bis hin zum CFK Bauteil mit demselben Kennwert quantifiziert. Somit könnte über eine Textileingangsgröße am Anfang der Gesamtprozesskette über alle relevanten Zwischenzustände hinweg nicht nur eine Korrelation zu Endbauteileigenschaften, sondern auch zu einer betriebswirtschaftlichen Kenngröße erzeugt werden. In einem weiteren Schritt wird untersucht, inwieweit es möglich ist Rohbauteile, die die Class-A Grenzwerte überschreiten, durch eine nachträgliche Beschichtung zu Class-A Bauteilen zu veredeln. Dies würde es ermöglichen, Class-A CFK Bauteile bei Temperaturen und Zykluszeiten von Strukturbauteilen zu fertigen, was eine deutliche Produktivitätssteigerung zur Folge hätte. Hierbei verhilft die entwickelte Prüfmethodik zu einer quantifizierten Vergleichbarkeit von Veredelungsverfahren in Abhängigkeit des Rohbauteilzustands. Zielgrößen sind damit (a) die erreichbare Oberflächenglätte ausgedrückt in einem Kennwert der Oberflächentopografie Sa und (b) das gleichzeitig erreichbare Produktionsvolumen.

In Kap. 7 wird untersucht, ob eine bewusste Erhöhung des Aufwands in einem der Prozessschritte genutzt werden kann, um die Gesamtherstellkosten durch den Entfall von definierten Folgeprozessschritten zu reduzieren. Da durch eine Prozessintegration immer eine Erhöhung des Aufwands in einem der Prozessschritte stattfindet, ist diese nur dann sinnvoll, wenn dadurch in einem vorherigen oder nachfolgenden Prozessschritt ein insgesamt größeres Einsparpotential gehoben wird. Betrachtet wird eine Prozesskettenverkürzung durch die Prozessintegration von Trennfolien bei der Rohteilherstellung. Durch den Einsatz der Trennfolien kann das sonst für die Entformung benötigte Trennmittel entfallen. Die Folie wird dabei vor dem eigentlichen Nasspress Prozess als temporäre Werkzeughaut tiefgezogen. Der Nasspress Prozess findet nach dem Tiefziehen der Folien unverändert und ohne Taktzeitverlust statt. Die Folien verbleiben nach dem Aushärten der Matrix auf dem Bauteil und dienen bis zur Lackierung/Verklebung als Schutzverpackung. Es soll das Potential geprüft werden, bei gleichbleibender Bauteilqualität die kostenintensive Lack-/Klebevorbehandlung einzusparen und gleichzeitig das Prozessfenster des Harzsystems voll auszuschöpfen.

4. Theoretische Betrachtung der Einflussgrößen auf die Oberflächenglätte von Class-A CFK Bauteilen im Nasspressprozess

Class-A CFK Karosseriebauteile, wie das Sichtcarbon Dach (Abb. 24), ermöglichen es, performancesteigernden Leichtbau als kundenwirksames Designelement zu inszenieren. Class-A Karosseriebauteile müssen dabei neben der Erfüllung mechanischer Anforderungen vor allem auch den optischen Ansprüchen der jeweiligen Kundenzielgruppe entsprechen und wirtschaftlich sinnvoll produzierbar sein. Im Segment der Premium Automobile mit Stückzahlen >10.000 Einheiten pro Jahr bedingt das sehr glatte, makellose Oberflächen bei gleichzeitigem Fokus auf einer kosteneffizienten Produktion.

Abb. 24 BMW F82 M4 mit serienmäßigem Class-A CFK-Dach in Sichtoptik [3, 6, 64]. Stückzahl ca. 10.000 Einheiten/Jahr und ca. 56.000 Einheiten über Laufzeit [86].

Ein häufig auftretendes Merkmal, das die Oberflächenanmutung von CFK Bauteilen stört, sind Faserdurchzeichnungen an der Bauteiloberfläche. Sie entstehen durch die unterschiedlichen physikalischen und chemischen Eigenschaften von Faser und Matrix und zeichnen sich im Muster des eingebetteten Textils ab. Aufgrund der textilbedingten Schwankungen des Faservolumengehalts entstehen dabei an matrixreichen Bereichen Einfallstellen, die zu sichtbar unebenen Oberflächen führen (siehe auch Kap. 2.5). Im Folgenden werden die Stellhebel und Einflussgrößen auf die Oberflächentopografie entlang der Prozesskette für im Nasspressverfahren hergestellte Class-A CFK Bauteile in Sichtoptik theoretisch betrachtet. Neben dem Einfluss auf die Oberflächenglätte wird auch das damit einhergehende Kostenpotential von Lösungsansätzen diskutiert. Analog zur Prozesskette wird in Kap 4.1 der Einfluss der textilen Halbzeuge und in Kap. 4.2 der Einfluss des Harzsystems und der Prozessparameter auf die Ausprägung der Faserdurchzeichnungen eines

Faserverbundbauteils beschrieben. In Kap. 4.3 werden die bekannten Varianten einer nachträglichen Oberflächenveredelung durch Beschichtungen dargestellt und diskutiert. Zum Abschluss der theoretischen Betrachtung der Einflussgrößen auf die Oberflächenglätte von Class-A CFK Bauteilen werden in Kap. 4.4 die etablierten und hierfür relevanten Methoden zur numerischen Vorhersage der Oberflächentopografie vorgestellt.

4.1. Einfluss der textilen Halbzeuge auf die Oberflächenglätte

Eine ausgeprägte Faserdurchzeichnung verringert die Oberflächenqualität von Class-A CFK Bauteilen. Die Ausprägung und Wellenlänge der Faserdurchzeichnung von CFK Bauteilen hat einen direkten Einfluss auf den Aufwand, eine Class-A Oberfläche über eine nachträgliche Lackierung zu erzeugen. Die Textilart bestimmt dabei den Anteil und die Lokalisierung von faserreichen und matrixreichen Regionen im CFK Bauteil und damit das Muster und die Ausprägung der Faserdurchzeichnung. Um perfekte Class-A Oberflächen erzeugen zu können, müssen sehr feine textile Halbzeuge eingesetzt werden. Diese hohen Anforderungen machen das ohnehin kostenintensive C-Fasermaterial noch teurer. [30] Je nachdem welche Textillage des Stacks sich an der Oberfläche abzeichnet, kann der Effekt in primäre Faserdurchzeichnung der Sichtlage (primary print-through, kurz PPT) oder sekundäre Faserdurchzeichnung innerer Lagen (secondary print-through, kurz SPT) unterteilt werden. (siehe auch Kap 2.5) Nachfolgend werden die textilen Einflussgrößen auf Faserdurchzeichnungen beschrieben und mögliche Stellhebel aufgezeigt.

Einfluss der Textilqualität auf Primary Print-Through (PPT) der Sichtlage

Als Sichtlage kommen für Faserverbundbauteile verschiedene Textilarten wie Vliese, Gewirke oder Gewebe in Frage. [87] Jede Textilart verursacht dabei an der Bauteiloberfläche eine charakteristische Faserdurchzeichnung mit einem spezifischen Muster. [15] Für Class-A Sichtcarbonbauteile werden aufgrund ihrer optischen Anmutung üblicherweise Gewebe eingesetzt, obwohl die bindungsartabhängigen Ondulationen die mechanischen Eigenschaften im Vergleich zu anderen Textilarten verringern. [6]

Nach DIN 61101 sind Gewebe textile Flächengebilde, die durch die Verkreuzung von Kettfäden und Schussfäden (meist im 90° Winkel) entstehen. Als Kettfäden oder kurz Kette werden jene Fäden bezeichnet, die längs zur Warenlaufrichtung verlaufen. Schussfäden (Schuss) verlaufen quer zur Kette. Die Anzahl an Kett- bzw. Schussfäden pro cm wird als Fadendichte bezeichnet. Die Art der Verkreuzungsreihenfolge wird als Bindung bezeichnet. Es werden drei Grundbindungsarten unterschieden: Leinwandbindung, Köperbindung, Atlasbindung. [88]

Für Class-A CFK-Bauteile werden überwiegend Sichtlagen aus Leinwand- und Köpergewebe eingesetzt. Bei kleinen Stückzahlen wie im Motorsport und bei dekorativen Anbauteilen mit komplexen Geometrien wird aufgrund der guten Drapierbarkeit zumeist das Köpergewebe verwendet. Für automatisierte Prozessketten wie beim RTM- oder Nasspressverfahren eigenen sich dagegen Leinwandgewebe aufgrund der hohen Verschiebstabilität durch maximal mögliche Anzahl an Verkreuzungen der Kett- und Schussfäden besser. [89] Die hohe

Bindungsanzahl stabilisiert das Gewebe bei der Verarbeitung zu Stacks und verhindert so einen Gewebeverzug.

Die Wellenlänge und Amplitude der Faserdurchzeichnung einer bestimmten Gewebesichtlage wird durch den Durchmesser und die Querschnittsgeometrie der eingesetzten Rovings und die Maschenweite (Abstand zwischen zwei Kett- bzw. Schussfäden) bei der Gewebeproduktion beeinflusst. Die Abb. 25 zeigt den Einfluss der Rovingbreite und der Maschenweite auf das Textilmuster eines Leinwandgewebes und das resultierende Oberflächenprofil.

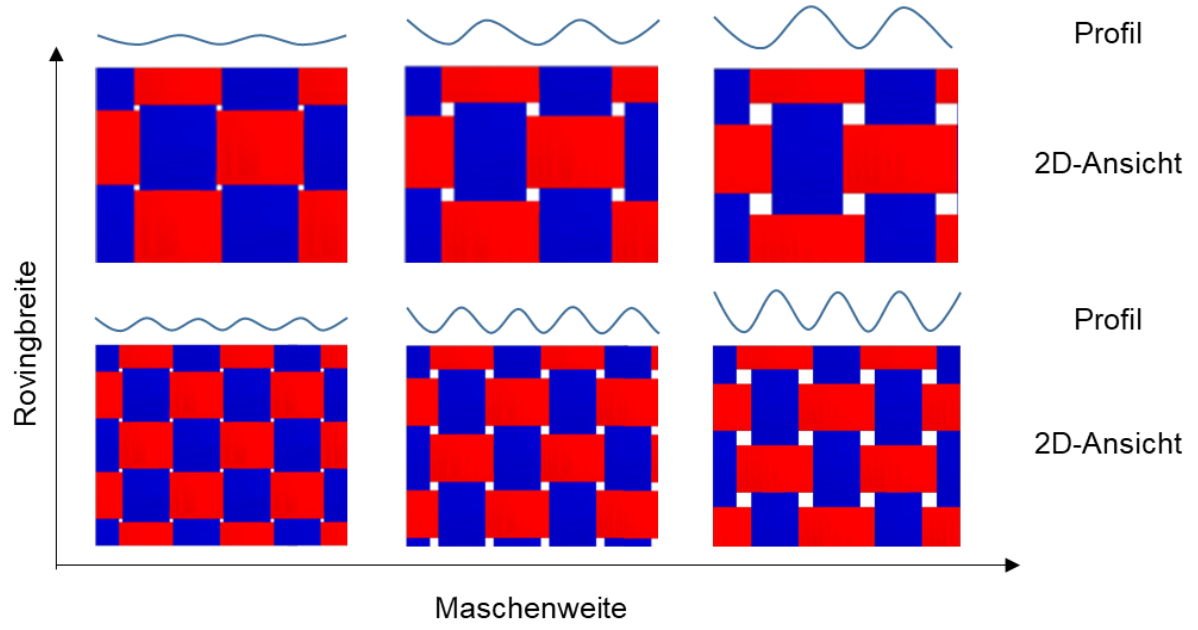


Abb. 25 Veränderung der Textiloberfläche in Abhängigkeit der Rovingbreite und Maschenweite. Je breiter der Roving, desto größer die Wellenlänge der Faserdurchzeichnung. Je lockerer das Gewebe, desto höher die Amplitude des Profils und somit welliger die Oberfläche.

Die Breite kann bei Carbonfaser-Rovings dabei durch eine unterschiedliche Filamentanzahl oder eine Änderung des Höhe-Breite-Verhältnisses (Roving Aspect Racio – kurz RAR) beeinflusst werden. Eine Möglichkeit den RAR zu verändern ist das Spreizen des Rovings. Je stärker ein Roving gespreizt wird, desto breiter und flacher wird er. Die Maschenweite kann zudem über die Fadendichte (Fäden pro cm oder Fd/cm) von Kette und Schuss verändert werden. Dies zeigt auch die Arbeit von Hildebrandt et al., in der mit Stahldrähten verschiedener Durchmesser der Einfluss der Fadengeometrie und Maschenweite von Geweben auf die Oberflächendurchzeichnung im Verbundbauteil untersucht wurde. Es wurde beobachtet, dass mit steigendem Draht- bzw. Fadendurchmesser (kreisförmig) und steigender Maschenweite (sinkende Webdichte) die Ausprägung der Oberflächenwelligkeit steigt. [18] Die Wellenlänge der Oberflächenabzeichnung folgt dabei der Wellenlängenveränderung des eingebetteten Textils. Je gröber das Textil, desto gröber das Muster der Faserdurchzeichnung auf der Bauteiloberfläche.

Daraus können bereits im textilen Halbzeug selbst mögliche Stellhebel für die Optimierung der Oberflächentopografie eines CFK-Bauteils abgeleitet werden. Über die Wahl des eingesetzten Webmaterials (Roving) als auch über die Einstellung von Webparametern (Fadendichte, Spreizung, Fadenspannung usw.) kann bei gleichen Umformparametern (Matrix, Prozesstemperatur, Presskraft, Zykluszeit usw.) die Bauteiloberfläche beeinflusst werden. Die Stellhebel sind für das Gesamtbauteil dabei teilweise komplementär und teilweise konkurrierend. Faserdurchzeichnungen entstehen durch ein lokal schwankendes Verhältnis von Textil und Matrix. Matrixreiche Regionen dehnen sich während der isothermen Aushärtung aus und ziehen sich nach dem Abkühlen zusammen, Bereiche mit hohem Faservolumengehalt verändern sich dagegen kaum. In Bereichen mit geringem Faservolumengehalt (z.B. Kreuzungspunkte) entstehen daher nach der Abkühlung Einfallstellen. Für ein glattes CFK Bauteil muss das Textil deswegen eine möglichst homogene und glatte Oberfläche aufweisen.

Öffnungsfaktor OF von Leinwandgeweben

Für ein möglichst glattes Leinwandgewebe sollten somit sehr flache und homogene Rovings mit einer sehr geringen Maschenweite eingesetzt werden. [90]

Für die Charakterisierung der Maschenweite kann der Öffnungsfaktor OF als Kennwert herangezogen werden. Bei flächiger Betrachtung des Gewebes stellt der Öffnungsfaktor eines Gewebes das Verhältnis aus fadenfreier (offener) Fläche zu der mit Kett- und Schussfaden belegten Fläche in Prozent dar. [91] (siehe Abb. 26)

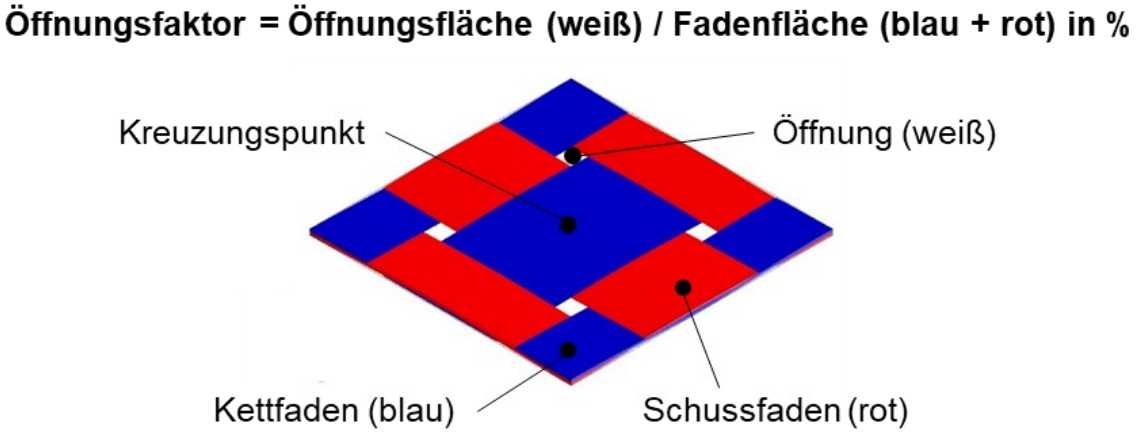


Abb. 26 Öffnungsfaktor OF von gewebten Halbzeugen.

Da der Öffnungsfaktor den Anteil der freien Fläche eines Gewebes beschreibt, wird er üblicherweise auch für die Bewertung der Lichtdurchlässigkeit verwendet.

Im CFK Bauteil entstehen an offenen Stellen des Gewebes Reinharzbereiche, die aufgrund der Matrixkontraktion lokale Tiefpunkte der Oberfläche bilden. (Kap. 2.5) Daraus resultiert, dass der Öffnungsfaktor einen direkten Einfluss auf die Ausprägung der Faserdurchzeichnung

bzw. die Amplitude der resultierenden Oberflächenwelligkeit hat. Beeinflusst wird der Öffnungsfaktor bei einem CF-Leinwandgewebe hauptsächlich durch den RAR und die Fadendichte von Kette und Schuss. Anders als bei textilen Halbzeugen für Class-A CFK-Bauteile ist bei konventionellen Geweben üblicherweise nicht der Öffnungsfaktor, sondern die Gewebedichte von Interesse. Dabei wird die absolute und relative Gewebedichte unterschieden. Die absolute Gewebedichte bezieht sich auf das Verhältnis von Faserfläche zu freier Fläche (offene Bereiche) bezogen auf eine Messfläche. Die relative Gewebedichte berücksichtigt zudem die Fadenstruktur samt eingeschlossener Luft auf Mikroebene und eignet sich vor allem für sehr feine Gewebe (>100 Fd/cm) mit komplexen Bindungsarten. [92] Die Berechnungen gehen dabei üblicherweise von kreisrunden Filamenten [93] aus und sollen komplexe Zusammenhänge zwischen Maschinenparametern und Eigenschaften ermöglichen [94, 95].
Für Class-A CFK Bauteile werden dagegen üblicherweise grobe Gewebe aus 3k Rovings mit einer Breite von ca. 1,5-2,0 mm und einer einfachen Bindungsart verwendet. Die Rovings erhalten durch das Spreizen eine elliptische Form mit einem asymmetrischen Höhe-Breite-Verhältnis. Die Fadendichte liegt für 3k Rovings bei nur ca. 5 Fd/cm. [91]
Der Hauptfokus dieser Arbeit liegt auf der Quantifizierung von Faserdurchzeichnungen. Die Form und Ausprägung wird dabei von der webstrukturabhängigen Anordnung der Rovings und der offenen Fläche verursacht. Daher werden in dieser Arbeit die Rovings als Monofilamente angesehen und der Öffnungsfaktor als relevanter Kennwert eingestuft, da dieser in der Lieferspezifikation für 3k CF-Sichtgewebe bereits eingesetzt wird.

Der Öffnungsfaktor OF wird in dieser Arbeit zur Vereinfachung für ein CF-Leinwandgewebe mit 3k-Rovings für einen quadratischen Messbereich wie folgt berechnet:

$$OF = \frac{l - Fd_k * b_k}{l^2} * \frac{l - Fd_s * b_s}{l^2} * 100\%$$

Mit:

l: Bezugslänge (10 mm)
Fd_k: Kettfadendichte (Fd/cm)
b_k: Kettfadenbreite (mm)
Fd_s: Schussfadendichte (Fd/cm)
b_s: Schussfadenbreite (mm)

Mit Hilfe der Gleichung ist es möglich, den Öffnungsfaktor in Abhängigkeit von einem Materialparameter – der Rovingbreite aufgrund eines definierten RAR – und einem

Prozessparameter – der Fadendichte – zu ermitteln. Das Diagramm in Abb. 27 zeigt den Öffnungsfaktor in Abhängigkeit der Rovingbreite für verschiedene Fadendichteeinstellungen.

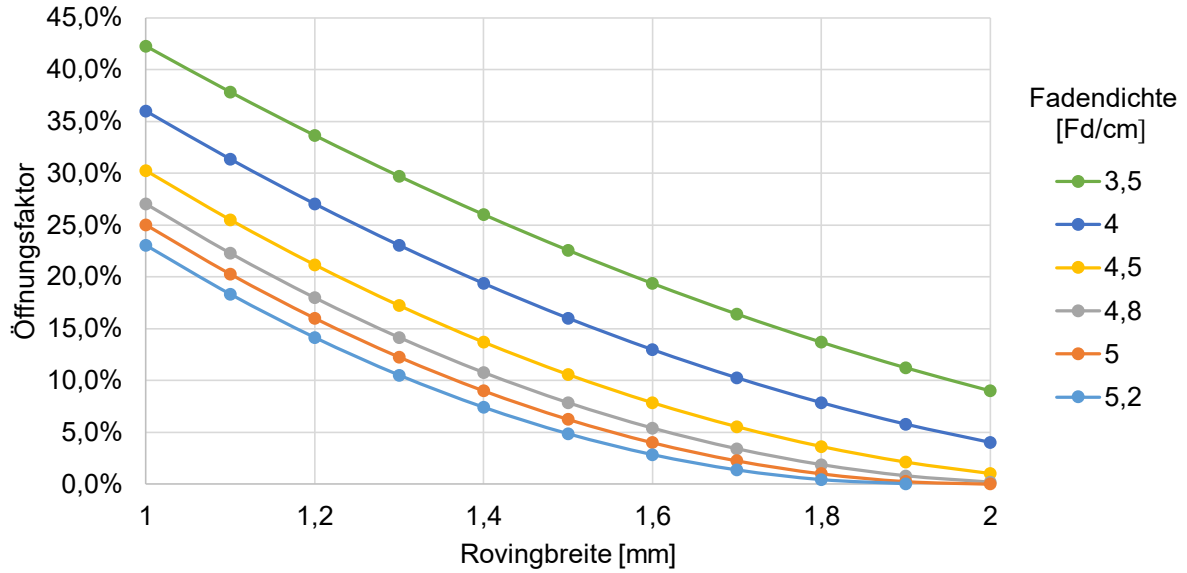


Abb. 27 Öffnungsfaktor in Abhängigkeit der Rovingbreite für Fadendichten von 3,5 bis 5,2 Fd/cm.

Das Diagramm zeigt, dass eine steigende Fadendichte und eine steigende Rovingbreite zu einer Verringerung des Öffnungsfaktors führen. Dabei ist es möglich bei einer definierten Rovingbreite nur über eine Erhöhung der Fadenbreite die Öffnungen vollständig zu schließen, was zu einem Öffnungsfaktor von 0% führen würde. Im Gegensatz zur Änderung der Rovingbreite führt eine Umstellung der Fadendichte zu einer Veränderung des Flächengewichts. Das Flächengewicht wird jedoch bei der Bauteilauslegung mit relativ engen Toleranzen spezifiziert. Daher liegt bei gleichbleibendem Flächengewicht das Potential zur Verringerung des Öffnungsfaktors vor allem in einer Erhöhung der Rovingbreite über eine Veränderung des RAR.

Der Öffnungsfaktor der Gewebesichtlage beeinflusst neben der Oberflächenwelligkeit des Textils auch dessen Verarbeitbarkeit. Eine Verkleinerung der Öffnungen zwischen Kett- und Schussfaden führt zu einer sinkenden Permeabilität und damit erschwerten Infiltrierbarkeit des Gewebes mit dem Harzsystem. Das führt gerade im Nasspressen zu einer möglichen Auswirkung auf Infiltrierzeiten, da üblicherweise das Harzsystem auf die Sichtlage appliziert wird. Eng gewobene Textilien haben zudem eine geringere Drapierbarkeit, was zu Faserverzug in Eckbereichen bei der Umformung führen kann. [89]

Da es sich bei Class-A CFK Bauteilen um ein Designelement am Fahrzeug handelt, ist zudem bei flachen Geweben die verringerte Tiefenwirkung des Webmusters im eingebetteten Zustand zu nennen. Hier gilt: je stärker die Ondulation des Gewebes, desto stärker die Tiefenwirkung aufgrund von extremeren Winkeln der Lichtstreuungen am Roving. Somit ergeben sich

Prozessgrenzen, die eine zu starke Reduzierung des Öffnungsfaktors einschränken. Übliche Leinwandgewebe für Class-A Sichtanwendungen haben daher einen spezifizierten Öffnungsfaktor <5 %. [91]

In Kapitel 6 wird mit dem in Kap 5.3 vorgestellten Simulationsmodell der Einfluss der Variation des Öffnungsfaktors über die Textilparameter RAR und Fadendichte auf die Ausprägung der primären Fadendurchzeichnung untersucht. Die Ergebnisse werden mit zwei 3k Gewebevarianten in Leinwandbindung mit unterschiedlichem Öffnungsfaktor verglichen. Dabei wird bereits im trockenen Stack mit dem in Kap. 5.2.2 eingeführten Kennwert der mittleren Oberflächenwelligkeit Sa der Einfluss des Öffnungsfaktors auf die Oberflächenwelligkeit ermittelt. Anschließend werden aus den vermessenen Stacks im Nasspressverfahren CFK-Bauteile bei verschiedenen Prozesstemperaturen hergestellt und die Ausprägung der primären Faserdurchzeichnung PPT ermittelt. Ziel ist es zu überprüfen, ob über den Wechsel der Sichtlage auf ein Textil mit engerer Öffnung Bauteile mit glatteren Oberflächen bei gleicher Prozesstemperatur erzeugt werden können. Im zweiten Schritt wird untersucht, ob es möglich ist mit einer Sichtlage mit geringerem Öffnungsfaktor Bauteile mit gleicher Oberflächenqualität bei höheren Werkzeugtemperaturen und somit kürzeren Zykluszeiten zu produzieren. Dies würde eine Erhöhung des Outputs ermöglichen.

Einfluss der Textilhomogenität auf Secondary Print-Through (SPT) der inneren Textillagen

Wie in Kapitel 2.5 beschrieben, können Class-A CFK Bauteile primäre Faserdurchzeichnungen der Sichtlage (PPT) und sekundäre Faserdurchzeichnungen verdeckter Lagen (SPT) aufweisen. Sekundäre Durchzeichnungen (SPT) entstehen durch einzelne Dickstellen oder Gassen der innenliegenden Verstärkungsstruktur von mehrlagigen Faserverbundbauteilen. Dies führt zu diskreten, sich teilweise nicht wiederholenden Merkmalen an der Oberfläche. Die zumeist feinere Sichtlage legt sich beim Pressvorgang an die unebene Form der darunterliegenden Lagen an, was zu lokalen Reflektionsschwankungen der Bauteiloberfläche führt. Wird die Sichtlage bei der Bauteilherstellung von einer solchen Inhomogenität innerer Lagen deformiert, kann der Fehler nicht nachgearbeitet werden, da der Zustand in der Matrix eingefroren wurde. Die üblicherweise nur in Teilbereichen auftretenden Faserdurchzeichnungen, haben nicht das Muster der ersten Sichtlage, sondern die Struktur darunterliegender Lagen. [6]

Für Bauteile wie das CFK-Dach, die neben optischen auch mechanische Anforderungen im Fahrzeug haben, werden unter der Gewebesichtlage üblicherweise Biaxialgelege als Verstärkungslagen eingesetzt. Biaxialgelege bestehen aus im 45° Winkel diagonal abgelegten Tapes (6k, 12k, …,50k Rovings), die mit Nähfäden miteinander verwirkt werden. Dabei ist eine

Lage in eine Faserlaufrichtung bezogen auf die Maschinenlaufrichtung von +45° und die zweite in -45° ausgerichtet. Je nach Reihenfolge erhält ein Biaxialgelege die Zusatzbezeichnung +/-45° oder -/+45°. [96] Daher äußern sich in diesem Fall SPT verursachende Dickenschwankungen, wie in Abb. 29 dargestellt, durch linienförmige Abzeichnungen in 45° Richtung.

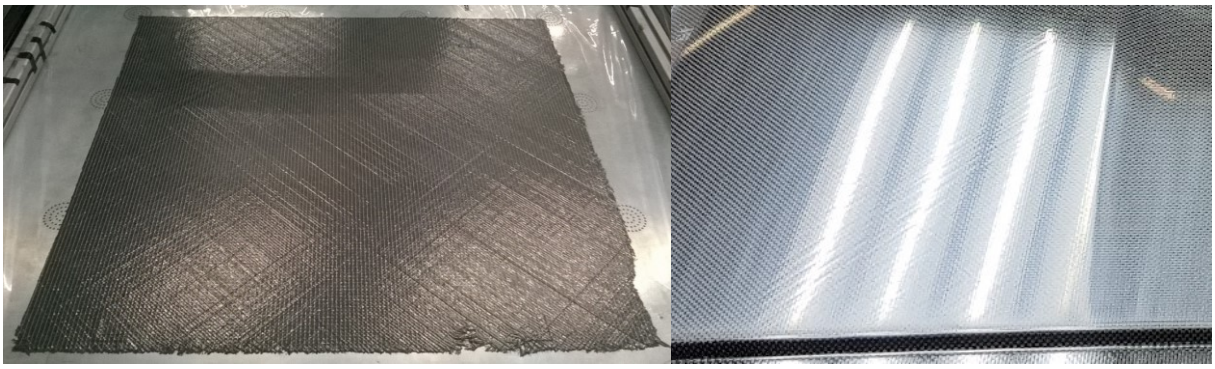


Abb. 28 Links: Dickenschwankung eines CF-Biaxialgeleges sichtbar gemacht auf einem Vakuumtisch, der das Textil über eine Folie komprimiert. Rechts: Sekundäre Faserdurchzeichnung des innenliegenden CF-Biaxialgeleges in einem CFK-Dach nach [34]. Die in 45° Winkel linienförmig verlaufenden Gestaltabweichungen sind vor der Lackierung erst unter einem Lichttunnel sichtbar. Das Phänomen wird in der Realität noch stärker wahrgenommen, als es sich auf Bildern darstellen lässt.

Der Prozess der Gelegeherstellung erzeugt aufgrund der nebeneinander abgelegten Tapes und der Verwirkung Dickenschwankungen im fertigen Halbzeug. Diese können auf einem Vakuumtisch unter einer Folie sichtbar gemacht werden. Die linienförmige Faserdurchzeichnung entsteht üblicherweise durch inhomogen gespreizte Tapes oder eine unregelmäßige Tapeablage. Dadurch können Gassen oder Überlappungen entstehen, die entlang des gesamten Tapes zu einer Dickenschwankung des Biaxialgeleges führen. Sind die Dickenschwankungen der inneren Verstärkungslagen zu hoch, besteht das Risiko von sekundären Faserdurchzeichnungen SPT im daraus hergestellten CFK-Bauteil. Die einzelnen Linien des SPT sind teilweise nur aus bestimmten Winkeln sichtbar und können sich über das ganze Bauteil ziehen. Die sekundären Durchzeichnungen sind gerade auf matten Rohbauteiloberflächen, wie sie beim Nasspressverfahren üblich sind, kaum erkennbar und erst im lackierten Zustand sichtbar. SPT-Effekte sind jedoch über eine Nacharbeit oder Oberflächenveredelung nicht zu eliminieren. Dies führt zu einem erhöhten Ausschussaufkommen in späten Prozessschritten und damit zu vermeidbaren Kosten. Es ist maßgeblich sicherzustellen, dass nur textile Halbzeuge in den Prozess gelangen, die eine vorher festgelegte Dickenschwankung nicht überschreiten. Folglich muss die Anforderung und Prüfung der Dickenhomogenität der Verstärkungslagen bereits im trockenen Textil erfolgen und nicht erst im Bauteil. Daher werden für im Nasspressverfahren hergestellte Class-A CFK Bauteile Biaxialgelege aus 12k Tapes und einer minimalen Dickenschwankung eingesetzt. Ein

Schwerpunkt bei der Qualitätssicherung liegt hierbei bei dem reproduzierbaren und hochwertigen Aufspreizen der Filamentgarne zu homogenen Faserbändern. [97]
Die Anforderungen erhöhen die Kosten, da zum einen keine günstigeren 50k Tapes eingesetzt werden können und zum anderen durch das Fehlen eines messbaren Grenzwertes Qualitätspuffer einkalkuliert werden müssen. Wie in Kap. 2.1 aufgezeigt, entfallen bei im Nasspressverfahren hergestellten Class-A Sichtcarbonbauteilen ca. 45% der Herstellkosten auf das eingesetzte Textil. Dementsprechend groß ist das Potential einer Kostenoptimierung des textilen Halbzeugs auf die Gesamtkosten, durch das Einführen von messbaren Grenzwerten. In [6] wird hierfür anhand der in Kap. 5.2.1 beschriebenen Messmethode die gerade noch verkraftbare Dickenschwankung ermittelt, die noch keinen SPT Effekt im Bauteil verursacht. Hierbei wird das Textil auf einem Vakuumtisch mittels Lasertriangulation vermessen und aus der ermittelten 3D-Oberflächentopografie physikalische Kennwerte (Sz25) ausgewertet. Mit der beschriebenen Methode können Biaxialgelege relativ zu einem bereits für Class-A Bauteile eingesetzten Textil verglichen werden. Dabei kann die maximal akzeptable Inhomogenität des trockenen Halbzeugs abgeleitet werden, um bereits im textilen Halbzeug Grenzwerte zu definieren. [6]
Dies ermöglicht sowohl dem Bauteilhersteller als auch dem Halbzeuglieferanten Anliefertoleranzen produktionsgerechter zu formulieren, was letztendlich zu einer Kostenoptimierung auf beiden Seiten führt.

4.2. Einfluss des Harzsystems und der Prozessparameter auf die Oberflächenglätte

Als Hauptursache für Faserdurchzeichnungen an Faserverbundbauteilen wird in der Fachliteratur die Volumenänderung der Matrix während und nach dem Aushärtevorgang angeführt (siehe auch Kap. 2.5). Üblicherweise wird die Volumenkontraktion aufgrund der Vernetzungsreaktion als chemischer Schrumpf oder Reaktionsschwindung benannt. Das Zusammenziehen der Matrix aufgrund der Abkühlung von Prozess- auf Umgebungstemperatur wird als thermischer Schwund bezeichnet. [16, 18, 22, 26, 38, 51] Die Ausprägung der Faserdurchzeichnung von CFK Bauteilen wird somit durch die Kombination aus Textilmaterial, Textilstruktur, Matrixmaterial und den eingestellten Prozessparametern beeinflusst. Bei gleichbleibenden Textilparametern sind die Stellhebel zum einen die Eigenschaften des eingesetzten Harzmaterials (Volumenschrumpf bei der Vernetzung und thermischer Ausdehnungskoeffizient α_T, auch CTE) und zum anderen die Prozessparameter (Prozesstemperatur, Presskraft / Kavitätsdruck).

Reaktionsschwindung des Harzsystems

Üblicherweise haben Epoxidharzsysteme eine Reaktionsschwindung von 4-5 % [98] . Durch Modifikationen der eingesetzten Polymere und Additive kann das chemische Schrumpfverhalten verringert werden [42, 99, 100, 100]. Spezielle Epoxidharzsysteme für Class-A Anwendungen im RTM- und Nasspressverfahren erreichen Werte von 2-3 % [101, 102]. Prozessseitig kann, wie auch von Hildebrandt [18] und Wenger et al. [58] beschrieben, der Reaktionsschwund und die damit verbundene Faserdurchzeichnung durch einen hohen Press- bzw. Kavitätsdruck während der Aushärtung signifikant verringert werden. Genau dieser Effekt wird bei der Herstellung von Class-A CFK Bauteilen im Nasspressverfahren genutzt. Die hohen Presskräfte führen zu einem Ausgleich der reaktionsbedingten Volumenverringerung durch ein Nachfließen des Harzsystems während der Reaktion, was den chemischen Schwund bis zum Überschreiten des Gelpunkts abschwächt. Als Gelpunkt wird dabei der während der Reaktion von Epoxidharzsystemen stattfindende Phasenübergang von flüssig zu fest bezeichnet. Für aminhärtende Epoxidharzsysteme, die auch für Class-A CFK Bauteile eingesetzt werden, liegt der Gelpunkt bei einem Aushärtegrad von ca. 60% (Reaktionsumsatz von p=0,6). [65, 103] In der Praxis kann der chemische Schwund beim Nasspressverfahren über die eingesetzten Harzsysteme und die Prozessführung so stark verringert werden, dass die Bauteile direkt nach dem Herausnehmen aus der heißen Kavität genau die Werkzeug-oberfläche abbilden und keine sichtbaren Faserdurchzeichnungen vorhanden sind. [3, 12]

Thermischer Schrumpf der Matrix

Primäre Faserdurchzeichnungen PPT werden bei Bauteilen, die in Hochdruckprozessen hergestellt werden, hauptsächlich durch die unterschiedlichen Ausdehnungskoeffizienten von Faser und Matrix verursacht. Im Nasspressverfahren werden Faserdurchzeichnungen erst durch die Abkühlung des Bauteils von der Prozess- auf die Umgebungstemperatur und die damit verbundene Kontraktion der Matrix sichtbar. Die Ausprägung der Faserdurchzeichnung ist dabei vor allem vom thermischen Ausdehnungskoeffizienten α der Matrix und der Aushärtetemperatur abhängig. Für eine kurze Aushärtezeit im Bereich weniger Minuten ist für im Nasspressverfahren eingesetzte Harzsysteme jedoch eine hohe Prozesstemperatur >100°C notwendig. Schon Kia et al. haben dabei festgestellt, dass die für kurze Zykluszeiten benötigte hohe Prozesstemperatur in Verbindung mit dem thermischen Ausdehnungsverhalten des Harzsystems eine Hauptursache für Faserdurchzeichnungen ist [15]. Während sich Kohlenstofffasern mit $\alpha_T = -3{,}8 \cdot 10^{-7}\ /K$ [60] während des temperaturinduzierten Aushärtevorgangs der Epoxidharzmatrix volumetrisch kaum verändern, dehnt sich die Matrix aufgrund des deutlich höheren Wärmeausdehnungskoeffizienten von $\alpha_T = 6{,}53 \cdot 10^{-5}\ /K$ [61] um das ca. 170-fache stärker aus und drückt gegen die heiße Werkzeugoberfläche. Aufgrund des großen Unterschieds der thermischen Ausdehnungskoeffizienten α_T von Faser und Matrix werden im Folgenden Möglichkeiten beschrieben, diese hohe Differenz über eine Modifikation des Harzsystems zu verringern.

Verringerung der thermischen Ausdehnung von Epoxidharzsystemen

Das thermische Ausdehnungsverhalten von EP-Harzsystemen lässt sich in gewissen Grenzen beeinflussen. Zum einen sei hier die Modifikation der eingesetzten Bestandteile in Harz und Härter genannt. Es ist jedoch auch möglich das Schrumpfverhalten eines Harzsystems durch Einsatz von Zusatzstoffen zu optimieren. Bereits Klaus et al. schrieben 1966, dass die thermische Ausdehnung von Epoxidharzsystemen materialseitig kaschiert werden kann, indem ein inerter Füllstoff verwendet wird, der einen geringen thermischen Ausdehnungskoeffizienten CTE besitzt. [100] Die Ergebnisse von Dittanet et al. bestätigen dies. Hier wurde gezeigt, dass Nanosilica Füllstoffe die thermische Ausdehnung von Epoxidharzen verringern können. Es wurde zudem aufgezeigt, dass bei steigendem Füllstoffanteil der CTE der Matrix sinkt. Für einen signifikanten Abfall des CTE war dabei ein Füllstoffanteil von 30% notwendig, was gleichzeitig zu einer deutlichen Viskositätserhöhung führt. [104] Auch Rieber et al. berichten von dem grundsätzlichen Potential hochgefüllte Harze für Class-A CFK Bauteile im Nasspressverfahren einzusetzen. Der Einsatz in einer automatisierten Produktion von Class-A CFK Bauteilen ist jedoch bisher nicht möglich, da die eingesetzten Dosiereinheiten im RTM- und Nasspressverfahren hochgefüllte Harzsysteme aufgrund der hohen Viskosität und

gleichzeitig stärkeren Abrasivität nicht verarbeiten können. [12] Der Einsatz von gefüllten Harzsystemen ist somit im Nasspressverfahren mit Standard Dosiersystemen nicht möglich.

Aushärtegrad α und Glasübergangstemperatur T_g

Die Glasübergangstemperatur T_g beschreibt die Temperatur bzw. den Temperaturbereich bei dem ein Übergang vom glasartigen, hart-elastischen zu einem gummi-elastischem Materialverhalten stattfindet. Die T_g eines Reaktionsharzes verändert sich dabei über die komplette Reaktion hinweg. Da das Harzsystem im Ausgangszustand flüssig ist, liegt die T_g deutlich unter dem Gefrierpunkt. Für Epoxidharzsysteme liegt die T_g im Flüssigzustand üblicherweise im Bereich -30 bis -50°C. Während der chemischen Vernetzung verändert das Harzsystem seinen Aggregatszustand von einer Flüssigkeit zu einem Feststoff. Mit steigendem Aushärtegrad α steigt dabei neben der Viskosität auch die T_g. Tatsächlich gibt es einen direkten Zusammenhang zwischen Aushärtegrad und T_g. Je höher der Aushärtegrad, desto höher die T_g. Die Aushärtezeit hängt von der Prozesstemperatur ab. Je nach Harzsystem und Anwendungsbereich kann dabei die Prozesstemperatur höher oder niedriger sein als die nach einer definierten Aushärtezeit erreichbare T_g. Dabei gilt, dass die Reaktion chemisch kontrolliert verläuft, solange die Prozesstemperatur über der T_g liegt. Überschreitet die T_g jedoch die Werkzeugtemperatur, verläuft die Reaktion ab diesem Zeitpunkt diffusionskontrolliert und damit deutlich langsamer. Aufgrund der Abhängigkeiten von Glasübergangstemperatur, Aushärtegrad, Aushärtezeit und Prozesstemperatur existieren mehrere mathematische Modelle zur Modellierung der Reaktionskinetik. [103, 105 bis 107]
Auch für das in dieser Arbeit verwendete Dow Voraforce 5300 Epoxidharzsystem steht ein solches Kinetikmodell zur Verfügung. Um den Verlauf der T_g für thermisch vernetzende Epoxidharzsysteme in Korrelation zum Aushärtegrad zu setzen, wird üblicherweise die DiBenedetto Gleichung verwendet [108]:

$$T_g = T_{g0} + \frac{(T_{gMax} - T_{g0})\lambda\alpha}{1 - (1 - \lambda)\alpha}$$

Dabei ist T_{g0} die Glasübergangtemperatur der Mischung aus Harz und Härter bei Start der Reaktion und einem Aushärtegrad von α = 0. T_{gMax} entspricht der Glasübergangstemperatur bei einem Aushärtegrad α = 1. Der sog. freie Parameter λ ist materialspezifisch und wird über DSC Messungen von gezielten Zuständen während der Aushärtung von Epoxidharzsystemen ermittelt. Für das in dieser Arbeit verwendete Dow Voraforce 5300 Epoxidharzsystem wurde dabei der freie Parameter λ = 0,37 ermittelt. Die T_{gMax} liegt bei 125,1°C. Die resultierende Aushärtezeit ist von der Prozesstemperatur abhängig. Dabei gilt: je höher die

Prozesstemperatur, desto geringer die Aushärtezeit. Die temperaturabhängigen Aushärtezeiten des Dow Voraforce 5300 Harzsystems werden in Kap. 6 näher betrachtet.

4.3. Optimierung der Oberflächenglätte durch Beschichtungen

Um die für Automobile geltenden Class-A Oberflächenanforderungen zu erfüllen, müssen CFK Bauteile üblicherweise lackiert werden. In Kap. 1.2.3 wurde dabei herausgestellt, dass eine Lackierung nicht nur die Oberflächenglätte (Appearance) sondern auch die Beständigkeit des Bauteils gegen Umwelteinflüsse verbessert. Im Nasspress- oder RTM Verfahren hergestellte Class-A CFK Bauteile werden üblicherweise offline in eigenen automatisierten Lacklinien beschichtet, da die Trocknertemperaturen der Karosserielacklinie (> 140°C) zu hoch sind. Die Abb. 29 zeigt die Prozessschritte bei der automatisierten Lackierung von CFK Dächern.

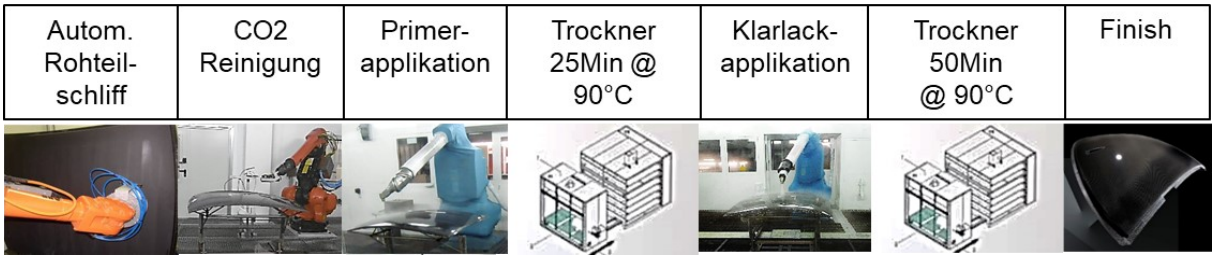


Abb. 29 Schematische Darstellung der Prozessschritte für das automatisierte Lackieren von CFK Dächern (Nasspressverfahren und RTM) mit Primer und 2K PUR Klarlack nach [109].

Nach der Bauteilherstellung folgt ein automatisierter Schliff zur Lackvorbehandlung. Dieser dient dabei hauptsächlich dem Entfernen von Trennmitteln (siehe auch Kap. 1.4.3.3) und nicht, wie bei der manuellen Lackierung üblich, der Verbesserung der Bauteilglätte. Beim Eintritt in die Lacklinie werden die Bauteile mit Trockeneis (CO2) gereinigt. Darauf folgt der Auftrag des Primers (Haftvermittler). Der Primer wird für ca. 25 Minuten bei 90°C eingebrannt. Nach einer kurzen Abkühlphase wird der 2K PUR Klarlack appliziert und nachfolgend ebenfalls bei 90°C, jedoch für 50 Minuten, getrocknet. Die Durchlaufzeit für die Lackierung beträgt insgesamt ca. 4,5 Stunden. Der gesamte Lackaufbau (Primer + Klarlack) eines Serien Class-A CFK-Dachs hergestellt im RTM oder Nasspressverfahren hat üblicherweise eine Schichtdicke <140 µm bei einfacher Lackierung und bis zu 250 µm bei einer Nachlackierung. Im Vergleich zu einer konventionellen Lackierung im Automobilbau (ca. 90-160 µm [110]) liegen CFK-Dächer mit einer Einfachlackierung an der oberen Grenze der akzeptierten Schichtdicken. Verglichen mit anderen CFK Bauteilen, die für eine Class-A Oberfläche gefüllert und mehrfach lackiert werden und so Lackschichtdicken über 300 µm benötigen, kann gerade die Einfachlackierung jedoch als dünn angesehen werden. Hierbei sei auch der Leichtbauaspekt zu berücksichtigen, da bei einer Dichte der Lacksysteme von mind. 1,0g/cm³ bei einer Fläche von 1m² pro 100µm Schichtdicke 100g Zusatzgewicht erzeugt werden.

Alternativen zur manuellen oder automatisierten Lackierung stellen vor allem prozessintegrierte Ansätze zur Oberflächenbeschichtung dar. Das Beschichten von Bauteilen im Werkzeug wird Englisch als Inmold Coating, kurz IMC bezeichnet. Ihren Ursprung hat das

IMC bei großen Bauteilen (Schiffsbau, Flugzeugbau usw.), wobei üblicherweise vor dem Laminieren manuell eine Gelcoat-Schicht auf die Kavität aufgebracht wird, um Unebenheiten auszugleichen. Die dabei eingesetzten Gelcoats sind für den Automobilbau jedoch zu hochviskos und benötigen zu hohe Schichtdicken [111].

Hopmann et al. beschreiben eine automatisierte und Class-A fähige Variante des Spaltimprägnierverfahrens, einem RTM ähnlichen Großserienprozess. Allerdings sind für Class-A fähige Oberflächen Reinharzschichten von mind. 500 µm notwendig [112] , was dem 3-5-Fachen einer normalen Lackierung von RTM oder Nasspress CFK-Dächern entspricht. Ähnliche Schichtdicken werden bei dem „Surface RTM“ Verfahren von KraussMaffei [37] und dem von Haeffelin beschriebenen „Film RTM“ [41] für eine Class-A fähige Oberfläche benötigt. Im Surface RTM Verfahren wird nach dem eigentlichen RTM Prozess das Werkzeug minimal geöffnet, um einen Spalt zu erzeugen. Der Spalt wird daraufhin mit dem Harzsystem oder einem Lack vollständig geflutet. Nachdem der IMC-Lack ausgehärtet ist, wird das Bauteil entnommen. Laut KraussMaffei ist es in dem Zustand direkt lackierbar, erfüllt also noch nicht direkt alle Class-A Anforderungen. [37]

Das Film RTM Verfahren integriert thermoplastische Folien (PC-ABS Verbund) in den RTM Prozess. Hierbei wird ein in Folie eingepackter Stack in die Werkzeugkavität eingelegt. Die Folien werden über IR-Strahler erhitzt und in die Kavität tiefgezogen. Nach dem Tiefziehen erfolgt der konventionelle RTM Prozess, wobei die Kavität über einen Dorn, der vorher die Folie durchstoßen hat, geflutet wird. Das Bauteil kann aufgrund der Folien ohne Trennmittel hergestellt werden und ist daher direkt lackierbar. Die Folien haben je nach Ausführung eine Dicke von 280-500 µm und befinden sich auf beiden Bauteilseiten. Der Vorteil der thermoplastischen Folie auf der Rückseite ist die Schweißbarkeit, was eine Verklebung ersetzen kann. Trotz der Foliendicke müssen die so erzeugten Bauteile für eine Class-A Oberfläche zusätzlich lackiert werden. [41]

Allen IMC Prozessen gemein ist die Beschichtung der Bauteile im Werkzeug. Die Integration des Beschichtungsvorgangs ist ein sehr interessanter Ansatz, da so eine komplette Lackierlinie eingespart werden könnte. Gleichzeitig müssen die Bauteile bei allen recherchierten IMC Prozessvarianten weiterhin lackiert werden, was gegenüber der Referenzprozesskette für ein automatisiert lackiertes CFK Dach keinen Vorteil bringen würde. Die im Nasspressverfahren erzeugten Bauteile sind bereits ausreichend glatt, um mit einer Einfachlackierung mit 140 µm eine Class-A Oberfläche zu erzeugen.

Nichtsdestotrotz verursacht die automatisierte Lackierung inklusive Vorbehandlung ca. 35% der Herstellkosten für im Nasspressverfahren hergestellte Class-A CFK Bauteile (siehe Kap 1.2.3), weshalb Optimierungsansätze dieses Prozessschritts einen spürbaren Einfluss auf die Gesamtkosten haben können. Daher werden in Kap. 6.5 und Kap. 7 aus den Recherchen

abgeleitete Ansätze untersucht, die ihre Wirkung und/oder Umsetzung vor allem bei der Beschichtung haben.

In Kap. 6.4 wird untersucht, inwieweit die Trocknungstemperatur der Beschichtung bzw. Lackierung das Abmildern von Faserabzeichnung des rohen CFK Bauteils beeinflussen können. Konventionelle Beschichtungsmethoden benötigen hohe Trocknertemperaturen für die Aushärtung des Lacksystems. Wie in den Kapiteln 2.5 und 4.2 beschrieben, zieht sich die Matrix aufgrund des höheren thermischen Ausdehnungskoeffizienten α_T nach der Entnahme aus dem heißen Werkzeug während der Abkühlung auf Umgebungstemperatur stärker als das eingebettete CF-Textil zusammen (Delta-α_T Effekt). Es entstehen Einfallstellen, die als Faserdurchzeichnungen bezeichnet werden. Bereits in den 1980er Jahren haben Kia et al. beobachtet, dass die Delta-α_T bedingte Faserabzeichnung beim erneuten Erhitzen des Bauteils aufgrund der Matrixausdehnung wieder verschwindet und die Bauteiloberfläche glatt wird. [38] Folglich kann angenommen werden, dass bei der temperaturinduzierten Lacktrocknung von CFK Bauteilen ein ähnlicher Vorgang stattfindet. Die Veränderung der Oberflächenglätte eines CFK Bauteils vom Pressvorgang bis zum fertig lackierten Bauteil wird in Abb. 30 schematisch dargestellt.

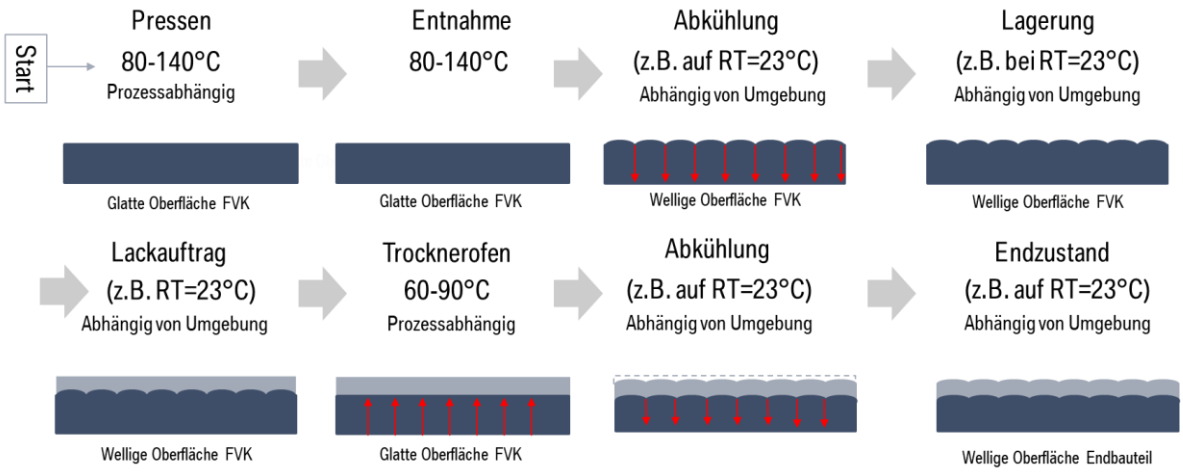


Abb. 30 Schematische Darstellung des Oberflächenzustands entlang der CFK Prozesskette. Während des Pressvorgangs wird die Matrix aufgrund der hohen Temperatur und dem Kavitätsinnendruck gegen die glatte Werkzeugwand gedrückt. Bei der Entnahme ist die Oberfläche glatt. Während dem Abkühlen zieht sich die Matrix zusammen. Durch die Filmbildung des Lacks wird beim Lackauftrag die Oberflächenwelligkeit ausgeglichen. Im Trocknerofen wird das Substrat wieder aufgeheizt, was zur Ausdehnung der Matrix führt. Der Lack härtet auf einer glatteren Oberfläche aus. Während dem erneuten Abkühlen zieht sich die Matrix zusammen und zieht die dünne Lackschicht mit. Auf der Oberfläche sind trotz Lackierung Faserdurchzeichnungen sichtbar.

Der eingesetzte 2K PUR Lack benötigt für die vollständige Aushärtung eine Trocknertemperatur von 90°C für mindestens 50 Minuten. Dies kommt der ursprünglichen Werkzeugtemperatur bei der Bauteilherstellung im Nasspressverfahren sehr nahe (ca. 100-

120°C). Das bedeutet, dass der Lack in diesem Fall auf einer deutlich glatteren Oberfläche als bei Raumtemperatur aushärtet. Da die Lackschichtdicke <140 µm weniger als 10% der Bauteildicke (1,7 +/- 2mm) ausmacht, wird der ausgehärtete Lack nach dem Abkühlen des Bauteils in die Vertiefungen der matrixreichen Bereiche gezogen. Demzufolge ist bei einem CFK Rohbauteil, das eine zu starke Faserdurchzeichnung hat, trotz Lackierung keine Class-A Oberfläche erreichbar. Dieser Effekt führt dazu, dass CFK Bauteile bei einer Prozesstemperatur gefertigt werden müssen, bei der die Faserdurchzeichnung nicht zu stark ausgeprägt ist. Diese Einschränkung bedingt wiederum längere Zykluszeiten und damit eine begrenzte Produktivität, was zu erhöhten Herstellkosten führt.
Auch der Wechsel auf eine prozessintegrierte Bauteilbeschichtung durch IMC kann hier nur eine eingeschränkte Verbesserung ermöglichen. Eine Erhöhung der Schichtdicke auf der Bauteilsichtseite verringert zwar die Ausprägung der Faserdurchzeichnung [27, 38], die Matrix wird aber auch hier im ausgedehnten Zustand beschichtet. Während dem Abkühlen zieht sich die Matrix zusammen und zieht die Inmold Beschichtung mit sich. Es entsteht, wenn auch abgemildert, eine Faserdurchzeichnung. Das Bauteil muss auch bei IMC-Schichtdicken von 300-500 µm weiterhin lackiert werden [37, 41]. Damit ist für Bauteile, die im Nasspressverfahren hergestellt werden, eine prozessintegrierte Bauteilbeschichtung nicht wirtschaftlich, da keine werkzeugfallende Class-A Oberfläche erzeugt werden kann. Dafür ist der Prozess aber komplexer und das Bauteil dicker und schwerer. Eine mögliche Zykluszeitreduzierung bei der Bauteilherstellung mit IMC durch höhere Prozesstemperaturen wird durch den zusätzlichen Beschichtungsschritt und die Kosten für die aufwendige Prozesstechnik aufgehoben.
Ein Ansatz, der noch wenig Beachtung gefunden hat, ist der Einsatz einer kalthärtenden Beschichtung, um die Ausprägung der Faserdurchzeichnung auszugleichen. Da sich bei einer Aushärtung bei Raumtemperatur die Matrix nicht ausdehnt, könnte der Lack bei der Filmbildung im flüssigen Zustand die Unebenheiten des Rohbauteils ausgleichen und diesen Zustand einfrieren. Daher wird in Kap. 6.5 untersucht, ob eine kalthärtende Beschichtung mit einem UV-härtenden Klarlack das Potential hat, auch ausgeprägte Faserdurchzeichnungen auszugleichen. Dies würde eine erhebliche Reduzierung der Zykluszeit im Pressprozess ermöglichen, da Bauteile mit höheren Prozesstemperaturen gefertigt werden könnten. Da UV-Lacke zudem Härtezeiten von wenigen Sekunden haben, entsteht auch im Beschichtungsprozess ein Kosteneinsparpotential.

In Kap. 7 wird dagegen ein Ansatz zur Prozesskettenverkürzung durch die Integration von tiefgezogenen Trennfolien in den Pressprozess untersucht. Der Entfall einer Lackvorbehandlung durch den prozessintegrierten Einsatz von Folien, wie von Haeffelin beschrieben [41], ist vielversprechend. Da beim Film RTM Verfahren kein Trennmittel für die

Entformung aus der Kavität notwendig ist, können die Bauteile ohne Vorbehandlung lackiert werden. Das Aufkaschieren der Folien ist für das Erzeugen einer Class-A Oberfläche jedoch nicht ausreichend, weshalb die Bauteile trotzdem lackiert werden müssen. Die eingesetzten PC-ABC Verbundfolien haben zudem eine Schichtdicke von mindesten 0,3mm. Dies führt bei der nötigen Doppelung (Sicht- und Rückseite) zu einer Erhöhung der Bauteildicke um 0,6mm und eine gleichzeitige Erhöhung des spezifischen Gewichts um mindestens 600g/m². Der hohe Materialeinsatz der PC-ABS Verbundfolien führt dabei auch zu hohen Kosten. Im Rechenbeispiel von Haeffelin entfällt dabei auf die eingesetzten Folien etwa der gleiche Kostenaufwand, wie auf das CFK-Substrat. [41]

Daher soll ein alternativer Ansatz zum Trennmittelentfall mit kostengünstigeren Folien untersucht werden. Hierfür werden vor dem eigentlichen Pressvorgang 40-60 µm dünne und stark dehnbare Trennfolien in die Kavität tiefgezogen. Die dünnen Folien sind dabei deutlich günstiger als die PC-ABS Folien. Sie verbleiben als Schutzverpackung auf dem trennmittelfreien Bauteil und werden direkt vor dem Lackieren bzw. Verkleben wieder entfernt. Somit wird das Bauteilgewicht nicht erhöht und die mechanischen Eigenschaften bleiben unverändert. Durch den Einsatz der Trennfolien ergibt sich das Potential, die Lack- und Klebevorbehandlung einzusparen und damit trotz Aufwandserhöhung im Pressprozess die Herstellkosten deutlich zu senken.

4.4. Methoden zur numerischen Vorhersage der Oberflächentopografie

Die computergestützte Eigenschaftsvorhersage von technischen Erzeugnissen und deren Herstellprozessen ist dank stetigem Zuwachs an Rechenleistung mittlerweile branchenübergreifend ein fester Bestandteil von Forschung und Entwicklung geworden. Eine Möglichkeit zur numerischen Vorhersage von physikalischen Eigenschaften ist die Finite Elemente Methode, kurz FEM. Hierbei wird ein komplexes System in eine endliche Anzahl an berechenbaren Teilsystemen (finite Elemente) aufgeteilt, um so in Summe das Verhalten des Gesamtsystems zu simulieren. [113] Hierbei kann die Betrachtungsebene in verschiedener Skala von Mikro (z.B. Faserebene) über Meso (Rovingebene) bis Makro (Bauteilebene) je nach Untersuchungsgegenstand gewählt werden. [114] Für die modellierte Vorhersage der Ausprägung von Durchzeichnungseffekten bei Faserverbundkunststoffen (FVK) wird überwiegend die Mesoskala (Roving in Matrix) über ein repräsentatives Volumenelement (RVE) betrachtet.

Einer der ersten Ansätze, die Oberflächentopografie von FVK zu modellieren, stammt dabei aus den Arbeiten von Kia et al. Hierbei wurde in einem 2D-Modell der Querschnitt eines glasfaserverstärkten duroplastischen Kunststoffs mit unidirektional angeordneten Fasern und unterschiedlichen Deckschichten untersucht. Über die numerische Betrachtung und verschiedene Validierungsversuche konnte der Einfluss der Differenz zwischen den thermischen Ausdehnungskoeffizienten von Faser und Matrix auf die Ausprägung der Oberflächen-deformation gezeigt werden. Zudem wurde gezeigt, dass die Oberfläche mit zunehmender Schichtdicke und Steifigkeit einer Deckschicht vermindert werden kann. [15, 38, 115]

Sanfeliz et al. haben mit Hilfe eines FEM Modells die Auswirkung von Pressdruck und Prozesstemperatur auf die Oberflächenglätte von CFK Bauteilen aus Leinwandgewebe mit Epoxidharzmatrix simuliert und experimentell validiert. Das zweidimensionale Finite-Elemente-Modell für den Verbund wurde aus zwei Einheitszellen bestehend aus einem faserreichen Überlappungsbereich von Kett- und Schussfaden und einem matrixreichen Öffnungsbereich aufgebaut. Für die Berechnung der Eigenschaften und Analyse des FE-Modells wurden NASA-interne und damit nicht öffentlich zugängliche Computercodes verwendet. Die Erkenntnisse über die beeinflussenden Parameter halfen dabei, das untersuchte Verbundsystem an die gewünschten Anforderungen und Anwendungen anzupassen. [39]

Blinzler hat im Rahmen der Forschungsarbeiten zu seiner Dissertation ein FE-Modell entwickelt, um eine Vorhersage über die quantitative Auswirkung von Material- und Prozessparameteränderungen auf die Oberflächentopografie von Glasfaser-Organoblechen (thermo-plastische FVK) mit Köper-2/2 Sichtlage herbeizuführen. Als FE-Programm wurde die

ANSYS Software von Ansys Inc., Southpointe verwendet. Mit Hilfe der Ergebnisse aus Simulation und Experiment konnte Blinzler ableiten, dass das thermische Ausdehnungsverhalten des Matrixsystems gegenüber der Ausdehnung der eingesetzten Faserart (GF oder CF) einen deutlich größeren Einfluss auf die Ausprägung der Faserdurchzeichnung ausübt. [16]

Sowohl Schubel et al. als auch Hildebrandt et al. setzen in Ihren Arbeiten auf in TexGen modellierte 3D-Gewebstrukturen. Hier ist es möglich unter Definition der Rovingquerschnitts-geometrie und Maschenweite die Gewebestruktur in Mesoskala zu modellieren und in eine als „Solid-Box“ modellierte Matrix einzubetten. [18, 77, 82, 116]

Die Untersuchungen von Schubel et al. konzentrierten sich auf die möglichst realitätsnahe Modellierung des thermischen und chemischen Schrumpfverhaltens verschiedener Harzsysteme während des Aushärtens und die resultierende lokale Änderung des Volumens auf der Oberfläche der Elementarzelle eines CF-Köpergewebes mit 3000, 6000 oder 12 000 Filamenten. Die per Simulation erzeugten Oberflächenprofile wurden mit experimentell ermittelten Oberflächenrauheitsmessungen (Ra-Werte) verglichen, um die Qualität des Modells zu validieren. Die Simulationsergebnisse der drei Gewebevarianten mit unterschiedlich stark schrumpfenden Harzsystemen zeigen dabei den gleichen Trend, wie die experimentellen Ergebnisse mit einem stark und einem wenig schrumpfenden Harzsystem. Der Fehler der simulativ erzeugten Ra-Werte liegt dabei innerhalb von 6% der experimentell erzeugten Ergebnisse. [116]

Hildebrandt et al. bauen in dem FE-Programm LS-Dyna aus verknoteten Lagrange Elementen ein FE-Netz (Engl. Mesh) auf, mit dem über die Deformation der einzelnen Elemente die Deformation des gesamten Materials (Faser und Matrix eines Organoblechs aus TexGen) aufgrund von Einflussparametern wie Temperaturveränderungen simuliert werden kann. Hildebrandt et al. fokussieren sich zum einen auf den Einfluss der Rovinggeometrie und Maschenweite auf die resultierende Oberflächentopografie und zeigen hierbei, dass sich mit steigender Rovinghöhe und Maschenweite die Faserdurchzeichnung verstärkt. Zudem legen sie in einer weiteren Untersuchungsreihe (simulativ und experimentell) den positiven Einfluss einer variothermen Prozessführung bei der Herstellung von thermoplastischen Organoblechen auf die resultierende Oberflächenglätte dar. [18, 82]

5. Methodik

In diesem Kapitel werden die im Rahmen dieser Arbeit verwendeten Methoden beschrieben. Zunächst wird in Kap. 5.1 die betrachtete Prozesskette dargestellt und das verwendete Versuchswerkzeug inkl. verbauter Messtechnik vorgestellt. In Kap. 5.2 wird die entwickelte Methode zur Bewertung der Oberflächentopografie von Class-A Bauteilen entlang der Prozesskette gesamthaft erläutert. Nachfolgend wird in Kap. 5.3 die für die Vorhersage der Oberflächentopografie verwendete FE-Simulationsmethode dargelegt.

5.1. Betrachtete Prozesskette und Versuchswerkzeug

Für die Validierung der erforschten Optimierungsmaßnahmen wird der Seriennasspressprozess (Kap. 2.1) für ein Class-A CFK-Dach mit einem Versuchswerkzeug in der Serienproduktionsumgebung abgebildet. Die Abb. 31 stellt die Prozessschritte für ein im Nasspressverfahren produziertes Class-A CFK-Dach dar.

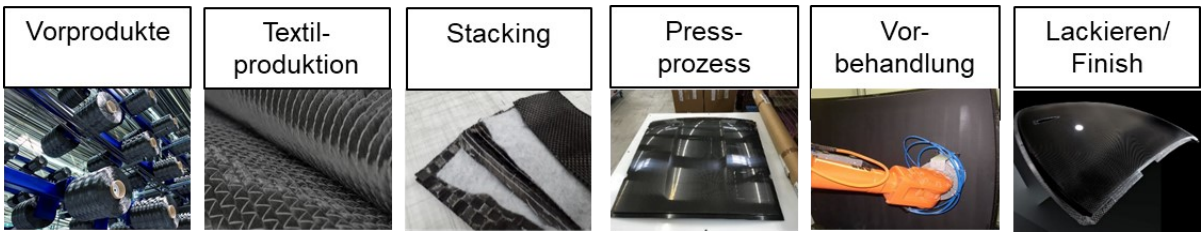


Abb. 31 Schematische Darstellung der Prozesskette für im Nasspressverfahren produzierte Class-A CFK Bauteile nach [64]. Von links mit der Textilproduktion (Herstellung von Gelegen und Geweben) über den Pressprozess bis hin zur Oberflächenveredelung über eine Klarlackierung.

Für die Versuche werden die gleichen textilen Halbzeuge, Harzsysteme, Prozessschritte und die gleiche Anlagentechnik wie in der Serienproduktion von CFK-Dächern verwendet. Der Lagenaufbau für im Nasspressverfahren hergestellte Class-A CFK-Dächer wird in Abb. 32 dargestellt. Dabei wird als Sichtlage ein 3k CF-Leinwandgewebe mit einem Flächengewicht von 200g/m² eingesetzt. Als mechanische Verstärkungslagen dienen im Inneren zwei Lagen von verwirkten Biaxialgelegen mit einem Flächengewicht von 250g/m². Die Rückseite bildet für einen symmetrischen Lagenaufbau ein 12k Leinwandgewebe mit einem Flächengewicht von 200g/m². Zwischen den Gewebe- und Gelegelagen wird jeweils eine Pufferschicht aus Polyester Vlies mit einem Flächengewicht von 60g/m² gelegt. Als Matrix dient das Dow Voraforce 5300 Epoxidharzsystem.

Abb. 32 Lagenaufbau CFK-Dach. [6]

Versuchswerkzeug

Als Vorbild dient das Werkzeug des BMW G15 8er CFK Dachs. Zur Reduzierung von Werkzeug- und Materialkosten, wurde das originale Dach in 1:2 skaliert. Das Versuchswerkzeug ermöglicht es kurzfristig und flexibel Prozessparameter, das Harzsystem und die textilen Halbzeuge zu ändern, kann jedoch auch im Serienumfeld betrieben werden. Auch das Verpressen von Prepregs ist möglich. Zudem ist es mit Messtechnik und einer Vorrichtung für ein prozessintegriertes Folientiefziehen ausgestattet. Dies ermöglicht seriennahe Versuche, ohne das Risiko ein Serienwerkzeug zu beschädigen. Die Erkenntnisse der Versuche können dabei direkt auf den Serienprozess übertragen werden, was Entwicklungszeit- und -kosten verringern kann. Die Abb. 33 zeigt die erste Werkzeughälfte (Matrize).

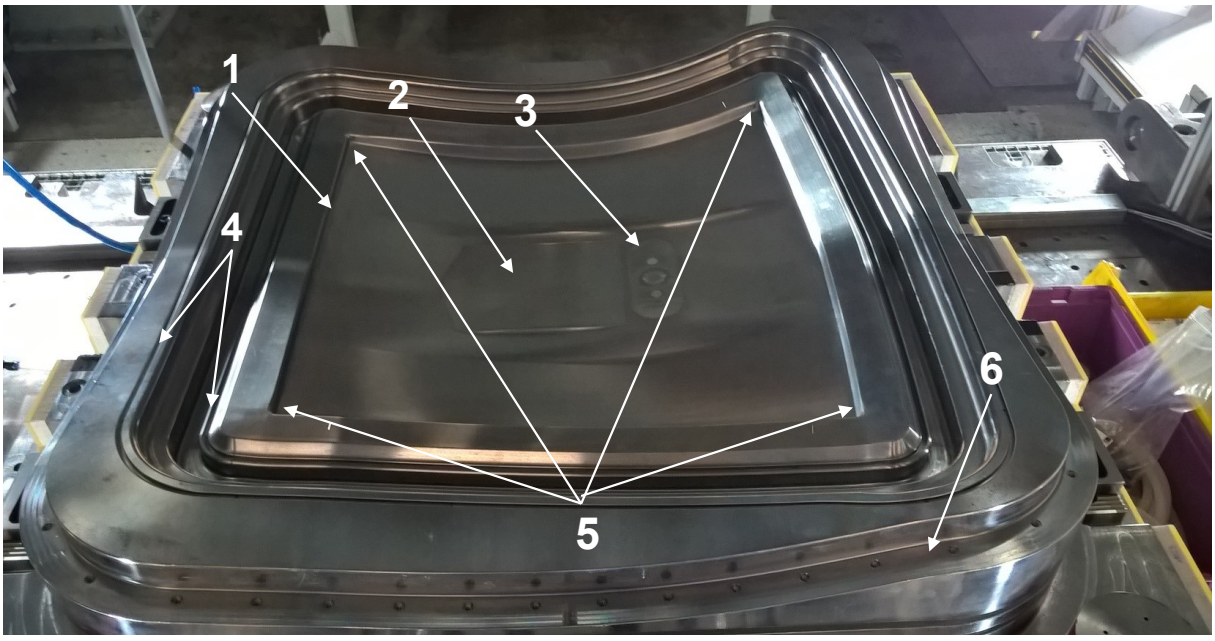


Abb. 33 Werkzeughälfte (Matrize) des Nasspress Versuchswerkzeugs. (**1)** Die Werkzeugfläche ist im Vergleich zu dem Serienwerkzeug in 1:2 skaliert, prozessrelevante Flächen und Radien wurden jedoch nicht verändert. **(2)** Das Werkzeug verfügt über eine ebene Messfläche im 150 x 200mm. **(3)** Für die Prozesssteuerung ist ein Temperatursensor, ein Drucksensor und ein DEA Sensor verbaut. **(4)** Entlüftungsnuten für die Prozessintegration von Folien. Der innere Kreislauf dient der Entlüftung, der äußere der automatischen Abdichtung. **(5)** Unsichtbare Kofferecken Entlüftung. **(6)** Aufnahmevorrichtung des Folienpositionierrahmens.

Flanschbereiche, Harzfallen, Umlenker und Quetschkanten entsprechen der Seriengeometrie (1). Da für eine 3D Topografiemessung mittels CWL-Sensor ebene Flächen vorteilhaft sind, hat das Werkzeug zusätzlich in der Mitte eine 150 x 200mm große Messfläche (2). Um Prozessparameter überwachen zu können, hat das Werkzeug je Werkzeughälfte einen Temperatur-, einen Druck- und einen DEA-Vernetzungssensor (3). *(Anmerkung: Da in dieser Arbeit ein Harzsystem aus einem geschlossenen Materialversorgungssystem mit bekanntem Kinetikmodell verwendet wurde, war der Einsatz des DEA-Sensors nicht notwendig. Der eingesetzte DEA-Sensor wird hauptsächlich für den Prepregprozess eingesetzt).*
Da das Werkzeug auch ein prozessintegriertes Tiefziehen von Folien ermöglichen soll, hat jede Werkzeughälfte zusätzlich einen patentierten, selbstabdichtenden Vakuumkreislauf (4,5) und eine Aufnahmevorrichtung für eine Folienpositionierhilfe (6). Das Tiefziehkonzept wird in Kap. 7 erklärt. Die Abb. 34 zeigt die zweite Werkzeughälfte (Patrize), die es über Entlüftungsbohrungen (8) in der Tauchkante und eine Dichtung ermöglicht, die Kavität bei geschlossenem Werkzeug kurz vor dem Pressen zu evakuieren.

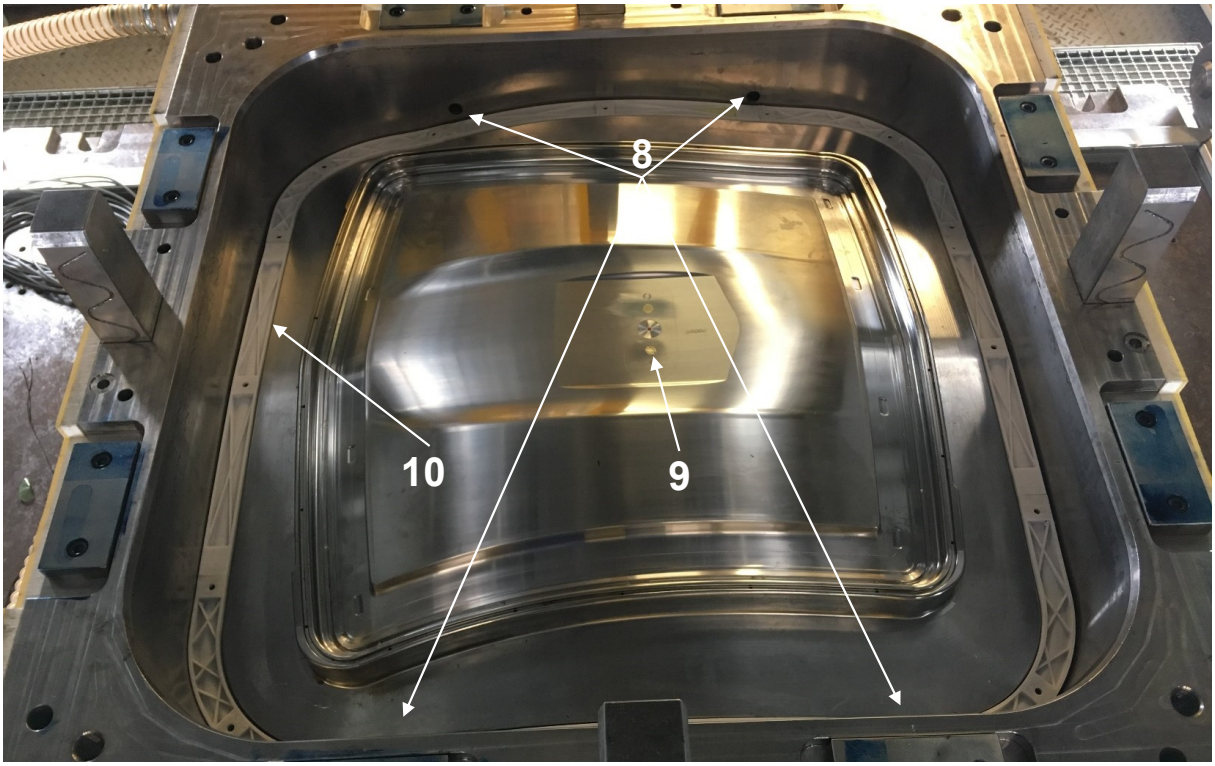


Abb. 34 Werkzeughälfte (Patrize) des Nasspress Versuchswerkzeugs. **(8**) Entlüftungsbohrungen für das Kavitätsvakuum. **(9)** Sensorpaket an der Rückseite der Messfläche mit Temperatursensor, Drucksensor und DEA Sensor. **(10)** Folienpositionierhilfe (ohne Folie) in Aufnahmevorrichtung.

Die Patrize verfügt ebenfalls über ein Sensorpaket (9) mit Temperatur-, Druck- und DEA-Sensor. Das Sensorpaket ist so angeordnet, dass es sich in der Mitte der Messflächenrückseite befindet. Auch diese Werkzeughälfte verfügt über eine Aufnahme der Positionierhilfe für das prozessintegrierte Folientiefziehen (10). Das Werkzeug kann mit beiden

Werkzeughälften nach oben eingebaut und sowohl mit als auch ohne Folien betrieben werden. Das Werkzeug eignet sich damit hervorragend für Parameterstudien und Materialversuche.

5.2. Methode zur prozesskettenbegleitenden Quantifizierung der Oberflächentopografie von Class-A CFK

Aus der Perspektive eines Automobilherstellers sind dekorative Class-A CFK Sichtbauteile wie Spiegelkappen oder Diffusoren zumeist extern zugekaufte Anbauteile, die als Sonderausstattung oder Sonderzubehör in geringen Stückzahlen verkauft werden. Dies führt zu Anforderungen und Prüfmethoden mit dem Fokus auf das Endprodukt. Folglich sind in der Automobilindustrie hauptsächlich Messmethoden für glänzende, fertig lackierte Bauteile etabliert (Kap. 2.6.1). Das Fahrzeuggewicht wird jedoch weiterhin eine fundamentale Bedeutung im Automobilbau haben und Sichtcarbonbauteile ermöglichen es, Leichtbau kundenwirksam zu inszenieren. Daher gibt es gerade bei Herstellern von Premium Fahrzeugen seit Jahren steigende Aktivitäten CFK Struktur- und Sichtcarbonbauteile selbst zu entwickeln und zu produzieren, um diese Technologie auch in höheren Volumina anbieten zu können und sich vom Wettbewerb technologisch zu differenzieren.
Eine In-house Produktion von Fahrzeugkomponenten wie beispielsweise CFK-Dächern führt dabei zu einem internen Anforderungs- und Qualitätsmanagement. Gerade mit zunehmender Automatisierung und Digitalisierung ist die Möglichkeit, Zwischenzustände definieren und quantifizieren zu können, von großer Bedeutung. Für eine kostenoptimierte Produktion von Class-A CFK Bauteilen ist es dabei erstrebenswert, vollständig auf eine aufwendige Nacharbeit verzichten zu können. Hierfür ist es im Falle der Faserabzeichnung von CFK Bauteilen zielführend, schon im trockenen textilen Halbzeug und möglichst nach jedem Prozessschritt eine quantifizierte Aussage über die Oberflächentopografie des Zwischenprodukts treffen zu können. Daher wurde im Rahmen dieser Arbeit eine Prüfkette entlang der relevantesten Prozessabschnitte entwickelt. Die Abbildung 35 zeigt die oberflächenrelevanten Schritte bei der Fertigung von Class-A CFK-Dächern im Nasspressverfahren und die dazugehörige Messmethode inkl. Kennwerten zur Bewertung der Oberflächentopografie.

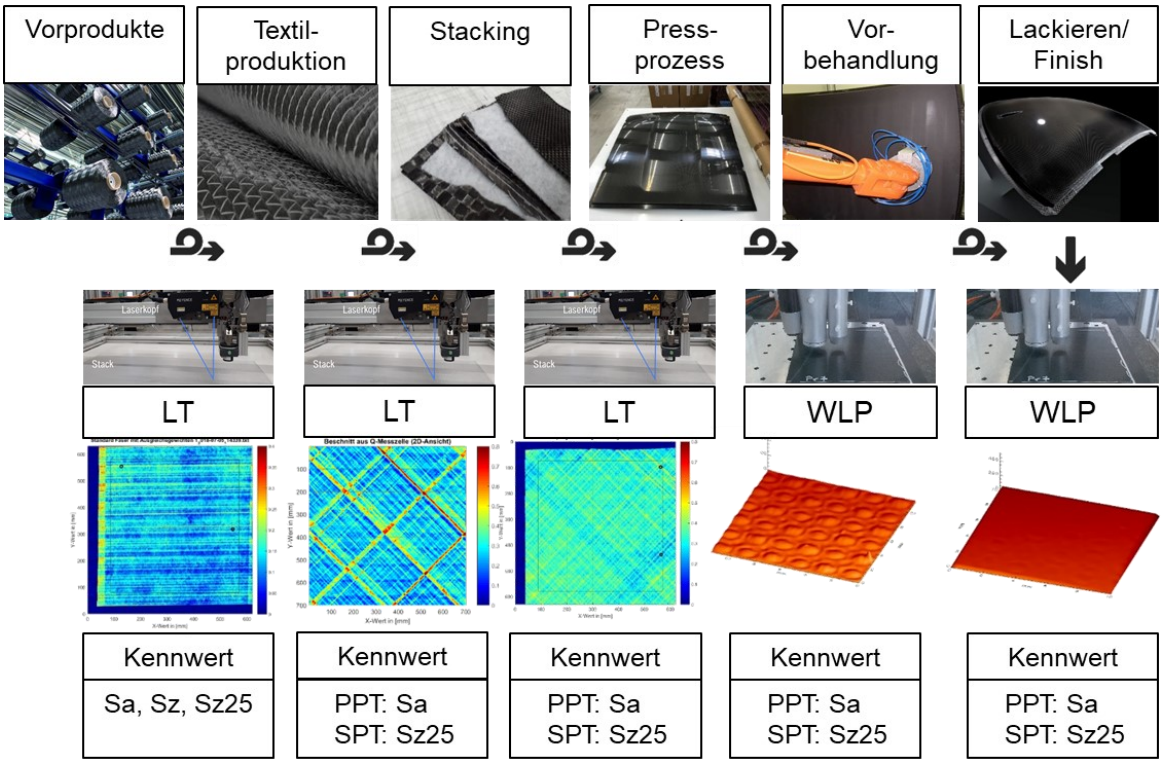


Abb. 35 Prinzip der Methode zur prozesskettenbegleitenden Quantifizierung der Oberflächentopografie von Class-A CFK Bauteilen (Prozesskette nach [64]).

Mit der Prüfkette ist es möglich, für die Zwischenprodukte jedes Prozessschritts – vom Textil bis zum lackierten Endbauteil – die Oberflächentopografie mit demselben Kennwert zu quantifizieren. Dabei kann von Anfang an sowohl die primäre Faserdurchzeichnung (PPT) als auch die sekundären Faserdurchzeichnungen (SPT) betrachtet werden. Somit kann der Einfluss des Textils, der Matrix und der Prozessparameter auf die Ausprägung der Faserabzeichnung separat betrachtet werden. Dies erlaubt es, die Ursachen für Faserabzeichnungen direkt in dem Prozessschritt, in dem sie entstehen, zu detektieren und Optimierungsmaßnahmen abzuleiten. Des Weiteren können konkurrierende und komplementäre Wirkzusammenhänge ermittelt werden und darauf aufbauend Stellhebel identifiziert und Maßnahmen zur Prozessoptimierung abgeleitet werden. Damit ist eine Vorhersage der Endbauteilqualität ausgehend von jedem Prozessschritt möglich.

Nicht zuletzt ermöglicht die Charakterisierung der Zwischenprodukte es, Toleranzen der Zwischenprodukte bewusst aufeinander abzustimmen und daraus abgeleitet eine kostenoptimierte Prozesskette aufzubauen. Nachfolgend werden die Messmethoden chronologisch entlang der Prozesskette vorgestellt. Zunächst wird die Oberflächentopografiemessung der trockenen textilen Halbzeuge mittels Lasertriangulation (LT) beschrieben. Hierbei ist es möglich die Oberflächenwelligkeit der Sichtlage (PPT) und innerer Lagen (SPT) zu quantifizieren. Im zweiten Schritt wird die Messung der Rohbauteile und lackierten Endbauteile mit einem Weißlicht Profilometer (WLP) zur Quantifizierung von primären Faserdurchzeichnungen PPT vorgestellt.

5.2.1. Quantifizierung der primären und sekundären Faserdurchzeichnung textiler Halbzeuge mittels Lasertriangulation

Die für Class-A CFK Bauteile eingesetzten Textilien haben im trockenen, unverpressten Zustand üblicherweise Dickenschwankungen im zweistelligen Mikrometerbereich und größer. Daher eignet sich die Lasertriangulation hervorragend für eine zeiteffiziente und genaue Ermittlung der Oberflächentopografie der textilen Halbzeuge. Das für diese Arbeit eingesetzte Messportal verfügt über einen Vakuumtisch, ein Control Panel und einen Portalroboter. Der Triangulationssensor der Fa. Keyence hat eine Auflösung von 10 µm in Dickenrichtung (z) und 100 µm in Ebenenrichtung (x/y). Durch die maximalen Probenmaße von 800 x 800 mm können auch Textilschwankungen mit größeren Abständen identifiziert und quantifiziert werden. Die maximale Messgeschwindigkeit des Portalroboters liegt bei 500 mm/s. Mit einem Tastabstand von 4 Pixel/mm ist es möglich die Fläche in knapp zwei Minuten zu vermessen. Für die Messgeschwindigkeit ist nicht der Lagenaufbau des Halbzeugs, sondern der Messbereich und die Abtastrate entscheidend. [117]

Die Abb.36 zeigt den Aufbau des Messportals. Auf einer Achse (1) ist der Laserkopf (2) montiert. Die Achse selbst ist auf zwei Portalachsen mit Linearmotoren montiert. Das Halbzeug (4) wird auf einen Vakuumtisch (5) positioniert und mit einer in einem Rahmen eingespannten Folie (3) abgedeckt. Durch das Anlegen von Vakuum wird die Luft durch Löcher im Tisch abgesaugt und die 40-60µm dünne Folie an das Flächengebilde gedrückt.

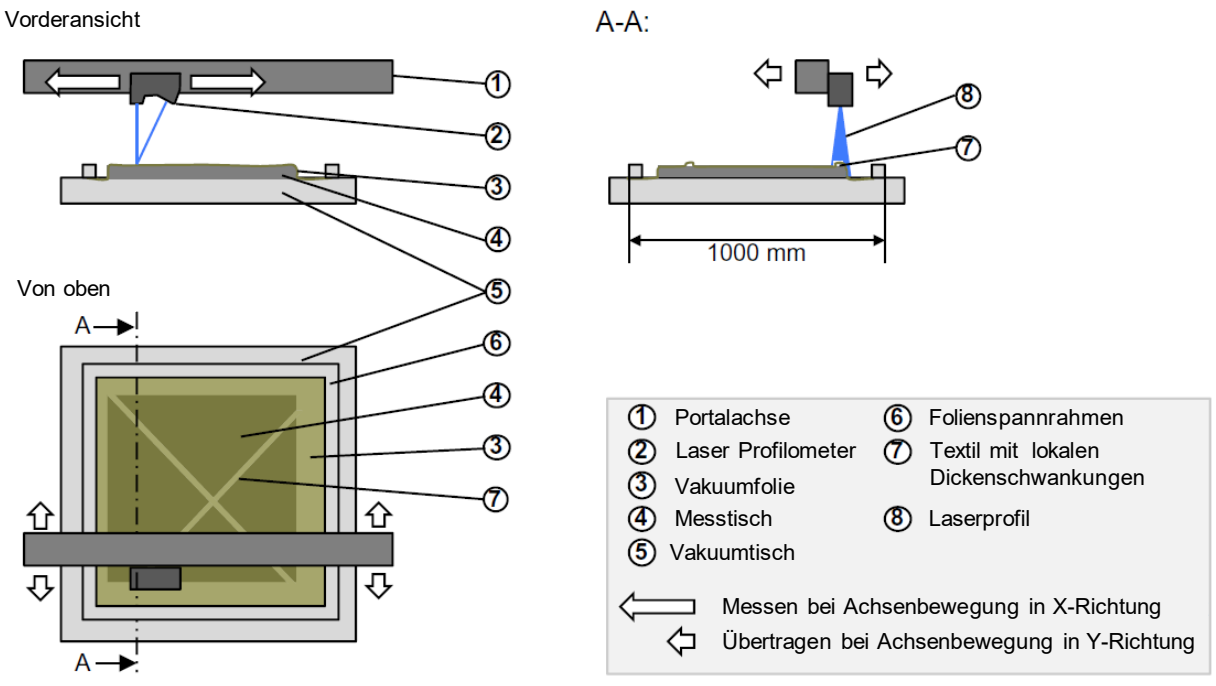


Abb. 36 Aufbau der Portalzelle für die Textilvermessung mittels Lasertriangulation nach [117].

Durch den Unterdruck von etwa 0,8 bar komprimiert die Folie das Textil und wird dabei in alle Vertiefungen und Gassen gezogen, was die Textilstruktur und etwaige Dickenschwankungen des textilen Halbzeugs erkennbar und damit messbar macht. Die glänzende Folie reflektiert den Laserstrahl des Messkopfes, wodurch das Messergebnis unabhängig von den Reflektionseigenschaften des Prüfkörpers wird. In diesem Zustand kann die Messung starten und der Laserkopf (Linienbreite 70 mm) wird mäanderförmig über den Messbereich geführt. Die Messdaten können anschließend über Tools (z.B. Matlab) entweder direkt analysiert oder so konvertiert werden, dass sie in anderen Analysetools (z.B. FRT Mark III Software) verarbeitet werden können. Da der Messkopfabstand nicht kalibriert ist, ist für die Auswertung der Topografiedaten vor oder nach der eigentlichen Messung einer Probe eine Referenzmessung ohne Probe notwendig. Um die Topografiedaten der Probe selbst zu erhalten, subtrahiert eine Software die Werte der Referenzmessung von den Messwerten der Probe.

Die so relativierten Daten der Oberflächentopografie können mit den aus Kapitel 2.6.3 bekannten und genormten Oberflächenkennwerten ausgewertet werden sowie als 2D und 3D Darstellungen ausgegeben und analysiert werden. (Abb. 37)

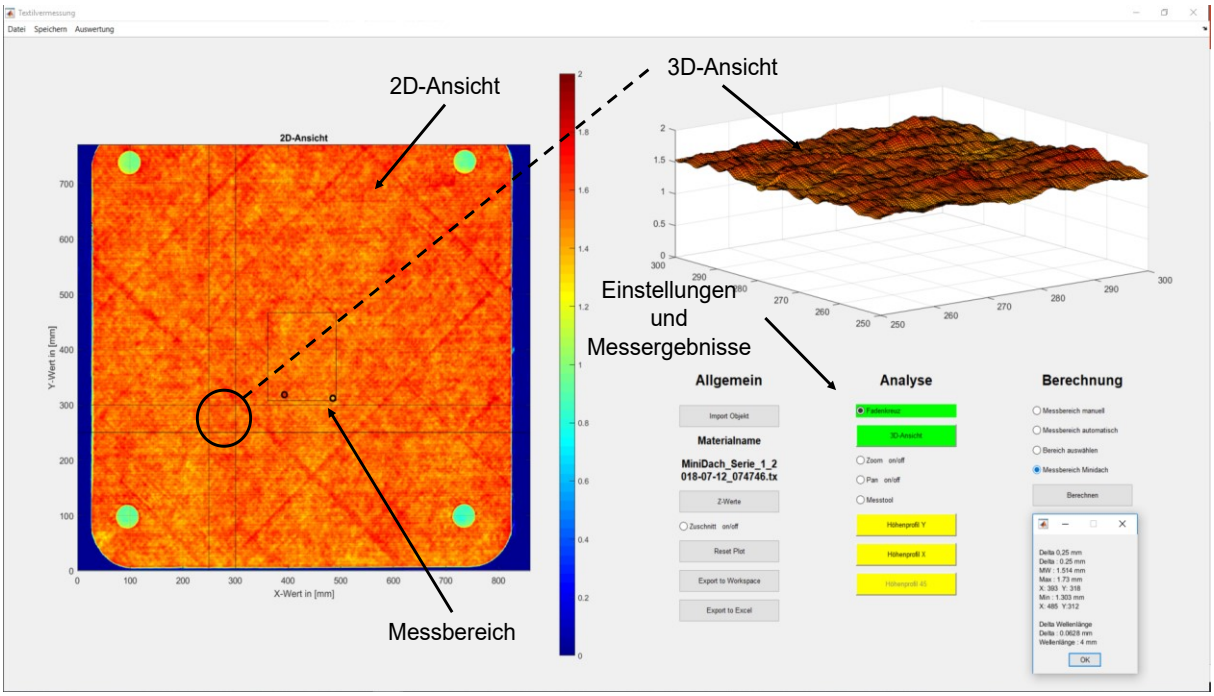


Abb. 37 Analyseoberfläche zur Auswertung der ermittelten Messdaten (Matlabtool)

Somit können die textilen Halbzeuge sowohl mit an die Anforderung angepassten, selbst programmierten Analysemethoden und gleichzeitig mit kommerziellen Softwarelösungen ausgewertet werden.

Auswertemethodik

Für die Auswertung der Oberflächenwelligkeit der Sichtlage wird das trockene Textil mittels Lasertriangulation vermessen und mit der in Kap 5.2.2 beschriebenen Auswertemethode analysiert.

Für die Auswertung der Oberflächenwelligkeiten innerer Textillagen, die sekundäre Faserdurchzeichnungen verursachen, wurde im Rahmen dieser Arbeit ein bereits in der Oberflächenanalysesoftware „FRT Mark III“ eingesetzter Kennwert „sWz25“ weiterentwickelt. Wie in Abb. 41 dargestellt, entspricht der sWz25-Wert dem arithmetischen Mittelwert der Wz-Werte (DIN 4287) von 25 Einzelmessflächen. [118] Durch die Unterteilung in 25 Einzelflächen werden Ausreißer minimiert und sich durch mehrere Sektoren ziehende Formabweichungen verstärkt. Jedoch ist es in der „FRT Mark III“ Software nicht möglich die Einzelmesswerte ausgeben zu lassen oder die Standardabweichung der Einzelmessungen zu bestimmen. Somit ist weder ein Rückschluss auf die Teilbereiche der Gesamtfläche noch auf die Homogenität des Flächengebildes möglich. Für die Qualitätsbewertung der eingesetzten textilen Halbzeuge sind diese Informationen jedoch essenziell. Daher wurde der „FRT Mark III“ spezifische Kennwert sWz25 in das für diese Arbeit programmierte Auswertetool implementiert und modifiziert. (Abb.38)

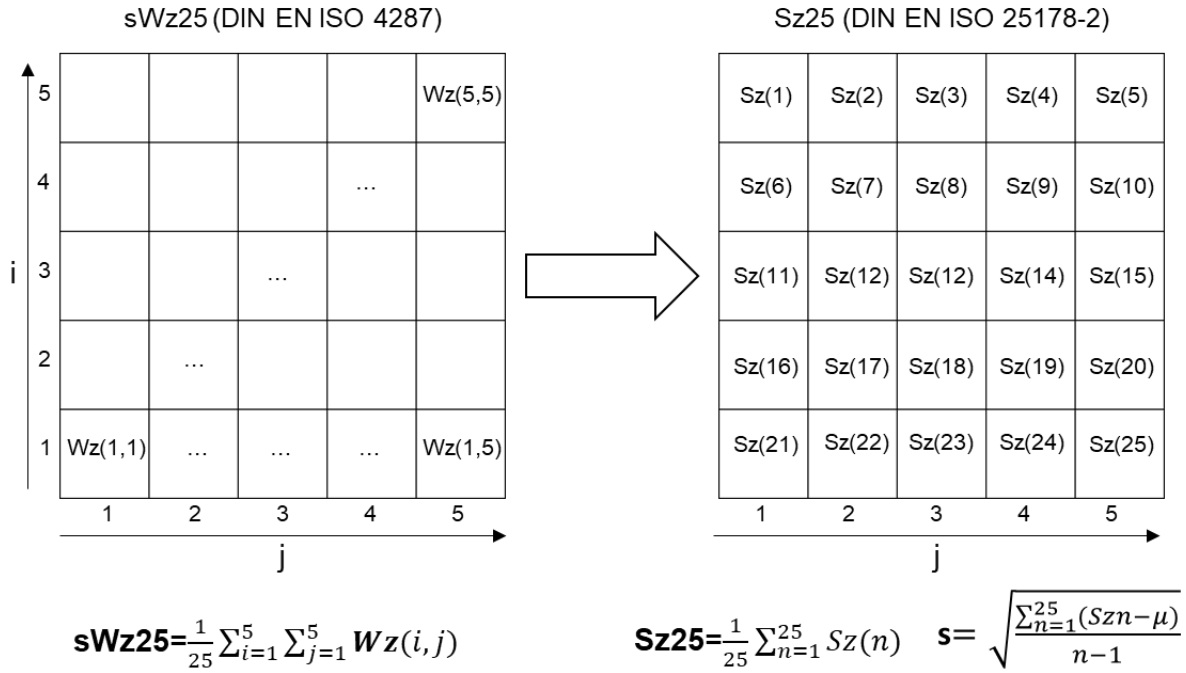


Abb. 38 Auswertemethodik sWz25 links [118] und daraus abgeleitet Sz25 [6] rechts. Zusätzlich wird die Standardabweichung (der Stichprobe) mit angegeben, um eine Aussage über die Textilhomogenität zu treffen.

Der verwendete Kennwert wird dabei als Sz25 bezeichnet. Wie bei dem Kennwert sWz25 wird die Messfläche in 25 Einzelflächen unterteilt, allerdings wird für die Einzelflächen der Sz-Wert nach DIN25178-2 bestimmt. Es werden sowohl die Einzelmesswerte als auch der Mittelwert (Sz25) und die Standardabweichung ausgegeben. Die Sz Ermittlung der Einzelflächen erfolgt dabei zeilenweise. Somit wird der Einfluss von diskreten linienförmigen Dickenabweichungen auf das Messergebnis verstärkt. Abb. 39 zeigt einen Vergleich aus der Praxis mit einem glatten Biaxialgelege A (links) und einem stark inhomogenen Biaxialgelege B, das zu starken SPT Effekten im Endbauteil führen würde (rechts).

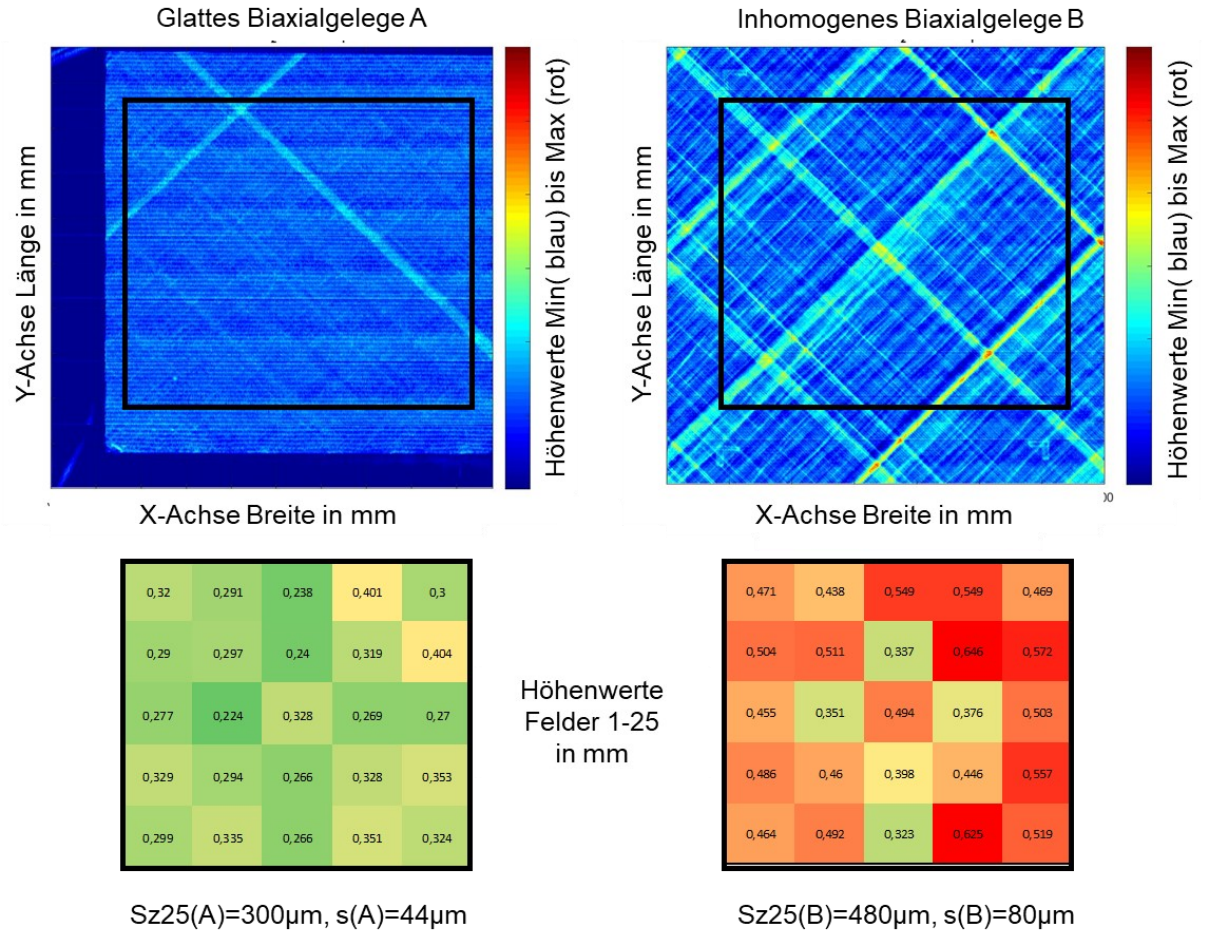


Abb. 39 Vergleich eines glatten Biaxialgeleges A (links) mit einem stark inhomogenen B (rechts). Sowohl visuell als auch an den SPT Kennwerten Sz25 und der Standardabweichung s werden die Unterschiede deutlich. Das rechte Textil B hat nicht nur eine deutlich stärkere Welligkeit durch Dickenschwankungen (Sz25(B) > Sz25(A)), sondern ist auch deutlich inhomogener (s(B)>s(A)).

Die Biaxialgelege A und B sind rein visuell bereits sehr gut zu unterscheiden. Bei beiden sind die Faserlaufrichtungen in +45° und -45° zu erkennen. Das Biaxialgelege A ist auf den ersten Blick glatter und homogener als das Biaxialgelege B.

Der Sz25 Wert des Textils A liegt mit Sz25(A)=300µm deutlich unter dem Sz25 Wert des Textils B mit Sz25(B) =480µm. Zudem Schwanken die Einzelwerte im Biaxialgelege B deutlich stärker, was zu einer Standardabweichung der Sz-Werte der 25 Einzelmessflächen von

s(B)=80µm führt. Die Standardabweichung ist beinahe doppelt so hoch wie die des homogenen Textils A (s(A)=44µm).

Zusammengefasst können mit dem Kennwert Sz25 und der dazugehörigen Standardabweichung s die Dickenschwankungen von Biaxialgelegen wie folgt charakterisiert werden (Tab. 1):

Ziel	**Kennwert**	**Aussage über**
Welligkeitsniveau der Textilpropbe	Sz25	Gesamtglätte der Stichprobe
Homogenität der Textilprobe	s (Sz 1-25)	Schwankung der Stichprobe
Homogenität des Welligkeitsniveaus	$s\,(Sz25)_n$	Produktionsstabilität
Durchschnittliche Textilhomogenität	$\overline{x}\ s(Sz1\text{-}25)_n$	Qualität der Rollencharge

Tab. 1 Charakterisierung SPT-verursachender Dickenschwankungen von Biaxialgelegen mit dem Kennwert Sz25 und der dazugehörigen Standardabweichung der Stichprobe s.

Bei der Auswertung der Oberflächentopografie einer Probe gibt der Kennwert Sz25 Auskunft über das Welligkeitsniveau eines Textils. Die Standardabweichung s der Einzelmessflächen (Sz 1-25) ermöglicht eine Aussage über die Homogenität des geprüften Textils. Werden mehrere Proben beispielsweise einer Rollencharge vermessen, so kann die Standardabweichung s der Sz25-Werte aller Proben Auskunft über die Homogenität des Welligkeitsniveaus der Textilcharge geben. Daraus können Rückschlüsse auf die Produktionsstabilität der Textilmaschine geschlossen werden. Der Mittelwert $\overline{x}$ der Standardabweichungen $s(Sz1\text{-}25)_n$ der Einzelmessflächen aller Proben gibt Auskunft über die durchschnittliche Textilhomogenität.

Somit ergeben sich folgende Möglichkeiten, die mittels Lasertriangulation erhobenen Topografiedaten von Textilien in Verbindung mit dem Sz25-Kennwert in der Material- und Prozessoptimierung einzusetzen:

- Grenzwerte und Toleranzen für Endbauteilrelevante Merkmale setzen
- Schwankungen innerhalb von Textilrollen (Maschinenstabilität) ermitteln
- Chargenschwankungen identifizieren (Produktionsstabilität)
- textile Halbzeuge unterschiedlicher Hersteller miteinander vergleichen
- Analyse von Optimierungsmaßnahmen visuell und quantifiziert messbar machen.

Mithilfe der entwickelten Prüfmethode können im Serienumfeld und bei der Absicherung von Neuentwicklungen biaxiale Verstärkungslagen bereits im trockenen Zustand auf die Homogenität der Dickenschwankungen untersucht werden. Daraus können anforderungsoptimierte Grenzwerte über den Kennwert Sz25 gesetzt werden. Dies ermöglicht eine Steigerung der Zeiteffizienz, da aus potenziellen Halbzeugen erst Bauteile hergestellt werden, wenn die gesetzten Grenzwerte eingehalten werden. Die Anwendung der entwickelten Prüf- und Analysemethode wird in [6] ausführlich beschrieben.

5.2.2. Quantifizierung primärer Faserdurchzeichnungen entlang der Prozesskette mit Hilfe eines Weißlicht Profilometers (WLP)

Im Rahmen dieser Arbeit wird zur Messung der Oberflächentopografie ein Weißlicht Profilometer der Serie MircoProf der Fa. FRT GmbH eingesetzt. Der verwendete Sensor besitzt nach Herstellerangaben ein laterales Auflösungsvermögen von 0,5 µm (in x- und y-Richtung) sowie eine vertikale Auflösung (in z-Richtung) von bis zu 6 nm. Die Auflösung im sub-µm Bereich ermöglicht es, mit minimalen Messunsicherheiten feinste Unebenheiten der Oberflächentopografie zu detektieren. Das Gerät kann sowohl für matte als auch glänzende Oberflächen eingesetzt werden, was das Charakterisieren von textilen Halbzeugen und Bauteilen vor und nach dem Lackieren ermöglicht. Wie in Abb. 40 dargestellt, ist es möglich, die Bauteiloberflächentopografie der drei relevanten Produktionsschritte zu erfassen.

Abb. 40 3D-Oberflächenprofil der relevanten Zustände eines CFK-Bauteils visualisiert in der Analysesoftware FRT Mark III. Links das textile Halbzeug, in der Mitte das unlackierte Rohteil und rechts das final lackierte Class-A Bauteil.

Die hohe z-Auflösung ermöglicht wiederholgenaue Messungen von transparenten Oberflächen, die visuell bereits sehr eben und merkmalsfrei erscheinen – bspw. konsolidierten und lackierten FVK-Oberflächen. Mit der zugehörigen Analysesoftware FRT Mark III können die Messdaten nach DIN 4287 und DIN EN ISO 25178 ausgewertet werden. Die für diese Arbeit vorhandene Ausführung des WLP kann maximal Flächen von 150 x 150mm vermessen, weshalb zu prüfende Proben überwiegend zugeschnitten werden müssen. Die FRT GmbH bietet jedoch auch In-Line Versionen des WLP an, was das zerstörungsfreie Messen von Bauteilen ermöglicht. [119]

Auswertemethodik und Kennwerte

Die für Class-A CFK Bauteile in Sichtoptik eingesetzten Textilien sind hauptsächlich 3k Leinwand- und Köpergewebe mit gleichmäßigen, sich wiederholenden Mustern. Die Ausprägung der Faserdurchzeichnung wird dabei durch die Amplitude der Oberflächenwelligkeit bestimmt. Somit kann für die Quantifizierung des PPT-Effekts von Gewebesichtlagen die mittlere arithmetische Höhe der Fläche **Sa** verwendet werden, da der Kennwert amplitudensensitiv ist (siehe Kapitel 2.6.3). Hierfür werden die mittels

Lasertriangulation oder Weißlicht Profilometer erhobenen Topografiedaten mit der FRT Mark III Software nach DIN EN ISO 25178-2 ausgewertet. Wie in Kap. 2.6.2 ausführlich beschrieben, ist für reproduzierbare Messergebnisse die richtige Filtereinstellung nach DIN-Norm essenziell. Daher werden die Topografiedaten je nach Art der Sichtlage (Bindungsart, Filamentanzahl und Rovingbreite) über eine S-L-Filterung nach der relevanten Wellenlänge gefiltert. Für die Ableitung der Filtereinstellungen wurde zunächst das im Rahmen dieser Arbeit eingesetzte Kohlenstofffaser 3k Leinwandgewebe (1/1) mit einem Flächengewicht von 200g/m² als trockenes Textil und im konsolidierten Zustand vermessen. Die Abbildung 42 zeigt beispielhaft die Messergebnisse.

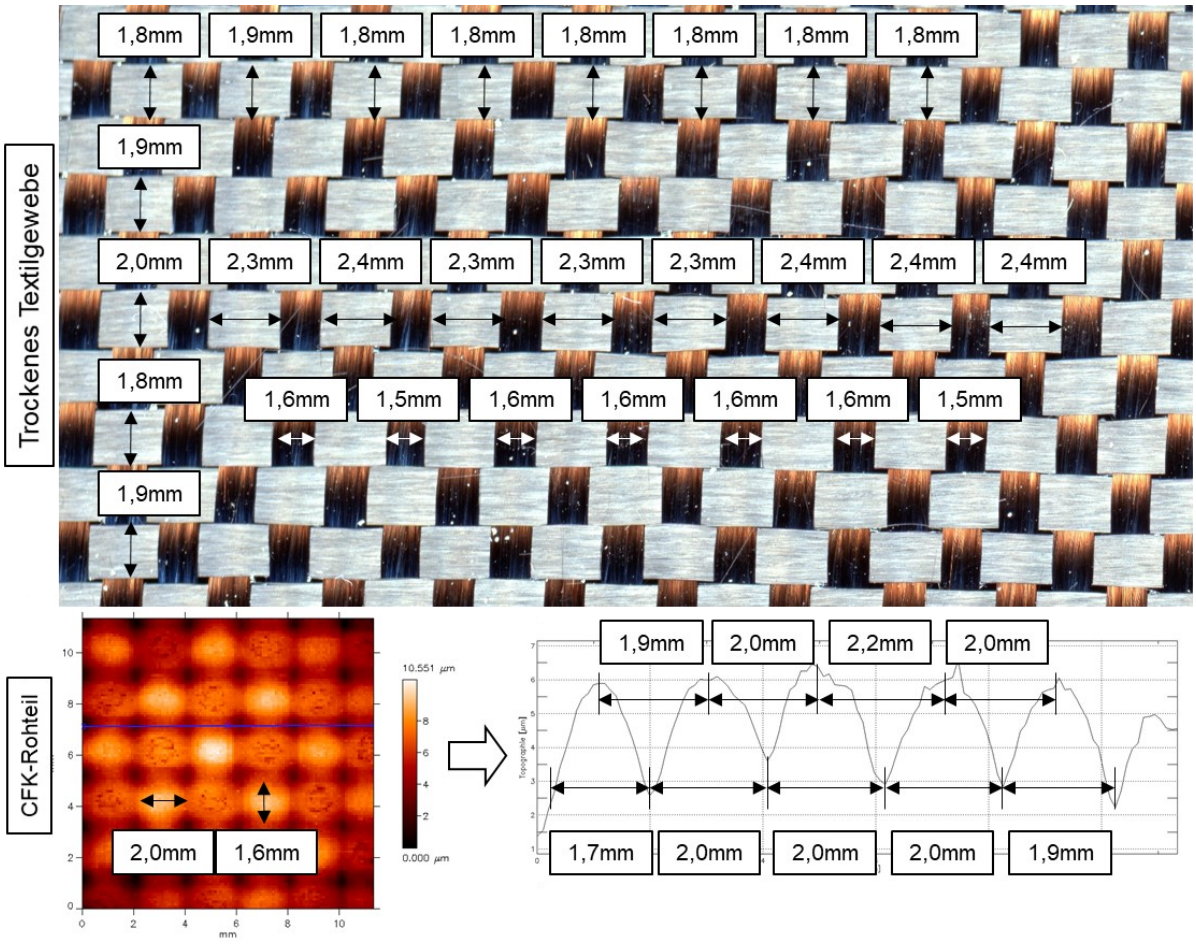


Abb. 41 Beispielhafte Messungen des 3k Leinwandgewebes zur Ermittlung der S-L-Filtereinstellungen. Oben: optische Digitalisierung der trockenen Sichtlage mit einem kalibrierten 4800dpi Scanner. Unten: Auswertung der Wellenlängen in einem unlackierten Rohteil.

Die Auswertung ergibt, dass die 3k Rovings des Leinwandgewebes je nach Ausrichtung Maße zwischen 1,5 und 2,4 mm erreichen. Nach dem Nasspressvorgang können Wellenlängen im Bereich 1,6 bis 2,2 mm gemessen werden.

Für eine reproduzierbare Auswertung der durch die Sichtlage erzeugten primären Faserdurchzeichnung (PPT) kann somit folgende Filtereinstellung abgeleitet werden:

PPT-Filter

S-Filter: 1500µm (1,5mm); L-Filter 2500µm (2,5mm)

Der fortan genannte PPT-Filter ist so gewählt, dass die von einem 3k Leinwandtextil verursachten Welligkeiten hervorgehoben werden. Anteile mit größeren und kleineren Wellenlängen werden ausgeblendet. Zur Validierung der PPT-Filterwahl wird in Abb. 42 zunächst der Einfluss des S-L-Filters auf die Profillinie eines CFK Bauteils mit Leinwandgewebe als Sichtlage veranschaulicht.

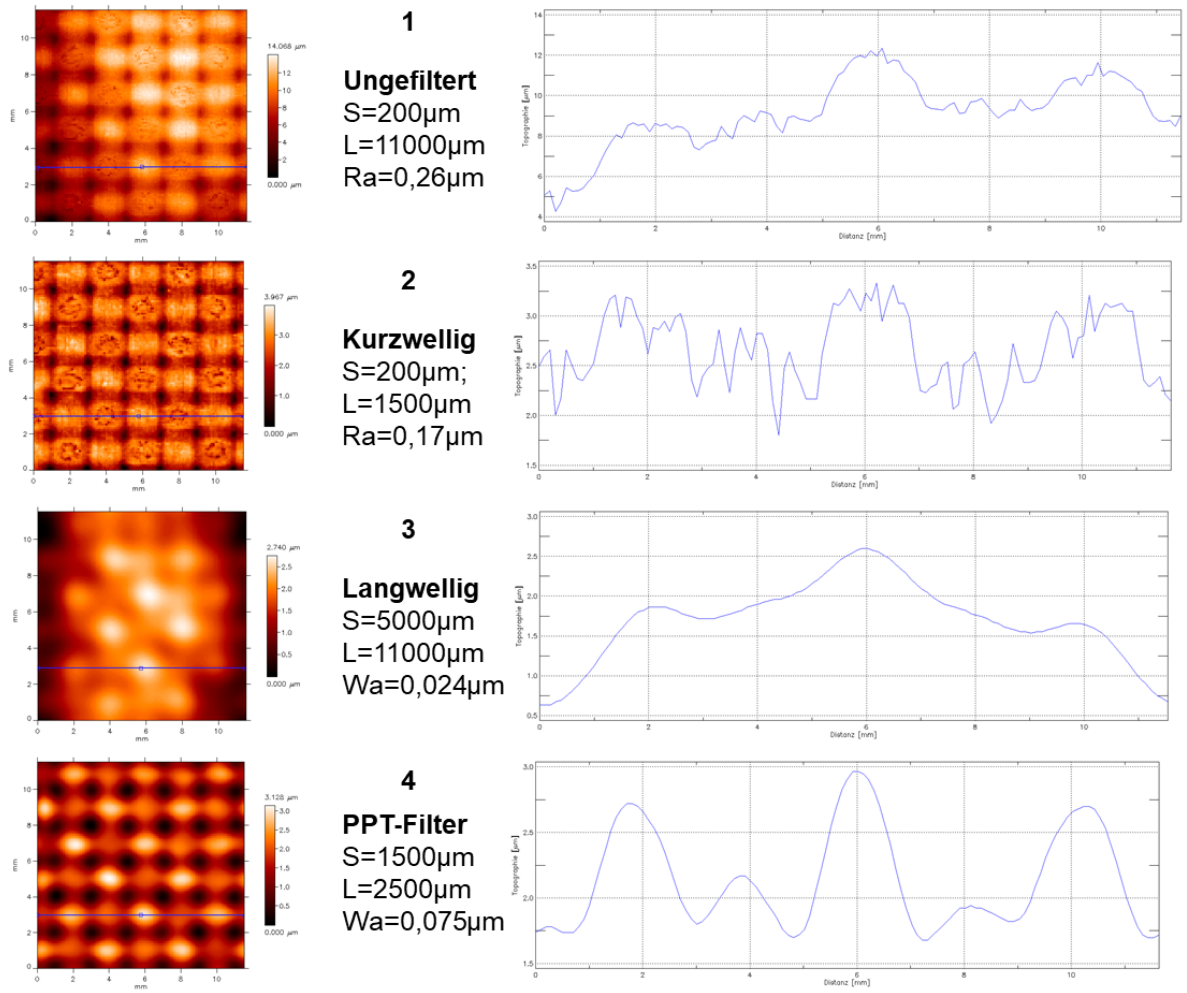


Abb. 42 Einfluss der Filtereinstellung auf die resultierende Oberfläche. (1) Ungefiltert ist der Einfluss kurzer und langwelliger Anteile sehr groß, was die Faserdurchzeichnung übertönt. (2) Nach der Rauheit gefiltert ist die Wellenstruktur des Leinwandgewebes nur grob erkennbar. (3) Gefiltert nach längerwelligen Bereichen ist die Wellenstruktur des Leinwandgewebes ebenfalls kaum erkennbar. (4) Erst bei korrektem PPT-Filter werden die Berge und Täler des Leinwandgewebes sichtbar. Es ist sogar möglich die Laufrichtung zu erkennen. Hohe Berge sind Rovings quer zur Messrichtung, flache Berge längs zur Messrichtung.

Erst die korrekte Filterung macht die von der Sichtlage verursachte Faserdurchzeichnung in der Profillinie sichtbar. Die anderen beispielhaften Filtereinstellungen (1, 2, 3) verfälschen das Messergebnis. Wird das Profil ungefiltert untersucht (1), so ist der Einfluss kurzer und langwelliger Anteile so groß, dass bei der Profillinienauswertung die Faserdurchzeichnung übertönt wird. Bei der Filterung hin zu kurzen Wellenlängen (2) ist die Wellenstruktur des Leinwandgewebes im Profil kaum erkennbar. Die kurzwelligen Amplituden sind teilweise höher als die Faserdurchzeichnung des Leinwandgewebes. Der hohe Ra-Wert wird von kurzwelligeren Gestaltabweichungen und nicht von der Faserdurchzeichnung verursacht; gefiltert nach langwelligen Bereichen (3) ist die Wellenstruktur des Leinwandgewebes im resultierenden Profil ebenfalls kaum erkennbar. Da die Unebenheiten der Messtrecke überwiegend kurze Wellenlängen <5 mm aufweist, ist auch der Ra-Wert extrem niedrig. Erst bei korrekter S-L-Filter Einstellung (4) werden die gesuchten Berge und Täler des Leinwandgewebes sichtbar. Es ist sogar möglich, die Laufrichtung des Gewebes zu erkennen. Flache Berge sind Rovings längs zur Messrichtung (Kette) und hohe Berge quer zur Messrichtung (Schuss). Der Vergleich zeigt, dass keine oder eine falsche Filtereinstellung dazu führen kann, dass Gestaltabweichungen anderer Wellenlängen die gesuchte Faserdurchzeichnung überlagern und dadurch keine korrekten Korrelationen abgeleitet werden können. Die Filtereinstellung muss somit auf das gesuchte Charakteristikum angepasst werden.

Der Einfluss der Filtereinstellung lässt sich analog auf die flächige Auswertung der Oberflächentopografie übertragen. Hierfür wurden drei CFK Bauteile geprüft, die in demselben Werkzeug, jedoch bei unterschiedlichen Prozesstemperaturen (105, 120 und 130°C) gefertigt wurden. (Abb. 43, nächste Seite)

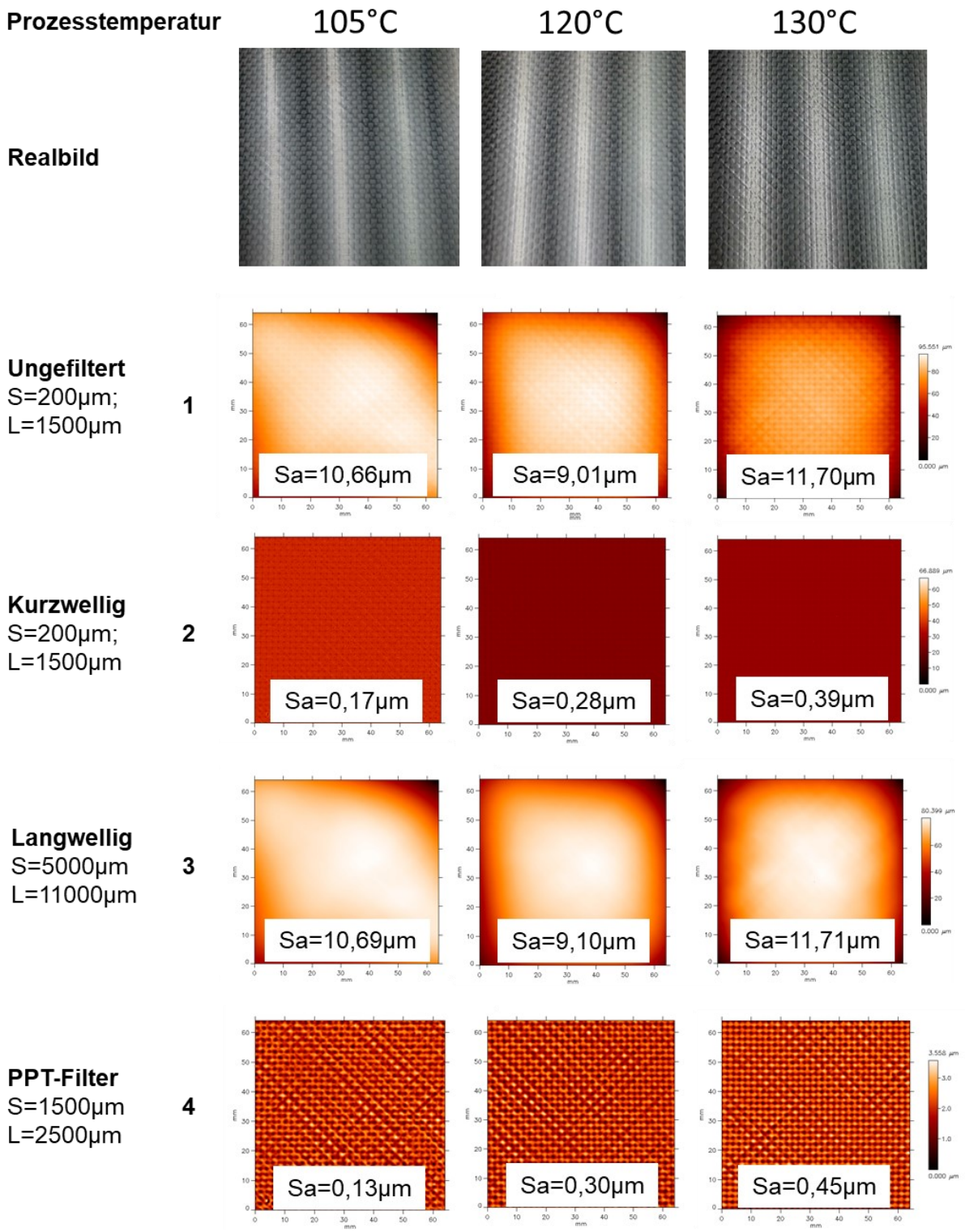


Abb. 43 Einfluss der Filtereinstellung auf das Ergebnis des Sa-Werts. Wie auf den Realbildern ersichtlich, wird die Faserdurchzeichnung durch steigende Prozesstemperaturen verstärkt. Sowohl die Einstellung (1) ungefiltert als auch (2) gefiltert nach langen Wellen längen zeigen keine Korrelation zur steigenden Faserdurchzeichnung. Die Filtereinstellung (2) folgt zwar dem Trend, allerdings nicht so direkt wie die auf die Sichtlage abgestimmte PPT-Filtereinstellung (4).

Wie in Kap. 2.5 beschrieben, führt das Erhöhen der Prozesstemperatur aufgrund der unterschiedlichen thermischen Ausdehnungskoeffizienten von Matrix und Faser zu einer steigenden Ausprägung von Faserdurchzeichnungen. Die Unterschiede sind mit bloßem Auge

direkt zu erkennen. Dementsprechend muss ein amplitudensensitiver Kennwert wie Sa diesem Trend bei korrekter Filtereinstellung ebenfalls folgen und ebenfalls größer werden. Sowohl die ungefilterten Topografiedaten (1) als auch die Filtereinstellung zu Gunsten langwelliger Anteile (3) können weder visuell noch über den Sa-Wert eine Korrelation zur steigenden Faserdurchzeichnung zeigen. Die Werte steigen nicht mit stärkerer Ausprägung der Faserdurchzeichnung, sondern scheinen von anderen Faktoren abhängig zu sein. Dagegen zeigen die kurzwellige Filtereinstellung (2) und die PPT-Filtereinstellung (4) eine Korrelation, wobei die PPT-Filtereinstellung dem Trend besser folgt. Zudem ist davon auszugehen, dass bei der Auswertung kurzer Wellenlängen beispielsweise eine unterschiedliche Rauheit der Werkzeugoberfläche zu einer Änderung der Messergebnisse bei derselben temperatur-induzierten Faserdurchzeichnung führt. Dies bestätigen auch die Ergebnisse von Schubel et al. Hier wurden CFK-Bauteile in Werkzeugen mit verschiedener Rauheit (Ra=0,07µm bis 0,53µm) gefertigt und auf ihre Rauheit hin geprüft. Die Bauteile hatten nicht nur durchgehend leicht höhere Ra-Werte als das Werkzeug, sondern folgten der steigenden Rauheit der Werkzeugoberfläche, ohne die Kennwerte im lackierten Zustand signifikant zu beeinflussen. [55] Daraus abgeleitet ist das Herausfiltern kurzer Wellenlängen im Bereich der Rauheit ratsam, um stabile (werkzeugunabhängige) Messergebnisse zu generieren.

Mit dem eingeführten Kennwert (Sa) und der PPT-Filtereinstellung für die untersuchte Sichtlage (3k Leinwand: S-Filter=1500µm; L-Filter=2500µm) kann die Veränderung der Oberflächenwelligkeit entlang der Prozesskette quantifiziert werden. Somit kann die Ausgangswelligkeit des textilen Halbzeugs und die Veränderung der Oberflächenwelligkeit der nachfolgenden Prozessschritte dargestellt werden.

Wie in Abb. 44 (nächste Seite) beschrieben, dämpft jeder Prozessschritt die von der Gewebestruktur verursachte Oberflächenwelligkeit. So beträgt der Sa-Wert des trockenen Hexcel 3k Leinwandgewebes im Schnitt 5,10 µm. Durch den Standard Nasspressprozess verringert sich die Oberflächenwelligkeit um ca. 97 % auf durchschnittlich 0,15 µm für ein unlackiertes, Class-A-fähiges Rohteil.

.

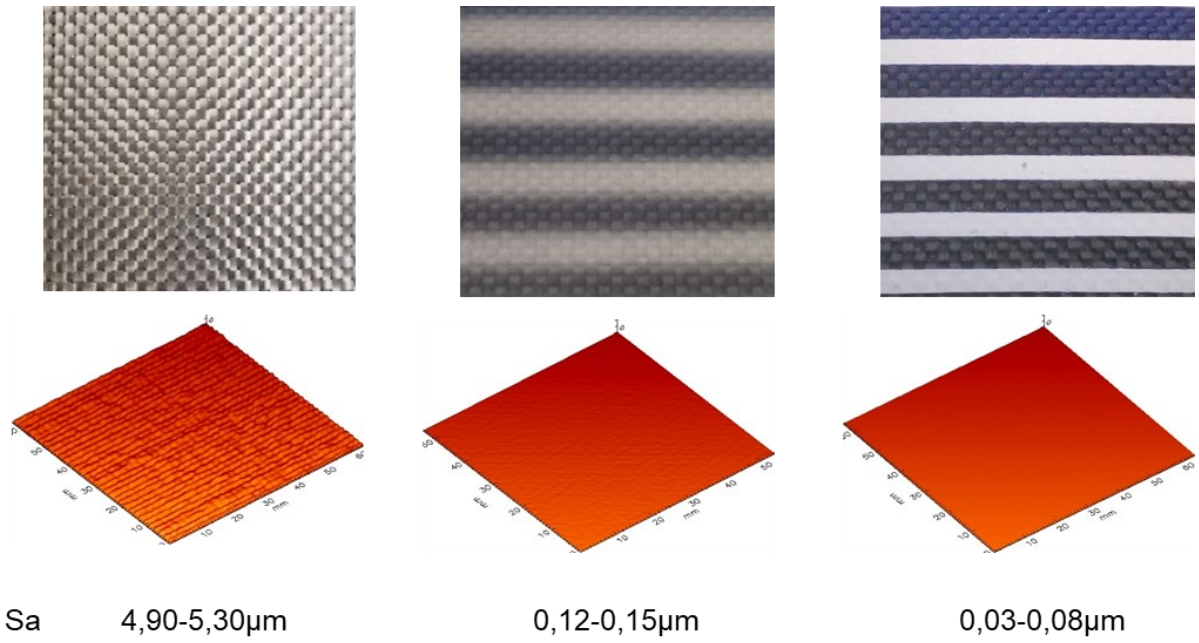


Abb. 44 Veränderung der Oberflächenglätte von Class-A CFK Bauteilen entlang der Prozesskette. Der Sa-Wert des trocknen Textils verringert sich durch den Pressprozess um ca. 97% bei einem unlackierten CFK Rohteil. Eine zusätzliche Lackierung verringert die ursprüngliche Oberflächenwelligkeit des Textils um bis zu 99,4%.

Abhängig von der Qualität der Lackierung sind Sa-Werte von bis zu 0,03 µm möglich, was annähernd keiner Faserdurchzeichnung entspricht. Somit verringert die Lackierung die Oberflächenwelligkeit des Rohteils um ca. 80 %. Im Vergleich zum trockenen Textil sind es bis zu 99,4 %. Die Sa-Werte der drei Hauptzustände entlang der Prozesskette eines Class-A CFK-Dachs können als Basiswerte für Optimierungen angesehen werden. Ausgehend von den Sa-Werten ist es möglich, Optimierungen an jeder Stelle der Prozesskette direkt zu bewerten und den Effekt auf die Endbauteilqualität vorherzusagen. Zudem können verschiedene Konstellationen miteinander verglichen und mögliche Kostenpotentiale bewertet werden.

5.2.3. PPT-Grenzwerte für Class-A-fähige Halbzeuge und Bauteile

Für die Grenzwertermittlung der maximal zulässigen Faserdurchzeichnung einer 3k Leinwandgewebesichtlage für Class-A CFK Bauteile wurden sämtliche in dieser Arbeit erzeugten Messdaten von textilen Halbzeugen, CFK Rohbauteilen und lackierten Endbauteilen aus der Serienproduktion und den in Kap. 5-7 beschriebenen Optimierungsansätzen verwendet. Wie in Kap. 5.2.2 definiert, wird die primäre Faserdurchzeichnung PPT über die mittlere arithmetische Höhe der Oberfläche Sa nach DIN EN ISO 25178 quantifiziert. Für die Auswertung der 3D-Topografiedaten wird der ebenfalls in Kap. 5.2.2 beschriebene PPT-Filter verwendet, der eine skalenbegrenzte S-L-Oberfläche mit

S=1500µm und L=2,5mm erzeugt. Die Sa-Grenzwerte dienen dabei als ermittelte Obergrenze, wobei kleinere Werte zu glatteren Oberflächen führen.

Als Grenzwert für die zulässige Oberflächenwelligkeit eines 3k Leinwandgewebes im trockenen Zustand kann ein Sa-Wert im Bereich 4,9-5,30 µm und kleiner gesetzt werden. Mit Geweben, die diesen Wert einhalten, lassen sich im automatisierten Nasspressverfahren Class-A fähige Bauteile herstellen. Da die Faserdurchzeichnung jedoch gerade beim Nasspressverfahren sehr stark von der Prozesstemperatur abhängt (siehe auch Kap 1.4.3.4), ist es durch eine Anpassung der Prozessparameter durchaus möglich welligere oder glattere Sichtlagen zu verarbeiten. Ziel muss es dabei sein, den Grenzwert für ein Class-A fähiges Rohbauteil von Sa=0,15 µm nicht zu überschreiten. Bei Bauteilen mit Sa-Werten über 0,15 µm, kann die Faserdurchzeichnung durch eine automatisierte Lackierung mit Schichtdicken von ca. 140 µm nicht mehr ausgeglichen werden. Für eine Class-A Oberfläche, wie sie im automobilen Premiumsegment üblich ist, ist für CFK Bauteile mit 3k Leinwandgewebe ein Sa-Wert kleiner 0,08 µm notwendig. Die Tab. 2 fasst die Grenzwerte für Class-A Bauteile entlang der Prozesskette zusammen.

PPT Grenzwerte für Class-A fähige Halbzeuge und Bauteile (3k Leinwandgewebe)	
Prozessschritt	**Sa-Wert (PPT Filter L=1500µm, S=2,5mm)**
Trockenes textiles Halbzeug	<5,30 µm
Rohbauteil mit Sichtlage	< 0,15 µm
Lackiertes Endbauteil	< 0,08 µm

Tab. 2 PPT Grenzwerte für Class-A fähige Halbzeuge und Bauteile (3k Leinwandgewebe).

Die ermittelten Grenzwerte gelten für die in Kap. 3-4 beschriebene Prozesskette für großflächige Class-A CFK Bauteile (z.B. CFK-Dächer), die im hochautomatisierten Nasspressverfahren hergestellt und in einer ebenfalls automatisierten Linie lackiert werden. Eine Übertragbarkeit gerade auf ähnliche hochautomatisierte Prozessketten, wie das RTM Verfahren mit demselben Lackierprozess ist möglich. Für Prozessketten mit einer (ggf. manuellen) Mehrschichtlackierung mit Zwischenschliff kann der PPT-Grenzwert der lackierten Bauteile als Anhaltspunkt dienen. Es ist jedoch zu beachten, dass dabei auch mit welligeren Rohteilen mit entsprechendem Aufwand deutlich glattere Oberflächen erzeugt werden können.

5.3. FE-Modell eines repräsentativen Class-A CFK-Dachausschnitts

Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein FE-basiertes Simulationsmodell des untersuchten Lagenaufbaus der in Kap. 5.1. vorgestellten Ersatzprozesskette für ein Class-A CFK-Dach verwendet. Ziel ist es, den Einfluss von Material- und Prozessparametervariationen auf die resultierende Oberflächentopografie simulieren zu können. Wie in den Vorarbeiten wurde eine Betrachtung auf Meso-Ebene gewählt. Dabei wurden die Einzellagen in dem FE-Modul von Digimat (Fa. MSC Software) inkl. der sie umgebenden Matrix modelliert und aufgrund des später mehrlagigen Aufbaus direkt über Hexaederelemente (C3D8-Elemente mit 2x2x2 Knoten) „gemesht“ bzw. vernetzt. Den so erzeugten Einheitszellen der Einzellagen werden daraufhin in HyperMesh (Altair) die effektiven Materialkennwerte zugewiesen. Das nun kompatible Skript wird in Abaqus CAE importiert und dort zu einem repräsentativen Volumenelement RVE des Gesamtbauteils „CFK-Dach“ verknüpft. Über das RVE kann so der Einfluss einer Änderung der Material- und Prozessparameter auf die Oberflächentopografie simuliert werden. Beispiele sind hier eine Veränderung der Rovinggeometrie und/oder Fadendichte des Leinwandgewebes der Sichtlage auf Textilebene oder eine Variation des thermischen Ausdehnungskoeffizienten der Matrix. Auf Prozessebene ist die Aushärtetemperatur, und damit die Differenz zur Umgebungstemperatur aufgrund der Matrixkontraktion während des Abkühlens, interessant. Anzumerken ist, dass nicht der Prozess selbst modelliert wird, sondern der Bauteilzustand direkt ab der Entnahme aus dem heißen Werkzeug. Die erzeugte Oberflächentopografie kann exportiert und über eine Konvertierung zu einer kompatiblen ASCII-Datei direkt in das in Kap. 5 vorgestellte Auswertetool FRT Mark III eingelesen und damit wie real erzeugte Bauteile bzgl. der PPT-Ausprägung analysiert werden. Die Abb. 45 zeigt die vier Schritte von der Modellierung und Vernetzung über die material- und prozessparameterabhängige Simulation und die anschließende Analyse der erzeugten Oberflächentopografie. Das vorgestellte FE-Simulationsmodell wird in Kap 6.1 verwendet, um

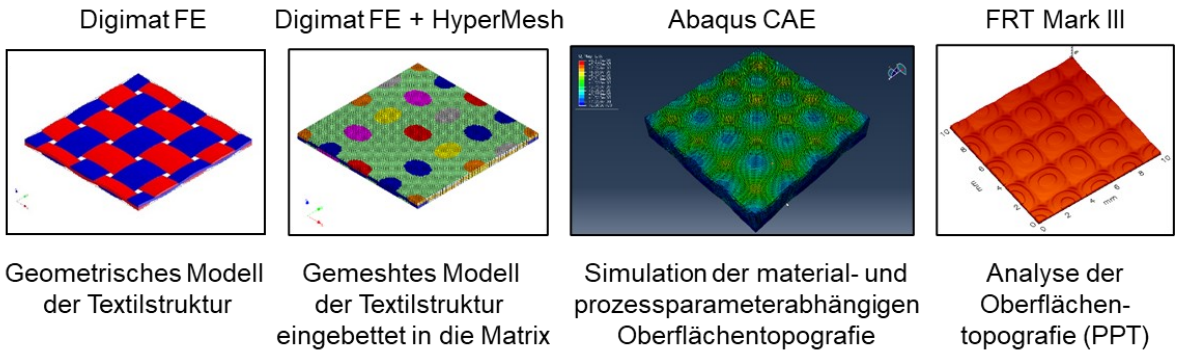


Abb. 45 Prinzip der FE-Simulation der Oberflächentopografie einer CFK-Dach Einheitszelle.

den Einfluss des Öffnungsfaktors OF (siehe Kap. 4.2) der 3k Leinwandgewebe-Sichtlage auf die Ausprägung der Faserdurchzeichnung (PPT) im CFK Bauteil zu simulieren. Eine detaillierte Erklärung und Validierung des Simulationsmodells ist in [61] zu finden.

6. Steigerung der Produktivität (Output) von Class-A CFK Bauteilen

6.1. Motivation und Versuchsaufbau

In Kap. 4 wurde anhand bisheriger Forschungsergebnisse aufgezeigt, dass bereits über eine Veränderung von textilspezifischen Parametern wie der Rovinggeometrie oder Maschenweite bzw. Fadendichte die Ausprägung der primären Faserdurchzeichnung PPT im CFK Bauteil beeinflusst werden kann. Das Ziel der Untersuchung ist es mit Hilfe der in Kap. 5.2 entwickelten Prüfkette aus einer technischen Kenngröße am Anfang der Prozesskette über alle relevanten Zwischenzustände eine Korrelation zu Endbauteileigenschaften zu erzeugen. Daher soll im Folgenden untersucht werden, wie stark sich eine Parameteränderung bei der Halbzeugherstellung am Anfang der Prozesskette eines im Nasspressen hergestellten Class-A CFK-Bauteils auf die nachfolgenden Zwischenzustände auswirkt.

Als technischer Textilparameter wird der Öffnungsfaktor der 3k Leinwandgewebe-Sichtlage gewählt. Der Öffnungsfaktor ist ein gängiges und spezifiziertes Qualitätsmerkmal von CF-Leinwandgeweben. Er beschreibt bei der Draufsicht auf das Textil das Verhältnis aus fadenfreier (offener) Fläche zu der mit Kett- und Schussfaden belegten Fläche in Prozent.

Es soll ermittelt werden, inwieweit eine Änderung des Öffnungsfaktors die Oberflächenwelligkeit des textilen Halbzeugs und damit die Ausprägung der primären Faserdurchzeichnung PPT im CFK-Bauteil verändert. Dabei werden von der simulativen Betrachtung bis zum fertigen Bauteil der Öffnungsfaktor und die resultierende Oberflächenwelligkeit als Sa-Wert verfolgt. Aus den Ergebnissen werden Potentiale zur prozessseitigen Zykluszeitreduzierung (technische Kenngröße) und der daraus resultierenden Steigerung des Outputs (betriebswirtschaftliche Kenngröße) abgeleitet.

Zunächst sollen dabei über das in 5.3 vorgestellte FE-Modell Sichtlagen mit verschiedenen Öffnungsfaktoren modelliert werden. Hierfür wird zum einen das Höhe-Breite-Verhältnis der Rovingquerschnittsgeometrie, auch RAR (Roving Aspect Ratio), verändert. Die zweite betrachtete Einflussgröße ist die Fadendichte bei gleichbleibender Rovinggeometrie. Dabei verändert die Fadendichte den Öffnungsfaktor durch die Anzahl an Rovings pro Zentimeter. Im nächsten Schritt soll der Einfluss der virtuell erzeugten Bauteile mit unterschiedlichen Öffnungsfaktoren der Leinwandgewebesichtlage auf die resultierende Ausprägung der primären Faserdurchzeichnung PPT betrachtet werden. Als Kennwert für die Ausprägung des PPT wird der in Kap. 5.2.2 eingeführte Sa-Wert verwendet. Die simulierte Oberflächentopografie wird hierfür in der FRT Mark III Software auf dieselbe Art analysiert, wie die real erzeugten Daten der textilen Halbzeuge und Bauteile. Das ermöglicht es, die simulativen und experimentellen Ergebnisse mit derselben Analysemethode und demselben Kennwert zu quantifizieren. Die Tab.3 fasst die hierbei relevanten Spezifikationen für ein 3k Leinwandtextil eines Class-A CFK-Dachs zusammen.

Prüfmerkmal	Kenngröße	Sollwert
Flächengewicht	g/m²	200 +/- 10
Fadendichte	Fd/cm	5,0 +/- 0,2
Öffnungsfaktor	%	< 5,0

Tab. 3 Auszug der relevanten Spezifikationen für das 3k CF-Leinwandgewebe eines Class-A CFK-Dachs. [91]

Im nächsten Schritt wird der Öffnungsfaktor von zwei verschiedenen 3k CF-Leinwandgeweben mit gleichem Flächengewicht von 200g/m² bestimmt. Hierfür werden Stichprobenbilder der beiden Gewebevarianten mit einem Scanner (Auflösung 4800 dpi) senkrecht zur Oberfläche aufgenommen und die Öffnungsbereiche vermessen. Aus der ermittelten Öffnungsfläche kann der Öffnungsfaktor berechnet werden.
Im Anschluss werden je 30 Stacks mit den beiden Gewebesichtlagen und dem in Kap. 5.1 vorgestellten restlichen Lagenaufbau hergestellt und per Lasertriangulation vermessen. Auch hier wird die Oberflächentopografie in der FRT Mark III Software ausgewertet und als Kennwert für die Oberflächenwelligkeit des textilen Halbzeugs der Sa-Wert verwendet. Da nur die Wellenlängen der 3k-Sichtlage relevant sind, wird die ermittelte Oberflächentopografie mit dem in Kap. 5.2.2 eingeführten PPT-Filter (S=1500 µm, L=2,5 mm) gefiltert. Ziel ist zu überprüfen, ob der unterschiedliche Öffnungsfaktor der beiden Gewebesichtlagen bereits einen Einfluss auf die Oberflächenwelligkeit des textilen Halbzeugs hat.
Anschließend werden aus den vermessenen Stacks im Nasspressverfahren mit dem in Kap. 5.1.1 vorgestellten Versuchswerkzeug je fünf CFK-Bauteile bei Prozesstemperaturen von 105°C-130°C (in 5°C Schritten) hergestellt. Das Pressenprofil und die Aushärtezeit sind dabei an die jeweilige Werkzeugtemperatur angepasst. Aus den CFK-Bauteilen wird die ebene Messfläche automatisiert herausgefräst und die Oberflächentopografie der PPT-Messfläche mit dem in Kap. 5.2.2 vorgestellten FRT MicroProf Weißlicht Profilometer (WLP) erfasst. Zusätzlich wird mit einem Auflichtmikroskop der Öffnungsfaktor der 3k Sichtlage im Bauteil ermittelt. Hier soll überprüft werden, ob sich der unterschiedliche Öffnungsfaktor der Sichtlagen durch den Pressprozess verändert und ob er mit den unterschiedlichen Sa-Werten des CFK-Bauteils korreliert. Da mit steigender Prozesstemperatur die PPT-Ausprägung steigt (thermische Ausdehnung der Matrix), soll untersucht werden, ob die unterschiedlichen Öffnungsfaktoren der Sichtlage die temperaturabhängige Welligkeit der gefertigten Bauteile beeinflusst. Es soll dabei herausgestellt werden, inwieweit eine glattere Sichtlage bei gleichen Prozessparametern zu einer glatteren Bauteiloberfläche führt. Weiterhin soll aufgezeigt werden, bei welcher Prozesstemperatur die PPT-Ausprägungen der beiden Sichtlagen-varianten auf dem gleichen Niveau liegen. Dies birgt das Potential, die temperaturabhängige

Prozesszeit bei gleichbleibender Oberflächenqualität zu verringern. Dabei soll die potentielle Zykluszeitreduzierung mit Hilfe des Kinetikmodells für das eingesetzte Harzsystem ermittelt werden, da für jede Prozesstemperatur die benötigte Aushärtezeit zum Erreichen einer definierten T_g ausgegeben werden kann. Dabei wird auch ein möglicher Einfluss der Differenz zwischen Werkzeugtemperatur und der aushärtezeitabhängigen Glasübergangstemperatur T_g der Bauteile auf die resultierende Oberflächenwelligkeit betrachtet. Aus der potenziellen Zykluszeitreduzierung wird anschließend die daraus resultierende Steigerung der Produktivität (Output pro Stunde) für Class-A CFK-Rohbauteile abgeleitet.

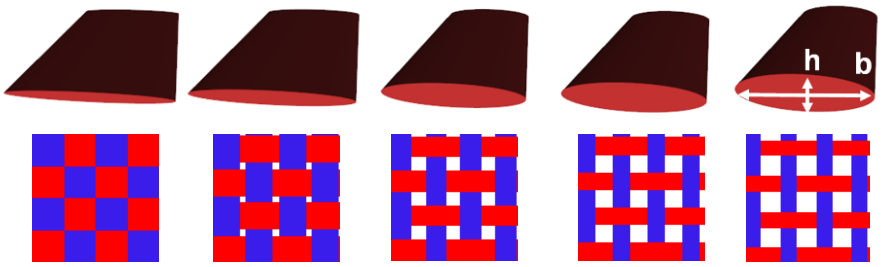
Anschließend wird untersucht inwieweit es möglich ist Rohteile, die den Class-A Grenzwert von Sa >0,15µm deutlich überschreiten, über eine kalthärtende Beschichtung zu Class-A Bauteilen zu veredeln. Hierfür wird die Material- und Prozesskombination mit der höchsten PPT-Ausprägung ausgewählt und mit einem UV-härtenden Klarlacksystem beschichtet. Die Lackvorbehandlungsschritte und Lackschichtdicke entsprechen dabei dem konventionellen Lackaufbau, der gleichzeitig als Referenz dient. Auch hierbei wird das resultierende Kostenpotential bewertet. Die Tab. 4 fasst die Schritte der Untersuchungsreihe zusammen.

Kapitel	Ziel	Methodik / Inhalt
6.1	Motivation und Versuchsaufbau	
6.2	Korrelation RAR und Fadendichte zu Öffnungsfaktor und resultierende PPT-Ausprägung (Sa)	Numerische Vorhersage im Simulationsmodell
6.3	Einfluss Öffnungsfaktor auf Oberflächenwelligkeit (Sa) im trockenen Textil	Vergleich zweier 3k Sichtlagen mit unterschiedlichem Öffnungsfaktor im trockenen Textil
6.4	Einfluss Öffnungsfaktor auf PPT-Ausprägung (Sa) im Bauteil und Potential Zykluszeitreduzierung	Vergleich der 3k Sichtlagen im CFK-Bauteil bei verschiedenen Prozesstemperaturen
6.5	Potential einer nachträglichen kalthärtenden Beschichtung zur weiteren Zykluszeitreduzierung	Vergleich der erreichbaren Oberflächengüte mit verschiedenen Lacksystemen
6.6	Fazit - Ableitung der kostenoptimalen Prozessroute für Green- und Brownfield	Vergleich der untersuchten Material- und Prozesskombinationen

Tab. 4 Übersicht der Untersuchungsumfänge entlang der Class-A CFK Prozesskette

6.2. Numerische Betrachtung Öffnungsfaktor zu PPT-Ausprägung

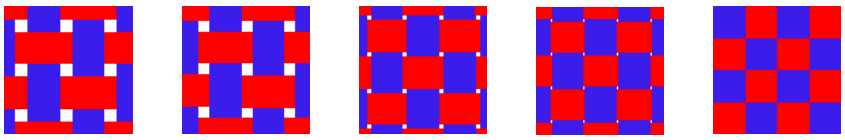
Über das in 5.3 vorgestellte FE-Modell werden 3k-Leinwandgewebe Sichtlagen mit verschiedenen Öffnungsfaktoren modelliert. Zunächst wird der Öffnungsfaktor wie in Tab. 5 dargestellt über verschiedene RAR (Roving Aspect Ratio) bei gleichbleibender Fadendichte von 5 Fd/cm modelliert.



RAR	**0,06**	**0,09**	**0,15**	**0,19**	**0,25**
Höhe [mm]	0,12	0,15	0,20	0,22	0,25
Breite [mm]	2,00	1,70	1,30	1,15	1,00
Fadendichte [Fd/cm]	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0
Öffnungsfaktor [%]	**0,0**	**2,3**	**12,3**	**18,1**	**25,0**

Tab. 5 Öffnungsfaktor in Abhängigkeit des RAR (Höhe zu Breite Verhältnis) bei konstanter Fadendichte.

Der RAR wird von 0,06 bis 0,25 simuliert. Ein steigender RAR erhöht den Öffnungsfaktor bei konstanter Fadendichte. Üblicherweise haben 3k-Rovings in CF-Leinwandgeweben eine Breite von 1,6-2,0mm was einem RAR 0,06-0,10 entspricht.
Im nächsten Schritt wird bei gleichbleibender Rovinggeometrie (RAR = 0,06) die Fadendichte verändert und der resultierende Öffnungsfaktor ermittelt. (Tab.5)



Fadendichte [Fd/cm]	**3,5**	**4,0**	**4,5**	**4,8**	**5,0**
RAR	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06
Rovingbreite [mm]	2,00	2,00	2,00	2,00	2,0
Öffnungsfaktor [%]	**9,0**	**4,0**	**1,0**	**0,2**	**0,0**

Tab. 6 Öffnungsfaktor in Abhängigkeit der Fadendichte (Fd/cm) bei konstanter Rovingbreite und RAR.

Bei gleichbleibendem RAR verringert sich der Öffnungsfaktor mit steigender Fadendichte. Dabei liegt die maximale Fadendichte für 2mm breite Rovings bei 5,0 Fd/cm. Dies zeigt, dass die Spezifikation der Fadendichte von 5,0 Fd/cm (+/- 0,2) in Tab 3. gleichzeitig eine Schwankung der Rovingbreite und damit des RAR bei der Textilfertigung miteinbezieht. Somit kann die RAR-Schwankung der Kett- und Schussfäden ausgeglichen werden, um das spezifizierte Flächengewicht von 200g/m² (+/- 10) zu erreichen.
Zusammengefasst kann der Öffnungsfaktor sowohl über den RAR als auch die Fadendichte beeinflusst werden.

Um den Einfluss der erzeugten Öffnungsfaktoren auf die Oberfläche zu simulieren, wurden die 3D-Topografie der virtuell erzeugten Bauteile in die FRT Mark III eingelesen und die Ausprägung der Faserdurchzeichnung untersucht. Als Kennwert für die Ausprägung des PPT wird der in Kap. 5.2.2 eingeführte Sa-Wert verwendet. Die simulierte Oberflächentopografie wird dabei auf dieselbe Art analysiert, wie die real erzeugten Daten der textilen Halbzeuge und Bauteile. Das erlaubt die simulativen und experimentellen Ergebnisse mit derselben Analysemethode und demselben Kennwert zu quantifizieren und miteinander zu vergleichen. Die simulierte Prozesstemperatur liegt bei 130°C. Die Abb. 46 zeigt die Sa-Werte in Abhängigkeit des Öffnungsfaktors.

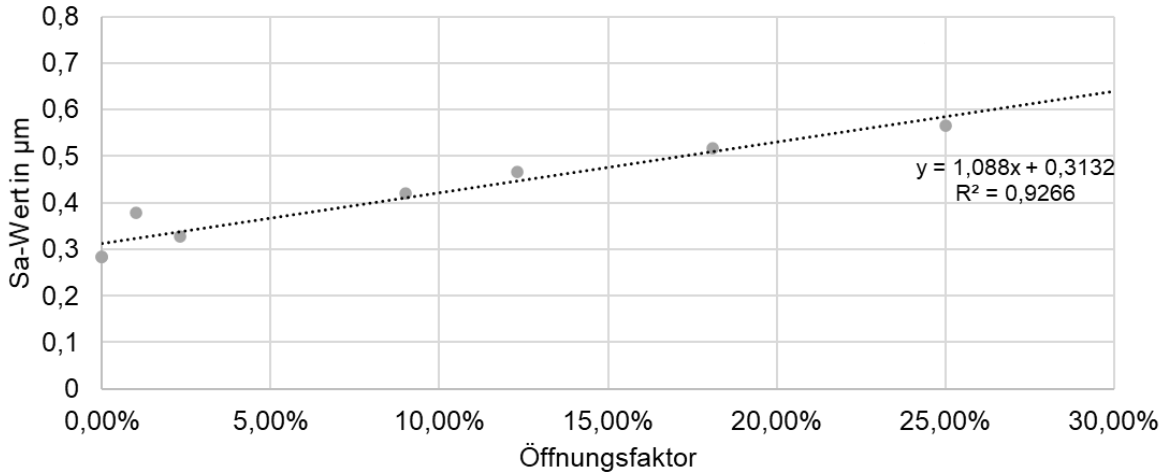


Abb. 46 Sa-Werte in Abhängigkeit des Öffnungsfaktors durch Variation der Fadendichte und RAR.

Es wird bestätigt, dass sich der Sa-Wert bei steigendem Öffnungsfaktor erhöht. Der Öffnungsfaktor kann dabei zum einen durch eine Anpassung der Rovinggeometrie (RAR) und zum anderen durch die Fadendichte verändert werden. Der Anstieg des Sa-Wertes ist dabei annähernd linear, was ein Bestimmtheitsmaß von $R^2 = 0,9266$ bestätigt.
Im Gegensatz zur Änderung des RAR führt eine Umstellung der Fadendichte zu einer Veränderung des Flächengewichts. Das Flächengewicht ist dabei im Gegensatz zum RAR

spezifiziert. Um die Anforderung an das Flächengewicht des 3k Leinwandgewebes von 200g/m² mit einer Toleranz +/- 10g/m² einzuhalten, muss die Fadendichte 5 Fd/cm mit einer Toleranz von +/- 0,2 eingehalten werden. Um gleichzeitig einen Öffnungsfaktor <5 % zu gewährleisten, ist ein RAR <0,1 notwendig, was zu einer Rovingbreite von 1,6 - 2,0 mm führt. Aufgrund der Einschränkung der erlaubten Fadendichteschwankung hat der RAR und damit die Rovingbreite in diesem Fall den größeren Einfluss auf den Öffnungsfaktor eines Class-A CF-Leinwandgewebes.

6.3. Einfluss Öffnungsfaktor auf Oberflächenwelligkeit im Textil

Nach der numerischen Betrachtung soll überprüft werden, inwiefern zwei 3k-Leinwandgewebe mit unterschiedlichen Öffnungsfaktoren sich ebenfalls bezüglich der Oberflächenwelligkeit unterscheiden. Das NP_A_3k genannte Textil ist ein Hexcel PrimeTex 3k CF-Leinwandgewebe mit einem Flächengewicht von 200 g/m². Das NP_B_3k Leinwandgewebe besteht ebenfalls aus 3k CF-Rovings, hat dasselbe Flächengewicht und wurde von Chomarat produziert. Beide Textilien haben eine Soll-Fadendichte von 5 Fd/cm.
Zunächst werden Bilder von Stichproben der zwei 3k Leinwandgewebe mit einem 4800dpi Scanner erfasst. Im digitalisierten Zustand werden die Öffnungsbereiche vermessen und dann miteinander verglichen. Die Abb. 47 zeigt die vermessenen Bilder der Leinwandgewebe, die Tab. 7 die ermittelten Öffnungsflächen und resultierenden Öffnungsfaktoren

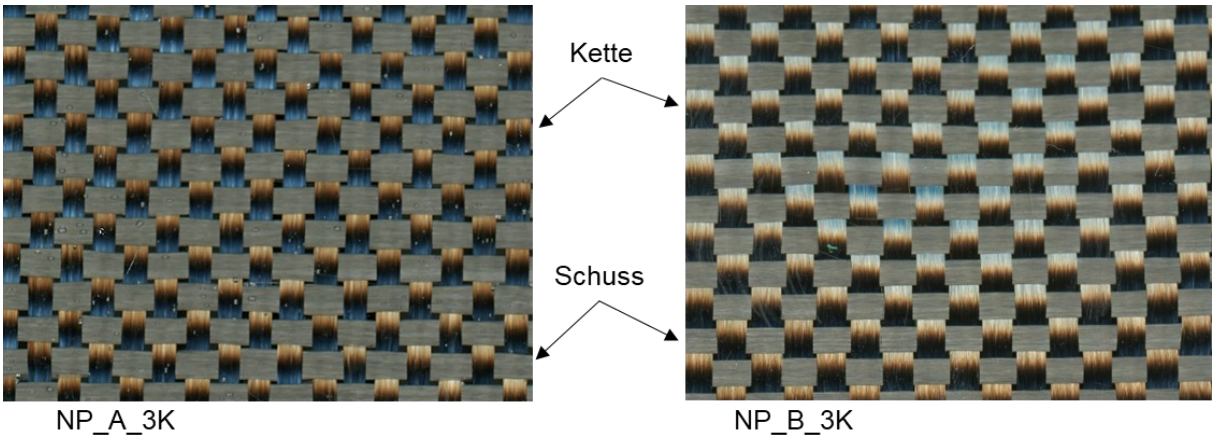


Abb. 47 Beispiel Vermessung der Öffnungsflächen zweier 3k Leinwandgewebe.

	NP_A_3k	**NP_B_3k**
Flächengewicht [g/m²]	200	200
Rovingbreite Kette [mm]	1,6	1,8
Rovinghöhe Kette [mm]	0,16	0,14
RAR Kette	0,10	0,08
Fadendichte Kette [Fd/cm]	5,0	5,0
Rovingbreite Schuss [mm]	1,7	1,9
Rovinghöhe Schuss [mm]	0,15	0,13
RAR Schuss	0,09	0,07
Fadendichte Schuss [Fd/cm]	5,0	5,0
Mittlerer RAR	**0,095**	**0,075**
Öffnungsfaktor [%]	**3,2**	**0,5**

Tab. 7 Ermittelte Öffnungsflächen und Öffnungsfaktoren für zwei 3k Leinwandgewebe.

Sowohl das NP_A_3k als auch das NP_B_3k Leinwandgewebe erfüllen die in Kap. 6.1 gesetzte Spezifikation mit einem Öffnungsfaktor <5 %. Dabei ist die Öffnungsfläche des NP_A_3k Leinwandgewebes mit einem Öffnungsfaktor von 3,2 % um einen Faktor 5,4 größer als die des NP_B_3k mit Öffnungsfaktor 0,5 %. Hervorzuheben ist, dass sich die Rovingbreite bei Kette und Schuss unterscheidet. Bei beiden Gewebevarianten ist der Schuss um ca. 1mm schmaler als die Kette. Die Fadendichte ist jedoch mit 5,0 Fd/cm konstant. Dieses Phänomen ist auch Hildebrand in seiner Arbeit mit Organoblechen mit einem 2/2 Köpergewebe aus Glasfasergarn aufgefallen. Trotz gleichem Rovingaufbau und Köper 2/2-Struktur wiesen die geprüften Rovings in Kettrichtung eine deutlich geringere Breite auf als die Schussfäden. Die Abb. 48 zeigt den Vergleich aus theoretischem Aufbau und realem Topographiebild.

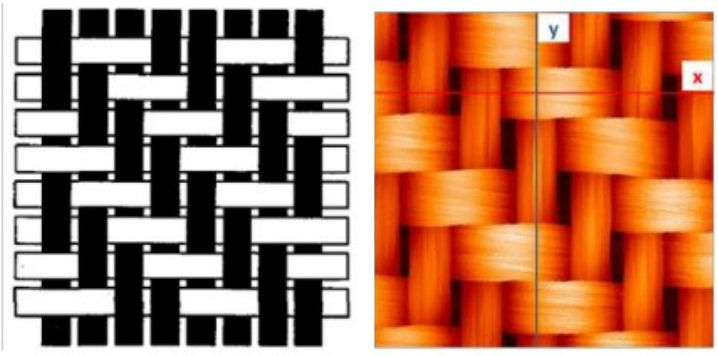


Abb. 48 Theoretischer Aufbau eines Köper 2/2-Gewebes, Rechts: Reales Topographiebild eines trockenen Hexforce 1102 Köper 2/2-Gewebes aus Hildebrandt [18].

Im Topografiebild ist der Unterschied zwischen dünnem Kett- und breiterem Schussfaden deutlich zu erkennen. Als Ursache wurden die unterschiedlichen Fadenspannungen im Webprozess identifiziert. [18]

Ein solch starker Unterschied wurde bei den vorliegenden Messungen nicht festgestellt. Jedoch hat Hildebrandt in seiner Arbeit Glasfasergarne verwendet. Die in dieser Arbeit geprüften CF-Leinwandgewebe bestehen aus zugfesteren Endlosfasern, was den Effekt schwächen könnte. Die Tatsache, dass Kette und Schuss unterschiedliche Breiten aufweisen, wird jedoch bestätigt. Die Öffnungen des realen Textils sind rechteckig und Unterliegen je nach Produktionsqualität gewissen Dimensionsschwankungen. Eine Anpassung der quadratischen Öffnung im vorhandenen Simulationsmodell ist jedoch nicht möglich, woraus sich eine geringe Abweichung ergibt. Daher wird der RAR gemittelt. Die Gleichung zur Berechnung des Öffnungsfaktors aus Kap. 4.2.1 berücksichtigt dies bereits, weshalb dieser nicht angepasst werden muss. Die Ergebnisse bestätigen dabei auch den Ansatz aus Kap. 5.2, für die Bewertung der Oberflächentopografie genormte Flächenkennwerte wie den Sa-Wert, anstatt Profillinien zu verwenden. Die Textilschwankungen der Kett- und Schussfadenbreite sind für den Betrachter nicht direkt wahrnehmbar, da sie vom menschlichen Auge nicht aufgelöst

werden können. Bei der Auswertung von Profillinien wird jedoch das Ergebnis richtungsabhängig stark beeinflusst, obwohl ansonsten keine Parameter verändert wurden. Daher ist für eine Korrelation der Oberflächentopografie zu der visuell wahrnehmbaren Faserdurchzeichnung das Verwenden eines flächenbasierten Kennwerts zu bevorzugen.

Messung der trockenen Stacks

Für die Ermittlung der initialen Oberflächenwelligkeit der beiden 3k Leinwandgewebe werden je 30 Stacks (750 x 750 mm) auf einer Fläche von 600 x 600 mm mittels Lasertriangulation vermessen. Die 3D Profildaten werden im Anschluss nach DIN EN ISO 27178-2 ausgewertet. Als Kennwert wird die mittlere arithmetische Höhe der Fläche **Sa** gewählt. Es wird die in Kap. 5.2.2 beschriebene PPT Filtereinstellung (S=1500 µm, L=2,5 mm) für die Auswertung verwendet. Der gewählte Messbereich entspricht dem PPT-Messbereich im fertigen Bauteil und umfasst eine Fläche von 70 x 70 mm. Die Abb. 49 veranschaulicht das Analyseprinzip.

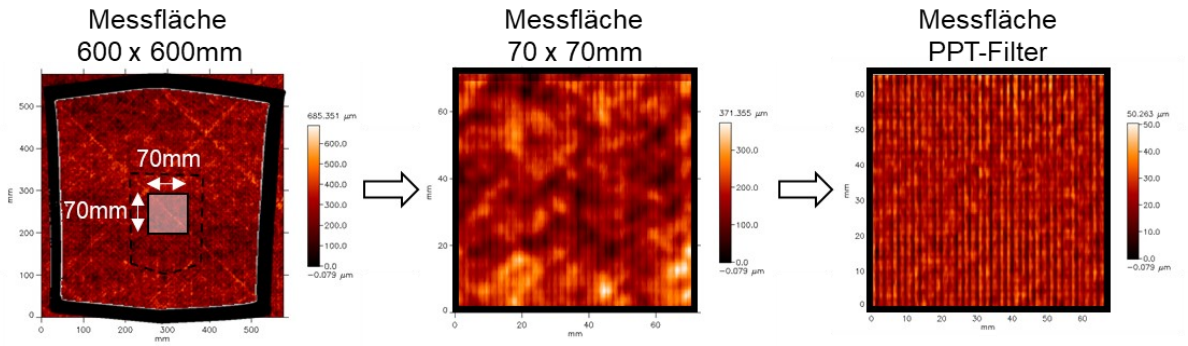


Abb. 49 Analyseprinzip der Textilmessung. Jeder Stack wird als Ganzes vermessen. Ausgewertet wird der gleiche PPT-Messbereich (70 x70mm), wie im späteren Bauteil. Auf die Rohdaten (Mitte) wird der PPT-Filter angewendet (rechts) und dann der Sa-Wert berechnet.

Im Mittel ergibt sich für die 30 vermessenen NP_A_3k Stacks ein Sa-Wert von 5,01 µm mit einer Standardabweichung von s=0,15 µm. Für die NP_B_3k Stacks mit alternativer 3k Leinwandgewebe Sichtlage konnte ein mittlerer Sa-Wert von 4,10 µm mit einer Standardabweichung von s=0,12 µm gemessen werden. Die Sa-Werte der beiden Varianten überschneiden sich nicht und unterscheiden sich somit signifikant. Die Tab. 8 fasst die Messergebisse der jeweils 30 vermessenen Stacks der Varianten NP_A_3k und NP_B_3k zusammen und stellt sie den ermittelten Öffnungsfaktoren gegenüber.

Variante (trockenes Textil)	**Öffnungsfaktor**	**Sa-Wert Messbereich**	**s**
NP_A_3k	3,2%	5,01 µm	0,15 µm
NP_B_3k	0,5%	4,10 µm	0,12 µm

Tab. 8 Sa-Werte (Mittelwert aus 30 Messungen und Standardabweichung s) der trockenen Stacks mit verschiedenen 3k Leinwandgewebe Sichtlagen vermessen mittels Lasertriangulation.

Das NP_B_3k Leinwandgewebe hat im trockenen Zustand einen um ca. 18 % geringeren Sa-Wert und somit eine glattere Oberfläche als das NP_A_3k Leinwandgewebe. Im trockenen Textil bestätigt sich somit, dass ein geringerer Öffnungsfaktor zu einer glatteren Textiloberfläche führt. Die geringere Öffnungsfläche trägt zudem dazu bei, dass die Verteilung des Faservolumengehalts entlang der Bauteiloberfläche durch die Verringerung von Reinharzbereichen homogenisiert wird. Im nächsten Schritt soll die Übertragbarkeit auf im Nasspressverfahren hergestellte Bauteile überprüft werden.

6.4. Einfluss Öffnungsfaktor auf PPT-Ausprägung im CFK-Bauteil

Die Messungen der textilen Halbzeuge mit 3k Leinwandgewebe Sichtlagen haben ergeben, dass ein kleinerer Öffnungsfaktor zu einer glatteren Textiloberfläche führt. Um den Einfluss des Öffnungsfaktors der Sichtlage auf die Ausprägung der Faserdurchzeichnung zu ermitteln, werden aus den vermessenen Stacks CFK Bauteile hergestellt und im Anschluss untersucht. Als Matrix wird das Dow Voraforce 5300 Epoxidharzsystem verwendet. Die Bauteile werden im Nasspressverfahren mit dem in Kap. 5.1 vorgestellten Versuchswerkzeug bei verschiedenen Soll-Werkzeugtemperaturen (105°C, 110°C, 115°C, 120°C, 125°C und 130°C) verpresst. Die Presskraft (2125kN) und die Harzmenge (520g) bleiben konstant. Da die NP_B_3k Sichtlage eine geringere Öffnung aufweist, erhöht sich die Dauer der Infiltrationszeit vor dem automatisierten Einlegen in das Presswerkzeug von 40s auf 120s. Die Soll-Bauteildicke liegt bei 1,7 mm mit einer Toleranz von +/- 0,2mm. Das Schließprofil der Presse und die Presszeit sind an die jeweilige Werkzeugtemperatur angepasst. Die Tab. 9 fasst die Versuchsparameter und die resultierende Glasübergangstemperatur T_g zusammen.

Werkzeugtemperatur [°C]		**Harzmenge [g]**	**Presskraft [kN]**	**Presszeit [s]**	**T_g [°C]**	
Soll	Ist	Ist	Ist	Ist	Soll	Ist
105	105-107	520	2125	511	>111	111-112
110	110-111	520	2125	506,5	>111	115
115	115-116	520	2125	495	>111	118
120	119-121	520	2125	488	>111	120-121
125	124-126	520	2125	485	>111	122
130	129-131	520	2125	482,5	>111	123

Tab. 9 Versuchsparameter und die resultierende Glasübergangstemperatur T_g.

Die Ist-Werkzeugtemperatur stellt die am eingebauten Temperatursensor gemessene Werkzeugtemperatur je Soll-Temperaturstufe dar. Die Soll-Glasübergangstemperatur ist in der Spezifikation für CFK-Dächer mit einem T_g > 111°C definiert. Die Ist-Werte entsprechen den ermittelten T_g der gefertigten Bauteile.

Um die Oberflächentopografie analysieren zu können, werden die ebenen PPT-Messflächen aus den erzeugten CFK-Bauteilen herausgefräst und mittels Weißlicht Profilometer WLP vermessen. Zuvor werden, ähnlich den Scan-Messungen der trockenen Sichtlage, die Öffnungsflächen im verpressten Zustand mit einem handelsüblichen USB-Mikroskop charakterisiert. Die Abb. 51 zeigt zwei Beispielbilder der Mikroskopieaufnahmen und die ermittelten Öffnungsfaktoren.

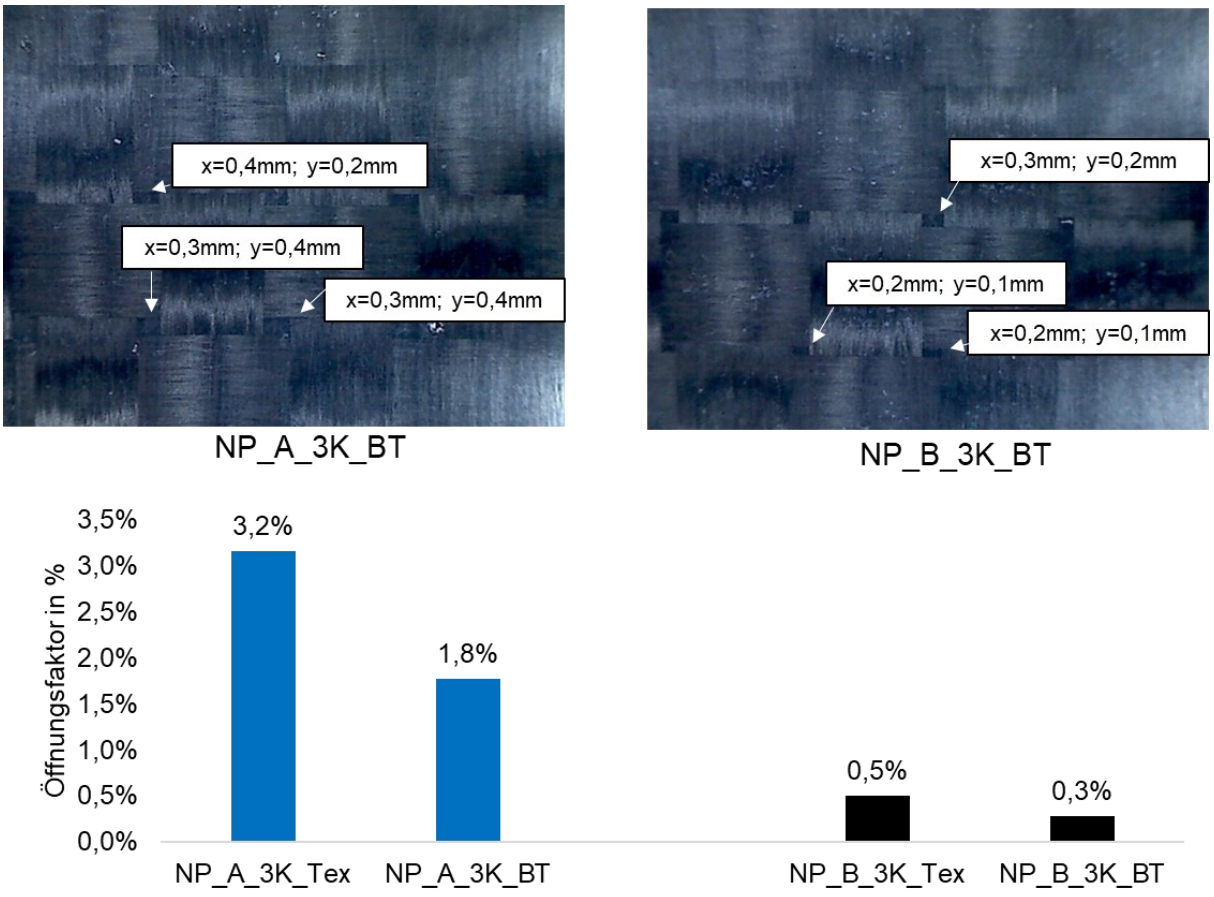


Abb. 50 Vergleich der Öffnungsfaktoren der Leinwandgewebe-Sichtlage im CFK-Bauteil.

Auch im Bauteil wird für den NP_B_3k Lagenaufbau ein geringerer Öffnungsfaktor ermittelt als für Bauteile mit NP_A_3k Sichtlage. Dabei werden für beide Varianten geringere Öffnungsfaktoren ermittelt als im trockenen Textil. Für das NP_A_3k Leinwandtextil ergibt sich eine Verringerung des Öffnungsfaktors um 44 % von 3,2 % auf 1,8 %. Relativ ist die Verkleinerung des Öffnungsfaktors der NP_A_3k Variante mit 43 % annähernd gleich, jedoch auf einem deutlich niedrigeren Niveau (0,5 % auf 0,3 %). Die Presskraft wurde für die beiden Varianten nicht verändert und auch das Flächengewicht ist gleich. Die Rovingbreite hat sich nicht signifikant verändert. Weiterhin ist bei beiden Varianten die Kette schmaler als der Schuss. Die Mittelwerte der Breiten erhöhen sich zwar in der zweiten Nachkommastelle, dies wird jedoch von der Schwankung der Messwerte innerhalb der Fehlergrenzen überlagert. Daraus lässt sich schließen, dass das Textil im Bereich der Messfläche aufgrund des Pressvorgangs zusammengedrückt wird und sich der Öffnungsfaktor um ca. 43-44 % verringert. Der offene Bereich des Leinwandgewebes, der im Bauteil als Reinharzbereich vorliegt, ist somit nach dem Umformen geringer als im ursprünglichen Textil, was die Verteilung des Faservolumengehalts weiter homogenisiert.

Nachfolgend werden die Messergebnisse der WLP-Messungen analysiert. Für die Auswertung der Oberflächentopografie wird wie beim trockenen Textil der Sa-Wert bei PPT-

Filtereinstellung (S=1500µm, L=2,5mm) gewählt. Die Abb. 51 veranschaulicht die in den Bauteilen gemessenen Sa-Werte der beiden Textilvarianten bezogen auf die Prozesstemperatur.

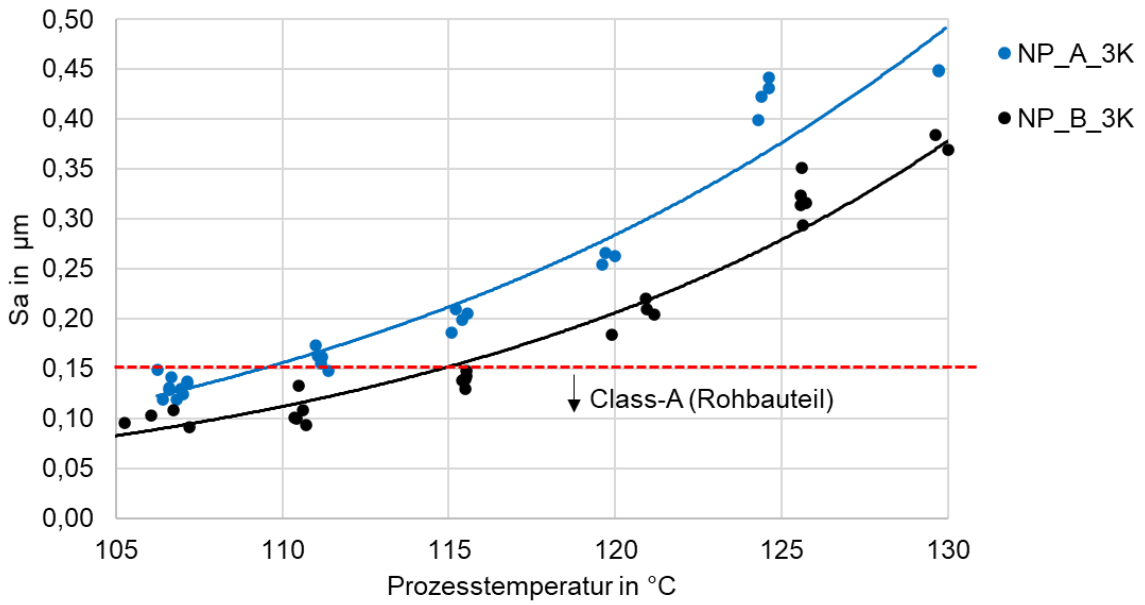


Abb. 51 Vergleich der PPT-Ausprägung (Sa-Wert) von CFK Bauteilen mit verschieden glatten 3k Leinwand Sichtlagen bei unterschiedlichen Prozesstemperaturen. Die blaue Linie zeigt die Sa-Werte für Stacks mit dem NP_A_3k Lagenaufbau, die schwarze Linie für Stacks mit dem glatteren NP_B_3k Lagenaufbau.

Grundsätzlich ist zu beobachten, dass mit steigender Prozesstemperatur auch der Kennwert für die Ausprägung der primären Faserdurchzeichnung (Sa-Wert) größer wird. Der Anstieg der Sa-Werte verstärkt sich hin zu höheren Temperaturen und ist nicht linear. Dabei ist für Bauteile mit NP_B_3k Lagenaufbau und kleinerem Öffnungsfaktor des 3k Leinwandgewebes bei gleicher Werkzeugtemperatur durchgehend ein niedrigerer Sa-Wert messbar als mit NP_A_3k Lagenaufbau. Die Verringerung der Reinharzbereiche trägt somit aufgrund der Homogenisierung des Faservolumengehalts zu einer geringeren Ausprägung der Faserdurchzeichnung bei.

Bei einer Prozesstemperatur von 105°C haben NP_B_3k Bauteile aufgrund der geringeren Öffnung eine glattere Oberfläche als NP_A_3k. Die Abb. 53 zeigt den Vergleich zwischen einem NP_A_3k Bauteil und einem NP_B_3k Bauteil hergestellt bei 105°C Prozesstemperatur.

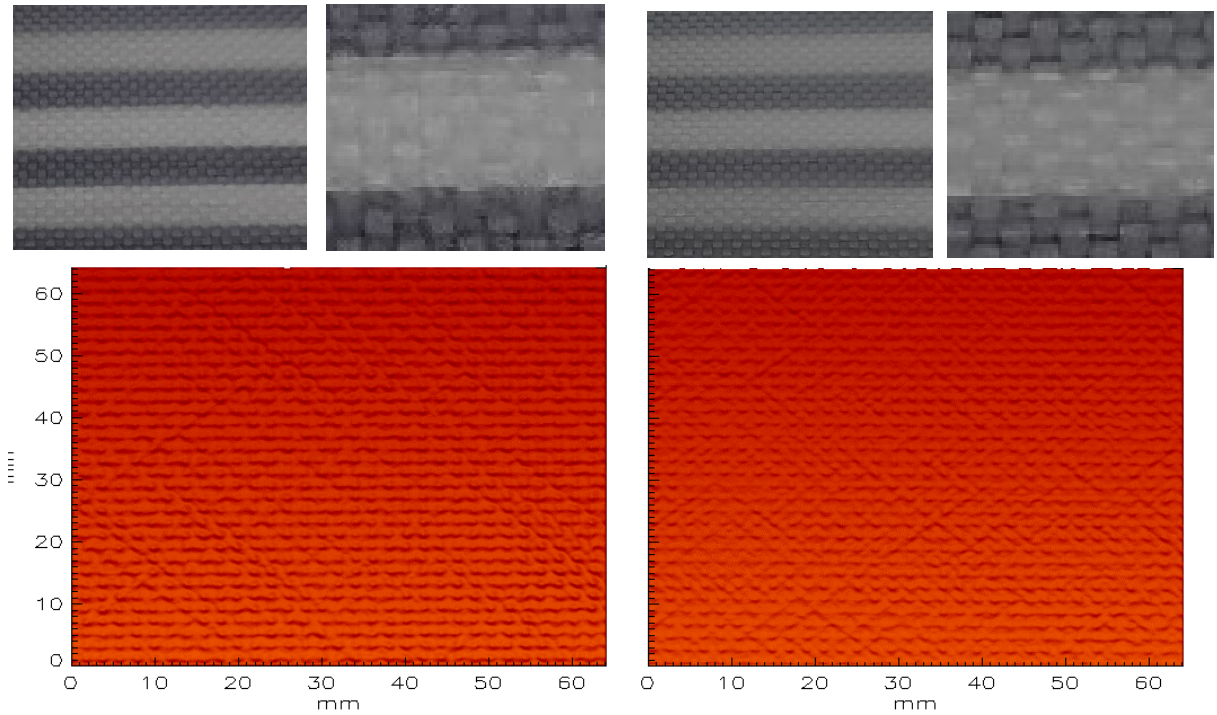


Abb. 52 Vergleich zwischen einem NP_A_3k Bauteil (links) und einem NP_B_3k Bauteil (rechts) bei 105°C Prozesstemperatur. Oben jeweils als Realbild im Lichttunnel, unten die PPT-gefilterten 3D-Oberflächentopografiedaten.

Beide Rohbauteile erfüllen den in Kap. 5.2.3 gesetzten Class-A Grenzwert von Sa < 0,15 µm. Aufgrund der matten Oberfläche der unlackierten Bauteile ist die leicht stärkere Ausprägung der Faserdurchzeichnung bei dem Bauteil NP_A_3k_105 im direkten Vergleich zu Bauteil NP_B_3k_105 erst im starken Zoom erkennbar. Mit Hilfe der PPT-gefilterten Oberflächentopografiedaten ist die Unterscheidung deutlicher, die korrespondierenden Sa-Werte lösen den tatsächlichen Unterschied am deutlichsten auf. Mit einem Sa-Wert von 0,091 µm erreicht das Bauteil NP_B_3k_105 fast den in Kap. 5.2.3 definierten Grenzwert für ein lackiertes Endbauteil (Sa < 0,08µm). Allerdings liegt für 105°C der Mittelwert der fünf NP_B_3k CFK Bauteile bei einem Sa-Wert von 0,10 µm, was das Welligkeitsniveau etwas weiter über den Grenzwert hebt. Zudem fehlen dem Rohbauteil ohne Lackierung der Glanzgrad und der Schutz des Lacks vor UV-Strahlung und weiteren Umwelteinflüssen. Im lackierten Zustand ist nichtdestotrotz eine sehr glatte Oberfläche mit Sa-Werten deutlich unterhalb des Grenzwerts zu erwarten. Die Oberflächenwelligkeit wird dann nicht mehr von der Faserdurchzeichnung, sondern von der Oberflächenstruktur des Lacksystems geprägt.
Aufgrund der glatten Sichtlage mit einem geringen Öffnungsfaktor von 0,5 %, können Bauteile mit dem NP_B_3k Lagenaufbau den in Kap. 5.2.3 gesetzten Grenzwert für Class-A Rohbauteile von Sa < 0,15 µm auch bei 115°C erfüllen. Bauteile mit NP_A_3k Lagenaufbau erreichen das geforderte Welligkeitsniveau nur bei 105°C. Alle anderen Bauteile, die den Class-A Grenzwert überschreiten, können mit dem in Kap. 4.4 beschriebenen automatisierten

Lackierverfahren ohne Zusatzaufwand keine Class-A Oberfläche erreichen. Die Abb. 54 zeigt den Vergleich zwischen einem NP_A_3k Bauteil bei 105°C und einem NP_B_3k Bauteil bei 115°C Prozesstemperatur.

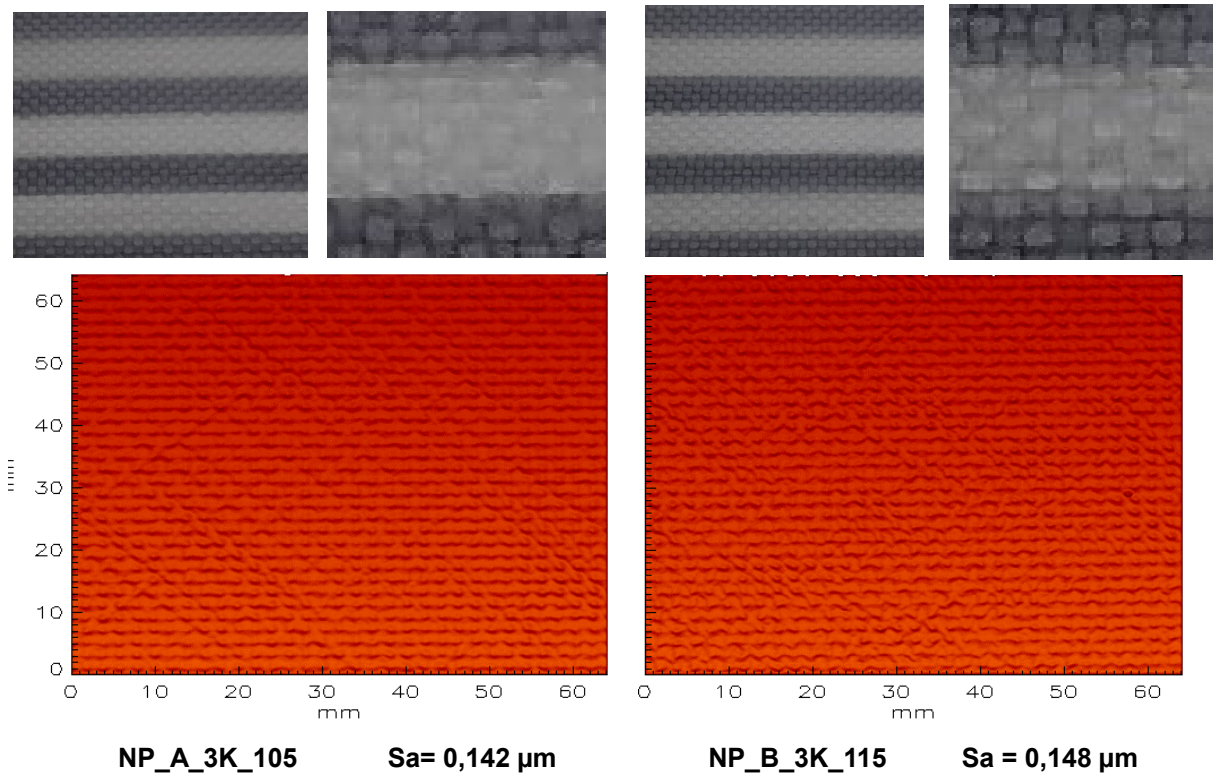


Abb. 53 Vergleich zwischen einem NP_A_3k Bauteil hergestellt bei 105°C (links) und einem NP_B_3k Bauteil hergestellt bei 115°C (rechts). Oben jeweils als Realbild im Lichttunnel, unten die PPT-gefilterten 3D-Oberflächentopografiedaten.

In diesem Vergleich ist die visuelle Unterscheidung der Ausprägung der Faserdurchzeichnung der Bauteile NP_A_3k_105 und NP_A_3k_115 am Realbauteil nicht möglich. Auch im starken Zoom sind die Bauteiloberflächen sehr ähnlich und bezogen auf die PPT-Ausprägung als gleich anzusehen. Mit Hilfe der PPT-gefilterten Oberflächentopografiedaten wird dieser Eindruck bestätigt, da die Sa-Werte annähernd gleich sind. Beide Bauteile erfüllen bei der jeweiligen Prozesstemperatur mit Sa-Werten <0,15 µm die Grenzwertanforderungen für ein Class-A fähiges CFK Rohbauteil.

Zusammengefasst führt eine glattere Sichtlage mit einem geringeren Öffnungsfaktor bei gleichen Prozessparametern zu glatteren Bauteiloberflächen. Die Verringerung des Öffnungsfaktors von 3,2% auf 0,5% und die damit verbundene glattere Sichtlage ermöglichen eine Prozesstemperaturerhöhung um 10°C bei gleichbleibender Oberflächenqualität. Die Temperaturerhöhung ermöglicht wiederum eine Zykluszeitreduzierung, was eine Steigerung der Produktivität (Output) ermöglicht. Dieses Potential soll nachfolgend betrachtet werden.

Korrelation zwischen PPT, Werkzeugtemperatur und Glasübergangstemperatur T_g

Um das Potential der mit der glatteren NP_B_3k Sichtlage verbundenen Zykluszeit-reduzierung zu ermitteln, wird im nächsten Schritt der Zusammenhang zwischen der Ausprägung der primären Faserdurchzeichnung PPT, der Prozesstemperatur und der presszeitabhängigen Glasübergangstemperatur T_g untersucht. Wie bereits aufgezeigt wurde, ist der Anstieg der Sa-Werte mit steigender Prozesstemperatur nicht linear. Teilt man jedoch wie in Abb. 54 die Messergebnisse in zwei Abschnitte mit 105-120°C und 125-130°C ein, ist ein sprunghafter Anstieg der Sa-Werte bei Prozesstemperaturen größer 120°C zu beobachten.

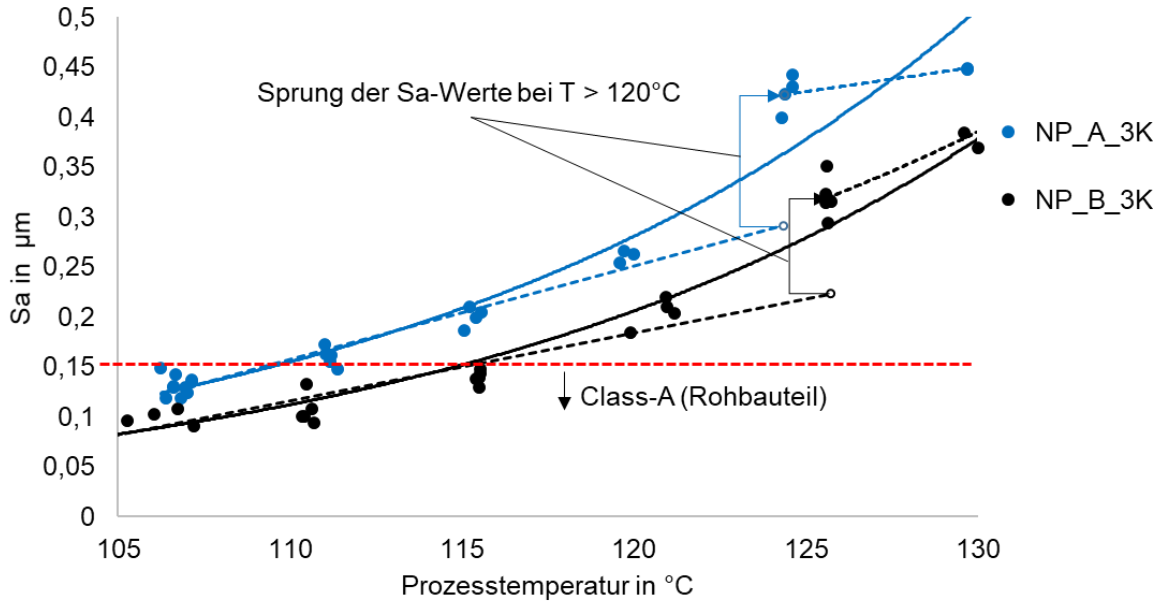


Abb. 54 Vergleich der PPT-Ausprägung (Sa-Wert) von CFK Bauteilen mit verschieden glatten 3k Leinwand Sichtlagen bei unterschiedlichen Prozesstemperaturen. Blau NP_A_3k, schwarz NP_B_3k. Bei ca. 120°C ist ein sprunghafter Anstieg der Sa-Werte zu beobachten.

Im Temperaturbereich 105-120°C ist für beide Textilvarianten approximativ ein linearer Zusammenhang feststellbar. Die Trendlinien der beiden Textilvarianten verlaufen zwischen 105-120°C annähernd parallel. Ab Temperaturen größer 120°C ist jedoch ein Sprung im Ordinatenabschnitt und eine Abweichung zum linearen Verlauf feststellbar. Dieses Phänomen soll nun näher betrachtet werden. Wie in Kap. 4.2 beschrieben, hat das eingesetzte Dow Voraforce 5300 Harzsystem eine maximale Glasübergangstemperatur T_{gMAX} (Midpoint) von 125,1°C bei einem Aushärtegrad von α=1, was einer vollständigen Aushärtung entspricht. Das zugehörige Kinetikmodell ermöglicht es, zu den jeweiligen Werkzeugtemperaturen und Prozesszeiten den Aushärtegrad und die korrspondierende Glasübergangstemperatur T_g zu ermitteln. Daher wird nachfolgend untersucht, inwiefern sich ein Zusammenhang zwischen den Sa-Werten, der Glasübergangstemperatur T_g und der Prozesstemperatur ergibt. Hierfür

wird die im Werkzeug gemessene Prozesstemperatur mit der ermittelten Glasübergangstemperatur T_g der erzeugten Bauteile in Beziehung gesetzt. Die Tab. 10 stellt der jeweiligen Werkzeugtemperatur die Sa-Werte, den Aushärtegrad, die T_g und die Differenz zwischen Werkzeugtemperatur und T_g (Midpoint) gegenüber.

$T_{Werkzeug}$ [°C]	Sa (PPT) [µm]		Presszeit [s]	Aushärtegrad α	$T_{g\ Midpoint}$ [°C]	$T_{Werkzeug}$-T_g [°C]
	NP_A_3k	NP_B_3k				
105	0,14	0,10	511	0,965	111	-6
110	0,16	0,11	506,5	0,974	115	-5
115	0,20	0,14	495	0,982	118	-3
120	0,27	0,21	488	0,989	120	0
125	0,43	0,32	485	0,992	122	+3
130	0,45	0,39	482,5	0,995	123	+7

Tab. 10 Übersicht der Sa-Werte in Abhängigkeit der Werkzeugtemperatur, Presszeit und den resultierenden Kenngrößen aus dem Kinetikmodell (Aushärtegrad und T_g) und der Differenz aus Werkzeugtemperatur und T_g.

Mit steigenden Werkzeugtemperaturen steigt auch der Aushärtegrad und somit die T_g. Bei 105°C und einem Aushärtegrad von 0,965 wird eine T_g von 111°C erreicht, was dem Minimum der Spezifikation für Class-A CFK-Dächer entspricht. Bei Bauteilen mit Werkzeugtemperaturen von 105-115°C erreicht die EP-Matrix eine T_g, die oberhalb der Werkzeugtemperatur liegt. Dieser Zustand wird auch als Vitrifikation oder Verglasung bezeichnet [120]. Bei 120°C entspricht die T_g der Matrix nach der gewählten Aushärtezeit von 488s genau der Werkzeugtemperatur. Bei 125°C und 130°C erreicht die T_g der Bauteile trotz annähernd vollständiger Aushärtung (α > 0,99) weder die T_{gMax} von 125,1°C noch die Werkzeugtemperatur. Die höchsten T_g-Werte werden bei 130°C und einer Aushärtezeit von 482,5s erreicht. Die Bauteile erreichen dabei eine T_g von 123°C bei einem Aushärtegrad von 0,995. Das ist 12°C über der Spezifikation, allerdings 7°C unterhalb der Werkzeugtemperatur. Auffällig ist hierbei, dass die bei 125°C und 130°C gefertigten Bauteile direkt nach der Entnahme subjektiv weicher wirkten, als jene, die bei 105-120°C hergestellt wurden.
Stellt man die ermittelten Sa-Werte der Differenz aus Werkzeugtemperatur und T_g wie im Diagramm der Abb. 55 gegenüber, wird deutlich, dass der Sprung der Sa-Werte genau beim Nullpunkt der Differenz zwischen $T_{Werkzeug}$ und T_g liegt.

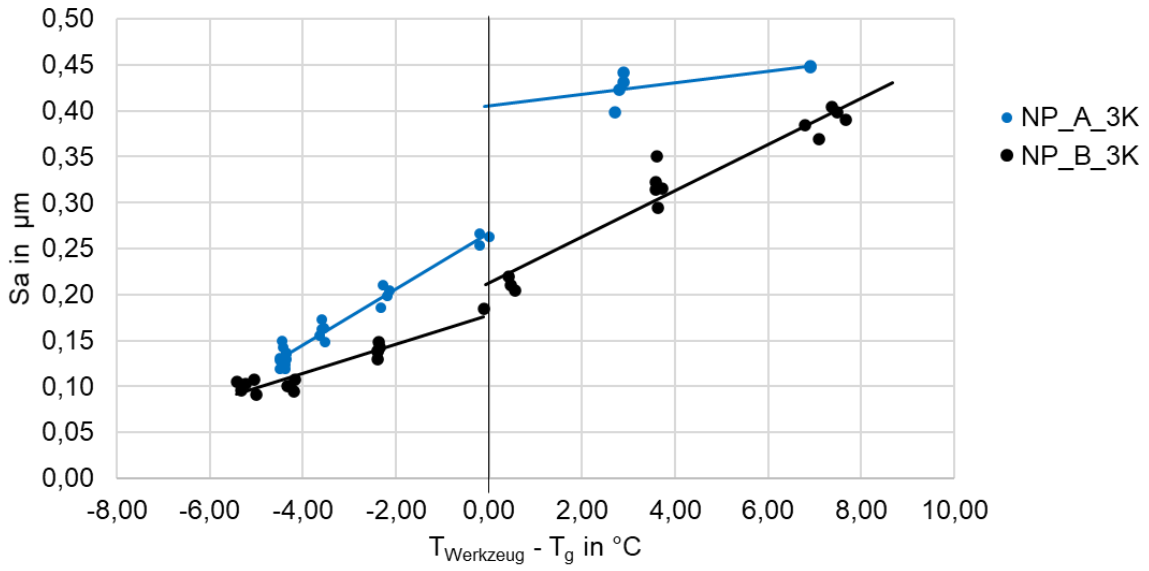


Abb. 55 Ausprägung der Faserdurchzeichnung (Sa-Wert) in Abhängigkeit der Differenz aus Werkzeugtemperatur und Glasübergangstemperatur.

Der unstetige Anstieg im Sa-Nullpunkt zeigt, dass neben der Werkzeugtemperatur selbst, auch das Verhältnis der Glasübergangstemperatur T_g zur Werkzeugtemperatur einen Einfluss auf die resultierende Oberflächenwelligkeit des Bauteils haben muss. Hervorzuheben ist, dass bei den NP_A_3k Bauteilen bei der Soll-Temperatur von 120°C die tatsächliche Werkzeugtemperatur mit 119,6-120,0°C noch knapp zu einer negativen Differenz von -0,2°C bis 0,0°C führt. Die hergestellten NP_B_3k Bauteile befinden sich mit 120,0-120,6°C jedoch knapp darüber. Drei der fünf Bauteile mit einer Werkzeugtemperatur von 120,5-120,6°C überschreiten dabei den $T_{Werkzeug}$-T_g Nullpunkt um 0,4-0,6 °C. Dies führt auch bei den Sa-Werten direkt zu einer Erhöhung von 0,18 µm auf 0,21-0,22 µm, was einer Abweichung von 17-22 % enstpricht. Logisch erscheint auch, dass der Sprung bei den Bauteilen mit NP_A_3k Sichtlage mit höherem Öffnungsfaktor deutlich stärker ausfällt, da hier größere Reinharzbereiche vorliegen, die zu einer Verstärkung des Effekts führen.

Liegt also die Werkzeugtemperatur über der durch die Aushärtezeit erreichten Glasübergangstemperatur T_g erhöht dies signifikant die Ausprägung der Faserdurchzeichnung. Dies liegt möglicherweise an der Erweichung der Matrix bei Überschreiten der Glasübergangstemperatur und dem damit einhergehenden Übergang vom glasartigen, hartelastischen zu einem gummi-elastischem Materialverhalten. Dies erklärt auch die „weicher“ wirkenden Bauteile. Da die Mobilität der Polymerketten mit Überschreiten der Glasübergangstemperatur steigt, findet dabei eine Erhöhung des thermischen Ausdehnungskoeffizienten statt.

Tatsächlich wird diese Annahme durch Forschungsarbeiten, die sich mit den Materialeigenschafften von duromeren Harzsystemen in Abhängigkeit der Prozessführung beschäftigt haben, bestätitgt. Beispielsweise hat Harsch bei TMA (Thermo-Mechanische-

Analyse) Messungen eines EP-Harzsystems nachgewiesen, dass sich der ursprüngliche thermische Ausdehnungskoeefizient von α_T = 3,8 *10^{-7} K^{-1} (38 ppm/K) bei Temperaturen oberhalb der T_g um das 2,8-fache auf α_T = 14,3 *10^{-7} K^{-1} (143 ppm/K) erhöht. Die Abb. 56 veranschaulicht den Sprung des thermischen Ausdehnungskoeffizienten auf Höhe der T_g des von Harsch untersuchten EP-Harzsystems. [120]

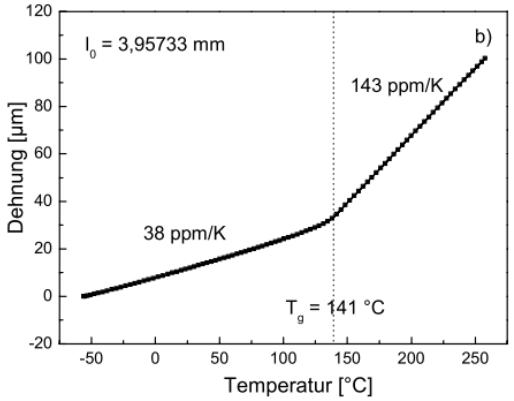


Abb.56 Dehnung eines ausgehärteten EP-Harzes bei konstanter Temperaturerhöhung aus Harsch [120].

Die Ergebnisse von Harsch, dass der thermische Ausdehnungskoeffitient von duromeren Harzsystemen bei Überschreiten der Glasübergangstemperatur T_g deutlich ansteigt, werden auch in [121, 122] bestätigt.

Somit lässt sich mit dem sprunghaften Anstieg des Ausdehnungskoeffizienten bei $T_{Werkzeug} > T_g$ auch der ebenfalls sprunghafte Anstieg der Sa-Werte und somit der Faserdurchzeichnung erklären. Wird die T_g der Matrix im Werkzeug überschritten, ist nach der Entnahme die Volumenkontraktion bei der Abkühlung bis zum Erreichen der T_g höher als darunter, was zu einer stärkeren Ausprägung der Faserdurchzeichnung führt. Daraus resultiert für eine definierte Werkzeugtemperatur eine Abhängigkeit der Ausprägung der Faserdurchzeichnung zur T_g und damit dem Aushärtegrad α der Matrix bei der Entnahme des Bauteils aus dem Werkzeug. Um die daraus abgeleitete Bedingung $T_g \geqq T_{Werkzeug}$ zu erfüllen, ist eine Mindestaushärtezeit notwendig, die bei hohen Temperaturen länger sein kann als für die Spezifikation von T_g > 111°C notwendig wäre.

Daraus ergibt sich zusätzlich zum empirisch ermittelten Sa-Grenzwert für Class-A Rohbauteile (Kap. 5.2.3) ein materialabhängiger Grenzwert, der es ermöglicht, die optimale Kombination aus Werkzeugtemperatur und Aushärtezeit zu ermitteln. Da die Glasübergangstemperatur T_g eines bestimmten EP-Harzsystems mit definiertem Mischungsverhältnis direkt vom Aushärtegrad abhängt [107], kann für eine bestimmte Prozess- bzw. Werkzeugtemperatur anhand eines isothermen Kinetikmodells direkt die benötigte Aushärtezeit ermittelt werden. Es

muss somit der Aushärtegrad gefunden werden, bei dem die T_g des Harzsystems genau die Werkzeugtemperatur erreicht.

Die Abb. 57 zeigt den aus dem Kinetikmodell errechneten Verlauf der Glasübergangstemperatur T_g über die Aushärtezeit für die in dieser Untersuchngsreihe Class-A fähigen Temperaturstufen von 105-115°C. Dabei wird zum einen die benötigte Aushärtezeit für die spezifizierte Grenze von T_g = 111°C eingezeichnet. Zusätzlich wird die Aushärtezeit angegeben, die bei 115°C die Bedingung $T_{Werkzeug} = T_g$ erfüllt.

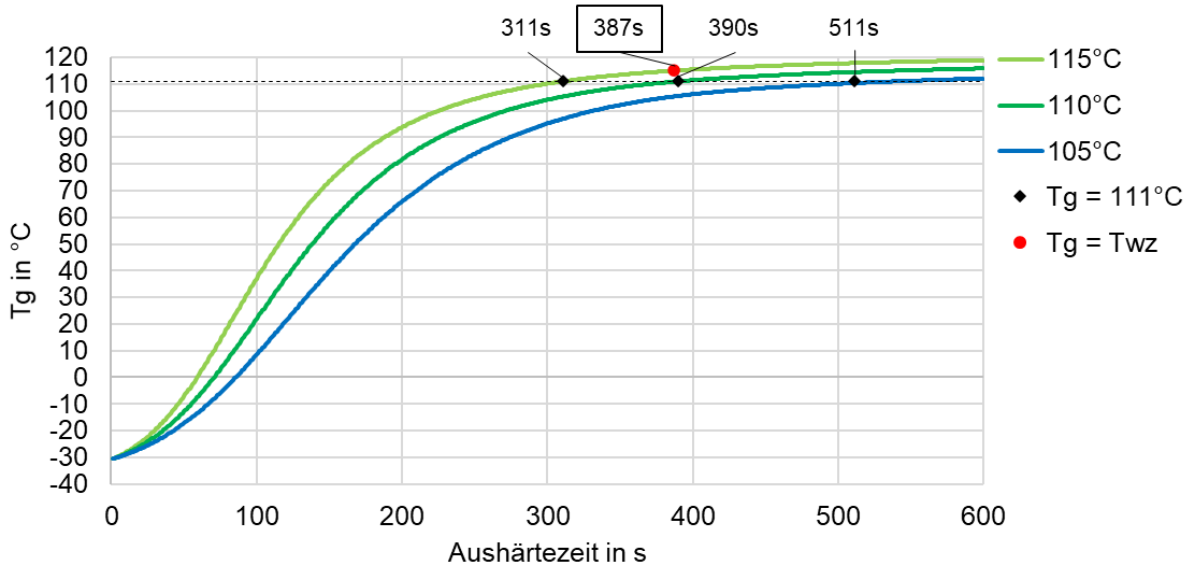


Abb. 57 Glasübergangstemperatur in Abhängigkeit der Aushärtezeit bei Werkzeugtemperaturen von 105-115°C. Bei 115°C zusätzlich zu T_g = 111°C mit rotem Punkt $T_g = T_{Werkzeug}$ = 115°C.

Somit ergibt sich für Bauteile die bei 115°C gefertigt werden nicht automatisch das Potential einer Zykluszeitreduzierung auf 311s bei Einhaltung der Spezifikation mit T_g = 111°C. Wie bei 120°C gezeigt wurde, kann das Überschreiten der T_g bereits um ca. 0,5°C zu einer Erhöhung der Sa-Werte um ca. 20% führen, was im Falle der NP_B_3k Bauteile bei 115°C (Sa = 0,14µm) ein Überschreiten des Class-A Grenzwerts von 0,15 µm ermöglichen kann. Daher wird nachfolgend die Berechnung der Produktivitätssteigerung anhand der Vorgaben von T_g > 111 °C und $T_g \geqq T_{Werkzeug}$ vorgenommen.

Bewertung der möglichen Produktivitätssteigerung

Mit den bisherigen Versuchsergebnissen kann die mögliche Produktivitätssteigerung (Output) bei gleichbleibender Oberflächenqualität durch den Austausch der 3k Leinwandgewebe Sichtlage mit geringerem Öffnungsfaktor berechnet werden. Die Tab. 11 stellt die Sa-Werte der beiden Varianten NP_A_3k und NP_B_3k mit der für die jeweilige Prozesstemperatur benötigten Presszeit und resultierenden T_g gegenüber.

Variante	Öffnungsfaktor [%]	Presszeit [s]	$T_{Werkzeug}$ [°C]	T_g [°C]	Sa-Wert [µm]
NP_A_3k	3,2	511	105	111	0,14
NP_B_3k	0,5	511	105	111	0,10
NP_B_3k	0,5	390	110	111	0,11
NP_B_3k	0,5	387	115	115	0,14

Tab. 11 Gegenüberstellung der Sa-Werte mit der für die jeweilige Prozesstemperatur benötigten Aushärtezeit und T_g der beiden Sichtlagenvarianten. Prämissen: T_g >111°C und $T_g \geqq T_{Werkzeug}$.

Durch die glattere 3k Leinwandgewebe Sichtlage NP_B_3k Variante mit einem Öffnungsfaktor von 0,5 % können Class-A CFK Rohbauteile bei bis zu 115°C hergestellt werden. Daraus resultiert eine maximale Zykluszeitreduzierung von 511s - 387s = 124s. Aufgrund der Prämisse, dass $T_g \geqq T_{Werkzeug}$ und T_g >111°C ergibt sich ein Prozessfenster, in dem mit einer hohen Prozessicherheit Rohbauteile hergestellt werden können, die sowohl alle mechanischen als auch die optischen Class-A Anforderungen erfüllen.

Kalkuliertes, kostenoptimales Class-A Prozessfenster mit NP_B_3k Lagenaufbau und Dow Voraforce 5300 Harzsystem:

Öffnungsfaktor 3k-Leinwandsichtlage:	0,5%
Infiltrationszeit	120s
Presskraft:	2125Kn
Prozesszeit:	388,5s +/- 1,5s
Werkzeugtemperatur:	112,5°C +/- 2,5°C
Bauteildicke:	1,7mm +/- 0,2mm

Da theoretisch die Aushärtzezeit im Werkzeug (Presszeit) bei der CFK Rohteilherstellung im Nasspressverfahren die taktzeitbestimmende Größe ist [3, 6, 12], erhöht eine Verringerung der Aushärtezeit direkt den Output. Dabei wird der Output in Bauteilen (CFK-Dächer) pro Stunde angegeben. Die Tab. 12 fasst die Ergebnisse zusammen.

	NP_A_3k	NP_B_3k	Abs. Differenz	Rel. Differenz
Öffnungsfaktor [%]	3,2	0,5	2,7	84,4%
Sa textiles Halbzeug [µm]	5,01	4,10	0,91	18,2%
Prozesstemperatur [°C]	105	115	10	8,70%
Sa CFK Rohbauteil [µm]	0,14	0,14	0	0,00%
Presszeit [s]	511	387	-124	-24,3%
Max. Bauteile / Stunde	7	9	2	28,6%
Max. Bauteile / 7h Schicht	49	63	14	28,6%

Tab. 12 Theoretische Potentialbewertung anhand der Presszeiteinsparung durch die im Vergleich zu NP_A_3k glattere Sichtlage im NP_B_3k Lagenaufbau. Durch den Einsatz des NP_A_3k Lagenaufbaus ist eine Erhöhung der Produktivität (Output) um zwei CFK-Dächer pro Stunde bei gleichbleibender Oberflächenqualität des Rohbauteils möglich.

Mit der glatteren NP_B_3k Sichtlage können aufgrund des geringeren Öffnungsfaktors Class-A fähige CFK Rohbauteile (Sa < 0,15µm) bei einer um 124s kürzeren Aushärtezeit gefertigt werden als mit der NP-A_3k Sichtlage. Die Oberflächenqualität ist dabei bezüglich der Faserdurchzeichnung vergleichbar, da die für die Zykluszeitverkürzung notwendige Temperaturerhöhung durch das glattere Textil ausgeglichen wird und somit ebenfalls ein Sa-Wert von 0,14 µm erreicht wird. Die höhere Prozesstemperatur der NP_B_3k Bauteile ermöglicht dabei eine Taktzeiteinsparung von 24,3 %.

Das bedeutet, dass in einer 7h Schicht mit dem NP_B_3k Lagenaufbau rein rechnerisch 63 anstatt 49 CFK-Dach Rohbauteile produziert werden können, was einer Erhöhung der Produktivität (Output) um 28,6 % entspricht. Hervorzuheben ist, dass dieses Potential nur durch das Anpassen einer bisher wenig beachteten Textilkenngröße, nämlich dem Öffnungsfaktor gehoben wird. Dabei kann der Öffnungsfaktor zum einen über den RAR und zum anderen durch die Fadendichte angepasst werden. Es handelt sich somit um Prozessparameter der Textilherstellung, die auch bei der Herstellung der NP_A_3k Sichtlage optimiert werden können.

Quantifizierbar wurde der Einfluss des Öffnungsfaktors auf die Ausprägung der Faserdurchzeichnung durch die in dieser Arbeit entwickelte Prüfkette. Dadurch kann vom Simulationsmodell über das textile Halbzeug bis in das CFK-Bauteil die Auswirkung auf die Oberflächentopografie mit demselben Kennwert verfolgt werden. Durch die auf 3k Leinwandgewebe ausgelegte S-L-Filterung repräsentiert der amplitudensensitive Sa-Wert dabei die Ausprägung der Faserdurchzeichnung. Zudem konnte mit der Auswertemethodik die Auswirkung der Veränderung des thermischen Ausdehnungsverhaltens bei Prozesstemperaturen oberhalb und unterhalb der Glasübergangstemperatur aus den Sa-Wert nachgewiesen werden. Dabei wurde festgestellt, dass sich der thermische

Ausdehnungskoeffizient der Matrix bei Überschreiten der T_g um bis zu Faktor drei erhöht, was zu einem überproportionalen Anstieg der Sa-Werte im fertigen CFK-Bauteil führt. Daraus wurde die Prozessgrenze für Class-A CFK Bauteile von $T_g \geqq T_{Werkzeug}$ abgeleitet. Diese wird mit dem für diese Versuche eingesetzten Dow Voraforce 5300 Harzsystem und dem NP_B_3k Lagenaufbau bis 115°C bei gleichzeitig kürzerer Aushärtezeit und Einhalten der Class-A Anforderungen erfüllt.

Aus den Prämissen $T_g \geqq T_{Werkzeug}$ und T_g >111°C ergibt sich ein stabiles Prozessfenster, in dem auch bei einer Werkzeugabkühlung auf bis zu 110°C, CFK-Dächer (Rohbauteile) hergestellt werden können, die ohne Absenken der Produktivität sowohl alle mechanischen als auch die optischen Class-A Anforderungen erfüllen.

6.5. Ausgleich des PPT-Effekts durch kalthärtende Beschichtungen

Mit dem in Kap. 4.4 beschriebenen automatisierten Lackierprozess kann eine Class-A Oberflächenqualität nur dann erreicht werden, wenn die CFK Rohbauteile einen Sa-Wert von 0,15 µm (Kap. 5.2.3) nicht überschreiten. Für die in dieser Arbeit untersuchte Kombination aus EP-Harzsystem und CF-Lagenaufbau ergeben sich daher Einschränkungen der Prozesstemperatur und der damit verbundenen Aushärtezeit, um diesen Grenzwert einzuhalten. Dabei konnte in den Kap. 6.1-6.4 durch den Einsatz einer Sichtlage (NP_B_3k) mit geringem Öffnungsfaktor zwar die Prozesstemperatur von 105°C auf 115°C erhöht werden. Jedoch musste die Prozesszeit so angepasst werden, dass die Glasübergangstemperatur T_g den Wert der Werkzeugtemperatur erreicht, da ansonsten die Ausprägung der Faserdurchzeichnung zu hoch wäre. Bauteile, die bei höheren Temperaturen hergestellt wurden, überschritten den Sa-Grenzwert deutlich. Die stärkste Ausprägung der Faserdurchzeichnung wurde dabei mit einem Sa-Wert von 0,45 µm bei der Kombination NP_A_3k Sichtlage und 130°C Werkzeugtemperatur gemessen. Die Abb. 58 zeigt den Vergleich der bei 105°C und 130°C hergestellten Rohbauteile beispielhaft als Realbild unter Streifenlicht und als 3D-Topografie aus der WLP Messung inkl. zugehöriger Sa-Werte.

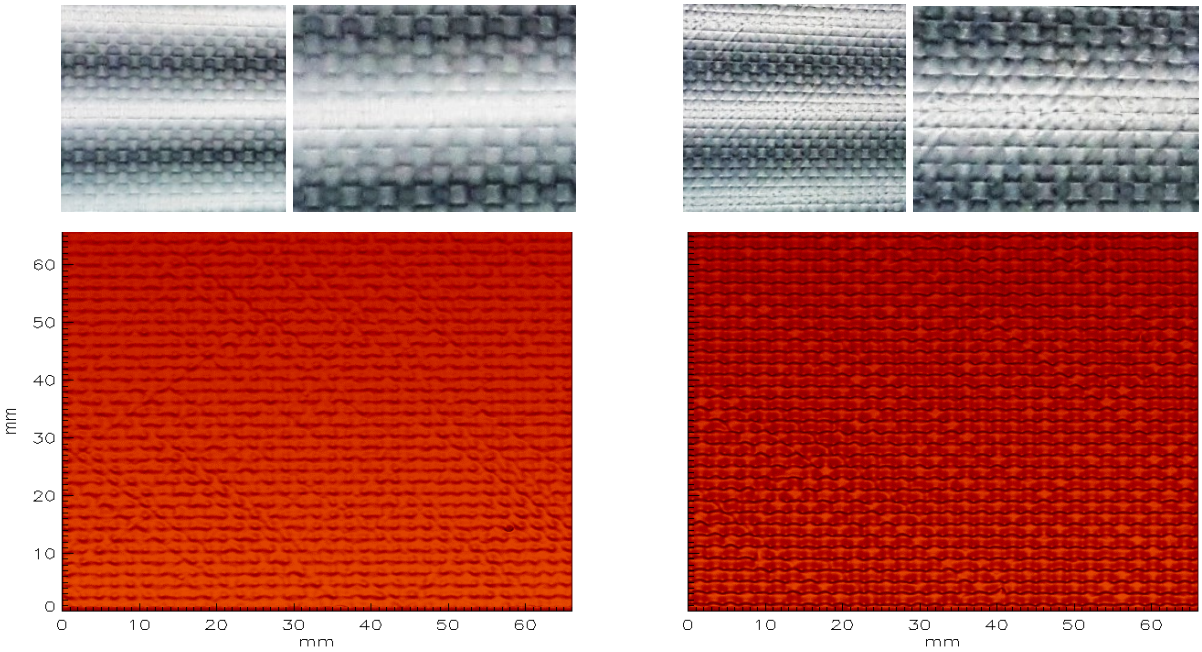


Abb. 58 Beispielhafter Vergleich der Faserdurchzeichnung an CFK Bauteilen, die bei 105°C und 130°C hergestellt wurden. Oben Realbild unter Streifenlicht, darunter 3D-Topografie mit Z-Skala (0-100µm). Die Bauteile unterscheiden sich sowohl optisch als auch in den Sa-Werten sehr stark.

Bei dem CFK-Bauteil, das bei 130°C hergestellt wurde, ist sowohl visuell als auch am Sa-Wert eine deutlich stärkere Ausprägung der Faserdurchzeichnung erkennbar. Dabei wird der

Grenzwert für Class-A Rohbauteile um das Dreifache überschritten. Auch bei der Betrachtung der Profillinie der PPT-gefilterten Oberflächentopografie ergibt sich im Abstand von Spitze zu Tal im Mittel der Faktor drei, wie in Abb. 59 zu sehen ist.

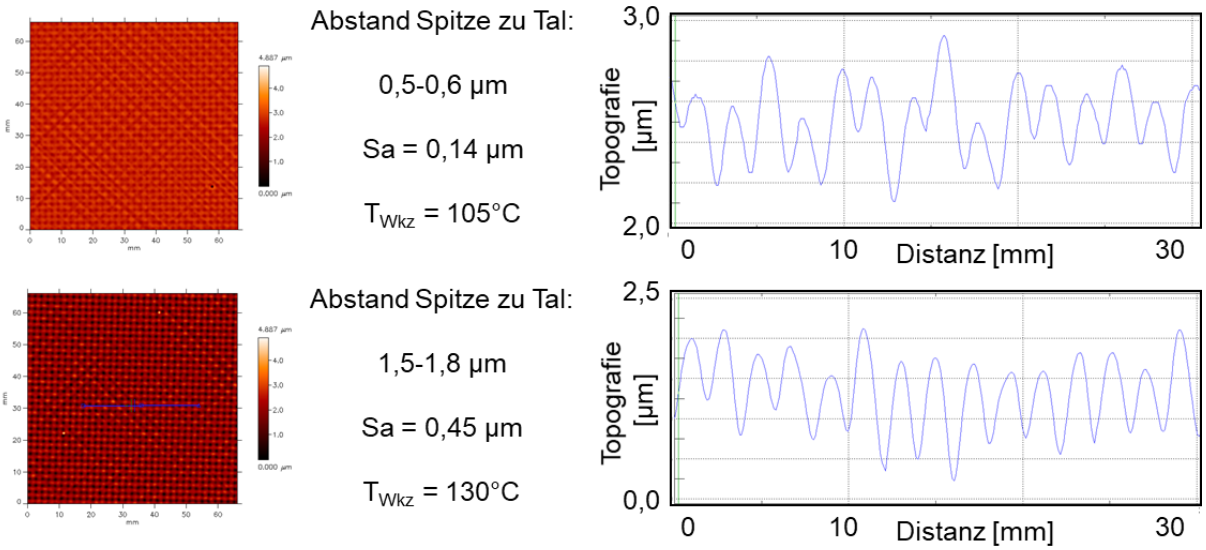
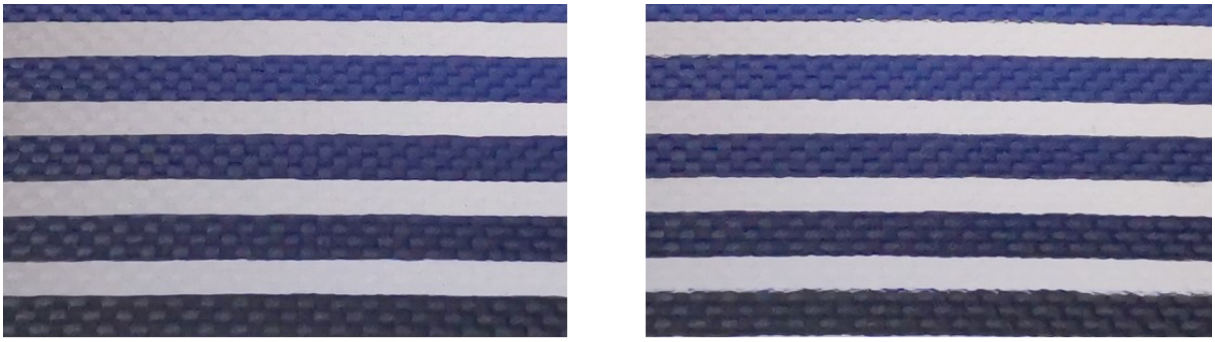


Abb. 59 Vergleich der Profillinien der PPT-gefilterten Oberflächentopografie bei oben 105°C und unten 130°C Werkzeugtemperatur.

Da der Sa-Wert die mittlere arithmetische Höhe der Oberflächentopografie abbildet, ist dieser amplitudensensitiv, weshalb sich der Faktor bei der flächigen und linearen Betrachtung deckt. (siehe dazu auch Kap. 2.6.3). Bei der Betrachtung der Profillinien fällt auf, dass die absoluten Werte der Spitze-Tal Abstände bei 105 °C bei 0,5-0,6 µm und bei 130°C bei 1,5-1,8 µm liegen. Damit entspricht die Abzeichnungstiefe 0,4-1,3 % der Lackschichtdicke von 140 µm, weshalb bei der Filmbildung nach der Applikation eine komplett glatte Oberfläche entsteht. Die Ausprägung der Faserdurchzeichnung beider Bauteile ist im Nasszustand nicht erkennbar. Trotzdem wird nach der thermischen Lacktrocknung, wie in Abb. 60 gezeigt, keine Class-A Oberfläche erreicht, da die starke Faserdurchzeichnung der 130°C Bauteile durchschlägt.



NP_A_3K_105°C_PUR
Sa = 0,067 µm

NP_A_3K_130°C_PUR
Sa = 0,109 µm

Abb. 60 Vergleich konventionell lackierter CFK-Dach Ausschnitte. Links hergestellt bei 105°C mit Class-A Oberfläche (Sa < 0,08µm), rechts bei 130°C mit sichtbarer Faserdurchzeichnung.

Ein möglicher Grund, weshalb eine Lackschichtdicke von 140 µm nicht ausreicht, um die Faserdurchzeichnung des bei 130°C hergestellten Bauteils auszugleichen, kann die bereits in Kap. 4.4 theoretisch betrachtete Temperaturbelastung von ca. 90°C sein, die das Bauteil während der Lacktrocknung erfährt. Aufgrund der Aufheizung auf die Trocknertemperatur dehnt sich die Matrix im Gegensatz zum eingebetteten C-Faser Textil aus. Der Lack härtet damit auf einer glatteren Oberfläche aus, als das Bauteil bei Raumtemperatur aufweist. Nach der Entnahme aus dem Trocknerofen kühlt das lackierte Bauteil ab, wobei sich die Matrix wieder zusammenzieht. Die im Vergleich dünne Lackschicht von ca. 140 µm wird in die Vertiefungen der Faserdurchzeichnungen des 1,7 mm starken Substrats gezogen und die Oberfläche wird wellig. Die Lackschicht ist dabei nicht in der Lage die Volumenkontraktion der Matrix zu verhindern. Die Oberflächenwelligkeit wird durch die zusätzliche Schicht nur gedämpft. Zudem unterliegt auch das Lackmaterial einer thermischen Schwindung bei der Abkühlung von der Trockner- auf Raumtemperatur, was das Durchschlagen der Faserdurchzeichnung ebenfalls begünstigt.

Daher wird im Folgenden untersucht, ob es möglich ist, den Effekt der Matrix- und Lackausdehnung bei der Lacktrocknung mit einem kalthärtenden Beschichtungssystem zu umgehen. Die Abb. 61 veranschaulicht das Prinzip einer Lackvernetzung mit UV-Strahlung im Vergleich zu einer konventionellen thermischen Trocknung von 2K PUR Lacksystemen.

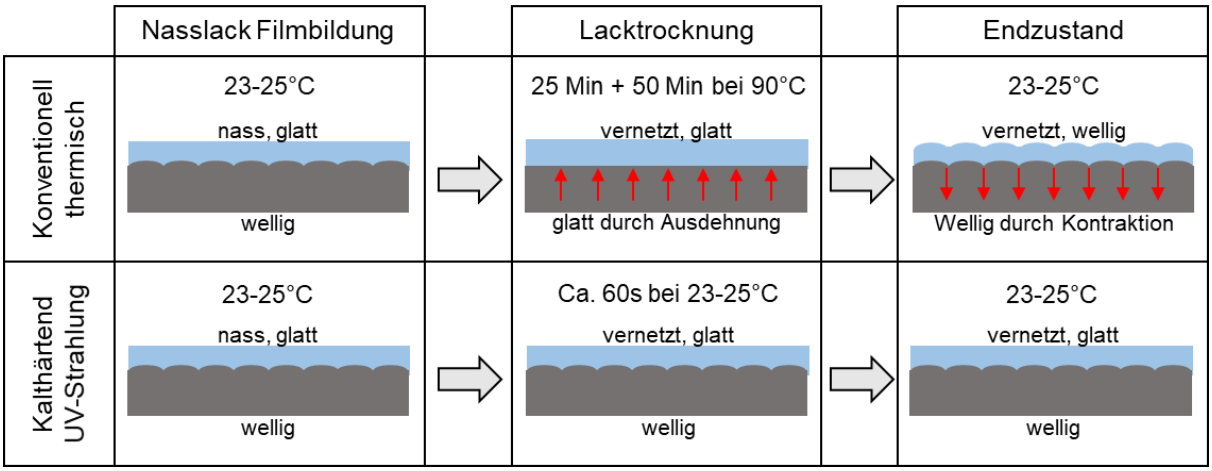


Abb.61 Vergleich der Zwischenzustände bei der Lackvernetzung in (oben) thermischen Trocknern und (unten) über UV-Strahlung. Im Gegensatz zur thermischen Trocknung findet bei der UV-Strahlenhärtung keine thermische Ausdehnung der Matrix statt, weshalb der Zustand bei der Filmbildung (Lackoberfläche glatt, Substrat wellig) „eingefroren“ wird.

Im Gegensatz zur thermischen Aushärtung von Lacksystemen in Trocknern, wird das Substrat bei der UV-Härtung kaum erwärmt. Aufgrund der radikalischen Polymerisation härten UV-Lacke je nach Schichtdicke in wenigen Sekunden aus. UV-härtende Lacksysteme und Druckfarben werden aufgrund der extrem kurzen Aushärtezeiten und der substratschonenden Vernetzung bei sehr guter mechanischer und chemischer Beständigkeit schon seit langem in der Verpackungsindustrie und für Konsumgüter eingesetzt. Mittlerweile finden sich auch im Automobilbau immer mehr Serienanwendungen für Interieur Bauteile, die zum Teil geringere Anforderungen an Feuchte- und UV-Beständigkeit haben als Exterieur Bauteile.
Grundsätzlich werden sog. Mono-Cure und Dual-Cure Systeme unterschieden. Mono-Cure UV-Lacksysteme sind lösemittelfreie 100%-Systeme, die ausschließlich durch UV-Strahlung vernetzen. Das bedeutet, dass ein nicht vollständig vernetzter Lack ohne zusätzliche Strahlendosis nicht mehr nachvernetzt. Dual-Cure Systeme beinhalten dagegen zusätzlich einen Härteranteil, der es ermöglicht, den Lack über UV-Strahlung und thermisch zu trocknen. Der Vorteil der Mono-Cure Systeme liegt in der sekundenschnellen Vernetzung und geringen Aufheizung des Substrats. Die Lacke sind zudem besonders kratzbeständig, haben einen hohen Glanzgrad und eine hohe Transparenz. Dual-Cure-Systeme werden hauptsächlich für thermostabile Bauteile mit komplexen Geometrien eingesetzt, bei denen nicht sichergestellt werden kann, dass an jeder Stelle eine ausreichende Strahlendosis erreicht wird. [123 bis 125]

Üblicherweise liegt bei der Potentialbetrachtung von UV-härtenden Lacksystemen im Automobilbau der Schwerpunkt auf dem geringeren Flächen- und Energiebedarf und der kurzen Aushärtezeit bei einem substratschonenden Prozess. Für CFK Anwendungen liegt das Potential von UV-härtenden Lacksystemen jedoch zusätzlich in der Möglichkeit aus Bauteilen mit starker Faserdurchzeichnung glatte Oberflächen in Class-A Qualität zu erzeugen. Damit

könnten Prozessgrenzen im Nasspressverfahren für Class-A CFK Bauteile neu definiert und das Prozessfenster vollständig auf eine minimale Aushärtezeit ausgelegt werden. Das Potential der Zykluszeitreduktion ist dabei groß. Mit Epoxidharzsystemen wie dem Dow Voraforce 5300 Harzsystem ist bei einer Prozesstemperatur von 130°C und dem Einhalten der Spezifikation von T_g > 111°C eine Aushärtezeit von bis zu 187s möglich, was für Strukturbauteile ohne Class-A Anforderungen bereits dem Stand der Technik entspricht. Somit ist theoretisch auch eine Vergrößerung der Produktionsvolumen auf ca. 60-100.000 Einheiten im Jahr möglich, was das Einsatzspektrum und die Verfügbarkeitsbreite von großflächigen Class-A CFK Karosseriebauteilen deutlich erhöht. (Abb. 62)

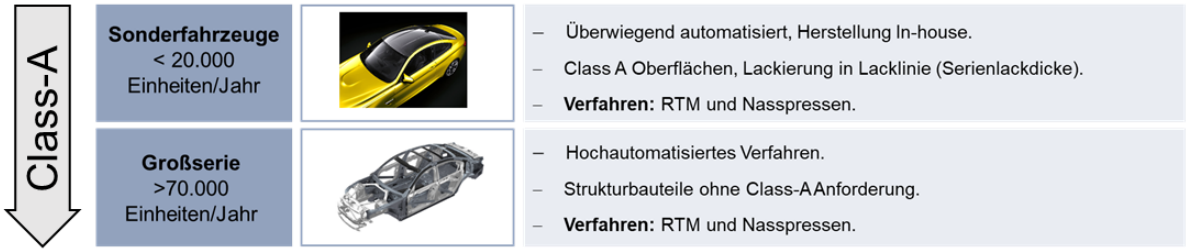


Abb. 62 Potentielle Verschiebung der möglichen Produktionsvolumen durch den Einsatz von UV-härtenden Lacksystemen für Class-A CFK Karosseriebauteile [3].

Versuchsaufbau

Da es sich bei CFK-Dächern um Bauteile geringer geometrischer Komplexität handelt und das Ziel im Vermeiden der Substrataufheizung bei der Lackvernetzung liegt, wird der Fokus auf die rein UV-härtenden Mono-Cure Systeme gelegt. Um das Potential der kalthärtenden UV-Lacksysteme zu ermitteln, werden die CFK-Bauteile bei der für Strukturbauteile üblichen Prozesstemperatur von 130°C im Nasspressverfahren hergestellt. Der Lagenaufbau und das Harzsystem entsprechen dabei den bisherigen Versuchen. Als Sichtlage wird die NP_A_3k Gewebesichtlage verwendet, um eine möglichst stark ausgeprägte Faserdurchzeichnung zu erzeugen. Die Presszeit wird auf 482,5s festgelegt, um eine Vergleichbarkeit zu den bisherigen Versuchen zu ermöglichen. Ein Teil der CFK-Bauteile wird anschließend mit dem in Kap 4.3 beschriebenen Serienlackverfahren für CFK-Dächer mit einem Primer und 2K PUR Klarlacksystem der Fa. Wörwag beschichtet und thermisch getrocknet. Der andere Teil wird mit einem UV-härtenden Mono-Cure Primer und Mono-Cure Klarlack der Fa. Berlac AG mit denselben Schichtdicken (gesamt 140 µm) lackiert. Als Referenz werden bei 105°C hergestellte CFK Rohbauteile, die den Class-A Grenzwert von Sa < 0,15 µm erfüllen mit dem konventionellen thermisch härtenden Lackprozess veredelt. Die so erzeugten Bauteile werden mittels Weißlicht Profilometer WLP vermessen und nach PPT-Filterung die Sa-Werte und der visuelle Eindruck verglichen. Die Tab. 13 fasst den Versuchsaufbau zusammen.

Bauteile	$T_{Werkzeug}$ [°C]	Prozesszeit [s]	Lackaufbau	Trocknerbedingungen
NP_A_3k_105_PUR	105	511	Primer +2K PUR	25 + 50 Min bei 90°C
NP_A_3k_130_PUR	130	482,5	Primer +2K PUR	25 + 50 Min bei 90°C
NP_A_3k_130_UV_Mono	130	482,5	Berlac UV Mono	UV-Härtung bei 23°C

Tab. 13 Versuchsaufbau Vergleich konventionelles 2K PUR Klarlacksystem zu UV-härtendem Mono-Cure Lacksystem.

Ergebnisse

Die CFK-Bauteile wurden vor und nach dem Lackieren per Weißlicht Profilometer WLP vermessen. Die ermittelte Oberflächentopografie wird mit der PPT-Filtereinstellung (S=1500µm, L=2,5mm) gefiltert und der Sa-Wert nach DIN 25178 ermittelt. Die Abb. 63 zeigt den visuellen Vergleich und die 3D-Topografie mit korrespondierenden Sa-Werten. Die bei 105°C hergestellten Referenzbauteile NP_A_3k_105_PUR mit konventionellem Lackaufbau erfüllen sowohl vor als auch nach dem Lackieren die in Kap. 5.2.3 gesetzten Class-A Grenzwerte. Die Faserdurchzeichnung ist nur sehr schwach ausgeprägt und wird im verbauten Zustand nicht als störend wahrgenommen.

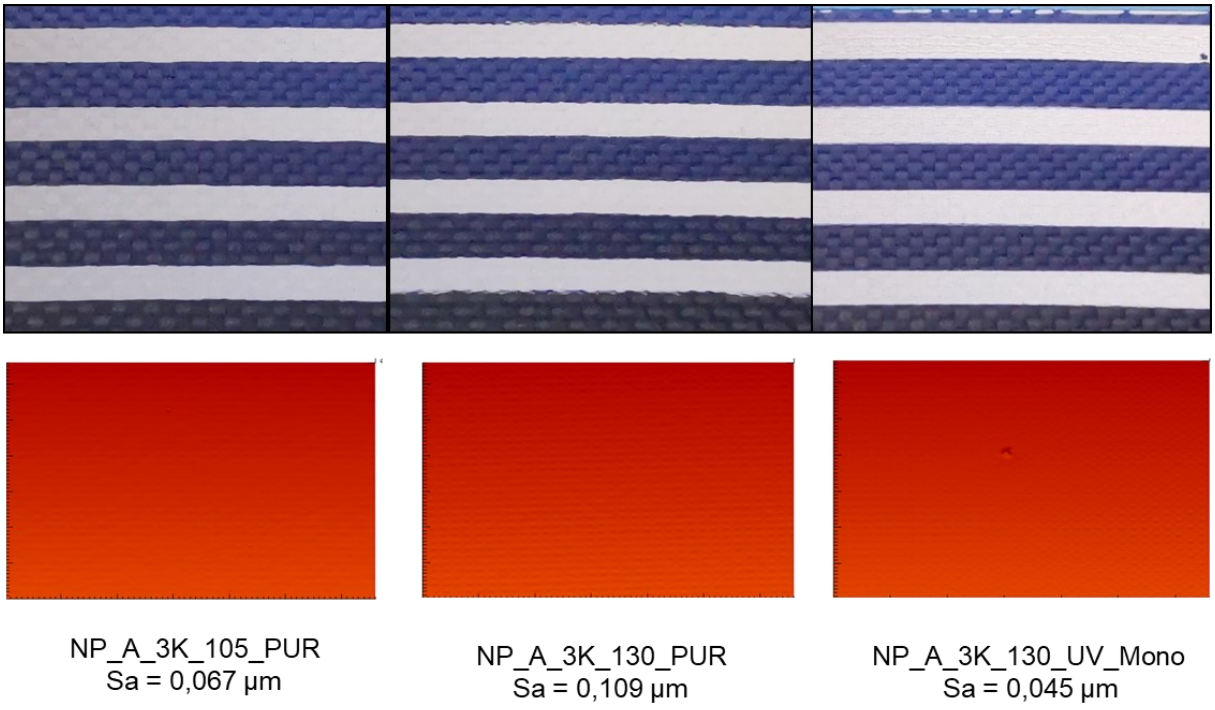


Abb. 63 Vergleich zwischen NP_A_3k_105 (links), NP_A_3k_130_PUR (Mitte) und NP_A_3k_130_UV_Mono (rechts). Oben jeweils als Realbild im Lichttunnel, unten die PPT-gefilterten 3D-Oberflächentopografiedaten mit Sa-Wert.

Bei den konventionell lackierten NP_A_3k_130_PUR Bauteilen ist die aufgrund der um 25°C höheren Prozesstemperatur stärkere Faserdurchzeichnung der Rohbauteile auch nach dem Lackieren sichtbar. Dagegen haben die mit UV-härtendem Lack beschichteten Bauteile NP_A_3k_130_UV_Mono die glatteste Oberfläche. Das Lichtmuster wird annähernd perfekt gespiegelt und es ist keine Faserdurchzeichnung erkennbar, obwohl die unter dem Lack liegenden Substrate ebenfalls bei 130°C hergestellt wurden. Auch die 3D-Topografie-darstellung bestätigt den visuellen Eindruck.

Zudem wurde beobachtet, dass bei Rohteilen, die bei 130°C hergestellt wurden, nach dem automatisierten Rohteilschliff mehr Lackkrater durch aufgeschliffene oberflächennahe Poren entstehen als bei 105°C. Aufgrund der rauen Oberfläche nach dem Schliff, sind die aufgeschliffenen Poren zumeist erst nach der Lackierung anhand von Lackkratern sichtbar. Es ist davon auszugehen, dass dieses Phänomen spezifisch für das Nasspressverfahren ist und beim RTM-Verfahren aufgrund der flutenden Kavitätsfüllung weniger häufig vorkommt. Im Nasspressen wird die Luft hingegen aus der Bauteilfläche an den Rand herausgepresst. Hierfür ist ein spezifisches Viskositätsfenster notwendig, bei dem die Luft weder umflossen noch eingesperrt, sondern herausgespült wird. Mit steigender Prozesstemperatur härtet das Harzsystem jedoch schneller aus, wodurch sich das Viskositätsfenster drastisch verkleinert. Dadurch steigt auch die Wahrscheinlichkeit, nicht die komplette Luft aus der Bauteilfläche zu verdrängen. [3, 12] Da die Poren/Lufteinschlüsse im ungeschliffenen Rohbauteil jedoch nicht sichtbar sind, ist davon auszugehen, dass sie unter einem dünnen Harzfilm im Bauteil eingeschlossen sind. Erst durch den Schliff werden die Poren offengelegt, was im lackierten Zustand zu Lackkratern führen kann. Dieser Zustand kann jedoch über die Prozessführung (Pressenprofil, Harzauftrag, Infiltrationszeit) optimiert werden. Für die Betrachtung der Faserdurchzeichnung ist dieser Oberflächenfehler dabei nicht relevant, da der überwiegende Teil der Bauteiloberflächen porenfrei war und damit ohne Einschränkungen ausgewertet werden konnte.

Die Referenzbauteile NP_A_3k_105 unterbieten mit Sa = 0,067 µm den Class-A Grenzwert von 0,08 µm. Bei der stark vergrößerten Darstellung ist eine sehr leichte Faserdurchzeichnung erkennbar, die jedoch im verbauten Zustand nicht als störend wahrgenommen wird. Die bei 130°C hergestellten und konventionell lackierten Bauteile NP_A_3k_130_PUR haben sowohl im Realbild als auch bei der 3D-Topografiedarstellung eine sichtbare Faserdurchzeichnung. Mit Sa = 0,109 µm wird der Class-A Grenzwert um 36,3 % überschritten. Die Faserdurchzeichnung wird im verbauten Zustand als störend empfunden, weshalb die Bauteile keine Class-A Qualität erreichen. Die glatteste Oberfläche im Vergleich haben die UV-lackierten NP_A_3k_130_UV_Mono Bauteile mit einem Sa-Wert von 0,045 µm, wobei der Class-A Grenzwert um 43,8 % unterschritten wird. Die Abb. 64 fasst die Ergebnisse der WLP

Messungen der lackierten und unlackierten CFK Bauteile zusammen und stellt sie den definierten Sa-Werten gegenüber.

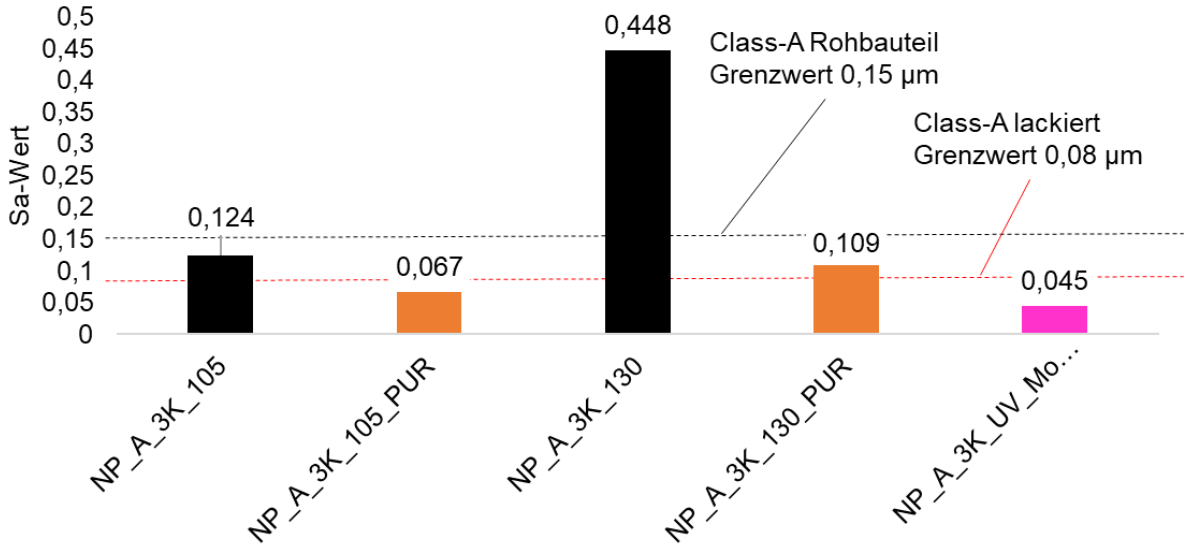


Abb. 64 Vergleich der Rohteilzustände bei 105°C und 130°C Werkzeugtemperatur und der erreichbaren Oberfläche mit thermisch härtendem 2K PUR Lacksystem und UV-härtendem Mono-Cure Lacksystem.

Somit wird der Ansatz bestätigt, dass mit einem kalthärtenden Lacksystem auch aus Bauteilen mit sehr starker Faserdurchzeichnung Class-A Oberflächen ohne zusätzliche Prozessschritte oder dickere Lackschichten erzeugt werden können. Durch die nachträgliche Beschichtung mit einem UV-härtenden Mono-Cure Lacksystem (Schichtdicke 140 µm) ist es möglich, Class-A CFK Bauteile mit dem DOW Voraforce 5300 Harzsystem bei einer Werkzeugtemperatur von 130°C im Nasspressverfahren herzustellen. Die Sa-Werte werden von 0,45-0,5 µm im Rohteil auf 0,045 µm im lackierten Zustand verringert. (Tab.14)

	NP_A_3k_PUR_105	NP_A_3k_UV_Mono_130
Werkzeugtemperatur [°C]	105	130
Aushärtegrad	0,964	0,964
Glasübergangstemperatur [°C]	111	111
Sa-Wert Rohbauteil [µm]	0,12-0,14	0,45-0,50
Presszeit [s]	511	187
Lacksystem	2K PUR	UV Mono-Cure
Trocknungsbedingungen	25 + 50 Min bei 90°C	< 60s bei 23°C
Sa-Wert lackiert [µm]	0,067	0,045
Max. Bauteile / Stunde	7	19
Max. Bauteile pro 7h Schicht	**49**	**133**

Tab. 14 Ermittlung der potenziellen Produktivitätssteigerung (Output) durch den Einsatz von UV-härtenden Mono-Cure Lacksystemen für Class-A CFK Bauteile.

Durch das deutliche Unterschreiten des Class-A Grenzwerts von 0,08 µm, kann für das Potential der Produktivitätssteigerung eine kürzere Aushärtezeit gewählt werden, bei der die Mindestanforderung von T_g > 111°C erfüllt wird. Für eine Werkzeugtemperatur von 130°C erreicht die EP-Matrix nach dem Kinetikmodell eine T_g von 111°C bei einem Aushärtegrad von 0,964 nach 187s. Durch das Ermöglichen von höheren Prozesstemperaturen kann die benötigte Aushärtezeit bei 130°C von 511 s auf bis zu 187 s verringert werden. Pro Stunde können in Bezug auf die reine Aushärtezeit somit 19 Bauteile hergestellt werden, was einer Steigerung um 171 % im Vergleich zum Referenzprozess mit sieben Bauteilen pro Stunde entspricht. Somit könnten je 7h Schicht bis zu 133 Class-A CFK Bauteile in einem Werkzeug gefertigt werden. Theoretisch sind je nach Schichtmodell so Stückzahlen von 60-100.000 Einheiten im Jahr möglich, was bisher nur für Strukturbauteile ohne Class-A Anforderung der Fall war.

6.6. Fazit

In Kap. 6 wurde untersucht, inwieweit es über eine prozesskettenbegleitende Quantifizierung der Oberflächentopografie von Class-A CFK Bauteilen möglich ist, material- und prozesstechnische Kenngrößen zu identifizieren, die eine Produktivitätssteigerung bei gleichbleibender Oberflächenqualität erlauben. Dabei kann mit der in Kap. 5.2 entwickelten Prüfmethodik die Oberflächentopografie ausgehend von einer simulativ erzeugten Oberfläche über das textile Halbzeug, das Rohbauteil bis zum lackierten Endbauteil mit demselben Kennwert (Sa-Wert, siehe Kap. 2.6.3) ausgewertet werden.

Einfluss des Öffnungsfaktors auf die Produktivität

Als technische Kenngröße wurde im ersten Schritt der Öffnungsfaktor der 3k Leinwandgewebe-Sichtlage ausgewählt und dessen Auswirkung auf eine mögliche Zykluszeitreduzierung im Nasspressprozess betrachtet. Der Öffnungsfaktor ist ein gängiges und spezifiziertes Qualitätsmerkmal für CF-Leinwandgewebe. Er beschreibt bei der Draufsicht auf das Textil das Verhältnis aus fadenfreier (offener) Fläche zu der mit Kett- und Schussfaden belegten Fläche in Prozent. Bei der numerischen Betrachtung wurden als textile Haupteinflussgrößen auf den Öffnungsfaktor die Fadendichte (Anzahl Fäden bzw. Rovings pro cm) und der RAR (Roving Aspect Ratio bzw. Höhe zu Breite Verhältnis) identifiziert. Im Gegensatz zum RAR, der nur die Breite und Höhe ansonsten gleicher Rovings beschreibt, hat die Fadendichte einen direkten Einfluss auf das Flächengewicht. Daher ist die Fadendichte von 3k CF-Leinwandgeweben für Class-A Anwendungen mit 5,0 +/- 0,2 Fäden/cm spezifiziert, um ein Flächengewicht von 200 +/- 10 g/m² zu erreichen. Somit ist bei gleichbleibendem Flächengewicht der Hauptstellhebel für den Öffnungsfaktor die Veränderung der Rovingbreite über den RAR. Bereits bei der numerischen Betrachtung wurde gezeigt, dass mit sinkendem RAR auch der Öffnungsfaktor abfällt. Für die in CF-Leinwandgeweben eingesetzten 3k Rovings mit einer üblichen Breite zwischen 1,6-2,0 mm ergeben sich so RAR Werte von 1,0 - 0,6 und daraus resultierend Öffnungsfaktoren von 0-4 %. Weiterhin wurde ermittelt, dass ein steigender Öffnungsfaktor zu einer Erhöhung des Sa-Wertes führt, was einer stärker werdenden Ausprägung der Faserdurchzeichnung (PPT-Effekt) entspricht.

Zur Validierung der numerisch erzeugten Erkenntnisse wurden zwei freiverkäufliche 3k CF-Leinwandgewebe, die die geforderten Class-A Spezifikationen erfüllen, vermessen und der Öffnungsfaktor über die in Kap. 4.2 beschriebene Formel ermittelt. Für die Variante NP_A_3k wurde eine Öffnungsfaktor von 3,2 %, für die Variante NP_B_3k ein Öffnungsfaktor von 0,5 % bestimmt. Dabei wurde beobachtet, dass trotz derselben Ausgangsbreite der Rovings die Schussfäden bei beiden Varianten aufgrund der geringeren Fadenspannung breiter sind als die Kettfäden. Dies führt zu einem unterschiedlichen RAR von Kette und Schuss. Somit ist

auch die Wellenlänge der erwarteten Faserdurchzeichnung richtungsabhängig. Diese Begebenheit bestätigt den Vorteil der in dieser Arbeit verwendeten flächenbezogenen Auswertemethodik nach DIN EN ISO 25178-2 mit dem Kennwert Sa im Vergleich zu der sonst üblichen Profillinienauswertung nach DIN EN ISO 4287. Aufgrund der flächenbezogenen Kennwerte und der an die Sichtlage angepassten Wellenlängenfilterung (S=1500µm, L=2,5mm) wird eine bessere Korrelation zu der optischen Wahrnehmung erreicht. Das Vermessen der beiden Leinwandgewebevarianten mittels Lasertriangulation bestätigt die Simulationsergebnisse. Mit einem Sa-Wert von 4,10 µm hat die Variante NP_B_3k (ÖF 0,5 %) eine um 18 % geringere Oberflächenwelligkeit als die Variante NP_A_3k (ÖF 3,2 %) mit Sa = 5,01 µm. Das aufgrund breiterer Rovings enger gewobene NP_B_3k Leinwandgewebe hat somit eine glattere Oberfläche als das Leinwandgewebe NP_A_3k mit größerem Öffnungsfaktor.

Um den Einfluss auf die resultierende Ausprägung der Faserdurchzeichnung (PPT-Effekt) im CFK-Bauteil und das mögliche Potential einer Aushärtezeitreduzierung zu ermitteln, wurden aus den vermessenen textilen Halbzeugen mit ansonsten gleichem Lagenaufbau im Nasspressverfahren (Kap. 5.1.1) CFK Bauteile bei Prozesstemperaturen zwischen 105-130°C hergestellt. Die ausgefrästen Messflächen der CFK Bauteile wurden mit einem Weißlicht Profilometer vermessen und die PPT-Ausprägung über Sa-Werte ermittelt. Mit der glatteren NP_B_3k Sichtlage können aufgrund des geringeren Öffnungsfaktors Class-A fähige CFK Rohbauteile (Sa < 0,15 µm, siehe Kap. 5.2.3) bei einer um 124s kürzeren Zykluszeit gefertigt werden als mit der NP_A_3k Sichtlage. Die Oberflächenqualität ist dabei bezüglich der Faserdurchzeichnung vergleichbar, da die für die Zykluszeitverkürzung notwendige Temperaturerhöhung durch das glattere Textil ausgeglichen wird und somit ebenfalls ein Sa-Wert von 0,14 µm erreicht wird. Die höhere Prozesstemperatur der NP_B_3k Bauteile ermöglicht dabei eine Einsparung der Aushärtezeit von 24,3 %. Das bedeutet, dass in einer 7h Schicht mit dem NP_B_3k Lagenaufbau theoretisch bis zu 63 anstatt 49 CFK-Dach Rohbauteile produziert werden können, was einer Erhöhung der Produktivität (Output) um 28,6 % entspricht.

Damit wurde gezeigt, dass die Produktivität nur durch das Anpassen einer bisher wenig beachteten Textilkenngröße, nämlich dem Öffnungsfaktor, innerhalb der bereits bestehenden Spezifikationstoleranzen gesteigert werden kann. Dabei kann der Öffnungsfaktor zum einen über den RAR und zum anderen durch die Fadendichte angepasst werden. Es handelt sich somit um Prozessparameter der Textilherstellung, die auch bei der Herstellung der NP_A_3k Sichtlage oder Geweben eines beliebigen Textilherstellers optimiert werden könnten.

Zudem konnte mit der Auswertemethodik die Veränderung des thermischen Ausdehnungsverhaltens bei Prozesstemperaturen oberhalb der Glasübergangstemperatur T_g der Matrix nachgewiesen werden. Dabei wurde festgestellt, dass sich der thermische

Ausdehnungskoeffizient der Matrix bei Überschreiten der T_g um bis zu Faktor drei erhöht, was zu einem überproportionalen Anstieg der Sa-Werte im fertigen CFK-Bauteil führt. Daraus wurde die Prozessgrenze von $T_g \geqq T_{Werkzeug}$ für Class-A CFK Bauteile abgeleitet. Aus den gesetzten Prämissen $T_g \geqq T_{Werkzeug}$ und T_g >111°C (Spezifikation) ergibt sich mit dem eingesetzten Dow Voraforce 5300 Harzsystem ein stabiles Prozessfenster, in dem auch bei einer Werkzeugabkühlung auf bis zu 110°C, CFK-Dächer (Rohbauteile) hergestellt werden können, die ohne Absenken der Produktivität sowohl alle mechanischen als auch optischen Class-A Anforderungen erfüllen.

Ausgleich des PPT-Effekts durch kalthärtende Beschichtungen

In Kap. 6.5 wurde untersucht, inwieweit es möglich ist Rohbauteile, die die Class-A Grenzwerte für Faserdurchzeichnungen überschreiten, durch eine nachträgliche Beschichtung zu Class-A Bauteilen zu veredeln. Dabei sollte der Effekt der Matrixausdehnung bei der thermischen Lacktrocknung durch ein kalthärtendes Lacksystem umgangen werden. Während der thermischen Lacktrocknung dehnt sich die Matrix wieder aus, was zu einer Aushärtung des Lackes auf einer glatteren Oberfläche führt. Bei der Abkühlung zieht sich die Matrix wieder zusammen und die dünne Lackschicht wird in die Vertiefungen der Faserdurchzeichnung gezogen. Die Faserdurchzeichnung wird durch die Schichtdickenerhöhung zwar abgemildert, jedoch nicht ausgeglichen. Ziel war es deshalb durch den Einsatz eines UV-härtenden Lacks den bei der Filmbildung im Nasszustand glatten Oberflächenzustand einzufrieren. Da das Substrat bei der Lacktrocknung nicht erhitzt wird, verändert sich die Oberflächenglätte nach der Aushärtung nicht mehr. Das lackierte Bauteil erfüllt trotz „schlechtem“ Rohbauteil die Class-A Anforderungen.

Um das Potential für die betrachtete Prozesskette zu untersuchen, wurden im Nasspressverfahren CFK Bauteile mit dem NP_A_3k Lagenaufbau bei 130°C hergestellt. Die Rohteile überschreiten den Class-A Grenzwert mit Sa = 0,45 µm deutlich. Ein Teil der Bauteile wird in einer Serienlackieranlage für Class-A CFK-Dächer mit einer Schichtdicke von 140 µm lackiert und thermisch ausgehärtet. Der andere Teil wird mit dem UV-härtenden Lacksystem mit derselben Schichtdicke beschichtet und bei Raumtemperatur vernetzt. Die konventionell lackierten Bauteile erfüllen dabei nicht die Class-A Anforderungen, weil sich die Faserdurchzeichnung durch den Lack durchschlägt und der Grenzwert von Sa < 0,08 µm mit einem Sa-Wert von 0,11 µm überschritten wird. Die Bauteile mit UV-härtendem Lack unterschreiten mit einem Sa-Wert von 0,045 µm hingegen den Class-A Grenzwert von 0,08 µm deutlich. Somit erfüllen die Bauteile die optischen Class-A Anforderungen. Das Potential der Produktivitätssteigerung durch eine kürzere Aushärtezeit ist dabei sehr groß. Für eine Werkzeugtemperatur von 130°C erreicht die DOW Voraforce 5300 EP-Matrix eine T_g von 111°C bei einem Aushärtegrad von 0,964 nach 187s. Pro Stunde können somit, ausgehend

von der theoretisch kürzeren Aushärtezeit, 19 Bauteile hergestellt werden, was einer Steigerung um bis zu 171 % im Vergleich zum Referenzprozess entspricht. Somit können je 7h Schicht 133 Class-A CFK Bauteile in einem Werkzeug gefertigt werden. Je nach Schichtmodell können so Stückzahlen von 60-100.000 Einheiten im Jahr erreicht werden, was bisher nur für Strukturbauteile ohne Class-A Anforderung möglich war. Das Potential ist damit sehr groß. Es bleiben jedoch noch technische Herausforderungen, die für einen tatsächlichen Serieneinsatz abgesichert werden müssen. Aktuell erfüllen UV-härtende Lacksystem nur im Interieur die Anforderungen der Automobilindustrie. Der Hauptgrund hierfür ist die Anforderung an die Lackierung, die Epoxidharzmatrix durch einen UV-Blocker zu schützen und dabei trotzdem durch UV-Strahlung zu vernetzen. Hierfür ist es notwendig die kritischen Wellenlängen für die Photooxidation der EP-Matrix zu ermitteln und den Lack so einzustellen, dass er bei einem anderen Wellenlängenspektrum aushärtet. Somit würden Lichtschutzadditive den lichtinduzierten Aushärteprozess nicht behindern. Zudem ist für ein UV-härtendes Lacksystem eine andere Struktur der Lacklinie notwendig, weshalb eine Umsetzung vor allem beim Bau einer neuen Lacklinie betriebswirtschaftlich sinnvoll wäre. Ausgehend von den Ergebnissen dieser Arbeit wird dieser Ansatz für Class-A CFK-Dächer weiterverfolgt.

7. Prozesskettenverkürzung durch trennmittelfreie Bauteile

7.1. Motivation Entfall der Lack- und Klebevorbehandlung

Neben der Optimierung der Material- und Prozessparameter der bestehenden Prozesskette ist eine weitere Möglichkeit zur Herstellkostenreduktion von Class-A CFK Bauteilen der Entfall von Nacharbeits- und Veredelungsumfängen. Mit 35% stellt die Oberflächenveredelung einen erheblichen Anteil der Gesamtherstellkosten eines im Nasspressverfahren produzierten Class-A CFK-Dachs dar. Die Veredelungskosten können dabei in Materialkosten (Haftvermittler und Klarlack) und Fertigungskosten (Lack- und Klebevorbehandlung, Lackierung, Endkontrolle) aufgeteilt werden. Die Kosten teilen sich wie folgt auf (Tab. 15):

Kostenart	**Fertigungsschritt**	**Beschreibung**	**Kostenanteil Lack**
Fertigungskosten FK	Lackvorbehandlung	Oberflächenschliff Schliff Klebeflansche Reinigung	21%
Materialkosten MK	Lackierung	Primer, Lack	18%
Fertigungskosten FK	Lackierung	Autom. Lackierung	61%

Tab. 15 Verteilung der Veredelungskosten für ein Class-A CFK Dach in Sichtoptik.

Bei der Oberflächenveredelung von Class-A CFK Bauteilen wird nicht nur die Oberflächenanmutung durch eine Lackierung verbessert. Für die automatisierte Lackierung müssen zunächst Oberflächenverunreinigungen wie Trennmittel und andere Kontaminationen in einem Vorbehandlungsprozess entfernt werden. Hierfür wird die Bauteiloberfläche geschliffen. Bei ebenen Flächen ist dies automatisiert möglich. Für anspruchsvollere Geometrien wie Designkanten und enge Radien am Bauteilrand muss jedoch manuell geschliffen werden. Auch die Klebeflansche auf der Bauteilrückseite werden manuell geschliffen. Die Haltbarkeit nach der abrasiven Vorbehandlung beträgt dabei 30 Tage. Dies führt dazu, dass 21 % der Veredelungskosten auf die Vorbehandlung entfallen. Die restlichen Kosten teilen sich in 18 % für das Lackmaterial und 61 % für die Lackfertigungskosten auf.

Im Gegensatz zu einer manuellen Lackierung, bei der das Bauteil bewusst abwechselnd beschichtet und geschliffen wird, wird die Oberfläche beim Rohteilschliff für CFK-Dächer nicht signifikant geglättet. Tatsächlich erhöht das Schleifen das Risiko oberflächennahe Poren zu öffnen und Fasern freizulegen. Nachteilig ist, dass beide Merkmale auf der geschliffenen Oberfläche nicht erkennbar sind und erst nach der Lackierung als Krater und Stippen sichtbar werden. Etwa 90 % der Zweitläufer (Zweitläuferquote ca. 10 %) werden dabei von aufgeschliffenen Poren verursacht. Wie in Kap. 6.5 aufgezeigt, erhöht sich dabei das Risiko

oberflächennaher Poren durch eine Erhöhung der Werkzeugtemperatur, um die Aushärtezeit im Nasspressprozess zu verkürzen. Bis zu einem gewissen Grad können die Oberflächenfehler nachgearbeitet werden, es entstehen dabei jedoch erhebliche Mehrkosten, da die Fehlstellen manuell repariert werden müssen. Nach der Reparatur werden die Bauteile erneut angeschliffen und automatisiert lackiert, was die Lackierkosten verdoppelt. Daher muss bei jedem fehlerhaften Bauteil abgewogen werden, ob der Aufwand der Nacharbeit wirtschaftlich ist.

Prozesstechnisch lässt sich die Auftrittswahrscheinlichkeit von oberflächennahen Poren durchaus vermeiden. Dabei wird das Bauteil bei geringeren Prozesstemperaturen gefertigt, was zu einem langsameren Viskositätsanstieg des Harzsystems bei der Aushärtung führt. Durch das größere Viskositätsfenster steht bei einer angepassten Pressenbewegung mehr Zeit für das Verdrängen von Luft zur Verfügung. Die Wahrscheinlichkeit von eingeschlossenen Poren sinkt dabei und die Zweitlackquote bzw. der Ausschuss aufgrund aufgeschliffener Poren wird reduziert. Dem gegenüber steht eine deutliche Taktzeiterhöhung aufgrund der langsameren Aushärtung des Harzsystems bei geringeren Prozesstemperaturen. Das erhöht die Produktionskosten und verringert die ausbringbare Stückzahl.

Daher wäre es vorteilhaft im Nasspressverfahren hergestellte Class-A CFK Bauteile ohne vorherigen Schliff lackieren und verkleben zu können. Hierfür muss jedoch das für die Entformung benötigte Trennmittel entfallen und die Bauteile bis zur Lackierung/Verklebung vor Kontaminationen geschützt werden. Dies würde zu direkt lackierbaren und verklebbaren Bauteilen führen und in der vorgestellten Prozesskette die Oberflächenveredelungskosten potentiell um 21 % senken. Zusätzlich ermöglicht ein Entfall des Rohteilschliffs eine Taktzeitverkürzung durch Erhöhung der Prozesstemperatur, da oberflächennahe Poren nicht mehr zu Fehlern im Lack führen. Somit kann das Prozessfenster des eingesetzten Harzsystems bei gleichzeitigem Einhalten von weiteren Prozessgrenzen voll ausgeschöpft werden.

Für das Ausschöpfen des Potentials ist eine ganzheitliche und interdisziplinäre Betrachtung der Prozesskette eines Class-A CFK Bauteils hilfreich Eine Möglichkeit, trennmittelfreie und direkt verklebbare / lackierbare Bauteile herzustellen, ist der prozessintegrierte Einsatz von speziellen Trennfolien. Die Folien übernehmen während dem Nasspressprozess die Funktion als Trennschicht und verbleiben nach dem Aushärten der Matrix auf dem Bauteil, wodurch sie es bis zur Lackierung/Verklebung wie eine Verpackung schützen. Dies erhöht zwar den Aufwand und damit die Kosten im Pressprozess, ermöglicht jedoch das Potential einer sonst nicht möglichen Kosteneinsparung im Lackprozess. Der Ansatz der Trennfolienintegration in den Nasspressprozess, die Absicherung und die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung werden nachfolgend beschrieben.

7.2. Prozessintegrierter Einsatz von Trennfolien in Nasspress Werkzeugen

Für die Integration von Trennfolien in den Nasspressprozess wird das in Kap. 5.1.1 beschriebene Werkzeug mit Vakuum-Kreisläufen versehen. Die Folie soll während dem Prozess als temporäre Werkzeughaut dienen. Wie in Abb. 65 schematisch dargestellt, wird der Nasspressprozess an sich nicht verändert, sondern nur um das Folientiefziehen erweitert.

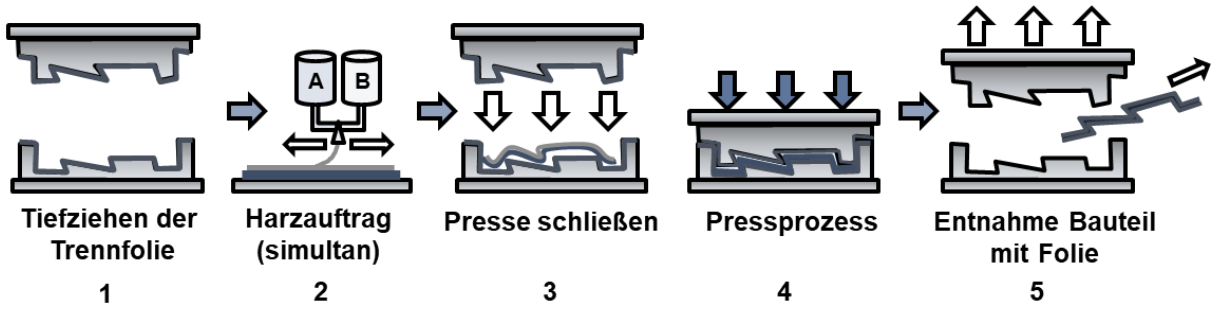


Abb. 65 Nasspressprozess mit integriertem Tiefziehen von Trennfolien. **(1)** Die Trennfolien werden in die Kavitäten des Ober- und Unterwerkzeugs tiefgezogen und werden so zur temporären Werkzeughaut. **(2)** Gleichzeitig wird das Harzsystem ohne Trennmittel auf das CF-Halbzeug appliziert. **(3)** Nach dem Harzauftrag wird das nasse Textil wie im konventionellen Nasspressprozess automatisiert in das Werkzeug eingelegt. **(4)** Das Bauteil härtet unter definiertem Druck und Temperatur aus. **(5)** Die Folie verbleibt auf dem Bauteil und dient nach der Entnahme bis zum nächsten Prozessschritt als Schutzverpackung. Grafische Darstellung nach [3, 11, 12].

Als Trennfolie wird eine plasmapolymerbeschichtete TPE-Folie (Thermoplastisches Elastomer) eingesetzt, die für Temperaturen bis ca. 200°C ausgelegt ist. Die Folie trennt das Bauteil während des gesamten Prozesszyklus mechanisch von der Werkzeugoberfläche und ist so beschichtet, dass keine Kontamination der Bauteiloberfläche verursacht wird. [126]. Die Trennfolie zeichnet sich aufgrund ihrer Bruchdehnung von >380 % [127] durch eine hervorragende Tiefziehfähigkeit aus, was auch den Einsatz bei Geometrien höherer Komplexität ermöglicht. Die Verwendung vergleichbarer Trennfolien für Faserverbundbauteile im Flugzeugbau und für Windkrafträder wird bereits 2012 in einem Patent der Fraunhofer Gesellschaft beschrieben. [128] Zudem hat das Fraunhofer Institut IFAM im Rahmen der Fachmesse JEC 2018 in Paris ein Konzept vorgestellt, bei dem Trennfolien für die Produktion trennmittelfreier CFK-Bauteile in einem Prepreg-Heizpressverfahren eingesetzt werden. Die Bauteile haben dabei eine einfache Geometrie. Die Trennfolien ersetzen die normal eingesetzte Schutzfolie der Prepreg-Halbzeuge, weshalb die Folien nicht vorher im Werkzeug tiefgezogen werden. Das Handling ist nicht automatisiert, was die Zykluszeit negativ beeinflusst. Mit dem Verfahren entstehen trennmittelfreie Bauteile, die direkt lackiert und verklebt werden können. [126] Dies zeigt das Potential von Trennfolien, die Vorbehandlungsschritte für die Lackierung von Class-A CFK Bauteilen entfallen zu lassen.

Aufgrund der hohen Preise für Prepreg-Halbzeuge muss das Prinzip der Trennfolien für die kosteneffiziente Produktion jedoch auf den Einsatz im automatisierten Nasspressverfahren übertragen werden. Die trockenen textilen Halbzeuge werden im Nasspressverfahren außerhalb der Werkzeugs beharzt, weshalb die Folien vor dem Einlegen des beharzten Stacks als temporäre Werkzeughaut tiefgezogen werden müssen. Die Abb. 66 zeigt das in Kap. 5.2.1 beschriebene Class-A Nasspress Werkzeug mit einer tiefgezogenen TPE-Trennfolie.

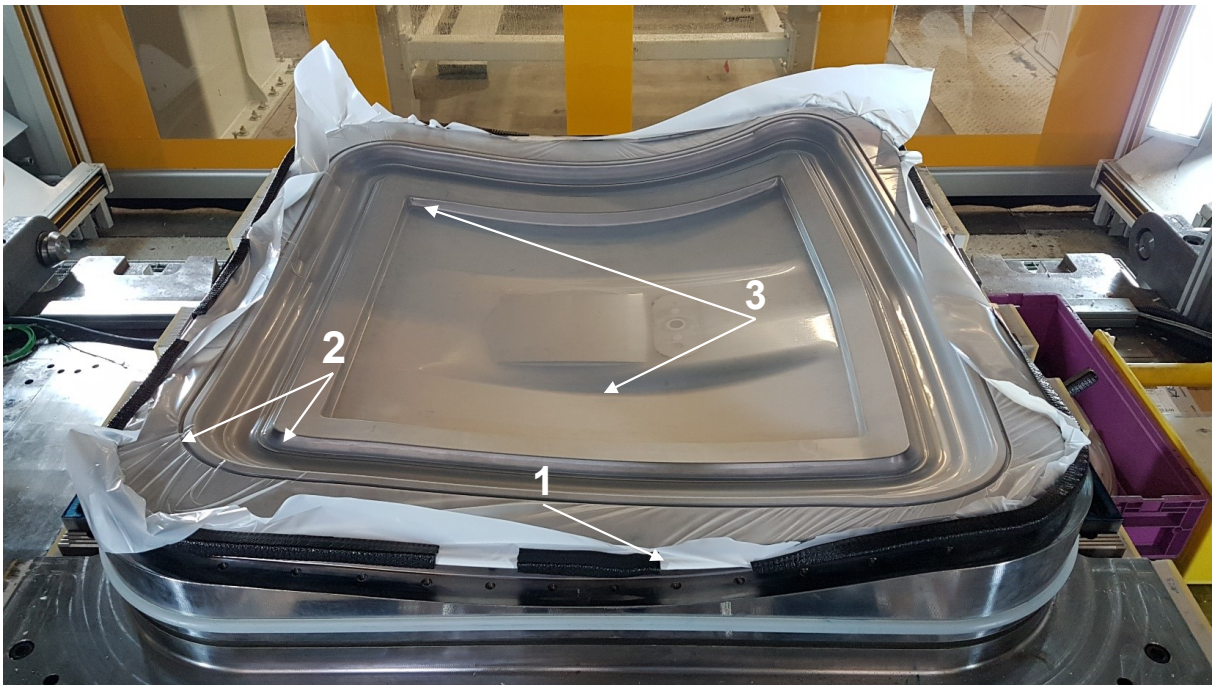


Abb. 66 Tiefgezogene TPE-Trennfolie auf Werkzeughälfte der Bauteilsichtseite. **(1)** Die Folie wird außen von einem Positionierrahmen gehalten. **(2)** Durch die Anordnung der Vakuum Bausteine dichtet die Folie sich während des Evakuierens selbstständig ab. **(3)** Dies führt zu einem vollständigen, faltenfreien Abformen der Werkzeuggeometrie. Die Folie wird zur temporären Werkzeugoberfläche bzw. Werkzeughaut.

Je Werkzeughälfte wird zunächst eine Trennfolie in eine Positionierhilfe eingespannt. Die eingespannten Folien werden manuell oder automatisiert in die Formwerkzeughälften eingelegt. Nun wird ein Vakuum angelegt und die Folien in die Kavität der jeweiligen Werkzeughälfte tiefgezogen. Hierfür hat jede Werkzeughälfte, wie in Abb. 67 dargestellt, zwei Vakuum-Kreisläufe. Kreislauf 1 (Dicht-Nut) ist für das Abdichten, Kreislauf 2 (Form-Nut) die Formgebung der Folie verantwortlich. Die an Kreislauf 2 angeschlossenen Entlüftungsbausteine in den konkaven Bauteilecken ermöglichen das vollständige Entfernen der Luft unter der Folie. Die Löcher der Entlüftungsbausteine sind so dimensioniert, dass sie nach dem Lackieren nicht mehr erkennbar sind. Zusätzlich ist die Position so gewählt, dass die leichten Abzeichnungen der Bausteinränder im eingebauten Zustand nicht sichtbar sind. Wird die Luft zwischen Folie und Werkzeug über die Vakuum-Kreisläufe abgesaugt, zieht es die Folie in die Kavität.

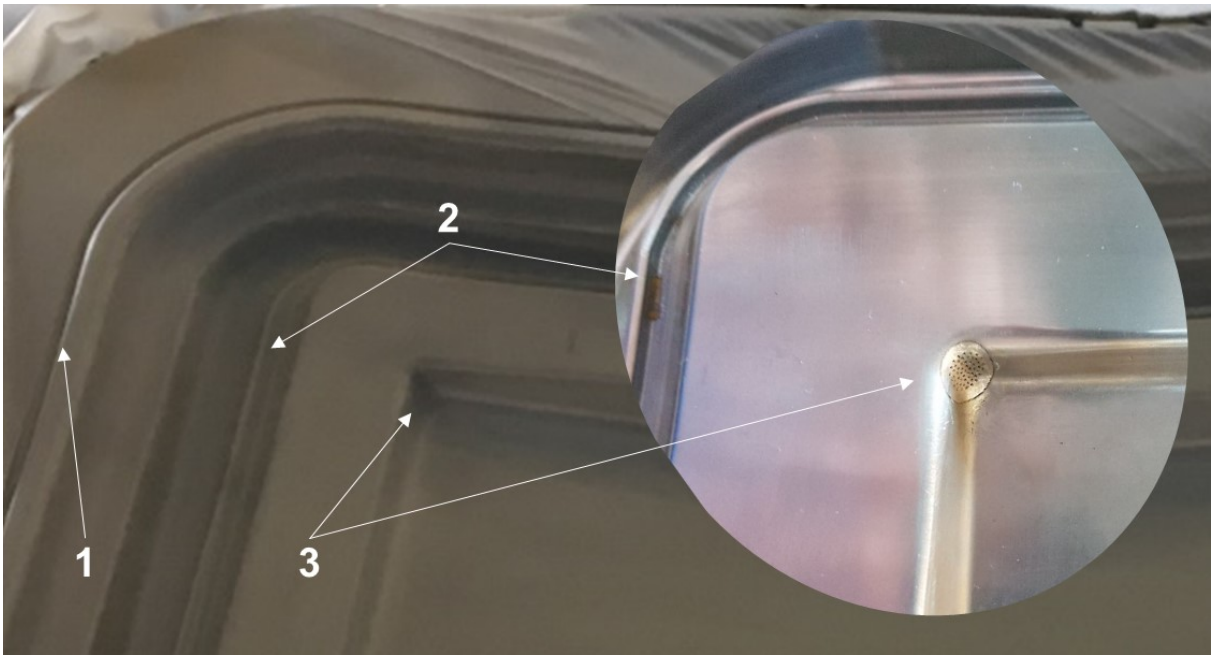


Abb. 67 (1) Vakuum-Kreislauf 1 mit Dicht-Nut. (2) Vakuum-Kreislauf 2 mit Form-Nut. Diese entzieht die Luft unter der Folie und führt dazu, dass die Folie in die Kavität tiefgezogen wird. (3) Entlüftungsbausteine in den konkaven Bauteilecken unterstützen das vollständige, faltenfreie Tiefziehen der Folie.

Da die Folie um das Werkzeug herum von der Positionierhilfe gehalten wird, gerät sie bei anliegendem Unterdruck unter Spannung. Hierdurch zieht es die Folie flächig in den äußeren Vakuum-Kreislauf (Dicht-Nut). Die Folie wird dabei so stark an die Nutkanten gedrückt, dass die Kavität abgedichtet wird. Bei weiterem Absaugen der verbleibenden Luft durch den Vakuum-Kreislauf 2 (Form-Nut und Entlüftungsbausteine) kann sich die Folie vollständig an die Werkzeugoberfläche anlegen und wird dabei zur temporären Werkzeugoberfläche. Das selbstabdichtende Dichtnutkonzept ist in dem zugehörigen Patent in [129] ausführlich beschrieben.

Sobald beide Folien vollständig in ihre jeweilige Kavität tiefgezogen wurden, kann der vorher extern beharzte Stack im konventionellen Nasspressverfahren verarbeitet werden. Die Luftabsaugung kann nach dem vollständigen Schließen der Presse abgeschaltet werden. Die 40-60 µm dünnen Folien beeinflussen den Nasspressprozess selbst dabei nicht. Für das Absaugen der Luft ist die Absaugleistung dabei von höherer Bedeutung als der erreichbare maximale Unterdruck. Abhängig von der Pumpenleistung können die Folien in wenigen Sekunden vollständig tiefgezogen werden. Durch das direkte Anliegen am Werkzeug heizt sich die Folie sofort auf und nimmt die Werkzeugtemperatur an. Nachdem das Bauteil vollständig ausgehärtet ist, verbleibt die Folie auf dem Bauteil. Über die Positionierhilfe ist eine automatisierte Entnahme möglich. Die Abb. 68 zeigt ein CFK Versuchsbauteil mit Folie auf der Sicht- und Rückseite nach der Entnahme.

Abb. 68 Trennmittelfreies Class-A CFK Bauteil mit Folie auf der Sicht- und Rückseite. Die Folie dient bis zur Lackierung (Sichtseite) bzw. Verklebung (Rückseite) als Schutzverpackung.

Da die Folie auf beiden Bauteilseiten verbleibt, dient sie bis zur Lackierung bzw. Verklebung als Schutzverpackung. Dies ermöglicht einfachere Logistikkonzepte und längere Lagerzeiten, was die Produktionsflexibilität deutlich erhöht. Sobald das Bauteil lackiert werden soll, wird die Folie in einem Stück rückstandslos von der Bauteiloberfläche abgezogen. Der Lackiervorgang kann direkt erfolgen. Das Abziehen der Folie kann manuell oder automatisiert erfolgen. Die Folie auf der Rückseite bleibt bis zur Montage am Bauteil und schützt so bis zum finalen Einbau die Klebeflansche.

7.3. Prüfung der direkten Überlackierbarkeit und Absicherung der Klebfestigkeit

Nachdem die prozesstechnische Umsetzung des Nasspressverfahrens mit Trennfolien ausführlich erläutert und beschrieben wurde, soll nun das Potential des Entfalls der Vorbehandlungsschritte bestätigt werden. Hierfür werden zunächst mit der in 5.1. beschriebenen Prozesskette trennmittelfreie CFK Bauteile bei 105°C hergestellt und dann die direkte Lackierbarkeit und die Verklebbarkeit der Bauteile geprüft. Die Kombination aus EP-Harzsystem und CF-Lagenaufbau entspricht dem der bisherigen Versuche.

7.3.1. Prüfung der direkten Lackierbarkeit

Für die Prüfung der direkten Lackierbarkeit werden Ausschnitte aus drei Bauteilen geprüft. Bauteil NP_Ref wird mit Vorbehandlung im Serienprozess lackiert. Bauteil NP_1 wird ohne Vorbehandlung direkt lackiert und Bauteil NP_2 wird ohne Vorbehandlung und ohne Haftvermittler direkt lackiert. Im Anschluss wird die Lackhaftung initial und nach 3000 Stunden Sonnensimulation (Xenontest nach SAE J 2527) geprüft. Hierfür wird das Skalpellschnitt-verfahren angewendet, das eine anforderungsoptimierte Variante der Gitterschnittprüfung darstellt. Auf dem in Klarsichtoptik lackierten CFK-Bauteil wird, wie in Abb. 69 dargestellt, mit einem Skalpell oder einem scharfen Cuttermesser ein gerader Schnitt unter einem Winkel von ca. 45° zur Bauteiloberfläche auf der x- und y-Achse durchgeführt [130].

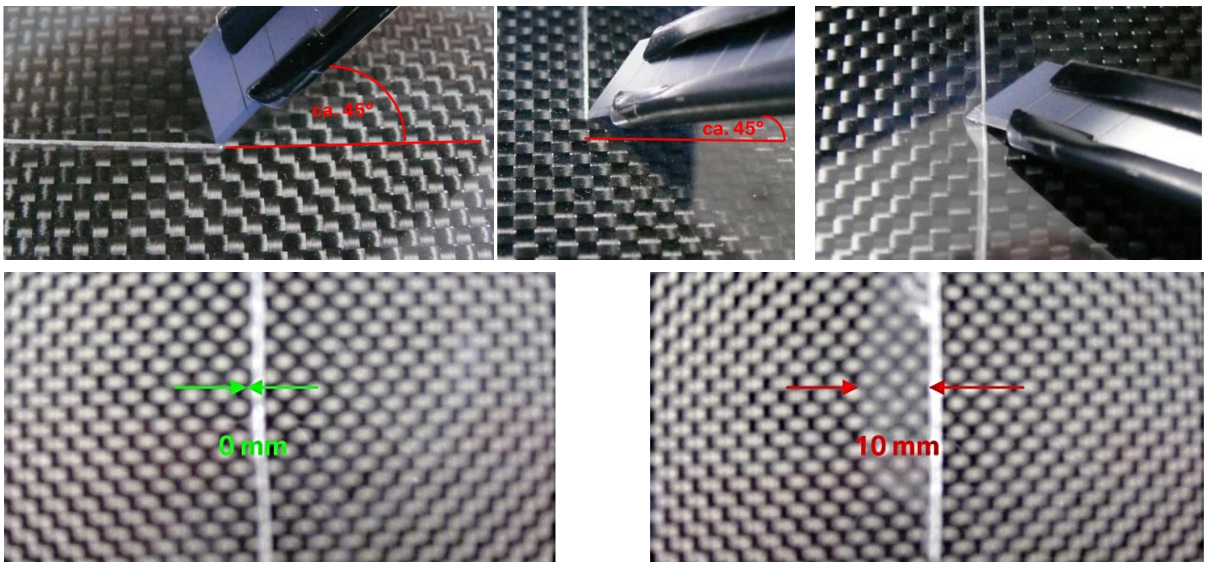


Abb. 69 Prüfablauf und Auswertung der Lackhaftungsprüfung mittels Skalpellschnittverfahren. Oben Schnittwinkel und Delaminationsversuch der Lackschicht. Unten Auswertung der Lackhaftung. Links sehr gute Lackhaftung mit 0mm Delamination, rechts mangelnde Lackhaftung mit 10 mm Delamination. Der Grenzwert liegt bei einer Delamination <1 mm. [130]

Für reproduzierbare Ergebnisse muss gewährleistet sein, dass durchgängig bis zum Substrat geschnitten wird. Anschließend wird mit der Messerspitze beginnend vom Schnitt der Lackaufbau vom Substrat in einem Zug delaminiert. Die Beurteilung der Haftung erfolgt aufgrund der Breite der erzielten Delamination in mm. Die Breite des Schrägschnitts wird dabei nicht bewertet. Bei einer guten Lackhaftung ist die Delamination <1 mm. Die Prüfung prüft dabei die Lackhaftung kritischer als die übliche Gitterschnittprüfung. [130]

Ergebnisse Lackhaftungsprüfung (initial):

Die Tab. 16 zeigt die Versuchsergebnisse der initialen Lackhaftungsprüfung mit dem Skalpellschnittverfahren.

Bauteilnummer	Vorbehandlung	Haftvermittler	Klarlack	Ergebnis Lackhaftung
NP_Ref	ja	ja	ja	0mm, i.O.
NP_1	nein	ja	ja	0mm, i.O.
NP_2	nein	nein	ja	0mm, i.O.

Tab. 16 Versuchsergebnisse der Lackhaftungsprüfung mit dem Skalpellschnittverfahren. Alle drei Varianten erfüllen die Anforderungen der Lackhaftung (0mm Ablösung).

Bei der initialen Skalpellschnittprüfung erfüllen alle drei Lackprozessvarianten mit trennmittelfreier Matrix die Anforderungen. Der Lack haftet so stark auf der Matrix, dass es nicht möglich ist, eine Delamination herbeizuführen. Folglich ist eine Lackvorbehandlung mit einem Rohteilschliff nicht notwendig, wenn das Trennmittel durch Trennfolien ersetzt wird. Die CFK-Bauteile sind nach dem Abziehen der Folie direkt lackierbar. Interessant ist, dass auch ohne Primer eine sehr gute Lackhaftung ermittelt wird. Dabei ist jedoch zu berücksichtigen, dass die Schichtdicke des Primers durch Klarlack ersetzt werden muss, um die Zielschichtdicke von 140 µm zu erreichen. Die Schichtdicke ist notwendig für einen ausreichenden Schutz der Epoxidharzmatrix des CFK Bauteils vor UV-Strahlung.

Ergebnisse Lackhaftungsprüfung nach Sonnensimulation Xenontest SAE J 2527 [131]

Erfahrungsgemäß gewährleistet eine initial gute Lackhaftung nicht direkt, dass diese über ein Fahrzeugleben haltbar sein wird. Je nach Region können variierende Witterungseinflüsse auf Fahrzeugoberflächen einwirken. Für die Haltbarkeit von lackierten CFK-Bauteilen ist dabei vor allem die Belastung durch direkte Sonnenstrahlung eine Herausforderung. Dabei kann es zu verschiedenen Alterungserscheinungen wie Vergilbung, Trübung, Faserdurchzeichnung und Lackenthaftung kommen. Zu einer Lackenthaftung kommt es dabei hauptsächlich, wenn die UV-Strahlung nicht genug durch den Lack abgeschirmt wurde und die darunterliegende

Epoxidharzmatrix zu stark belastet wird. Dabei können photooxidative Abbaureaktionen des Epoxidharzes im grenzflächennahen Bereich zu einer Enthaftung des Lackes führen. [132] Daher wird die von der Sonne ausgehende UV-Strahlenbelastung unter der Verwendung von Xenontestgeräten mit Zeitraffereffekt simuliert. Die Proben werden dabei für insgesamt 3000 Stunden belastet und anschließend erneut mit dem Skalpellschnittverfahren geprüft. Die Tab. 17 fasst die Ergebnisse der Skalpellschnittprüfung nach Xenonbewitterung zusammen.

Bauteilnummer	Vorbehandlung	Haftvermittler	Klarlack	Ergebnis Lackhaftung
NP_Ref	ja	ja	ja	0mm, i.O.
NP_1	nein	ja	ja	0mm, i.O.
NP_2	nein	nein	ja	5-10mm, n.i.O.

Tab. 17 Versuchsergebnisse der Lackhaftungsprüfung mit dem Skalpellschnittverfahren nach Xenonbewitterung. Die Varianten NP_Ref und NP_1 erfüllen die Anforderungen der Lackhaftung (0mm Ablösung). Die Variante NP_2 ohne Primer hat eine Lackenthaftung von 5-10 mm.

Nach Xenonbewitterung weisen die Varianten NP_Ref und NP_1 weiterhin eine sehr gute Lackhaftung auf. Eine Delamination der Lackschicht ist weiterhin nicht möglich. Anders ist es bei der NP_2 Variante ohne Primer. Hier ist wie in Abb. 70 (rechts) zu sehen eine deutliche Delamination von 5-10mm erkennbar.

Abb. 70 Vergleich der Lackhaftung nach Xenonbelastung. NP_Ref und NP_1 mit sehr guter Lackhaftung. NP_2 ohne Primer mit Delamination von 5-10 mm.

Der Lack haftet damit ohne Primer nicht nachhaltig auf der Epoxidharzmatrix. Da jedoch das Potential des Primerentfalls durch den Ausgleich mit einer höheren Lackschichtdicke sehr gering ist, wird diese Variante als nicht zielführend bewertet. Es wird aber bestätigt, dass durch den Einsatz von Trennfolien der bisher notwendige Rohteilschliff entfallen kann. Aufgrund des

dadurch möglichen Trennmittelentfalls erfüllen die Proben mit und ohne einer abrasiven Vorbehandlung die Class-A Anforderungen sowohl initial als auch nach Xenonbewitterung.

7.3.2. Prüfung der direkten Verklebbarkeit

Für die Prüfung der direkten Verklebbarkeit ohne Vorbehandlung werden mit dem in Kap 7.2 beschriebenen Verfahren trennmittelfreie CFK-Bauteile in zwei Kampagnen mit einem Abstand von sechs Monaten gefertigt. Dadurch wird auch das Potential einer deutlichen Verlängerung der Lagerdauer (bisher <30 Tage) durch die schützende Trennfolie untersucht. Die Prüfung der Klebfestigkeit erfolgt eine Woche nach der zweiten Kampagne. Als Prüfmethode wird ein Peeltest und eine Zugscherfestigkeitsprüfung angelehnt an die DIN EN 1465 durchgeführt. Beide Prüfungen sind BMW-interne Freigabeprüfungen für sicherheits-relevante Strukturverklebungen wie die eines CFK-Dachs. Eine Verklebung muss dabei trotz stark variierender klimatischer Belastungen die spezifizierten Anforderungen ohne Einschränkung erfüllen. Um die klimatischen Bedingungen, die während der Fahrzeuglebensdauer auftreten können, zu simulieren, werden die Verklebungen zusätzlich zur initialen Prüfung auch nach einer Klimawechselbelastung und einer Kondenswasser-Konstantklimabelastung geprüft.

Klimawechselbelastung

Hierbei werden extreme Schwankungen der Temperatur und relativen Luftfeuchte simuliert. Die Gesamtdauer der Belastung beträgt 240 Stunden und ist wie in Abb. 71 dargestellt in drei Abschnitte (Start-, Haupt- und Endzyklus) unterteilt.

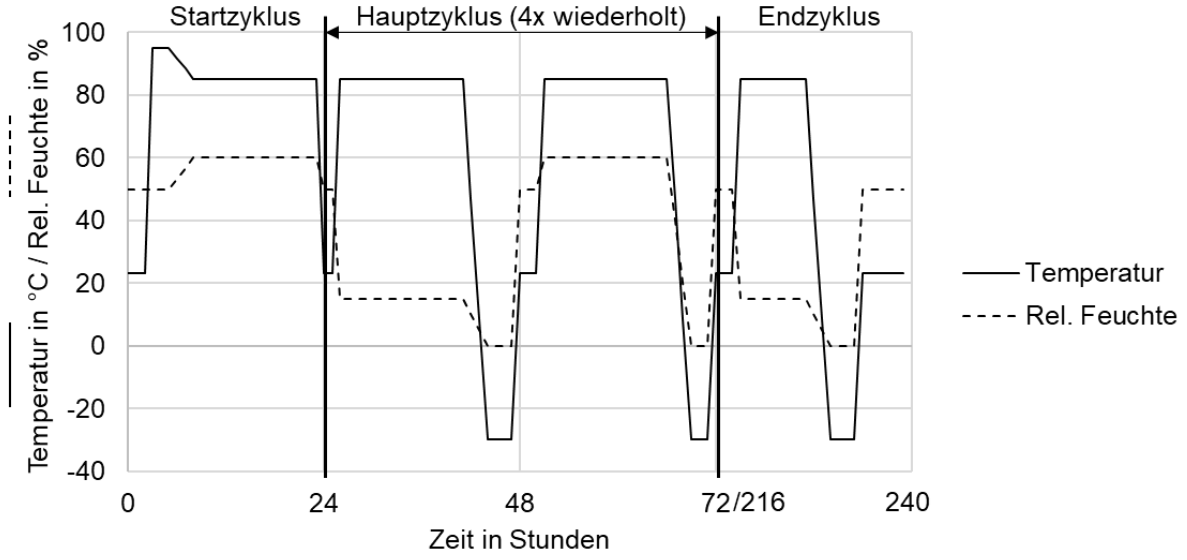


Abb. 71 Belastungszyklen der Klimawechselbelastung mit einer Gesamtdauer von 240 Stunden.

Die Bedingungen werden dabei in einer Klimakammer in Stufen zwischen -30°C bis 95°C (Temperatur) und 0 % bis 60 % (rel. Luftfeuchte) verändert. Der Startzyklus beginnt bei Normklima DIN 50014-23/50-1 (Lufttemperatur 23°C +/- 1°C, rel. Luftfeuchte 50 % +/- 3 %, Grenzabweichung Klasse 1). Danach folgt nach einer einstündigen Aufheizrampe eine Haltezeit von einer Stunde bei 95°C und 50 % rel. Luftfeuchte. Dieser folgt eine langsame Abkühlung auf 85°C und Erhöhung der rel. Luftfeuchte auf 60 %. Diese Bedingung wird für 16 Stunden beibehalten. Der Startzyklus wird mit der Rückkehr zum Normklima DIN 50014-23/50-1 beendet. Direkt im Anschluss folgt der Hauptzyklus. Hierbei werden die geprüften Proben in der ersten Zyklushälfte (24 Stunden) vom Normklima auf die maximale heiß/trocken Bedingung 85°C und 15 % rel. Luftfeuchte erhitzt und am Ende innerhalb von zwei Stunden die Frostbedingung -30°C und 0 % rel. Feuchte abgekühlt. In der zweiten Zyklushälfte wird zusätzlich zum Erhitzen auf 85°C auch die rel. Luftfeuchte auf 60 % erhöht. Im Anschluss werden die Proben wieder auf die Frostbedingung abgekühlt. Der beschriebene Hauptzyklus wird viermal wiederholt, was insgesamt einem Zeitrahmen von acht Tagen entspricht. In den darauffolgenden letzten 24 Stunden werden die Proben mit dem Endzyklus belastet. Hierbei werden die Proben erneut mit der maximalen heiß/trocken Bedingung und der Frostbedingung belastet. Die letzten sechs Stunden wird bei Normklima nach DIN 50014-23/50-1 gelagert. Direkt im Anschluss werden die Proben dem Peeltest bzw. der Zugscherprüfung unterzogen.

Kondenswasser-Konstantklimabelastung nach DIN EN ISO 6270-2

Die Prüfung dient der Beurteilung der Beständigkeit einer Verklebung gegenüber hoher Luftfeuchtigkeit. Dabei werden die Bedingungen in der Klimakammer so eingestellt, dass die eingetragene Luftfeuchte auf der Probenoberfläche kondensiert. Die Prüfdauer beträgt zehn Tage (240 Stunden) bei einer konstanten Temperatur von 40°C +/- 3°C und rel. Feuchte von 100 % mit Betauung der Prüfkörper. [133]

Direkt im Anschluss werden die Proben dem Peeltest bzw. der Zugscherprüfung unterzogen.

7.3.2.1. Peeltest

Der Peeltest [134] dient der qualitativen Bewertung der Adhäsion und Kohäsion eines Klebstoffes auf einem Substrat über eine Ordinalskala (Notensystem). Dabei wird eine Kleberaupe auf ein Substrat appliziert, anschließend manuell in einem definierten Winkel abgezogen und gleichzeitig mit einem Messer bis zum Substrat eingeschnitten. Hierfür werden auf einer Probe zunächst in Längsrichtung zwei parallele Klebstoffbahnen aufgetragen. Der 2K-Klebstoff wird über eine Druckluft Doppelkartuschen Klebepistole mit Mischerdüse in Form einer linsenförmigen Raupe (Breite 15mm */- 3mm) ohne Hinterschnitt

und in einem Winkel von 45° bis 90° zum Substrat in einem Zug ohne Absetzen appliziert. Die Raupen werden dann nach Lagerung und Klimabelastung geprüft. Der Zugwinkel beträgt dabei 80-100°. Die Abb. 72 veranschaulicht schematisch die Durchführung des Peeltests.

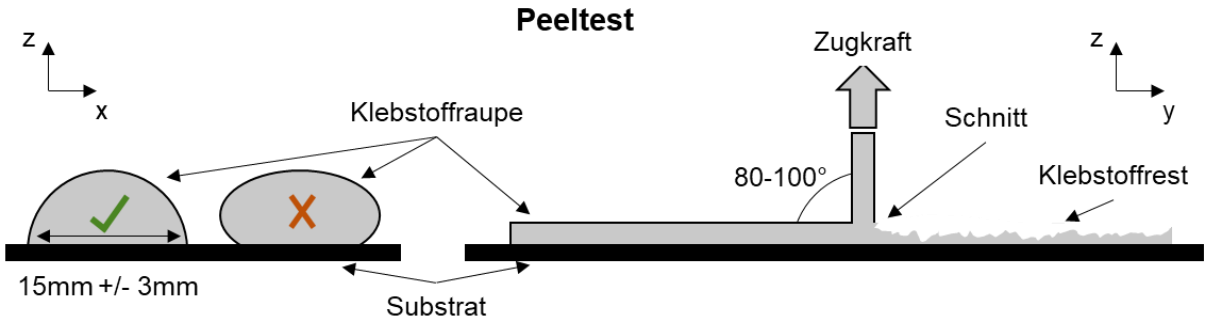


Abb. 72 Schematische Darstellung Peeltest. Links Soll-Raupengeometrie, rechts Durchführung.

Die so erzeugte Bruchfläche wird je nach Bruchbild mit einem Notensystem von Note 1 (>95 % kohäsiver Bruch) bis Note 4 (>25 % kohäsiver Anteil) bewertet. Als in Ordnung werden Bruchbilder bewertet, bei denen ein kohäsiver Anteil >75 % (Note 2) erreicht wird. Ein kohäsives Bruchverhalten wird dabei als Versagen innerhalb des Klebstoffs, ein adhäsives Bruchverhalten als Versagen an der Grenzfläche zwischen Klebstoff und Substrat definiert [135]. Die Tab. 18 zeigt die Bewertungsskala der Bruchflächen.

Note	Bewertung	Kohäsiver Anteil
1	In Ordnung	>95%
2	In Ordnung	75-95%
3	Nicht in Ordnung	25-75%
4	Nicht in Ordnung	<25%

Tab. 18 Skala für die Bewertung der im Peeltest erzeugten Bruchbilder. [134]

Für die Prüfung der trennmittelfreien CFK-Bauteile werden zunächst Proben mit den Maßen 100 x 200 mm herausgeschnitten. Die Trennfolie verbleibt dabei bis direkt vor dem Applizieren der Kleberaupen auf der CFK-Probe. Für die Prüfung wird ein kalthärtender 2K PUR Klebstoff Sikaforce 7777 L06 der Sika Deutschland GmbH verwendet. Die beschichteten Proben werden anschließend für sieben Tage bei Normklima DIN 50014-23/50-1 [136] gelagert und härten aus. Ein Teil der Proben wird direkt nach der Klebstoffaushärtung, der Rest entweder nach Klimawechselbelastung oder nach Kondenswasser-Konstantklimabelastung geprüft. Die Tab. 19 fasst die Prüfbedingungen zusammen.

Abkürzung	Lagerdauer	Klebstoffhärtung	Klimabelastung
Initial	1W / 6M	168h Normklima	Keine
KWB	1W / 6M	168h Normklima	240h Klimawechselbelastung
KW-KK	1W / 6M	168h Normklima	240h Kondenswasser-Kontaktbelastung

Tab. 19 Übersicht der Klimabelastung vor der Durchführung des Peeltests. Lagerdauer eine Woche (1W) und sechs Monate (6M) vor Klebstoffauftrag verpackt in Trennfolie.

Peeltest Ergebnisse

Die geprüften Proben erfüllen mit einem kohäsiven Bruch >95% und Note 1 bei beiden Raupen (R1 und R2) vollständig die Anforderungen. Die Tab. 20 fasst die Ergebnisse zusammen.

Nr.	Lagerung	Klima-belastung	Bruchbild Raupe 1 (R1)	Note R1	Bruchbild Raupe 2 (R2)	Note R2
1	6 Monate	Initial	>95% Kohäsiv	1	>95% Kohäsiv	1
2	6 Monate	Initial	>95% Kohäsiv	1	>95% Kohäsiv	1
3	6 Monate	Initial	>95% Kohäsiv	1	>95% Kohäsiv	1
4	6 Monate	Initial	>95% Kohäsiv	1	>95% Kohäsiv	1
5	6 Monate	Initial	>95% Kohäsiv	1	>95% Kohäsiv	1
6	6 Monate	Initial	>95% Kohäsiv	1	>95% Kohäsiv	1
7	6 Monate	Initial	>95% Kohäsiv	1	>95% Kohäsiv	1
8	1 Woche	Initial	>95% Kohäsiv	1	>95% Kohäsiv	1
9	1 Woche	Initial	>95% Kohäsiv	1	>95% Kohäsiv	1
19	1 Woche	Initial	>95% Kohäsiv	1	>95% Kohäsiv	1
11	1 Woche	Initial	>95% Kohäsiv	1	>95% Kohäsiv	1
12	1 Woche	Initial	>95% Kohäsiv	1	>95% Kohäsiv	1
13	1 Woche	Initial	>95% Kohäsiv	1	>95% Kohäsiv	1
14	1 Woche	Initial	>95% Kohäsiv	1	>95% Kohäsiv	1
15	1 Woche	Initial	>95% Kohäsiv	1	>95% Kohäsiv	1
16	6 Monate	KWB	>95% Kohäsiv	1	>95% Kohäsiv	1
17	6 Monate	KWB	>95% Kohäsiv	1	>95% Kohäsiv	1
18	6 Monate	KWB	>95% Kohäsiv	1	>95% Kohäsiv	1
19	6 Monate	KWB	>95% Kohäsiv	1	>95% Kohäsiv	1
20	1 Woche	KWB	>95% Kohäsiv	1	>95% Kohäsiv	1
21	1 Woche	KWB	>95% Kohäsiv	1	>95% Kohäsiv	1
22	1 Woche	KWB	>95% Kohäsiv	1	>95% Kohäsiv	1
23	6 Monate	KW-KK	>95% Kohäsiv	1	>95% Kohäsiv	1
24	6 Monate	KW-KK	>95% Kohäsiv	1	>95% Kohäsiv	1
25	6 Monate	KW-KK	>95% Kohäsiv	1	>95% Kohäsiv	1
26	6 Monate	KW-KK	>95% Kohäsiv	1	>95% Kohäsiv	1
27	1 Woche	KW-KK	>95% Kohäsiv	1	>95% Kohäsiv	1
28	1 Woche	KW-KK	>95% Kohäsiv	1	>95% Kohäsiv	1
29	1 Woche	KW-KK	>95% Kohäsiv	1	>95% Kohäsiv	1

Tab. 20 Ergebnisse Peeltest der trennmittelfreien CFK-Bauteile hergestellt mit Trennfolien. Die Abb. 73 zeigt Beispielbilder der Proben nach dem Peeltest.

Lagerung 6 Monate, Initial | Lagerung 6 Monate, KWB | Lagerung 6 Monate, KW-KK

Abb. 73 Probenbilder nach Peeltest. Links initial, Mitte nach KWB, rechts nach KW-KK.

Alle geprüften trennmittelfreien CFK-Bauteile erfüllen die sicherheitsrelevanten Anforderungen an Strukturverklebungen ohne einer abrasiven Vorbehandlung durch einen manuellen Schliff. Weder eine Lagerdauer von sechs Monaten noch eine Zusatzbeanspruchung durch eine Klimawechselbelastung (KWB) und Kondenswasser-Konstantklimabelastung (KW-KK) haben einen negativen Einfluss auf das sehr gute Ergebnis (Note 1, >95 % kohäsiver Bruch) des Peeltests. Um zusätzlich den Einfluss auf die Klebkraft zu bestimmen wird nachfolgend die Zugscherfestigkeit geprüft.

7.3.2.2. Prüfung der Zugscherfestigkeit

Die Prüfung der Zugscherfestigkeit ist auch außerhalb der Automobilindustrie eine bewährte zerstörende Prüfmethode, um Klebfestigkeiten zu bestimmen. Nach DIN EN 1465 wird die Zugscherfestigkeit von Überlappungsklebungen über eine erzwungene Scherbelastung einer einschnittigen Überlappungsverbindung zwischen zwei starren Fügeteilen ermittelt. Durch die Einwirkung einer Zugkraft, die parallel zur Klebfläche und zur Hauptachse der Probe wirkt, kann die Klebfestigkeit als Bruchkraft F_{MAX} und die flächenbezogene Bruchspannung τ_{Max} bestimmt werden. Die Bruchspannung errechnet sich aus dem Quotienten der Bruchkraft F_{MAX} in N durch die Klebefläche in mm². Die Klebefläche setzt sich dabei aus der Überlappungslänge $L_Ü$ und Prüfkörperbreite B zusammen. [137]

$$\text{Bruchspannung: } \tau_{Max} = \frac{F_{Max}}{L_Ü * B} \qquad \text{Einheit: } \frac{N}{mm^2} = MPa$$

Mit

τ_{Max}: Zugscherfestigkeit in N/mm² oder MPa

F_{MAX}: Maximale Bruchkraft in N

$L_ü$: Überlappungslänge in mm

B: Prüfkörperbreite

Für die geprüften trennmittelfreien CFK-Bauteile werden die in Abb. 74 schematisch dargestellten Dimensionen gewählt.

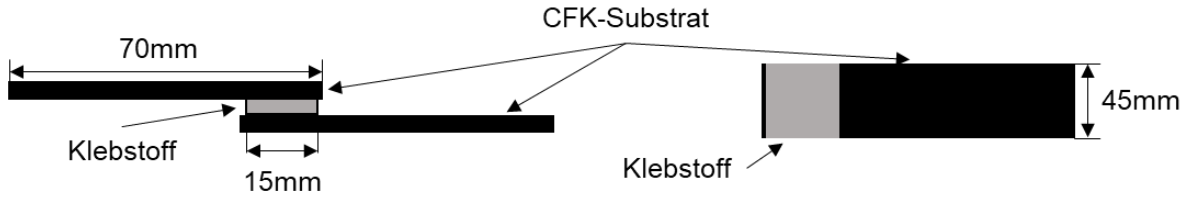


Abb. 74 Aufbau einer CFK-Probe zur Prüfung der Zugscherfestigkeit.

Die Prüfkörperlänge beträgt ca. 70 mm, die Überlappungslänge $L_ü$ = 15 mm +/- 0,5 mm und die Probenbreite B = 40 mm +/- 1,0 mm. Die Reißgeschwindigkeit beträgt 20 mm/min. Der Zielwert der Bruchspannung liegt bei 5-10 N/mm² bzw. MPa.
Um zu bestimmen, ob der Trennmittelentfall und der Einsatz der Trennfolien einen Einfluss auf die Verklebung haben ist zusätzlich zu der Klebfestigkeit vor allem das Bruchbild entscheidend. Wie beim Peeltest in Kap. 7.3.2.1 wird hier hauptsächlich in adhäsives Bruchverhalten an der Grenzfläche und kohäsives Bruchverhalten im Klebstoff unterschieden, wie Abb. 75 anhand von zwei CFK Proben dargestellt.

Kohäsionsbruch **CF** Adhäsionsbruch **AF**

Abb. 75 Beispielbilder von Zugscherproben mit einem Kohäsionsbruch links und Adhäsionsbruch rechts.

Zusätzlich werden in der DIN EN ISO 10365 neben dem reinen Adhäsions- und Kohäsionsbruch wie in Abb. 76 dargestellt auch Mischformen und weitere Bruchbilder unterschieden und in Klassen unterteilt. Die Erweiterung der Bruchbildklassen erlaubt es, eine präzisere Aussage über die Eigenschaften der Verklebung zu treffen. [135] Je näher die Adhäsions- und Kohäsionskraft aneinander liegen, desto schwieriger ist es dabei ein eindeutiges Bruchbild zu erzeugen. So können eingebrachte Mikroblasen im Klebstoff oder minimale Kontaminationen der Prüfkörperoberfläche zu Mischbrüchen führen. Ist hingegen die Klebkraft (Adhäsion und Kohäsion) stärker als die Festigkeit der Fügeteile selbst, kommt es zu einem Fügeteilbruch mit Substratausriss oder Delamination bei Mehrschichtverbunden.

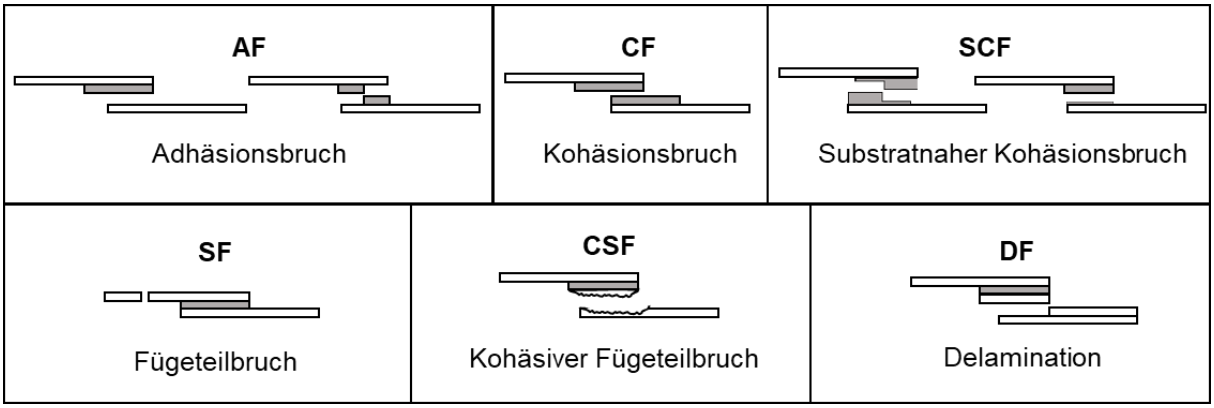


Abb. 76 Bezeichnung der wichtigsten Bruchbilder nach DIN EN ISO 10365. [135]

Die Bewertungslogik der Bruchbilder erfolgt analog der Bewertungsskala des Peeltests in Kap. 7.3.2.1. Eine korrekt vorbereitete CFK-Probe mit einer abrasiven Vorbehandlung erreicht dabei innerhalb der Haltbarkeit durchgehend einen kohäsiven Bruch (Anteil >95 % und Note 1) und eine Zugscherfestigkeit von 5-10 N/mm² bzw. MPa.

Auch für die Ermittlung der Zugscherfestigkeit werden die Proben initial, nach Klimawechselbelastung und Kondenswasser-Konstantklimabelastung geprüft. Für die Ermittlung der Lagerfähigkeit der in die Trennfolien eingepackten trennmittelfreien CFK-Proben werden ebenfalls Proben mit einer Lagerdauer von einer Woche und sechs Monaten geprüft. Die Trennfolie wird erst direkt vor der Verklebung abgezogen. Die Tab. 21 fasst die Prüfbedingungen zusammen.

Abkürzung	Lagerdauer	Klebstoffhärtung	Klimabelastung
Initial	1W / 6M	168h Normklima	Keine
KWB	1W / 6M	168h Normklima	240h Klimawechselbelastung
KW-KK	1W / 6M	168h Normklima	240h Kondenswasser-Kontaktbelastung

Tab. 21 Prüfbedingungen und Lagerdauer der trennmittelfreien CFK-Zugscherprüfkörper

Ergebnisse der Zugscherprüfung

Alle geprüften Proben erfüllen mit einer Bruchspannung τ_{Max} zwischen 5,6-9,4 MPa und einem kohäsiven Bruch >95 % und Note 1 vollständig die Anforderungen. Damit erfüllen alle geprüften trennmittelfreien CFK-Bauteile die sicherheitsrelevanten Anforderungen an Strukturverklebungen ohne einer abrasiven Vorbehandlung durch einen manuellen Schliff. Weder eine Lagerdauer von sechs Monaten noch eine Zusatzbeanspruchung durch eine Klimawechselbelastung und Kondenswasser-Konstantklimabelastung haben einen negativen Einfluss auf das Ergebnis der Prüfung. Die Tab. 22 fasst die Ergebnisse zusammen.

Nr.	Lagerung	Klima	Bruch	Note	LÜ [mm]	B [mm]	So [mm²]	F_{Max} [N]	T_{Max} [MPa]
1	1 Woche	Initial	CF	1	15,3	39,3	603,1	5431,9	9,0
2	1 Woche	Initial	CF	1	14,7	42,0	616,0	5398,2	8,8
3	1 Woche	Initial	CF	1	15,0	45,0	675,0	5070,5	7,5
4	1 Woche	Initial	CF	1	15,0	40,7	610,0	4950,0	8,1
5	1 Woche	Initial	CF	1	15,0	40,0	600,0	5306,2	8,8
6	1 Woche	Initial	CF	1	16,0	38,0	608,0	4501,7	7,4
7	1 Woche	KWB	CF	1	15,0	39,3	590,0	3614,2	6,1
8	1 Woche	KWB	CF	1	14,7	40,7	596,4	4722,9	7,9
9	1 Woche	KWB	CF	1	15,3	41,3	633,8	4599,9	7,3
10	1 Woche	KW-KK	CF	1	15,3	42,7	654,2	5544,7	8,5
11	1 Woche	KW-KK	CF	1	15,0	39,3	590,0	4385,1	7,4
12	1 Woche	KW-KK	CF	1	15,0	43,0	645,0	5656,4	8,8
13	6 Monate	Initial	CF	1	14,7	38,3	562,2	3133,0	5,6
14	6 Monate	Initial	CF	1	14,0	40,0	560,0	5271,4	9,4
15	6 Monate	Initial	CF	1	15,0	39,3	590,0	4726,8	8,0
16	6 Monate	Initial	CF	1	15,7	41,0	642,3	5917,0	9,2
17	6 Monate	KWB	CF	1	15,0	42,3	635,0	4464,7	7,0
18	6 Monate	KWB	CF	1	14,7	40,3	591,6	4872,0	8,2
19	6 Monate	KW-KK	CF	1	15,0	40,0	600,0	5241,1	8,7
20	6 Monate	KW-KK	CF	1	15,3	39,3	603,1	4631,4	7,7

Tab. 22 Übersicht der Ergebnisse der Zugscherprüfung nach verschiedener klimatischer Belastung und vorheriger Lagerung in Trennfolien für eine Woche und sechs Monate.

In der Abb. 77 sind die Versuchsergebnisse nach Lagerdauer und klimatischer Belastung aufgeteilt. Die Fehlerbalken zeigen die Schwankungsbreite der Ergebnisse.

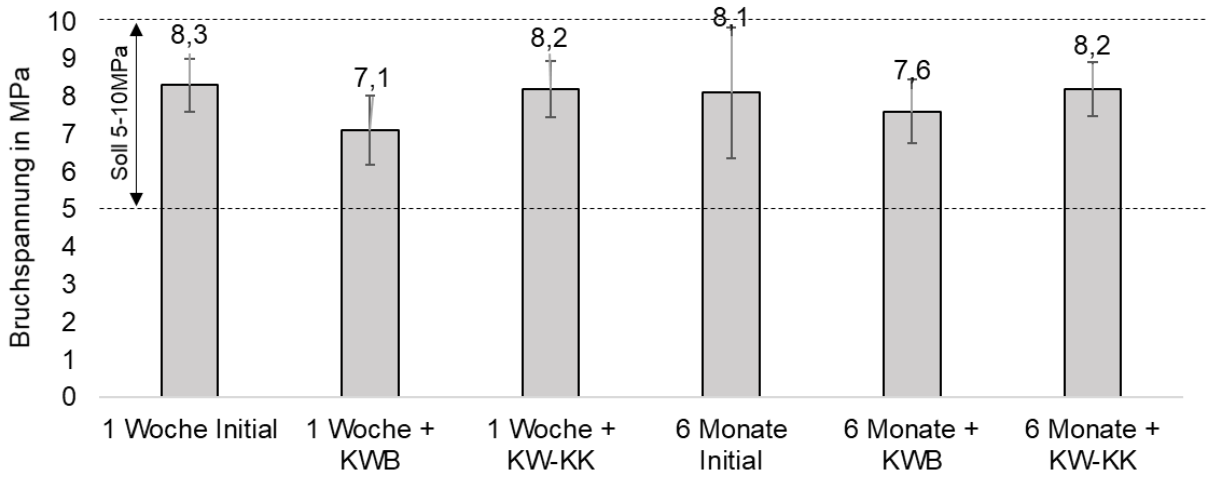


Abb. 77 Diagramm der Versuchsergebnisse der Zugscherprüfung.

Auch hier zeigt sich, dass alle Proben innerhalb der Vorgabe von 5-10 MPa liegen. Die Schwankung innerhalb der Probenkategorien überlagert die Sprünge der mittleren Bruchspannung, weshalb sich keine signifikanten Unterschiede feststellen lassen. Dabei

liegen die Mittelwerte sowohl bei einer Lagerdauer von einer Woche als auch sechs Monaten bei der initialen Prüfung und KW-KK Belastung auf einem sehr ähnlichen Niveau von 8,1-8,3 MPa. Einzig für die Klimawechsel-belastung ist ein Trend hin zu niedrigeren Werten zu erkennen. Der Abfall ist jedoch sowohl bei einer Lagerdauer von einer Woche als auch sechs Monaten erkennbar, im Mittel bei der kürzeren Lagerdauer sogar stärker. Da jedoch alle Proben einen rein kohäsiven Bruch aufweisen, deutet dies auf eine Schwächung des Klebstoffs und nicht der Grenzfläche hin. Die Abb. 78 zeigt Beispielbilder für die sechs Zustände.

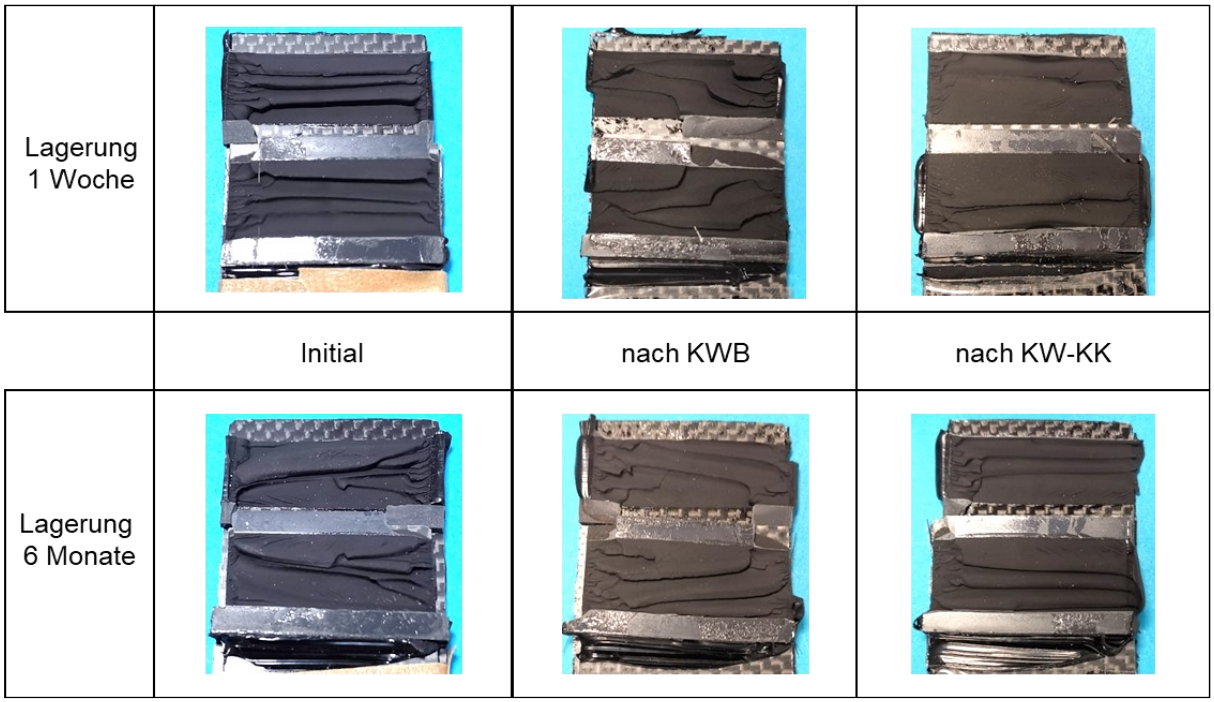


Abb. 78 Beispielbilder der sechs geprüften Zustände. Aufteilung in oben Lagerung eine Woche, unten sechs Monate. Von links initial ohne Belastung geprüft, Mitte nach Klimawechselbelastung KWB und rechts nach Kondenswasser Konstantklimabelastung KW-KK. Alle Proben brechen kohäsiv innerhalb des Klebstoffs.

Somit lässt sich zusammenfassen, dass bei den geprüften trennmittelfreien Bauteilen ein Entfall der abrasiven Klebevorbehandlung keinen negativen Einfluss auf die Zugscherfestigkeit hat. Die gemessenen Bruchspannungen liegen allesamt innerhalb der vorgegeben Toleranz von 5-10 MPa, Schwankungen sind aufgrund des durchgehenden kohäsiven Bruchbilds auf Klebstoffeigenschaften zurückzuführen und nicht auf die Grenzfläche. Durch den Einsatz der Trennfolien ist der Trennmittelentfall erst möglich. Die Folien schützen die Bauteile ab der Bauteilherstellung vor Umwelteinflüssen und ermöglichen nachweislich eine Lagerung von bis zu sechs Monaten, was einer Verlängerung um Faktor sechs entspricht.

7.4. Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

Nach dem technischen Nachweis des Potentials für den Entfall der Lack- und Klebevorbehandlung, soll der Ansatz bezüglich der Wirtschaftlichkeit betrachtet werden. Hierfür werden zunächst die relativen Herstellkosten in zwei Stufen miteinander verglichen. Stufe eins ist der reine prozessintegrierte Einsatz von Trennfolien und der Entfall der Lack- und Klebevorbehandlung. Stufe zwei berücksichtigt die Verringerung der Zweitläuferquote durch ausgeschliffene oberflächennahe Poren von 10 % auf 1 %. Im Anschluss wird die jeweils erzielbare Rendite über die dynamische Investitionsrechnung (interner Zinsfuß) ermittelt.

Vergleich der Herstellkosten

Die Herstellkosten HK setzen sich, wie in Kap 7.1 beschrieben aus dem Anteil der Materialkosten MK und Fertigungskosten FK zusammen. Die Tab. 23 fasst die einzelnen Positionen der Prozessschritte Nasspressen (NP), Lackierung (Lack) und Klebevorbehandlung (Kleb) zusammen. Die MK und FK werden dabei jeweils prozentual in Bezug zu den Herstellkosten (100 %) gesetzt. Das HK-Potential ergibt sich aus der Differenz zu den 100 % HK der Referenz Prozesskette im Nasspressverfahren.

Prozessschritt (NP/Lack/Kleb)	**Benennung**	**Kostenart (MK/FK/HK)**	**Referenz NP**	**Trennfolie Stufe 1**	**Trennfolie Stufe 2**
NP	Matrix	MK	5,9%	5,9%	5,9%
NP	Halbzeug	MK	45,1%	45,1%	45,1%
NP	Trennmittel	MK/FK	1,6%	0.0%	0.0%
NP	Trennfolie	MK/FK	0,0%	3,2%	3,2%
NP	Pressen	FK	7,0%	7,0%	7,0%
NP	Fräsen	FK	1,9%	1,9%	1,9%
Lack	Rohteilschliff	FK	1,1%	0,0%	0,0%
Lack	Reinigung CO_2	FK	1,0%	1,0%	1,0%
Lack	Primer/Lack	MK	6,2%	6,2%	6,2%
Lack	Lackierung	FK	15,8%	15,8%	15,8%
Lack	Endkontrolle	FK	5,9%	5,9%	5,9%
Lack	Zweitläufer	MK/FK	3,0%	3,0%	0,3%
Kleb	Flanschschliff	FK	5,5%	0%	0%
Summe		**HK**	**100%**	**95,0%**	**92,3%**

Tab. 23 Herstellkosten im Vergleich Referenz Prozesskette Nasspressverfahren und prozessintegrierte Trennfolie in Stufe 1 mit Zweitlack Quote 10 % und Stufe 2 Zweitlackquote 1 %.

Die Kalkulation ergibt für den prozessintegrierten Einsatz von Trennfolien für im Nasspressverfahren hergestellte Class-A CFK-Dächer einen Herstellkostenvorteil von 5 % ohne Berücksichtigung der potenziell reduzierten Zweitlackquote durch nicht aufgeschliffene Poren. Berücksichtigt man eine Reduzierung der schliffbedingten Zweitläufer, erhöht sich der Vorteil auf 7,7 % pro Bauteil.

Ermittlung der Rendite über den internen Zinssatz (dyn. Investitionsrechnung)

Bei der Kapitalwertmethode (engl. Net present value, NPV) wird vereinfacht beschrieben die mögliche Rendite eines Investitionsvorhabens gegen einen angenommenen Renditezinssatz verglichen. Dabei kann der Renditezinssatz bei einem Produktionssystem kalkulatorisch (theoretisch) oder auf Basis einer Ist-Wertschöpfungskette angenommen werden. Die Methode ist Teil der dynamischen Investitionsrechnung, da der Zeitpunkt, zu der die netto Zahlungsströme (Ausgaben und Einnahmen) fließen, berücksichtigt wird. Somit hat aufgrund der angenommenen Verzinsung das vorhandene Kapital in der Gegenwart einen höheren Wert als zu einem späteren Zeitpunkt. Je länger es also dauert, bis das investierte Kapital wieder erwirtschaftet wird, desto höher muss der monetäre Erfolg sein [138].
Der Kapitalwert wird wie folgt berechnet [138]:

$$KW = \sum_{t=0}^{n} Z_t * (1+i)^{-t}$$

Mit

KW: Kapitalwert

Z_t: Zahlungsstrom im Jahr t

t: Jahr

n: Anzahl der Jahre

i: Zinssatz (Rendite)

Der Kapitalwert zeigt somit den Anfangsvermögenszuwachs zum Zeitpunkt t=0 unter Berücksichtigung des Rendite- bzw. Verzinsungsanspruchs. Bei einem

- Kapitalwert > 0 wird mehr als die Referenzrendite
- Kapitalwert = 0 wird genau die Referenzrendite
- Kapitalwert < 0 wird weniger als die Referenzrendite erwirtschaftet.

Üblicherweise wird eine Entscheidung für ein Investitionsvorhaben erst bei einem positiven Kapitalwert getroffen. Es ist jedoch auch möglich auf Basis des Kapitalwerts die erzielbare Rendite (Verzinsung des eingesetzten Kapitals) nach einer definierten Zeit t zu berechnen. Es

wird also der Zinssatz i ermittelt, für den der Kapitalwert KW genau null ist. Bei der sog. Internen-Zinsfuß-Methode kann eine Zusatzinvestition, wie beispielsweise eine Prozessintegration von Trennfolien in eine Nasspress Linie, für ein neues Bauteil und ein definiertes Stückzahlszenario bewertet werden. Für Auszahlungen wird dabei nur das zusätzlich eingesetzte Kapital, für Einzahlungen der errechnete Herstellkostenvorteil berücksichtigt. [138] Für den vorliegenden Fall wird eine Gesamtprojektdauer von zehn Jahren aufgeteilt in vier Phasen angenommen. Am Anfang steht eine Industrialisierungsdauer von zweieinhalb Jahren bei der nur Auszahlungen getätigt werden, um den neuen Prozess zu integrieren. Zur Hälfte des dritten Jahres wird die Serienproduktion aufgenommen und es werden Einzahlungen aufgrund des Herstellkostenvorteils erwirtschaftet. Im dritten Jahr beträgt das Volumen daher 10.000 Einheiten. Ab dem vierten Jahr läuft die Serienproduktion für einen Zeitraum von fünf Jahren mit einem angenommenen Volumen von 20.000 Einheiten im Jahr. In den letzten beiden Jahren läuft das Produkt aus, wobei im neunten Jahr noch ein Absatz von 15.000 Einheiten und im zehnten Jahr von 10.000 Einheiten angenommen wird. Für die gesamte Betriebsdauer wird eine zusätzliche Instandhaltungspauschale von 10.000€ pro Jahr gegengerechnet. Die Abb. 79 veranschaulicht den Verlauf des Produktionsvolumens und der erwirtschafteten Verzinsung (Rendite bei Stufe 1 und Stufe 2) des eingesetzten Kapitals über die Projektlaufzeit von zehn Jahren eingeteilt in vier Phasen.

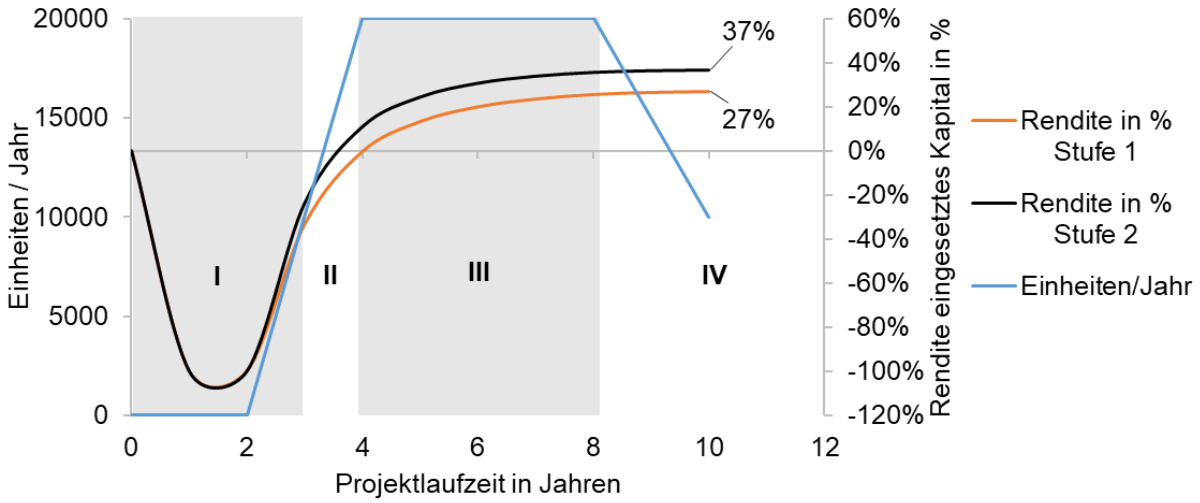


Abb. 79 Verlauf der abgesetzten Einheiten und der Rendite (interne Verzinsung) für die Prozessintegration von Trennfolien in den Nasspressprozess (Stufe 1 und Stufe 2). Phase I Industrialisierung, Phase II Anlauf der Serienproduktion, Phase III volle Serienproduktion, Phase IV Auslauf der Produktion.

In der Phase I fallen während der bautechnischen Umsetzung und Industrialisierung nur Kosten an, denen keine Einzahlungen gegengerechnet werden können. Erst im dritten Jahr nach Abschluss der Industrialisierung und Anlauf der Produktion werden Einzahlungen

generiert, denen nur die zusätzlich angenommenen Instandhaltungskosten entgegenstehen. Amortisiert wird die Investition bei der angenommenen Stufe 1 (ohne Berücksichtigung der Reduzierung von Nacharbeit) nach genau vier Jahren. In Stufe 2 wird der Nullpunkt bereits im dritten Jahr nach Anlauf der Produktion erreicht. In der Phase III wird eine Jahresproduktion von 20.000 Einheiten angenommen, wobei die Rendite kontinuierlich ansteigt. Nach Abschluss der Phase IV am Ende der Projektlaufzeit und 135.000 produzierten Class-A CFK Bauteilen ergibt sich eine Gesamtrendite von 27 % für die Stufe 1 und 37 % für Stufe 2. Der Vergleich zeigt dabei, welch großes Kostenpotential eine Prozessintegration ermöglichen kann, da hierdurch kostenintensive manuelle Tätigkeiten eingespart werden können. Es wird dabei bestätigt, dass Kostenoptimierungen dieser Höhe in bestehenden Prozessen nur möglich sind, wenn der in dieser Arbeit verfolgte Ansatz, Prozessketten trotz der Interdisziplinarität als Ganzes zu betrachten, verfolgt wird. Erst eine Prozesskostenerhöhung im Pressverfahren ermöglicht die Einsparung im Prozessabschnitt Lackierung. Da die einzelnen Prozessschritte Halbzeugherstellung, Bauteilherstellung und Oberflächenveredelung in der Praxis üblicherweise jedoch organisatorisch voneinander getrennt sind, ist diese Betrachtungsweise keine Selbstverständlichkeit.

7.5. Fazit

In Kapitel 7 wurde das Potential einer Prozessintegration von Trennfolien in den Nasspressprozess für Class-A CFK Bauteile untersucht. Der Ansatz verfolgt dabei eine ganzheitliche Betrachtung der Prozesskette. Durch die Erhöhung des Aufwands in einem der Prozessschritte wird in einem nachfolgenden Prozessschritt ein insgesamt größeres Einsparpotential gehoben. Für die Entformbarkeit vom duromeren CFK Bauteilen werden üblicherweise Trennmittel eingesetzt. Diese müssen für eine Lackier- und Verklebbarkeit abrasiv in einem zum Teil manuellen Vorbehandlungsprozess entfernt werden. Diese Vorbehandlung macht dabei 21 % der Veredelungskosten und 6,6 % der Gesamtherstellkosten aus. Rechnet man die durch den Rohteilschliff verursachten Zweitläufer-Bauteile mit ein, die aufgrund von freigelegten Fasern oder Poren nachgebessert und erneut lackiert werden müssen, erhöhen sich die Kosten um 2,7 % auf 9,3 % der Gesamtherstellkosten. Die Vorbehandlungskosten können nur eingespart werden, wenn Bauteile ohne Trennmittel produziert würden.

Ein Ansatz trennmittelfreie CFK-Bauteile herzustellen, ist der prozessintegrierte Einsatz von sogenannten Trennfolien. Die untersuchten dünnen und stark dehnbaren Folien bestehen dabei aus TPE (Thermoplastisches Elastomer) und verfügen über eine Plasma-Oberflächenbehandlung, die ein Anhaften von Harzsystemen verhindern soll. Für die Integration der Trennfolien in den Nasspressprozess werden beide Hälften des in Kap. 5.1.1 beschriebenen Werkzeugs mit Vakuum-Kreisläufen versehen. Die Folie wird dadurch vor dem eigentlichen Nasspressprozess als temporäre Werkzeughaut tiefgezogen. Der Nasspressprozess findet nach dem Tiefziehen der Folien unverändert und ohne Taktzeitverlust statt. Die Folien verbleiben nach dem Aushärten der Matrix auf dem Bauteil und dienen bis zur Lackierung bzw. Verklebung als Schutzverpackung. Auch das Handling wird erleichtert, da die Bauteile über den Folienspannrahmen automatisiert entnommen werden können.

Über Absicherungsversuche wurde die direkte Lackier- und Verklebbarkeit ohne Vorbehandlung überprüft. Hierfür wurden im ersten Schritt in Kap. 7.3.1 drei Bauteilzustände erzeugt und danach die Lackhaftung mittels dem Skalpellschnittverfahren untersucht. Der Referenzzustand entspricht dabei einem trennmittelfreien CFK Bauteil, das nach einem Rohteilschliff mit dem konventionellen Lackaufbau (Primer + Klarlack) lackiert wurde. Die übrigen Bauteile wurden ohne Rohteilschliff direkt nach Entfernen der Trennfolie der automatisierten Lacklinie zugeführt. Um das volle Potential zu überprüfen, wurde für den dritten Zustand auch der Primer weggelassen und dafür die Lackschichtdicke erhöht, um die Sollschichtdicke von 140 µm zu erreichen. Die Lackhaftung der so erzeugten Bauteile wurde direkt nach dem Lackieren und nach einer Sonnensimulation mittels Xenonkurzbewitterung

geprüft. Dabei wurde für alle trennmittelfreien Bauteile eine sehr gute Lackhaftung bei der initialen Prüfung ermittelt. Nach der starken UV-Belastung der Xenontests konnte jedoch eine deutliche Lackenthaftung für die Proben ohne Primer festgestellt werden. Die Proben mit dem kompletten Lackaufbau inklusive Primer hatten unabhängig eines vorangehenden Schliffs unverändert eine sehr gute Lackhaftung. Es wurde somit nachgewiesen, dass durch die eingesetzten, prozessintegrierten Trennfolien direktlackierbare CFK-Bauteile erzeugt werden können, die einen Entfall des Trennmittels und der Vorbehandlung über einen Rohteilschliff ermöglichen.

Da im konventionellen Nasspressprozess auch für eine sichere Verklebung das Trennmittel abrasiv von den Klebeflanschbereichen der Bauteilrückseite entfernt werden muss, wurde in Kap. 7.3.2 die direkte Verklebbarkeit ohne Vorbehandlung untersucht. Als Prüfmethode wird ein Peeltest und eine Zugscherfestigkeitsprüfung angelehnt an die DIN EN 1465 durchgeführt. Beide Prüfungen sind BMW-interne Freigabeprüfungen für sicherheitsrelevante Strukturverklebungen wie die eines CFK-Dachs. Für die Prüfung der direkten Verklebbarkeit ohne Vorbehandlung werden trennmittelfreie CFK-Bauteile in zwei Kampagnen mit einem Abstand von sechs Monaten gefertigt. Dadurch wird direkt das Potential einer deutlichen Verlängerung der Lagerdauer (bisher < 30 Tage) durch die schützende Trennfolie untersucht. Um die im realen Fahrzeugbetrieb möglichen klimatischen Belastungen zu simulieren, wurde die Verklebung zusätzlich zur initialen Prüfung auch nach einer Klimawechselbelastung und einer Kondenswasser-Konstantklimabelastung geprüft. Alle getesteten trennmittelfreien CFK-Bauteile erfüllen die Anforderungen sowohl beim Peeltest als auch bei der Zugscherfestigkeits-prüfung ohne einer abrasiven Vorbehandlung durch einen manuellen Schliff. Weder eine Lagerdauer von sechs Monaten noch eine Zusatzbeanspruchung durch eine Klimawechselbelastung und Kondenswasser-Konstantklimabelastung haben einen negativen Einfluss auf das Ergebnis. Es wird bei beiden Prüfmethoden durchgehend ein kohäsiver Bruch im Klebstoff beobachtet. Die Bruchspannung liegt ebenfalls bei allen geprüften Proben innerhalb der definierten Sollwerte von 5-10 MPa.

Nach dem technischen Nachweis, dass der Einsatz von Trennfolien im Nasspressprozess den Entfall von ansonsten notwendigen Trennmitteln und der damit verbundenen Vorbehandlungsschritte für eine Lackier- und Verklebbarkeit ermöglicht, wurde die Wirtschaftlichkeit betrachtet. Hierfür wurden zunächst die relativen Herstellkosten in zwei Stufen miteinander verglichen. Stufe 1 ist der reine prozessintegrierte Einsatz von Trennfolien und der Entfall der Lack- und Klebevorbehandlung. Stufe 2 berücksichtigt die Verringerung der Zweitläuferquote durch ausgeschliffene oberflächennahe Poren von 10 % auf 1 %. Im Anschluss wurde die jeweils erzielbare Rendite unter Berücksichtigung der höheren Werkzeug- und Anlaufkosten über die dynamische Investitionsrechnung (interner Zinsfuß) ermittelt. Die Kalkulation ergibt für den prozessintegrierten Einsatz von Trennfolien für im

Nasspressverfahren hergestellte Class-A CFK Dächer einen Herstellkostenvorteil von 5% ohne Berücksichtigung der potenziell reduzierten Zweitlackquote durch nicht aufgeschliffene Poren (Stufe 1). Berücksichtigt man eine Reduzierung der schliffbedingten Zweitläufer (Stufe 2), erhöht sich der Vorteil auf 7,7 % pro Bauteil. Das Gesamtherstellkostenpotential von 9,3 % wird aufgrund der Kostenerhöhung im trennfolienintegrierten Nasspressprozess um 1,6 % abgesenkt. Für das ermittelte Herstellkostenpotential wird auf Basis der Kapitalwertmethode die erzielbare Rendite (Verzinsung des eingesetzten Kapitals) für eine Projektlaufzeit von zehn Jahren und einem Gesamtvolumen von 135.000 Einheiten berechnet. Der Zeitraum wird dabei in vier Phasen von der Industrialisierung über den Produktionsanlauf mit nachfolgender Serienproduktion und einem Produktionsauslauf unterteilt. Die getätigten Investitionen amortisieren sich bei der angenommenen Stufe 1 (ohne Berücksichtigung der Reduzierung von Nacharbeit) nach genau vier Jahren. In Stufe 2 wird die Rendite bereits im dritten Jahr nach Anlauf der Produktion positiv. Am Ende der Projektlaufzeit ergibt sich eine Gesamtrendite von 27 % für die Stufe 1 und 37 % für Stufe 2.

Insgesamt wird gezeigt, dass über eine Prozessintegration von Trennfolien kostenintensive manuelle Tätigkeiten in Nachfolgeprozessen eingespart werden können. Erst eine Prozesskostenerhöhung durch die Integration von Trennfolien im Pressverfahren ermöglicht die Einsparung im späteren Prozessabschnitt Lackierung. Es wird dabei bestätigt, dass Kostenoptimierungen dieser Höhe in bestehenden Prozessen vor allem dann möglich sind, wenn Prozessketten trotz der Interdisziplinarität als Ganzes betrachtet werden. Die in der Praxis übliche und zum Teil notwendige organisatorische Trennung der einzelnen Prozessschritte Halbzeugherstellung, Bauteilherstellung und Oberflächenveredelung erschwert es jedoch, solche Potentiale auf Anhieb sichtbar zu machen. Der hier untersuchte Ansatz zeigt allerdings, dass sich eine ganzheitliche Betrachtung lohnen kann. Gleichzeitig ergeben sich als Nebenprodukt Vorteile in der Logistik aufgrund der deutlich längeren Lagerfähigkeit der Bauteile. Es wird somit eine Prozesskettenverkürzung erreicht, die gleichzeitig Kosten einspart, die Produktionsqualität erhöht und das Bauteilhandling vereinfacht.

8. Schlussfolgerungen

Mit Class-A CFK Sichtbauteilen lässt sich der für eine nachhaltige Reduktion des CO2 Ausstoßes benötigte Leichtbau aufgrund der sportlichen Anmutung des Werkstoffes kundenwirksam inszenieren. Für die Großserienproduktion solch hochwertiger CFK Bauteile werden bisher lange Prozessketten benötigt, um die automobilen Class-A Oberflächenanforderungen zu erfüllen. Die Prozessketten für Class-A CFK Bauteile sind interdisziplinär und bestehen aus Textiltechnik, Polymerchemie, Faserverbundherstellung und Oberflächenveredelung. Optimierungsansätze für die Output-Steigerung oder Verbesserung der Oberflächenqualität fokussierten sich bisher jedoch überwiegend auf eine Technologie oder maximal zwei angrenzende Technologien. Der Fokus der Forschungsarbeiten und des verarbeitenden Produktionsumfelds lag dabei hauptsächlich auf der Oberflächenqualität des Endbauteils.
Eine besondere technische Herausforderung stellt die für Faserverbundbauteile charakteristische Neigung zu Faserdurchzeichnungen dar. Trotz des seit Jahrzenten etablierten Gebrauchs von Faserverbundwerkstoffen, sowohl in der Luft- und Raumfahrt als auch im Automobilbau wurde bisher keine normierte Definition für das Phänomen etabliert. Gerade im englischen Sprachraum existieren etliche Fachbegriffe für dasselbe Phänomen (*Fiber Print-Through, Fiber Read-out, Telegraphing, Fiber Strike Through, Surface Waviness oder Linear Voids*). Da sich die Struktur des Textils an die Bauteiloberfläche durchzeichnet, ist der Begriff Fiber Print-Through, zu Deutsch Faserdurchzeichnung, technisch der passendste Begriff. Dabei ist das Muster der Faserdurchzeichnung abhängig vom Lagenaufbau des CFK-Bauteils. Bei Mehrschichtverbunden können primäre Faserdurchzeichnungen der Sichtlage (engl. Primary Print-Through, kurz PPT) und sekundäre Faserdurchzeichnungen tieferliegender Textillagen (engl. Secondary Print-Through, kurz SPT) unterschieden werden. Während die Ausprägung des PPT hauptsächlich vom chemischen und thermischen Schrumpfverhalten der Matrix und der Textilstruktur abhängig ist, sind die Durchzeichnungseffekte des SPT hauptsächlich auf die Homogenität der textilen Verstärkungslagen zurückzuführen und durch die Prozessführung nicht beeinflussbar.

Diese Arbeit hatte somit das Ziel ein tiefergehendes Verständnis der material- und prozesstechnischen Wirkzusammenhänge entlang der gesamten Prozesskette von duromeren Class-A Sichtcarbonkomponenten im Automobilbau zu ermöglichen. Als Zielbauteil wurde ein im Nasspressverfahren hergestelltes Class-A CFK-Dach mit großer Fläche und geringer geometrischer Komplexität gewählt. Hierfür wurde ein seriennahes Nasspress-Versuchswerkzeug konzipiert und umgesetzt, welches das CFK-Dach des BMW 8er G15 im Maßstab 1:2 abbildet. Die interdisziplinäre Prozesskette dieses Class-A CFK

Bauteils wurde dabei als Ganzes betrachtet, um die das optimale Zusammenspiel aus verschiedenen Optimierungsansätzen zu erreichen. Als Ergebnis dieser Arbeit wurden neue Stellhebel abgeleitet, die es ermöglichen, die eingesetzten Material- und Prozessparameter kostenoptimal aufeinander abzustimmen. Es wurden drei Ansätze zur Prozess- und Kostenoptimierung für duromere Class-A CFK Sichtbauteile in Großserienprozessen behandelt:

1. Entwicklung einer Prüfmethode zur flächenhaften Quantifizierung der Ausprägung von Faserdurchzeichnungen entlang der gesamten Prozesskette eines Class-A CFK Bauteils.
2. Erhöhung der Produktivität (Output) durch die gezielte Abstimmung von Material- und Prozessparametern bei gleichbleibender Bauteilqualität (Oberflächenglätte).
3. Reduzierung der Herstellkosten durch die Prozessintegration von Trennfolien und den damit verbundenen Entfall von kostenintensiven Lackvorbehandlungsschritten.

1. Entwicklung einer Prüfmethode zur flächenhaften Quantifizierung der Ausprägung von Faserdurchzeichnungen entlang der gesamten Prozesskette eines Class-A CFK Bauteils.

Nach einer theoretischen Betrachtung der Prozesskette in Kap. 4 wurde zunächst eine Prüfmethode entwickelt, die es ermöglicht, die Ausprägung der Faserdurchzeichnung entlang der gesamten Prozesskette – von der Oberflächenwelligkeit des textilen Halbzeugs bis zum lackierten Endbauteil – zu quantifizieren. Ziel war es dabei eine möglichst starke Korrelation zwischen der visuellen Wahrnehmung und einem physikalischen Kennwert zu ermitteln. Für die primäre Faserdurchzeichnung wurde daher der amplitudensensitive Kennwert Sa ermittelt. Der Sa-Wert ist in der DIN EN ISO 25178-2 [85] genormt und beschreibt den arithmetischen Mittelwert der absoluten Ordinatenwerte innerhalb des definierten flächigen Messbereichs einer 3D-Topografie. Somit ist es erstmals möglich die Ausprägung der Faserdurchzeichnung mit einem flächenbezogenen Kennwert zu quantifizieren. Dabei ist es mit Messgeräten wie dem Weißlicht Profilometer FRT MicroProf 100/200 möglich, sowohl die Oberflächentopografie der textilen Halbzeuge als auch der lackierten Bauteile mit Messflächen von bis zu 300 x 300 mm zu erfassen. Zudem erlaubt die gröbere Oberflächenstruktur der trockenen textilen Halbzeuge eine Erfassung der Oberflächentopografie mit schnelleren, produktionsnahen Messsystemen mit Lasertriangulationssensor [117], die innerhalb weniger Minuten Messflächen von bis zu 1 m² erfassen können. Die 3D-Topografiedaten beider Messgeräte können dabei nach DIN EN ISO 25178-2 und dem Kennwert Sa ausgewertet werden.

Wie bereits in mehreren Vorarbeiten [7, 9, 15, 15, 15, 18, 18, 30, 38, 39, 82] beschrieben, hängt das Muster der durch Faserdurchzeichnungen verursachten Gestaltabweichung der Oberfläche von Faserverbundkunststoffen von der eingebetteten Textilstruktur ab. Diese erzeugt in Abhängigkeit der Textilart und der eingesetzten Fadenbreite einen charakteristischen Wellenlängenbereich. Diesen gilt es zu ermitteln, um eine spezifische Quantifizierung der Ausprägung der Faserdurchzeichnung ohne Störeinflüsse zu ermöglichen. Die charakteristische Wellenlänge der in dieser Arbeit betrachteten 3k Carbonfaser Leinwandgewebesichtlage liegt aufgrund einer Fadenbreite zwischen 1,6-2,0 mm bei einem daraus resultierenden Wellenlängenspektrum der Faserdurchzeichnung von 1,5-2,5 mm. Die Auswertung nach DIN EN ISO 25178-2 ermöglicht es die messtechnisch erfasste Primäroberfläche über eine sogenannte Skalenbegrenzung der Wellenlängen zu filtern. In dieser Arbeit wurde als Skalenbegrenzung der normierte S-L-Filter verwendet. Der daraufhin benannte PPT-Filter ist so gewählt, dass die von einem 3k CF-Leinwandtextil verursachten Welligkeiten hervorgehoben werden. Anteile mit größeren und kleineren Wellenlängen werden ausgeblendet.

PPT-Filter
S-Filter: 1500µm (1,5mm); L-Filter 2500µm (2,5mm)

Somit ermöglicht der normierte Kennwert Sa in Verbindung mit dem empirisch validierten PPT-Filter eine reproduzierbare Quantifizierung der Ausprägung der Faserdurchzeichnung entlang der betrachteten Prozesskette von Class-A CFK Bauteilen mit 3k Leinwandgewebesichtlage. Dabei spiegelt der physikalische Kennwert den Anstieg der Ausprägung von Faserdurchzeichnungen feiner wider als die visuelle Wahrnehmung des Betrachters. Es können somit präzisere Wirkzusammenhänge und Korrelationen erfasst und analysiert werden. Dabei ist hervorzuheben, dass ein anderer Lagenaufbau, vor allem eine andere Sichtlage, für eine ähnlich präzise Aussage eine wellenlängenspezifische Anpassung der S-L-Filterung benötigt. Daher wird resultierend aus den Ergebnissen dieser Arbeit die Empfehlung ausgesprochen, bei der Quantifizierung von Faserdurchzeichnungen mit physikalischen Kennwerten neben dem Kennwert selbst immer die verwendete Filtereinstellung der skalenbegrenzten Oberfläche mitzuführen. Ein Kennwert ohne diese Information ist, wie in dieser Arbeit gezeigt, nicht belastbar aussagefähig.
Abgeleitet aus den Erkenntnissen dieser Arbeit können somit folgende Class-A Grenzwerte für die relevanten Prozessschritte eines Class-A CFK Bauteils mit 3k CF-Leinwandgewebesichtlage gesetzt werden (Sa-Wert mit PPT Filter L=1500 µm, S=2,5 mm):
Trockenes textiles Halbzeug Sa <5,30 µm; unlackiertes Rohbauteil Sa < 0,15 µm; lackiertes Endbauteil Sa < 0,08 µm.

2. Erhöhung der Produktivität (Output) durch die gezielte Abstimmung von Material- und Prozessparametern bei gleichbleibender Bauteilqualität (Oberflächenglätte).

Über die Möglichkeit der prozesskettenbegleitenden Quantifizierung der Ausprägung der Faserdurchzeichnung von Class-A CFK Bauteilen wurde untersucht, inwieweit daraus material- und prozesstechnische Kenngrößen identifiziert werden können, die eine Produktivitätssteigerung (Output) bei gleichbleibender Oberflächenqualität erlauben. Da am Beispiel des G15 CFK-Dachs eine großserientechnische Prozesskette betrachtet wurde, liegen hierfür bereits detaillierte Spezifikationen und Qualitätsanforderungen an Halbzeuge, Zwischenprodukte und das Class-A Endbauteil vor.

Reduzierung der PPT-Ausprägung durch einen optimierten Öffnungsfaktor

Im ersten Schritt war das Ziel daher innerhalb der vorhandenen Spezifikationen Einflussgrößen auszuwählen, die eine Erhöhung der Produktivität ohne Veränderung der Prozesskette selbst ermöglichen. Als technische Kenngröße wurde hierfür der Öffnungsfaktor der 3k Leinwandgewebe-Sichtlage ausgewählt und dessen Auswirkung auf eine mögliche Zykluszeitreduzierung im Nasspressprozess betrachtet. Der Öffnungsfaktor ist ein gängiges und spezifiziertes Qualitätsmerkmal für CF-Leinwandgewebe. Er beschreibt bei der Draufsicht auf das Textil das Verhältnis aus fadenfreier (offener) Fläche zu der mit Kett- und Schussfaden belegten Fläche in Prozent. Als Haupteinflussgrößen auf den Öffnungsfaktor wurden die Fadendichte (Anzahl Fäden bzw. Rovings pro cm) und der RAR (Roving Aspect Ratio bzw. Höhe zu Breite Verhältnis) identifiziert. Im Gegensatz zum RAR, der nur die Breite und Höhe ansonsten gleicher Rovings beschreibt, hat die Fadendichte einen direkten Einfluss auf das Flächengewicht. Somit ist bei gleichbleibendem Flächengewicht der Hauptstellhebel für den Öffnungsfaktor die Veränderung der Rovingbreite über den RAR. Über die numerische Betrachtung eines repräsentativen Volumenelements des betrachteten CFK-Dachs wurde gezeigt, dass mit sinkendem RAR auch der Öffnungsfaktor abfällt. Für die in CF-Leinwandgeweben eingesetzten 3k Rovings mit einer üblichen Breite zwischen 1,6-2,0 mm ergeben sich so RAR Werte von 1,0 -0,6 und daraus resultierend Öffnungsfaktoren von 0-4 %. Weiterhin wurde über die eingesetzte FE-Methode ermittelt, dass ein steigender Öffnungsfaktor zu einer Erhöhung des Sa-Wertes führt, was einer stärker werdenden Ausprägung der Faserdurchzeichnung (PPT-Effekt) entspricht.

Zur Validierung der numerisch erzeugten Erkenntnisse wurden zwei freiverkäufliche 3k CF-Leinwandgewebe, die die geforderten Class-A Spezifikationen erfüllen, vermessen und der Öffnungsfaktor über die in Kap. 4.2 beschriebene Formel ermittelt. Für die Variante NP_A_3k wurde ein Öffnungsfaktor von 3,2 %, für die Variante NP_B_3k ein Öffnungsfaktor von 0,5 % bestimmt. Dabei wurde beobachtet, dass trotz derselben Ausgangsbreite der Rovings die

Schussfäden bei beiden Varianten aufgrund der geringeren Fadenspannung breiter sind als die Kettfäden. Dies führt zu einem unterschiedlichen RAR von Kette und Schuss. Somit ist auch die Wellenlänge der erwarteten Faserdurchzeichnung richtungsabhängig. Diese Begebenheit bestätigt den Vorteil der in dieser Arbeit verwendeten flächenbezogenen Auswertemethodik nach DIN EN ISO 25178-2 mit dem Kennwert Sa und einem definierten Wellenlängenbereich im Vergleich zu der sonst üblichen Profillinienauswertung. Mit einem Sa-Wert von 4,10 µm hat die Variante NP_B_3k (ÖF 0,5 %) eine um 18 % geringere Oberflächenwelligkeit als die Variante NP_A_3k (ÖF 3,2 %) mit Sa = 5,01 µm. Das aufgrund breiterer Rovings enger gewobene NP_B_3k Leinwandgewebe hat somit eine glattere Oberfläche als das Leinwandgewebe NP_A_3k mit größerem Öffnungsfaktor.

Um den Einfluss auf die resultierende Ausprägung der Faserdurchzeichnung (PPT-Effekt) im CFK-Bauteil und das mögliche Potential einer Aushärtezeitreduzierung zu ermitteln, wurden aus den vermessenen textilen Halbzeugen mit ansonsten gleichem Lagenaufbau im Nasspressverfahren (Kap. 5.1.1) CFK Bauteile bei Prozesstemperaturen zwischen 105-130°C hergestellt. Die ausgefrästen Messflächen der CFK Bauteile wurden mit einem Weißlicht Profilometer vermessen und die PPT-Ausprägung über Sa-Werte ermittelt. So wurde gezeigt, dass mit der aufgrund des geringeren Öffnungsfaktors glatteren NP_B_3k Sichtlage Class-A fähige CFK Rohbauteile (Sa < 0,15 µm, siehe Kap. 5.2.3) bei einer um 10°C höheren Prozesstemperatur und um 124s kürzeren Zykluszeit gefertigt werden können als mit der NP_A_3k Sichtlage mit größerem Öffnungsfaktor. Die Oberflächenqualität ist dabei bezüglich der Faserdurchzeichnung sowohl messtechnisch (beide Sa von 0,14 µm) als auch von der visuellen Wahrnehmung als gleichwertig anzusehen. Die für die Zykluszeitverkürzung notwendige Temperaturerhöhung wird durch das glattere Textil ausgeglichen und ermöglicht dabei eine Taktzeiteinsparung von 24,3 %.

Das bedeutet, dass nur über die Anpassung des Öffnungsfaktors der Sichtlage eine Erhöhung der Produktivität (Output) um 28,6 % ermöglicht wird. Hervorzuheben ist dabei, dass der Öffnungsfaktor über Standard Prozessparameter der Textilherstellung beeinflusst werden kann, wodurch es folglich möglich ist, diese Erkenntnisse bei Optimierungen eines beliebigen Textilherstellers einzusetzen.

Zudem konnte mit der Auswertemethodik die Veränderung des thermischen Ausdehnungsverhaltens bei Prozesstemperaturen oberhalb der Glasübergangstemperatur T_g der Matrix nachgewiesen werden. Dabei wurde festgestellt, dass sich der thermische Ausdehnungskoeffizient der Matrix bei Überschreiten der T_g um bis zu Faktor drei erhöht, was zu einem überproportionalen Anstieg der Sa-Werte im fertigen CFK-Bauteil führt. Daraus wurde die Prozessgrenze von $T_g \geqq T_{Werkzeug}$ für Class-A CFK Bauteile abgeleitet. Aus den gesetzten Prämissen $T_g \geqq T_{Werkzeug}$ und T_g >111°C (Spezifikation CFK-Dach) ergibt sich mit dem eingesetzten Dow Voraforce 5300 Harzsystem ein stabiles Prozessfenster, in dem auch

bei einer Werkzeugabkühlung auf bis zu 110°C, CFK-Dächer (Rohbauteile) hergestellt werden können, die ohne Absenken der Produktivität sowohl alle mechanischen als auch optischen Class-A Anforderungen erfüllen.

Ausgleich des PPT-Effekts durch kalthärtende Beschichtungen

Mit Hilfe der entwickelten Prüf- und Auswertemethodik wurde weiterhin untersucht, ob es möglich ist Rohbauteile, die die Class-A Grenzwerte für Faserdurchzeichnungen deutlich überschreiten, durch eine nachträgliche Beschichtung zu Class-A Bauteilen zu veredeln. Dies ist mit einer konventionellen 2K Lackierung und thermischer Lacktrocknung bisher nicht möglich. Erklären lässt sich dies durch den von Kia et al. beschrieben Effekt, dass sich beim erneuten Erhitzen eines FVK-Bauteils dessen Faserabzeichnung aufgrund der thermischen Matrixausdehnung verringert, wodurch die Bauteiloberfläche wieder geglättet wird [38]. Dies verursacht bei der thermischen Lacktrocknung ein Aushärten des glatten Lackfilms auf einer glatteren Oberfläche als bei Raumtemperatur. Bei der Abkühlung nach der Lacktrocknung zieht sich die Matrix wieder zusammen wodurch die dünne Lackschicht in die Vertiefungen der Faserdurchzeichnungen gezogen wird. Dabei wird Faserdurchzeichnung durch die Schichtdickenerhöhung der Lackierung zwar abgemildert, jedoch nicht vollständig ausgeglichen. Ziel der Untersuchungen war es deshalb, den ungewollten Effekt der Matrixausdehnung bei der thermischen Lacktrocknung durch ein kalthärtendes Lacksystem zu umgehen. Es wurde gezeigt, dass es möglich ist durch den Einsatz eines UV-härtenden Lacks den im Nasszustand glatten Oberflächenzustand auch nach der Lacktrocknung beizubehalten. Geprüft wurden bei 130°C Prozesstemperatur im Nasspressverfahren hergestellte CFK Bauteile. Die Prozessparameter entsprechen dabei denen von Strukturbauteilen ohne Class-A Anforderungen, weshalb die Rohteile erwartungsgemäß den Class-A Grenzwert von Sa < 0,15 µm mit Sa = 0,45 µm deutlich überschreiten. Ein Teil der Bauteile wurde in einer Serienlackieranlage für Class-A CFK Dächer mit einer Schichtdicke von 140 µm lackiert und thermisch ausgehärtet. Der andere Teil wurde mit dem UV-härtenden Lacksystem mit derselben Schichtdicke beschichtet und bei Raumtemperatur vernetzt. Die konventionell lackierten Bauteile erfüllen dabei nicht die Class-A Anforderungen, weil sich die Faserdurchzeichnung durch den Lack durchschlägt und der Grenzwert von Sa < 0,08µm mit einem Sa-Wert von 0,11 µm überschritten wird. Die Bauteile mit UV-härtendem Lack unterschreiten mit einem Sa-Wert von 0,045 µm hingegen den Class-A Grenzwert von 0,08 µm. Da das Substrat bei der Lacktrocknung nicht erhitzt wird, verändert sich die Oberflächenglätte nach der Aushärtung nicht mehr. Das lackierte Bauteil erfüllt trotz „schlechtem“ Rohbauteil die Class-A Anforderungen und ist sogar glatter als die Class-A Referenzbauteile.

Das Potential der Produktivitätssteigerung durch eine kürzere Aushärtezeit ist dabei sehr groß. Für eine Werkzeugtemperatur von 130°C erreicht die DOW Voraforce 5300 EP-Matrix eine T_g von 111°C bei einem Aushärtegrad von α = 0,964 nach 187s. Pro Stunde können somit theoretisch 19 Bauteile hergestellt werden, was einer Steigerung um 171 % im Vergleich zum Referenzprozess entspricht. Somit können bei einer reinen Aushärtezeitabhängigen Gesamtzykluszeit je 7h Schicht bis zu 133 Class-A CFK Bauteile in einem Werkzeug gefertigt werden. Theoretisch sind je nach Schichtmodell so Stückzahlen von 60-100.000 Einheiten im Jahr möglich, was bisher nur für Strukturbauteile ohne Class-A Anforderung möglich war. Das Potential ist damit sehr groß.

Es bleiben jedoch noch technische Herausforderungen, die für einen tatsächlichen Serieneinsatz abgesichert werden müssen. Aktuell erfüllen UV-härtende Lacksystem nur im Interieur die Anforderungen der Automobilindustrie. Der Hauptgrund hierfür sind die konkurrierenden Anforderungen an die Lackierung. Die Epoxidharzmatrix soll durch einen UV-Blocker geschützt werden und dabei trotzdem durch UV-Strahlung vernetzen. Hierfür ist es notwendig die kritischen Wellenlängen für die Photooxidation der EP-Matrix zu ermitteln und den Lack so einzustellen, dass er bei einem anderen Wellenlängenspektrum aushärtet. Somit würden Lichtschutzadditive den lichtinduzierten Aushärteprozess nicht behindern. Zudem ist für ein UV-härtendes Lacksystem eine andere Struktur der Lacklinie notwendig, weshalb eine Umsetzung vor allem beim Bau einer neuen Lacklinie betriebswirtschaftlich sinnvoll wäre. Ausgehend von den Ergebnissen dieser Arbeit wird dieser Ansatz für Class-A CFK-Dächer weiterverfolgt. Eine Umsetzung scheint mittelfristig umsetzbar.

3. Reduzierung der Herstellkosten durch die Prozessintegration von Trennfolien und den damit verbundenen Entfall von kostenintensiven Lack- und Klebevorbehandlungsschritten.

Um eine Reduzierung der Herstellkosten durch eine Prozesskettenverkürzung zu ermöglichen wurde die Prozesskette für Class-A CFK Bauteile ganzheitlich betrachtet. Dies ist notwendig, da durch eine Prozessintegration immer eine Erhöhung des Aufwands in diesem Prozessschritt stattfindet, was bei einer Einzelbetrachtung nicht zielführend wäre. Erst durch die ganzheitliche Betrachtung wird das insgesamt größere Potential offengelegt, das in einem vorherigen oder nachfolgenden Prozessschritt gehoben werden kann.

Um die Entformbarkeit vom duromeren CFK Bauteilen zu gewährleisten, werden üblicherweise Trennmittel eingesetzt. Diese müssen für eine Lackier- und Verklebbarkeit abrasiv in einem zum Teil manuellen Vorbehandlungsprozess entfernt werden. Diese Vorbehandlungsschritte sind kostenintensiv und führen aufgrund des benötigten Schliffs häufig zu Nacharbeit aufgrund freigelegter Fasern und Poren. Der in dieser Arbeit verfolgte Ansatz beinhaltet daher den

prozessintegrierten Einsatz von Trennfolien mit dem Ziel trennmittelfreie CFK-Bauteile herzustellen und somit die Lack- und Klebevorbehandlung entfallen zu lassen. Die untersuchten dünnen (40-60 µm) und stark dehnbaren (<380 %) Folien bestehen dabei aus TPE (Thermoplastisches Elastomer) und verfügen über eine Plasma-Oberflächenbehandlung, die ein Anhaften von Harzsystemen verhindert. Für die Integration der Trennfolien in den Nasspressprozess werden beide Hälften des in Kap. 5.1.1 beschriebenen Werkzeugs mit Vakuum-Kreisläufen versehen. Die Folie wird dadurch vor dem eigentlichen Nasspressprozess als temporäre Werkzeughaut tiefgezogen. Der Nasspressprozess findet nach dem Tiefziehen der Folien unverändert und ohne Taktzeitverlust statt. Die Folien verbleiben nach dem Aushärten der Matrix auf dem Bauteil und dienen bis zur Lackierung bzw. Verklebung als Schutzverpackung. Auch das Handling wird erleichtert, da die Bauteile über den Folienspannrahmen automatisiert entnommen werden können.

Über Absicherungsversuche wurde die direkte Lackier- und Verklebbarkeit ohne Vorbehandlung nachgewiesen. Für die Prüfung der Lackhaftung wurden drei Bauteilzustände erzeugt und danach mittels dem für Class-A CFK-Dächer etablierten Skalpellschnittverfahren untersucht. Der Referenzzustand entspricht dabei einem trennmittelfreien CFK Bauteil, das nach einem Rohteilschliff mit dem konventionellen Lackaufbau (Primer + Klarlack) lackiert wurde. Die übrigen Bauteile wurden ohne Rohteilschliff direkt nach Entfernen der Trennfolie der automatisierten Lacklinie zugeführt. Um das volle Potential zu überprüfen wurde für den dritten Zustand auch der Primer weggelassen und dafür die Lackschichtdicke erhöht, um die Sollschichtdicke von 140 µm zu erreichen. Die Lackhaftung der so erzeugten Bauteile wurde direkt nach dem Lackieren und nach einer Sonnensimulation mittels Xenonkurzbewitterung geprüft. Dabei wurde für alle trennmittelfreien Bauteile eine sehr gute Lackhaftung mit 0 mm Delamination bei der initialen Prüfung ermittelt. Nach der starken UV-Belastung der Xenontests konnte nur für die Bauteile ohne Primer eine Lackenthaftung mit 5-10 mm Delamination festgestellt werden. Die Proben mit dem kompletten Lackaufbau inklusive Primer hatten unabhängig eines vorangehenden Schliffs unverändert eine sehr gute Lackhaftung und 0mm Delamination. Es wurde somit nachgewiesen, dass durch die eingesetzten, prozessintegrierten Trennfolien direktlackierbare CFK-Bauteile erzeugt werden können, die einen Entfall des Trennmittels und der Vorbehandlung über einen Rohteilschliff ermöglichen.

Da im konventionellen Nasspressprozess auch für eine sichere Verklebung das Trennmittel abrasiv von den Klebeflanschbereichen der Bauteilrückseite entfernt werden muss, wurde zusätzlich die direkte Verklebbarkeit ohne Vorbehandlung untersucht. Als Prüfmethode wurde ein Peeltest und eine Zugscherfestigkeitsprüfung angelehnt an die DIN EN 1465 durchgeführt. Für die Prüfung der direkten Verklebbarkeit ohne Vorbehandlung wurden trennmittelfreie CFK-Bauteile in zwei Kampagnen mit einem Abstand von sechs Monaten gefertigt. Dadurch wird direkt das Potential einer deutlichen Verlängerung der Lagerdauer (bisher <30 Tage) durch

die schützende Trennfolie untersucht. Alle getesteten trennmittelfreien CFK-Bauteile erfüllen die Anforderungen sowohl beim Peeltest als auch bei der Zugscherfestigkeitsprüfung ohne einer abrasiven Vorbehandlung durch einen manuellen Schliff. Weder eine Lagerdauer von sechs Monaten noch eine Zusatzbeanspruchung durch eine Klimawechselbelastung und Kondenswasser-Konstantklimabelastung haben einen negativen Einfluss auf das Ergebnis. Es wird bei beiden Prüfmethoden durchgehend ein kohäsiver Bruch mit Note 1 im Klebstoff beobachtet. Die Bruchspannung T_{Max} liegt ebenfalls bei allen geprüften Proben innerhalb der definierten Sollwerte von 5-10 MPa.

Für die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung wurden zunächst die relativen Herstellkosten in zwei Stufen miteinander verglichen. Stufe 1 betrachtet rein den prozessintegrierten Einsatz von Trennfolien und den Entfall der Lack- und Klebevorbehandlung. Stufe 2 berücksichtigt zudem die Verringerung der Nacharbeit durch aufgeschliffene oberflächennahe Poren von 10 % auf 1 %. Im Anschluss wurde die jeweils erzielbare Rendite unter Berücksichtigung der höheren Werkzeug- und Anlaufkosten über die dynamische Investitionsrechnung (interner Zinsfuß) ermittelt. Die Kalkulation ergibt für den prozessintegrierten Einsatz von Trennfolien für im Nasspressverfahren hergestellte Class-A CFK-Dächer einen Herstellkostenvorteil von 5 % ohne Berücksichtigung der potenziell reduzierten Zweitlackquote durch nicht aufgeschliffene Poren (Stufe 1). Berücksichtigt man eine Reduzierung der schliffbedingten Zweitläufer (Stufe 2), erhöht sich der Vorteil auf 7,7 % pro Bauteil. Das Gesamtherstellkostenpotential von 9,3 % wird aufgrund der Kostenerhöhung im trennfolienintegrierten Nasspressprozess um 1,6 % abgesenkt. Für das ermittelte Herstellkostenpotential wird auf Basis der Kapitalwertmethode die erzielbare Rendite (Verzinsung des eingesetzten Kapitals) für eine Projektlaufzeit von zehn Jahren und einem Gesamtvolumen von 135.000 Einheiten berechnet. Der Zeitraum wird dabei in vier Phasen von der Industrialisierung über den Produktionsanlauf mit nachfolgender Serienproduktion und einem Produktionsauslauf unterteilt. Die getätigten Investitionen amortisieren sich bei der angenommenen Stufe 1 (ohne Berücksichtigung der Reduzierung von Nacharbeit) nach vier Jahren. In Stufe 2 wird die Rendite bereits im dritten Jahr nach Anlauf der Produktion positiv. Am Ende der Projektlaufzeit ergibt sich eine Gesamtrendite von 27 % für die Stufe 1 und 37 % für Stufe 2.

Insgesamt wird gezeigt, dass über eine Prozessintegration von Trennfolien kostenintensive manuelle Tätigkeiten in Nachfolgeprozessen eingespart werden können. Erst eine Prozesskostenerhöhung durch die Integration von Trennfolien im Pressverfahren ermöglicht die Einsparung im späteren Prozessabschnitt Lackierung. Es wird dabei bestätigt, dass Kostenoptimierungen dieser Höhe in bestehenden Prozessen vor allem dann möglich sind, wenn Prozessketten trotz der Interdisziplinarität als Ganzes betrachtet werden. Die in der Praxis übliche und zum Teil notwendige organisatorische Trennung der einzelnen Prozessschritte Halbzeugherstellung, Bauteilherstellung und Oberflächenveredelung

erschwert es jedoch solche Potentiale auf Anhieb sichtbar zu machen. Der hier untersuchte Ansatz zeigt jedoch, dass sich eine ganzheitliche Betrachtung lohnen kann. Gleichzeitig ergeben sich als Nebenprodukt Vorteile in der Logistik aufgrund der deutlich längeren Lagerfähigkeit der Bauteile. Es wird somit eine Prozesskettenverkürzung erreicht, die gleichzeitig Kosten einspart, die Produktionsqualität erhöht und das Bauteilhandling vereinfacht.

9. Zusammenfassung und Ausblick

In dieser Arbeit wurde gezeigt, dass auch in einer hochautomatisierten Großserienproduktion von im Nasspressverfahren hergestellten Class-A CFK-Dächern durch eine ganzheitliche Betrachtung der Prozesskette und der Wirkzusammenhänge zwischen Material- und Prozessparametern signifikante Einsparpotentiale und Stückzahlerhöhungen möglich sind. Mit Hilfe der entwickelten Prüfmethode für die Quantifizierung der Faserdurchzeichnung an Class-A CFK Bauteilen entlang der Prozesskette können Optimierungsmaßnahmen direkt an der Stelle des Prozesses gemessen werden, an der sie wirken. Durch die bedarfsorientierte Optimierung des Textilparameters „Öffnungsfaktor“ kann über eine glattere Sichtlage direkt die Oberflächenqualität von Class-A CFK Bauteilen verbessert und gleichzeitig eine Taktzeitverkürzung erreicht werden. Die Maßnahme ist kurzfristig und mit geringem Absicherungsaufwand in der Halbzeugherstellung und Bauteilproduktion umsetzbar. Dabei wurde auch gezeigt, dass aufgrund der deutlichen Erhöhung des thermischen Ausdehnungskoeffizienten die Prozesstemperatur bei Entnahme stets unter der T_g liegen sollte. Die Prozessgrenze $T_{Wz} \leq T_g$ ermöglicht es, die minimale Zykluszeit bei optimaler Oberflächenqualität zu erreichen.

Über die entwickelte Prüfmethode wurde auch gezeigt, dass sehr starke Faserdurchzeichnungen von Rohbauteilen über eine kalthärtende Beschichtung mit UV-Lacken ausgeglichen werden können. Somit könnten Bauteile bei Temperaturen und Zykluszeiten von Strukturbauteilen hergestellt werden, die bei einer thermisch härtenden Lackierung keine Erfüllung der Class-A Anforderungen ermöglichen würden. Für einen Serieneinsatz müssen UV-Lacke jedoch alle Exterieuranforderungen erfüllen, wofür weiterhin Entwicklungsarbeit, vor allem im Bereich UV-Schutz des Rohbauteils, zu leisten ist. Eine Umsetzung ist somit auch aufgrund der Installation einer UV-Lacklinie mittelfristig innerhalb der nächsten 3-5 Jahre realistisch.

Der Ansatz der Prozessintegration von Trennfolien zur Herstellung von trennmittelfreien, direkt lackier- und verklebbaren Class-A CFK Bauteilen ist ebenfalls mittelfristig umsetzbar. Hierfür müssen die Erkenntnisse dieser Arbeit aus dem entwickelten seriennahen Versuchswerkzeug auf ein CFK-Seriendach übertragen werden. Die Herausforderung besteht hierbei vor allem in der Finalisierung des Automatisierungskonzepts für das Folienhandling bei der Entnahme der Bauteile und der Absicherung der langfristig gleichbleibenden Folienqualität.

Der größte Stellhebel zur Kostenoptimierung und vor allem Erreichung höherer Volumen besteht somit in der Verbindung zwischen dem Einsatz von Trennfolien und der Lackierung mit UV-härtenden Lacken. Diese Konstellation birgt das Potential Class-A CFK Bauteile in Stückzahlen von Strukturbauteilen zu produzieren und dabei trotz der dafür benötigten hohen Prozesstemperaturen durch den Entfall des Rohteilschliffs eine minimale Nacharbeitsquote zu

erreichen. Die Erhöhung der Erstläuferquote in Verbindung mit dem Entfall des Trennmittels führt dabei trotz dem Einsatz von Kunststofffolien zu einer nachhaltigeren Produktion. Da die Trennfolie bis zur Lackierung bzw. Verklebung als Schutzverpackung auf dem Bauteil verbleibt, können zudem Logistikprozesse vereinfacht und Lagerzeiten erhöht werden, was ebenfalls eine signifikante Kostenreduktion ermöglicht. Für eine weitere Steigerung der Nachhaltigkeit ist es auch denkbar, anstatt Trennfolien, die lediglich als Prozesshilfe zum Entfall der Lackvorbereitung und als Transportschutz dienen, Folien einzusetzen, die auf dem Bauteil verbleiben und die finale Sichtoberfläche bilden. Damit ist ein kompletter Entfall der Lackierung erreichbar und der damit verbundene intensive Einsatz von Medien (Strom, Gas, Wasser) und Material (Lack, Chemikalien) sowie ihre Emissionserzeugung (Partikel, VOC, CO2, Schall und Geruch) können vollends vermieden werden. Aus Hersteller- und Kundensicht würde die werkzeugfallende Folierung außerdem bisher in Großserienprozessen nicht darstellbare Designfreiheiten und damit die Möglichkeiten zur kosteneffizienten Individualisierung und Differenzierung ermöglichen.

Zusammengefasst tragen die Erkenntnisse dieser Arbeit wesentlich dazu bei, dass duromere Class-A CFK Sichtbauteile zukünftig in deutlich höheren Stückzahlen bei gleichzeitiger Reduktion von Prozesszeiten, Ressourcen und Kosten hergestellt werden können. Auf diese Weise wird Leichtbau und die damit verbundene CO2-Reduktion im Fahrbetrieb mit sichtbaren Außenhautkomponenten für Fahrzeugsegmente mit höheren Absatzvolumen verfügbar und kann so einen wichtigen Beitrag zur Nachhaltigkeit im Fahrzeugbau leisten.

Literaturverzeichnis

[1] BMWi - Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie: Bekanntmachung des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWi) zur Förderung von Forschungsprojekten auf dem Gebiet: „Leichtbaukonzepte für Straßen- und Schienenfahrzeuge". https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/B/bekanntmachung-zur-foerderung-von-forschungsprojekten-auf-dem-gebiet-leichtbaukonzepte-strassen-schienen-fahrzeuge.pdf?__blob=publicationFile&v=9, abgerufen am: 05.01.2021

[2] Schlosser, A., Knab, D., Baban, S. C., Seidel, P., Knoblinger, T. u. Lök, C.: After the hype: Where is the carbon car?, 2018. https://www.adlittle.com/en/insights/viewpoints/after-hype-where-carbon-car, abgerufen am: 17.04.2020

[3] Henke Thomas, Echler, Eric, Metzger, Dominik: Recent Development in the Field of CRFP. Sampe Europe Summit 2019. Paris 2019

[4] BMW Group: Pressemeldung - BMW Group bleibt weltweit führender Premium-Automobilhersteller. München 2018

[5] BMW AG: BMW 8er Coupe und Cabrio Preisliste - The 8. 2020. https://www.press.bmwgroup.com/deutschland/article/detail/T0296571DE/das-bmw-8er-coup%C3%A9-und-bmw-8er-cabriolet-preisliste-fuer-deutschland?language=de, abgerufen am: 18.04.2020

[6] Metzger, D., Meeß, J., Heine, M. u. Henke, T.: Assessment of Secondary Fiber Print-Through Effects on Class-A CFRP Parts Produced with Highly Cost Efficient Processes. Selected, peer reviewed papers from the 22nd Symposium on Composites, June 26-28, 2019, Kaiserslautern, Germany. Key Engineering Materials 809 (2019), S. 569–574

[7] Feraboli, P. u. Masini, A.: Development of carbon/epoxy structural components for a high performance vehicle. Composites Part B: Engineering 35 (2004) 4, S. 323–330

[8] Dickson, G. R. u. McIlhagger, R.: Assessing the surface finish of polymer composite components. International Journal of Machine Tools and Manufacture 32 (1992) 1-2, S. 51–56

[9] Brosius, D.: Corvette gets leaner with carbon fiber hood, 2004. https://www.compositesworld.com/articles/corvette-gets-leaner-with-carbon-fiber-hood, abgerufen am: 01.02.2020

[10] AVK–Industrievereinigung Verstärkte Kunststoffe e. V.: Handbuch Faserverbundkunststoffe/Composites. Grundlagen, Verarbeitung, Anwendungen. Wiesbaden: Springer Vieweg 2014

[11] Chaudhari, R., Pick, M., Geiger, O., Schmidt, D., Elsner, P. u. Henning, F.: Compression RTM - A new process for manufacturing high volume continuous fiber reinforced composites. 5th International CFK-Valley Stade Convention. Stade 2011

[12] Rieber, G., Sorg, C., Vosshoff, H. u. Preussner, T.: Wet Compression Molding. From Structural to Exterior Parts. SAMPE Europe Conference & Exhibition 2017. Stuttgart 2017

[13] Braess, H.-H. u. Seiffert, U.: Vieweg Handbuch Kraftfahrzeugtechnik. Mit 122 Tabellen. ATZ/MTZ-Fachbuch. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag 2012

[14] Deutsches Lackinstitut: Dünn wie ein Haar - Der Aufbau einer Autolackierung. https://www.lacke-und-farben.de/magazin/automobil/duenn-wie-ein-haar-der-aufbau-einer-autolackierung/, abgerufen am: 18.04.2020

[15] Kia, H. G.: A Technique for Predicting Molding Conditions which Result in Class A Surfaces for Glass Fiber Reinforced Polymers. Journal of COMPOSITE MATERIALS, 22 (1988), S. 794–811

[16] Blinzler, M.: Werkstoff- und prozessseitige Einflußmöglichkeiten zur Optimierung der Oberflächenqualität endlosfaserverstärkter thermoplastischer Kunststoffe, Zugl.: Kaiserslautern, Univ., Diss., 2002. Kaiserslautern

[17] BYK-Gardner GmbH: Einführung Appearance, Geretsried. https://www.byk.com/fileadmin/byk/support/instruments/theory/appearance/de/Einfuehrung_Appearance.pdf, abgerufen am: 20.05.2020

[18] Hildebrandt, K.: Material- und prozesssprezifische Einflüsse auf Oberflächeneigenschaften von endlosfaserverstärkten Thermoplasten, Technische Universität Kaiserslautern Dissertation. Kaiserslautern 2015

[19] Kigle-Boeckler, G.: Surface Smoothness and its Influence on Paint Appearance. How to Measure and Control it? Coloring Technology for Plastics

[20] La Rie, E. R. de u. La Rie, E. R. de: The Influence of Varnishes on the Appearance of Paintings. Studies in Conservation 32 (1987) 1, S. 1

[21] Osterhold, M. u. Armbruster, K.: Moderne Oberflächenmeßverfahren für beschichtete Kunststoffteile-Oberflächenstruktur. Materialwissenschaften und Wcrkstofftechnik 28 (1997), S. 176–179

[22] Reuter, W.: Hochleistungs-Faser-Kunststoff-Verbunde mit Class-A-Oberflächenqualität für den Einsatz in der Fahrzeugaußenhaut. Zugl.: Kaiserslautern, Univ., Diss., 2001. IVW-Schriftenreihe, Bd. 19. Kaiserslautern: IVW 2002

[23] Schene, H.: Untersuchungen über den optisch-physiologischen Eindruck der Oberflächenstruktur von Lackfilmen, Universität Stuttgart Dissertation. Stuttgart 1989

[24] Beyerer, J., Puente León, F. u. Frese, C.: Automatische Sichtprüfung. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg 2016

[25] Bastawros, A. F., Speer, J. G., Zerafa, G. u. Krupitzer, R. P.: Effects of Steel Surface Texture on Appearance After Painting

[26] Dyckhoff, J. H.: Resin transfer moulding. Beitrag zur Verbesserung der Formteiloberflächenqualität = Resin transfer moulding. Zugl.: Aachen, Techn. Hochsch., Diss., 1995. Aachener Beiträge zur Kunststoffverarbeitung, Bd. 40. Aachen: Verl. der Augustinus-Buchh 1995

[27] BYK-Gardner GmbH: 20161005-BYK-Einfuehrung_Orange-Peel, S. 33–36

[28] Karsten, G. (Hrsg.): Handbuch der physiologischen Optik. Allgemeine Enzyklopädie der Physik, Bd. 9. Leipzig: Leopold Voss 1867

[29] Scheers, J., Vermeulen, M., De Maré. C. u. Meseure, K.: Assesment of Steel Surface Roughness and Waviness in Relation with Paint Appearance. Int. Journal of Mach. Tools Manufacturing 38 (1998), S. 647–656

[30] Feraboli, P., Masini, A. u. Bonfatti, A.: Advanced composites for the body and chassis of a production high performance car. International Journal of Vehicle Design 44 (2007) 3/4

[31] Hoffmann, H., Spur, G. u. Neugebauer, R.: Handbuch Umformen. Edition Handbuch der Fertigungstechnik. s.l.: Carl Hanser Fachbuchverlag 2012

[32] VDA - Verband der Automobilindustrie: Band 16 - Dekorative Oberflächen von Anbau- und Funktionsteilen im Außen- und Innenbereich von Automobilen. Qualitätsmanagement in der Automobilindustrie, Bd. 16. 2016

[33] BMW AG: Oberflächenklassifizierung und Bewertungszonen für lackierte Kraftfahrzeuge der BMW AG. (Internes Dokument BMW AG)

[34] BMW AG: Qualitätsvorschriften für CFK Bauteile und Class-A CFK Dächer. (Internes Dokument BMW AG)

[35] Ehrenstein, G. W. u. Pongratz, S.: Beständigkeit von Kunststoffen. Edition Kunststoffe. München: Hanser 2007

[36] Summerscales, J., Hoppins, C., Anstice, P., Brooks, N., Wiggers, J., Yahathugoda, D., Harper, A., Wood, C. u. Cooper, M.: In-Mold Gel Coating for Resin Transfer Moding. The 10th International Conference on Flow Processes in Composite Materials (2010)

[37] KrausMaffei: Surface RTM. https://www.kraussmaffei.com/de/unsere-verfahren/surface-rtm-s-rtm, abgerufen am: 04.11.2020

[38] Kia, H. G.: Modeling Surface Deformation of Glass Fiber Reinforced Composites. Joumal of COMPOSITE MATERIALS 20 (1986), S. 335–346

[39] Sanfeliz, J., Murthy, P. u. Chamis, C.: Computational Simulation of Surface Waviness in Graphite/Epoxy Woven Composites Due to Initial Curing. NASA Technical Memorandum 105313 (1992)

[40] Bergström, R., Piiroinen, O. u. Ylhäinen, A.: Improving surface quality in vacuum infused parts Nr. 3, 2008. https://www.materialstoday.com/composite-parts/features/improving-surface-quality-in-vacuum-infused-parts/, abgerufen am: 10.06.2020

[41] Haeffelin, D.: Verfahren zur Integration von Folien in den RTM-Prozess (resin transfer molding) für endlosfaserverstärkte Schalenteile, TU München Dissertation. München 2017

[42] Haider, M., Hubert, P. u. Lessard, L.: An experimental investigation of class A surface finish of composites made by the resin transfer molding process. Composites Science and Technology 67 (2007) 15-16, S. 3176–3186

[43] Harper, L. T.: Discontinuous Carbon Fibre Composites for Automotive Applications, University of Notthingham Dissertation. Notthingham August / 2006

[44] Herring, M. L., Mardel, J. I. u. Fox, B. L.: The effect of material selection and manufacturing process on the surface finish of carbon fibre composites. Journal of Materials Processing Technology 210 (2010) 6-7, S. 926–940

[45] Hochalter, J. D., Massarello, J. J., Maji, a. K. u. Fuierer, P. A.: The origins of fiber print-through in lightweight composite optics. Proceedings of SPIE 6289 (2006)

[46] Hopmann, C., Karatzias, C., Wagner, R., Boettcher, A. u. Fischer, K.: Production of CFRP components with clear surface layer in the PU spray impregnation process. AIP Conference Proceedings 1914 100001 (2017)

[47] Kraemer, M., Dauser, T., Middendorf, P. u. Bauernhansl, T.: Correlation between subjective perception and objective parameters for the characterisation of fibre print-through on surfaces of class A carbon fibre reinforced plastics via multidimensional scaling. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing 115 (2018), S. 166–174

[48] Kunze, J., Mahrholz, T. u. Sinapius, M.: Identification and quantitation of processing parameters controlling the surface quality of carbon fibre-reinforced composites. Journal of Reinforced Plastics and Composites 35 (2016) 8, S. 654–670

[49] Kuo, Y.-M., Lin, H.-J., Lee, Y.-H. u. Lai, W.-M.: Study of the decrease in print-through phenomenon on fiber-reinforced plastic material. Journal of Reinforced Plastics and Composites 30 (2011) 24, S. 1989–2001

[50] Lin, H.-J., Lai, W.-M., Huang, H.-D. u. Kuo, Y.-M.: Discussion on the Cause of Print-through Phenomenon of FRP and Several Improvement Methods. Journal of Composite Materials 44 (2010) 17, S. 2111–2126

[51] Massarello, J. J.: Fiber print-through mitigation technique for composite mirror replication. Journal of Composite Materials 45 (2006) 12, S. 123401

[52] Michaeli, W. u. Skrodolies, K.: Verbesserung der Oberflächeneigenschaften von SMC-Bauteilen mit Hilfe der Prozesssimulation. Journal of Plastics Technology 2 (2006)

[53] Müller, P., Seidel, S., Stehncken, C. u. Becke Jürgen-Werner: Assessment of fiber print trough on surfaces of coated fiber-reinforced composites. 2008

[54] Neitzel, M., Blinzler, M., Edelmann, K. u. Hoecker, F.: Surface quality characterization of textile-reinforced thermoplastics. Polymer Composites 21 (2000) 4, S. 630–635

[55] Schubel, P. J., Warrior, N. A., Kendall, K. N. u. Rudd, C. D.: Characterisation of thermoset laminates for cosmetic automotive applications: Part I – Surface characterisation. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing 37 (2006) 10, S. 1734–1746

[56] Shah, D. U. u. Schubel, P. J.: Evaluation of cure shrinkage measurement techniques for thermosetting resins. Polymer Testing 29 (2010) 6, S. 629–639

[57] Wang, C. S. u. Iobst, S. A.: Reducing Fiber Readout of Structural Composite Panels. Journal of Reinforced Plastics and Composites 28 (2009) 19, S. 2377–2386

[58] Wenger, W., Dickson, G. R., McIlhagger, R. u. Miller, P. P.: The surface-finish characteristics of composite components. Journal of Materials Processing Technology (1992) 33, S. 439–452

[59] Amkreutz, M., Kolbe, J. u. Nagel, C.: Simulation des Härtungsschrumpfes von Klebstoffen zur Berücksichtigung bei der Bauteilauslegung. Klebetechnik und Oberflähen, S. 118–125

[60] Toray Composite Materials America, Inc.: Technical Data Sheet Toray T700S Standard Modulus Carbon fiber. file:///C:/Users/q492779/Downloads/T700S%20R4_04132018%20(1).pdf, abgerufen am: 10.06.2020

[61] Friese, D.: Optimierung von Class-A CFK-Sichtbauteilen in der automobilen Großserienfertigung, TU Dresden Diplomarbeit. Dresden 2019

[62] Kraemer, M., Middendorf, P. u. Bauernhansl, T.: Investigation on the influence of humidity on the topography of surfaces of polymeric class A carbon fiber reinforced plastics. Journal of Composite Materials 52 (2018) 30, S. 4247–4260

[63] Wilke, I.: Alterungserscheinungen lackierter FVK-Oberflächen

[64] Metzger, D. u. Henke, T.: Predictive Surface Topography assessment of Class-A CFRP Components produced with highly cost-efficient Processes. Composites Convention 2019. Stade 2019

[65] Zarrelli, M. u. Sjordos, Alexandros A. Partridge, Ivana K.: Investigation of cure induced shrinkage in unreinforced epoxy resin. Plastics, Rubber and Composites Processing and Applications (2002) 31, S. 377–384

[66] Lin, H.-J., Liao, C.-I. u. Jiang, R.-L.: Methods to Reduce the Print-through Phenomenon on the Surface of FRP. Journal of Reinforced Plastics and Composites 26 (2007) 4, S. 377–389

[67] BYK-Gardner GmbH: 20161005-wave-scan_dual, S. 37–40

[68] Souza, M. L. de, Mardel, J. I. u. Fox, B. L.: Hygrothermal effects on painted carbon fibre composite surfaces. Journal of Composite Materials 47 (2013) 5, S. 539–547

[69] Hass, C.: Oberflächenbenchmark verschiedener Class-A Karosseriebauteile, RWTH Aachen Bachelorarbeit. Aachen 2019

[70] Meeß, J.: Qualifizierung einer Prüfkette zur Oberflächenbewertung von Class-A CFK Sichtbauteilen, Technische Universität Kaiserslautern Diplomarbeit. Kaiserslautern 2018

[71] Gluekher, F.: Analyse von Messsystemen und Welligkeitskennwerten zur Detektierung von fiber readout an CFK Class A Sichtbauteilen, Technische Universitaet Muenchen Masterarbeit. München 2017

[72] US4629319

[73] US4920385

[74] Micro-Epsilon: reflectCONTROL-PSS-8005-D. Automoatisierte Lackfehlerkontrolle. https://www.micro-epsilon.de/download/products/dat--reflectCONTROL-PSS-8005-D--de.pdf, abgerufen am: 13.06.2020

[75] Benny: Hightech-Lackierung: Bei BMW hilft KI für ein perfektes Ergebnis, 2020. https://www.bimmertoday.de/2020/05/22/hightech-lackierung-bei-bmw-hilft-ki-fur-ein-perfektes-ergebnis/, abgerufen am: 13.06.2020

[76] ISO 3274:1996-12. *ISO 3274 GPS - Surface Texture: Profile method. Nominal characteristics of contact stylus instruments*

[77] Schubel, P. J.: Surface Roughness Modelling of Textile Composites using TexGen. Proceedings of 8th International Conference on Textile Composites (2006), T10-1 - T10-6

[78] Lücke, P.: Mikrooptische Sensoren nach dem chromatisch konfokalen Messprinzip, Universität Karlsruhe Dissertation. Karlsruhe 2006

[79] FRT GmbH: Der chromatische Sensor FRT CWL und FRT CWL FT. (Originalbetriebsanleitung)

[80] DIN EN ISO 4287:2010-07. *DIN EN ISO 4287:2010-07, Geometrische Produktspezifikation (GPS)_- Oberflächenbeschaffenheit: Tastschnittverfahren_- Benennungen, Definitionen und Kenngrößen der Oberflächenbeschaffenheit (ISO_4287:1997_+ Cor_1:1998_+ Cor_2:2005_+ Amd_1:2009); Deutsche Fassung EN_ISO_4287:1998_+ AC:2008_+ A1:2009. Grundlegende und allgemeine Begriffe und zugeordnete Benennungen (VIM) ; ISO/IEC-Leitfaden 99:2007 = Vocabulaire international de métrologie = International vocabulary of metrology*

[81] DIN 4760:1982-06. *DIN 4760 Gestaltabweichungen. Begriffe, Ordnungssystem*

[82] Hildebrandt, K., Schulte-Hubbert, F., Medina, L. u. Mitschang, P.: Influence of Fabric Parameters on Surface Waviness of FRPC: An Experimental Investigation and

Development of a Model on Surface Waviness. KMUTNB International Journal of Applied Science and Technology (2015), S. 1–10

[83] Lueck, A., Drummer, D. u. Hoffmann Leo: Oberflächeneigenschaften endlosfaserverstärkter Thermoplaste – Halbzeugmodifikation für den Einsatz im Sichtbereich. Neue Materialien Fürth. 2018

[84] Guedes, J. F., Martins, M. S. S., Martins, R. u. Rocha, N.: Carbon Nanotube Layer for Reduction of Fiber Print-Through in Carbon Fiber Composites. Advances in Polymer Technology 2019 (2019) 1, S. 1–11

[85] DIN EN ISO 25178-2:2012. *DIN EN ISO 25178-2:2012-09, Geometrische Produktspezifikation (GPS)_- Oberflächenbeschaffenheit: Flächenhaft. Teil_2: Begriffe und Oberflächen-Kenngrößen (ISO_25178-2:2012); Deutsche Fassung EN_ISO_25178-2:2012*

[86] Hiltscher, B.: BMW M3 F80 & M4 F82/F83: Finale Stückzahlen im Vergleich, 2020. https://www.bimmertoday.de/2020/08/20/bmw-m3-f80-m4-f82-f83-finale-stuckzahlen-im-vergleich-f8x/, abgerufen am: 02.09.2020

[87] Serienproduktion von hochfesten Faserverbundbauteilen. Perspektiven für den deutschen Maschinen- und Anlagenbau, Studie, Lässig, R., Eisenhut, M., Mathias, A., Schulte, R., Peters, F., Kühmann, T., Waldmann, T. u. Begemann, W., 2012

[88] DIN 611101-1 : 1979 01:1979-01. *DIN 61101-1 Gewebebindungen. Allgemeine Begriffe, Grundbindungen*

[89] Kowtsch, C., Herzberg, C. u. Kleicke, R.: Gewebte Halbzeuge und Webtechniken. In: Cherif (Hg.) 2011 – Textile Werkstoffe für den Leichtbau, S. 171–224

[90] Cherif, C. (Hrsg.): Textile Werkstoffe für den Leichtbau. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg 2011

[91] BMW AG: Lieferspezifikation - Gewebe in Leinwandbindung für Aussenhautbauteile in Carbonoptik. (Internes Dokument BMW AG)

[92] Aibibu, D.: Charakterisierung, Modellierung und Optimierung der Barriereeigenschaften von OP-Textilien, TU Dresden Dissertation. Dresden 2005

[93] Peirce, F. T.: 5—THE GEOMETRY OF CLOTH STRUCTURE. Journal of the Textile Institute Transactions 28 (1937) 3, T45-T96

[94] Kumar, B. u. Hu, J.: Woven fabric structures and properties. In: Engineering of High-Performance Textiles. Elsevier 2018, S. 133–151

[95] Jederan, M.: Zusammenhänge zwischen den Garneigenschaften, der Gewebe-Dichteparametern und der Einstellungsparametern der Maschinen. Periodica Polytechnica Ser. Mech. Eng. 38 (1994) 4, S. 225–241

[96] Hausding, J. u. Märtin, J.: Gewirkte Halbzeuge und Wirktechniken. In: Cherif, C. (Hrsg.): Textile Werkstoffe für den Leichtbau. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg 2011, S. 265–305

[97] Hausding, J. u. Märtin, J.: Gewirkte Halbzeuge und Wirktechniken. In: Cherif, C. (Hrsg.): Textile Werkstoffe für den Leichtbau. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg 2011, S. 265–305

[98] Stein, D. u. Stein, R.: Eigenschaften Epoxidharz. http://www.unitracc.de/know-how/fachbuecher/instandhaltung-von-kanalisationen/sanierung/renovierung/beschichtungsverfahren/stoffe-fuer-die-moertelbeschichtung/reaktionsharzmoumlrtel-und-betone/ep-harze-epoxidharze?SearchableText=EP-Harze

[99] Grasser, A.: Polymerisationsspannung und -schrumpf dentaler Füllungskomposite, Friedrich-Alexander-Universität Dissertation. Erlangen März / 2011

[100] Klaus, I. u. Knowles, W.: Reduction of shrinkage in Epoxy Resins. Journal of Applied Polymer Science 10 (1966), S. 887–889

[101] Hexion: TDS Hexion Epikote Rsin 04695-1 and EpiKure Curing Agent 05490A and Heloxy Aditive 112. https://www.hexion.com/CustomServices/PDFDownloader.aspx?type=tds&pid=7875894 4-5814-6fe3-ae8a-ff0300fcd525, abgerufen am: 03.11.2020

[102] Hexion: Infos Schrumpfverhalten Epoxidharze - Termin mit BMA AG. 2015

[103] Wenzel, M.: Spannungsbildung und Relaxationsverhalten bei der Aushärtung von Epoxidharzen, Technische Universität Darmstadt Dissertation. Darmstadt 2005

[104] Dittanet, P.: Fracture Behavior of Silica Nanoparticle Filled Epoxy Resin

[105] Theriault, R., Wolfrum, J. u. Ehrenstein, G. W.: Härtungsverlauf von Harzsystemen. Charakterisierung mittels TTT-Diagramm. Kunststoffe 89 (1999) 11, S. 112–116

[106] Barton, J.: Monitoring the curing reaction of an aromatic amine/epoxide resin system by differential scanning calorimetry (DSC): Determination and significance of the activation energy. Die Makromolekulare Chemie (1973) 171, S. 247–251

[107] Blumenstock, T., Eschl, J., Woicke, S., Moranchel-Caballero, S., Ludwig, H., Lück, T. u. Eyerer, P.: Aushärtungsvorgäbge von Duroplasten Kennwertermittlung, Modellierung, Simulation, S. 1–6

[108] DiBenedetto, A. T.: Prediction of the glass transition temperature of polymers: A model based on the principle of corresponding states. Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics 25 (1987) 9, S. 1949–1969

[109] BMW AG: Prozessablauf automatisierte Lackierung CFK Dächer. (Internes Dokument BMW AG)

[110] ETARI GmbH: Standardlackdicke PKWs nach Marken. https://etari.de/de/lackdicken-tabelle/, abgerufen am: 04.01.2021

[111] Rogers, W., Hoppins, C., Gombos, Z. u. Summerscales, J.: In-mould gel-coating of polymer composites: a review. Journal of Cleaner Production 70 (2014), S. 282–291

[112] Hopmann, C., Michaeli, W. u. Bastian, R.: CFK-Bauteile mit Class-A-Oberfläche. Kunststoffe 6 (2012)

[113] Klein, B.: FEM. Grundlagen und Anwendungen der Finite-Element-Methode im Maschinen- und Fahrzeugbau ; mit 12 Fallstudien und 19 Übungsaufgaben. Studium Technik. Wiesbaden: Vieweg 2005

[114] Kästner, M.: Skalenübergreifende Modellierung und Simulation des mechanischen Verhaltens von textilverstärktem Polypropylen unter Nutzung der XFEM, Dissertation. Dresden 2009

[115] Kia, H. G.: The Effect of Resin Formulation on the Surface Appearance of Glass Fiber Reinforced Polymers. Journal of Composite Materials 21 (1987) 12, S. 1145–1163

[116] Schubel, P. J., Warrior, N. A. u. Rudd, C. D.: Surface quality prediction of thermoset composite structures using geometric simulation tools. Plastics, Rubber and Composites 36 (2007) 10, S. 428–437

[117] Kracke, C., Nonn, A., Koch, C., Nebe, M., Schmidt, E., Bickerton, S., Gries, T. u. Mitschang, P.: Interaction of textile variability and flow channel distribution systems on flow front progression in the RTM process. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing 106 (2018), S. 70–81

[118] Koglin, J.: Bedienungsanleitung FRT Mark III. Auswertesoftware für Oberflächtopographiemessungen. 2018

[119] FRT GmbH: Produktportfolio. https://frtmetrology.com/produkte/microprof/, abgerufen am: 24.05.2020

[120] Harsch, M.: Methoden und Ansätze zur spannungsarmen Vernetzung von Epoxidharzen, Zugl.: Kaiserslautern, Techn. Univ., Diss., 2008. Kaiserslautern

[121] Grellmann, W. u. Altstädt, V.: Kunststoffprüfung. München: Hanser 2011

[122] Plepys, A. R. u. Farris, R. J.: Evolution of residual stresses in three-dimensionally constrained epoxy resins. Polymer 31 (1990) 10, S. 1932–1936

[123] Berlac AG: Dual-Cure UV-Lack. Technologiebeschreibung und Produkteigenschaften

[124] n.n.: UV-Harze von kratzfest bis hochflexibel. Farbe und Lack (2010), S. 1–11

[125] Schulz, D. u. Itasse, S.: Lackieren - UV-Lackierung erschließt immer mehr Anwendungsfelder, 2014. https://www.maschinenmarkt.vogel.de/uv-lackierung-erschliesst-immer-mehr-anwendungsfelder-a-437370/?p=2, abgerufen am: 04.01.2021

[126] Becker, A.-G.: FlexPLAS -Trennfolie – Trennmittelfreie FVK-Bauteilherstellung in komplexen Heizpressen-Werkzeugen. 2018

[127] Infiana Germany GmbH & Co. Kg: Technisches Datenblatt FlexPlas FM TPE Film 11133. 2017

[128] DE1020122070149A1

[129] DE 10 2018 125 716 A1

[130] BMW Group: Skalpellschnitt auf CFK-Bauteilen mit Klarsichtoptik. 2015

[131] SAE J 2527:2017-09-19:2017-09. *SAE J 2527 - Performance Based Standard for Accelerated Exposure of Automotive Exterior Materials Using a Controlled Irradiance Xenon-Arc Apparatus*

[132] Gurack, D., Krüger, G., Krotzek, A. u. Rudolf, A.: Adhäsionsverhalten zwischen bewitterten 2K-EP-Beschichtungen und 2K-PUR-Beschichtungen - Einfluss der Bewitterung. Stahlbau 80 (2011) 8, S. 627–635

[133] DIN EN ISO 6270-2:2018-04:2018-04. *DIN EN ISO 6270-2 Beschichtungsstoffe - Bestimmung der Beständigkeit gegen Feuchtigkeit - Teil 2: Kondensation (Beanspruchung in einer Klimakammer mit geheiztem Wasserbehälter)*

[134] BMW Group: Peeltest von kalthärtenden elastischen Klebstoffen. Prüfanweisung - Internes Dokument. 2018

[135] DIN EN ISO 10365:1995-08. *DIN EN ISO 10365 Bezeichnung der wichtigsten Bruchbilder*

[136] DIN 50014:2018-08. *DIN 50014 Normalklimate für Vorbehandlung und/oder Prüfung — Festlegungen*

[137] DIN EN 1465:2009-07. *DIN EN 1465 -Klebstoffe – Bestimmung der Zugscherfestigkeit von Überlappungsklebungen; Deutsche Fassung EN 1465:2009*

[138] Investition und Finanzierung. Grundlagen der betrieblichen Finanzwirtschaft. Springer eBook Collection Business and Economics. Wiesbaden: Gabler 2008

Abbildungs- und Tabellenverzeichnis

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1 *Einsatz von CFK in der Struktur und als Class-A Bauteile am Beispiel der BMW Group. Sowohl Struktur- als auch Sichtbauteile wurden über die Zeit zunächst nur in Prototypen über Sondermodelle bis hin zu Großserienfahrzeugen eingesetzt. Mit dem 8er G15 bietet BMW seit 2018 ein Class-A Sichtcarbondach für ein nicht M-Fahrzeug an. [3]*

Abb. 2 *Übersicht der etablierten Herstellverfahren für CFK Bauteile. Mit steigenden Stückzahlen sinkt der Anteil manueller Arbeitsvorgänge. Mit den automatisierten RTM- und Nasspressverfahren sind Class-A Bauteile, wie CFK-Dächer in Stückzahlen von über 20.000 Einheiten im Jahr realisierbar. Mit den Verfahren sind deutlich höhere Stückzahlen (>70.000 Einheiten / Jahr) möglich, jedoch erfüllen die Bauteile dann die Class-A Anforderungen nicht, können aber ohne weiteres als Strukturbauteile eingesetzt werden [6].*

Abb. 3 *Nasspressprozess. (1) Über eine Robotergeführte Düse wird das mit Trennmittel versetzte Epoxidharzsystem definiert auf das CF-Halbzeug appliziert. (2) Nachdem das beharzte Halbzeug automatisiert in die Presse eingelegt wurde, wird die Presse geschlossen und das Halbzeug final imprägniert und drapiert. (3) Das Harzsystem härtet unter definiertem Druck und Temperatur während dem Pressprozess aus. (4) Nachdem das Bauteil ausgehärtet ist wird das Bauteil automatisiert entnommen.*

Abb. 4 *Verteilung der Herstellkosten für ein Class-A CFK-Dach hergestellt im Nasspressprozess [3, 6, 10]*

Abb. 5 *Fokussierte Betrachtung einer Oberfläche: links Fokus auf die Oberflächenstruktur, rechts auf das Spiegelbild [20]*

Abb. 6 *Einfluss kurzwelliger (links) und langwelliger (rechts) Gestaltabweichungen auf das Spiegelbild einer gerichtet beleuchteten Oberfläche. Bei kurzwelligen Unebenheiten (Rauheit) wird das Licht diffus gestreut, das Spiegelbild wird unscharf und schwach. Bei langwelligen Unebenheiten (Welligkeit) entsteht ein Spiegelbild mit Hell-Dunkel Muster und verzerrten Rändern. Über den Bildern ist die Lichtintensitätsverteilung über der Bauteillänge dargestellt.*

Abb. 7 *Auflösungsvermögen des menschlichen Auges und Wahrnehmung unterschiedlicher Wellenlängen der Oberflächenstruktur je nach Betrachtungsabstand. Bei 5m Entfernung (links) wird die Lackoberfläche als glatt empfunden, das Lichtspiel der Designelemente wird hauptsächlich wahrgenommen und die Randschärfe des gespiegelten Horizonts ist leicht abgeschwächt. Bei 3m Abstand (Mitte) erkennt man bereits langwellige Störkonturen im Spiegelbild des Horizonts. Bei naher Betrachtung von 0,5m (rechts) sind auch kurzwellige Strukturen und (mögliche) feine Lackfehler erkennbar. Nach [17, 20, 21]*

Abb. 8: *links Einteilung der Fahrzeugaußenhautflächen eines BMW Z4 in Zone A*-B; rechts in Primärflächen P0-P2. Die Abgrenzung der Flächenbereiche ist identisch.*

Abb. 9 *Bewertungszonen in Kraftfahrzeugen nach VDA Band 16 [31]*

Abb. 10 *Charakteristische Oberflächenfehler von Class-A CFK Bauteilen.*

Abb. 11 *Verteilung der in der Literatur verwendeten Fachbegriffe für das Phänomen der Faserdurchzeichnung bei FVK auf Basis des Literaturreviews für diese Arbeit. International ist der meistverwende Begriff „Fiber Print-Through, kurz FPT", übersetzt Faserdurchzeichnung. Zudem wird im deutschsprachigen Raum auch Faserabzeichnung verwendet.*

Abb. 12 *Modellhaftes Schema der Faserdurchzeichnung am Beispiel einer Gewebeverstärkung. [14]*

Abb. 13 *PPT- Primary Print-Through. Die stärkere Ausprägung bei Komponente 2 wird durch eine höhere Prozesstemperatur verursacht.*

Abb. 14 *SPT – Secondary Print-Through verursacht durch eine inhomogene Verstärkungslage unterhalb der Sichtlage.*

Abb. 15 *Übersicht eingesetzter Messmethoden für die Bewertung von Faserdurchzeichnungen auf Basis des Literaturreviews für diese Arbeit. Am häufigsten wurde bisher das in der Automobilindustrie etablierte Lack-Appearance-Messgerät WaveScan von BYK Gardner und das Tastschnittverfahren eingesetzt. Zudem werden immer häufiger profilometrische Messgeräte verwendet, die es ermöglichen 3D-Topografien der gemessenen Oberfläche zu erzeugen. (Interferometer, Laser Profilometer, Weißlichtprofilometer WLP, konfokale Mikroskope)*

Abb. 16 *Schema eines chromatischen Weißlichtsensors zur Oberflächentopografiemessung*

Abb. 17 *Prinzip der Lasertriangulation nach [22].*

Abb. 18 *Ordnungen der Gestaltabweichungen nach DIN EN ISO 4760 (5. und 6. Ordnung irrelevant) [73]*

Abb. 19 *Übersicht eingesetzter Kennwerte für die Bewertung von Faserdurchzeichnungen auf Basis des Literaturreviews für diese Arbeit. Eine deutliche Tendenz zur Auswertung von Profilen und dem verwenden von Rauheitskennwerten ist erkennbar. Neuere Arbeiten verwenden immer häufiger Welligkeitskennwerte. Das Auswerten der Fläche nach der DIN EN ISO 25178-2 wurde bisher noch nicht behandelt. Der Kennwert Wz25* ist ein Sonderkennwert in der Analysesoftware FRT Mark III und damit in keiner Norm enthalten.*

Abb. 20 *FVK-relevante Rauheitskennwerte nach DIN EN ISO 4287 Rp = höchste Profilspitze, Rv = tiefstes Profiltal, Rt = Rp + Rv der gesamten Messstrecke, Rz = Summe höchste Spitze und tiefstes Tal einer definierten Einzelmesstrecke, die maximal der Messstrecke entsprechen kann (dann Rz = Rt), Ra = arithmetischer Mittelwert der Rauheit. [72]*

Abb. 21 *FVK-relevante Welligkskennwerte nach DIN 4287 Wp = höchste Profilspitze, Wv = tiefstes Profiltal, Wt = Wp + Wv der gesamten Messstrecke, Wz = Summe höchste Spitze und tiefstes Tal einer definierten Einzelmesstrecke, die maximal der Messstrecke entsprechen kann (dann Wz = Wt), Wa= arithmetischer Mittelwert der Welligkeit. [72]*

Abb. 22 *Veranschaulichung der Reaktion des Kennwertes Ra bzw. Wa auf die Verdopplung der Wellenlänge λ (von links nach rechts) und der Amplitude y_0 (von oben nach unten). Eine Veränderung der Wellenlänge verändert den Kennwert nicht. Im Gegensatz dazu verdoppelt sich der Wert bei doppelter Amplitude.*

Abb. 23 *Einfluss der Filtereinstellung bei der Auswertung von Profilmessungen eines CFK Bauteils mit 3k Leinwand Sichtlage aufgenommen mit einem FRT MicroProf 200. Bild 1 und 3 gefiltert nach Rauheit (Ra), Bild 2 und 4 nach Welligkeit (Wa). Zudem wurde bei Bild 1 und 2 der Cut-Off Filter bei λc= 0,8mm gesetzt und bei Bild 3 und 4 λc= 3,0mm. Alle vier Ergebnisse desselben Ausschnitts unterscheiden sich sowohl in den Kennwerten als auch in visuell deutlich.*

Abb. 24 *Einfluss der Messposition: Profilmessungen eines CFK Bauteils mit 3k Leinwand Sichtlage mit einem FRT MicroProf 200. Trotz derselben Filtereinstellung nach DIN EN ISO 4287 in allen drei Bildern, ist sowohl visuell auf der rechten Seite als auch an den Ra-Kennwerten ein deutlicher Unterschied zu erkennen. Der Unterschied zwischen dem oberen Bild (Ra=0,18µm) und dem unteren (Ra=0,26µm) beträgt ca. 44%.*

Abb. 26 *BMW F82 M4 mit serienmäßigem Class-A CFK-Dach in Sichtoptik. Stückzahl ca. 10.000 Einheiten/Jahr und ca. 56.000 Einheiten über Laufzeit. [78]*

Abb. 27 *Veränderung der Textiloberfläche in Abhängigkeit der Rovingbreite und Maschenweite. Je Breiter der Roving, desto größer die Wellenlänge der Faserdurchzeichnung. Je lockerer das Gewebe, desto höher die Amplitude des Profils und somit welliger die Oberfläche.*

Abb. 28 *Öffnungsfaktor OF von gewebten Halbzeugen.*

Abb. 29 Öffnungsfaktor in Abhängigkeit der Rovingbreite für Fadendichten von 3,5 bis 5,2 Fd/cm.

Abb. 30 *Links: Dickenschwankung eines CF-Biaxialgeleges sichtbar gemacht auf einem Vakuumtisch, der das Textil über eine Folie komprimiert. Rechts: Sekundäre Faserdurchzeichnung des innenliegenden CF-Biaxialgeleges in einem CFK-Dach. Die in 45° Winkel linienförmig verlaufenden Gestaltabweichungen sind vor der Lackierung erst unter einem Lichttunnel sichtbar. Das Phänomen wird vom Betrachter noch stärker wahrgenommen, als es sich auf Bildern darstellen lässt.*

Abb. 31 *Schematische Darstellung der Prozessschritte für das automatisierte Lackieren von CFK Dächern (Nasspressverfahren und RTM) mit Primer und 2K PUR Klarlack.*

Abb. 32 *Schematische Darstellung des Oberflächenzustands entlang der CFK Prozesskette. Während des Pressvorgangs wird die Matrix aufgrund der hohen Temperatur und dem Kavitätsinnendruck gegen die glatte Werkzeugwand gedrückt. Bei der Entnahme ist die Oberfläche glatt. Während dem Abkühlen zieht sich die Matrix zusammen. Durch die Filmbildung des Lacks wird beim Lackauftrag die Oberflächenwelligkeit ausgeglichen. Im Trocknerofen wird das Substrat wieder aufgeheizt, was zur Ausdehnung der Matrix führt. Der Lack härtet auf einer glatteren Oberfläche aus. Während dem erneuten Abkühlen zieht sich die Matrix zusammen und zieht die dünne Lackschicht mit. Auf der Oberfläche sind trotz Lackierung Faserdurchzeichnungen sichtbar.*

Abb. 33 *Schematische Darstellung der Prozesskette für im Nasspressverfahren produzierte Class-A CFK Bauteile. Von links mit der Textilproduktion über den Pressprozess bis hin zur Oberflächenveredelung über eine Klarlackierung.*

Abb. 34 *Lagenaufbau CFK-Dach (Nasspressverfahren)*

Abb. 35 *Werkzeughälfte (Matrize) des Nasspress Versuchswerkzeugs. (**1**) Die Werkzeugfläche ist im Vergleich zu dem Serienwerkzeug in 1:2 skaliert, prozessrelevante Flächen und Radien wurden jedoch nicht verändert. **(2)** Das Werkzeug verfügt über eine ebene Messfläche im 15 x 20mm. **(3)** Für die Prozesssteuerung ist ein Temperatursensor, ein Drucksensor und ein DEA Sensor verbaut. **(4)** Entlüftungsnuten für die Prozessintegration von Folien. Der innere Kreislauf dient der Entlüftung, der äußere der automatischen Abdichtung. **(5)** Unsichtbare Kofferecken Entlüftung. **(6)** Aufnahmevorrichtung des Folienpositionierrahmens.*

Abb. 36 *Werkzeughälfte (Patrize) des Nasspress Versuchswerkzeugs. **(8**) Entlüftungsbohrungen für das Kavitätsvakuum. **(9)** Sensorpaket an der Rückseite der Messfläche mit Temperatursensor, Drucksensor und DEA Sensor. **(10)** Folienpositionierhilfe (ohne Folie) in Aufnahmevorrichtung.*

Abb. 40 *Prinzip der Methode zur Prozesskettenbegleitenden Quantifizierung der Oberflächentopografie von Class-A CFK Bauteilen.*

Abb. 41 *Aufbau der Portalzelle für die Textilvermessung mittels Lasertriangulation.*

Abb. 42 *Analyseoberfläche zur Auswertung der ermittelten Messdaten (Matlabtool)*

Abb. 43 *Auswertemethodik sWz25 links [110] und daraus abgeleitet Sz25 [6] rechts. Zusätzlich wird die Standardabweichung (der Stichprobe) mit angegeben, um eine Aussage über die Textilhomogenität zu treffen.*

Abb. 44 *Vergleich eines glatten Biaxialgeleges A (links) mit einem stark inhomogenen B (rechts). Sowohl visuell, als auch an den SPT Kennwerten Sz25 und der Standardabweichung s werden die Unterschiede deutlich. Das rechte Textil B hat nicht nur eine deutlich stärkere Welligkeit durch Dickenschwankungen (Sz25(B) > Sz25(A)), sondern ist auch deutlich inhomogener (s(B)>s(A)).*

Abb. 45 *3D-Oberflächenprofil der relevanten Zustände eines CFK-Bauteils visualisiert in der Analysesoftware FRT Mark III. Links das textile Halbzeug, in der Mitte das unlackierte Rohteil und rechts das final lackierte Class-A Bauteil.*

Abb. 46 *Beispielhafte Messungen des 3k Leinwandgewebes zur Ermittlung der S-L-Filtereinstellungen. Oben optische Digitalisierung der trockenen Sichtlage mit einem kalibrierten 4800dpi Scanner. Unten Auswertung der Wellenlängen in einem unlackierten Rohteil.*

Abb. 47 *Einfluss der Filtereinstellung auf die resultierende Oberfläche. (1) Ungefiltert ist der Einfluss kurzer und langwelliger Anteile sehr groß, was die Faserdurchzeichnung übertönt. (2) Nach der Rauheit gefiltert ist die Wellenstruktur des Leinwandgewebes ist nur grob erkennbar. (3) Gefiltert nach längerwelligen Bereichen ist die Wellenstruktur des Leinwandgewebes ebenfalls kaum erkennbar. (4) Erst bei korrektem PPT-Filter werden die Berge und Täler des Leinwandgewebes sichtbar. Es ist sogar möglich die Laufrichtung zu erkennen. Hohe Berge sind Rovings quer zur Messrichtung, flache Berge längs zur Messrichtung.*

Abb. 48 *Einfluss der Filtereinstellung auf das Ergebnis des Sa-Werts. Wie auf den Realbildern ersichtlich, wird die Faserdurchzeichnung durch steigende Prozesstemperaturen verstärkt. Sowohl die Einstellung (1) ungefiltert als auch (2) gefiltert nach langen Wellenlängen zeigen keine Korrelation zur steigenden Faserdurchzeichnung. Die Filtereinstellung (2) zeigt folgt zwar dem Trend, allerdings nicht so direkt, wie die auf die Sichtlage abgestimmte PPT-Filtereinstellung (4).*

Abb. 49 *Veränderung der Oberflächenglätte von Class-A CFK Bauteilen entlang der Prozesskette. Der Sa-Wert des trockenen Textil verringert sich durch den Pressprozess um ca. 97% bei einem unlackierten CFK Rohteil. Eine zusätzliche Lackierung dämpft die ursprüngliche Oberflächenwelligkeit des Textils um 99,4%.*

Abb. 50 Prinzip der FE-Simulation der Oberflächentopografie einer CFK-Dach Einheitszelle (RVE)

Abb. 51 *Sa-Werte in Abhängigkeit Öffnungsfaktors durch Variation der Fadendichte und RAR.*

Abb. 52 *Beispiel Vermessung der Öffnungsflächen zweier 3k Leinwandgewebe.*

Abb. 53 *Theoretischer Aufbau eines Köper 2/2-Gewebes, Rechts: Reales Topographiebild eines trockenen Hexforce 1102 Köper 2/2-Gewebes. Aus: [16]*

Abb. 54 *Analyseprinzip der Textilmessung. Jeder Stack wird als Ganzes vermessen. Ausgewertet wird der gleiche PPT-Messbereich (70 x70mm), wie im späteren Bauteil. Auf die Rohdaten (Mitte) wird der PPT-Filter angewendet (rechts) und dann der Sa-Wert berechnet.*

Abb. 55 *Vergleich der Öffnungsfaktoren der Leinwandgewebe-Sichtlage im CFK-Bauteil.*

Abb. 56 *Vergleich der PPT-Ausprägung (Sa-Wert) von CFK Bauteilen mit verschieden glatten 3k Leinwand Sichtlagen bei unterschiedlichen Prozesstemperaturen. Die blaue Linie zeigt die Sa-Werte für Stacks mit dem NP_A_3k Lagenaufbau, die graue Linie für Stacks mit dem glatteren NP_B_3k Lagenaufbau.*

Abb. 57 *Vergleich zwischen einem NP_A_3k Bauteil (links) und einem NP_B_3k (rechts) Bauteil bei 105°C Prozesstemperatur. Oben jeweils als Realbild im Lichttunnel, unten die PPT-gefilterten 3D-Oberflächentopografiedaten.*

Abb. 58 *Vergleich zwischen einem NP_A_3k Bauteil hergestellt bei 105°C (links) und einem NP_B_3k Bauteil hergestellt bei 115°C (rechts). Oben jeweils als Realbild im Lichttunnel, unten die PPT-gefilterten 3D-Oberflächentopografiedaten.*

Abb. 59 *Vergleich der PPT-Ausprägung (Sa-Wert) von CFK Bauteilen mit verschieden glatten 3k Leinwand Sichtlagen bei unterschiedlichen Prozesstemperaturen. Blau NP_A_3k, schwarz NP_B_3k. Bei ca. 120°C ist ein sprunghafter Anstieg der Sa-Werte zu beobachten.*

Abb. 60 *Ausprägung der Faserdurchzeichnung (Sa-Wert) in Abhängigkeit der Differenz aus Werkzeugtemperatur und Glasübergangstemperatur.*

Abb.61 *Dehnung eines ausgehärteten EP-Harzes bei konstanter Temperaturerhöhung. [112]*

Abb. 62 *Glasübergangstemperatur in Abhängigkeit der Aushärtezeit bei Werkzeugtemperaturen von 105-115°C. Bei 115°C zusätzlich zu T_g = 111°C mit rotem Punkt $T_g = T_{Werkzeug}$ = 115°C.*

Abb. 63 *Beispielhafter Vergleich der Faserdurchzeichnung an CFK Bauteilen, die bei 105°C und 130°C hergestellt wurden. Oben Realbild unter Streifenlicht, darunter 3D-Topografie mit Z-Skala (0-100µm). Die Bauteile unterscheiden sich sowohl optisch als auch in den Sa-Werten sehr stark.*

Abb. 64 *Vergleich der Profillinien der PPT-gefilterten Oberflächentopografie bei oben 105°C und unten 130°C Werkzeugtemperatur.*

Abb. 65 *Vergleich konventionell lackierter CFK-Dach Ausschnitte. Links hergestellt bei 105°C mit Class-A Oberfläche (Sa < 0,08µm), rechts bei 130°C mit sichtbarer Faserdurchzeichnung.*

Abb.66 *Vergleich der Zwischenzustände bei der Lackvernetzung in (oben) thermischen Trocknern und (unten) über UV-Strahlung. Im Gegensatz zur thermischen Trocknung findet bei der UV-Strahlenhärtung keine thermische Ausdehnung der Matrix statt, weshalb der Zustand bei der Filmbildung (Lackoberfläche glatt, Substrat wellig) „eingefroren" wird.*

Abb. 67 *Potentielle Verschiebung der möglichen Produktionsvolumen durch den Einsatz von UV-härtenden Lacksystemen für Class-A CFK Karosseriebauteile.*

Abb. 68 Vergleich zwischen NP_A_3k_105 (links), NP_A_3k_130_PUR (Mitte) und NP_A_3k_130_UV_Mono (rechts). Oben jeweils als Realbild im Lichttunnel, unten die PPT-gefilterten 3D-Oberflächentopografiedaten mit Sa-Wert.

Abb. 69 Vergleich der Rohteilzustände bei 105°C und 130°C Werkzeugtemperatur und der erreichbaren Oberfläche mit thermisch härtendem 2K PUR Lacksystem und UV-härtendem Mono-Cure Lacksystem.

Abb. 70 *Nasspressprozess mit integriertem Tiefziehen von Trennfolien.* ***(1)*** *Die Trennfolien werden in die Kavitäten des Ober- und Unterwerkzeugs tiefgezogen und werden so zur temporären Werkzeughaut.* ***(2)*** *Gleichzeitig wird das Harzsystem ohne Trennmittel auf das CF-Halbzeug appliziert.* ***(3)*** *Nach dem Harzauftrag wird das nasse Textil wie im konventionellen Nasspressprozess automatisiert in das Werkzeug eingelegt.* ***(4)*** *Das Bauteil härtet unter definiertem Druck und Temperatur aus.* ***(5)*** *Die Folie verbleibt auf dem Bauteil und dient nach der Entnahme bis zum nächsten Prozessschritt als Schutzverpackung.*

Abb. 71 *Tiefgezogene TPE-Trennfolie auf Werkzeughälfte der Bauteilsichtseite.* ***(1)*** *Die Folie wird außen von einem Positionierrahmen gehalten.* ***(2)*** *Durch die Anordnung der Vakuum Bausteine dichtet die Folie sich während des evakuierens selbstständig ab.* ***(3)*** *Dies führt zu einem vollständigen, faltenfreien Abformen der Werkzeuggeometrie. Die Folie wird zur temporären Werkzeugoberfläche bzw. Werkzeughaut.*

Abb. 72 (1) Vakuum-Kreislauf 1 mit Dicht-Nut. (2) Vakuum-Kreislauf 2 mit Form-Nut. Diese entzieht die Luft unter der Folie und führt dazu, dass die Folie in die Kavität tiefgezogen wird. (3) Entlüftungsbausteine in den konkaven Bauteilecken unterstützen das vollständige, faltenfreie Tiefziehen der Folie.

Abb. 73 *Trennmittelfreies Class-A CFK Bauteil mit Folie auf der Sicht- und Rückseite. Die Folie dient bis zur Lackierung (Sichtseite) bzw. Verklebung (Rückseite) als Schutzverpackung.*

Abb. 74 *Prüfablauf und Auswertung der Lackhaftungsprüfung mittels Skalpellschnittverfahren.*

Abb. 75 Vergleich der Lackhaftung nach Xenonbelastung. NP_Ref und NP_1 mit sehr guter Lackhaftung. NP_2 ohne Primer mit Delamination von 5-10mm.

Abb. 76 *Belastungszyklen der Klimawechselbelastung mit einer Gesamtdauer von 240 Stunden.*

Abb. 77 Schematische Darstellung Peeltest. Links Soll-Raupengeometrie, rechts Durchführung.

Abb. 78 *Probenbilder nach Peeltest. Links initial, Mitte nach KWB, rechts nach KW-KK.*

Abb. 79 Aufbau einer CFL-Probe zur Prüfung der Zugscherfestigkeit.

Abb. 80 Beispielbilder von Zugscherproben mit einem Kohäsionsbruch links und Adhäsionsbruch rechts..

Abb. 81 Bezeichnung der wichtigsten Bruchbilder nach DIN EN ISO 10365. [127]

Abb. 82 *Diagramm der Versuchsergebnisse der Zugscherprüfung.*

Abb. 83 *Beispielbilder der sechs geprüften Zustände. Aufteilung in oben Lagerung eine Woche, unten sechs Monate. Von links initial ohne Belsastung geprüft, Mitte nach Klimawechselbelastung KWB und rechts nach Kondenswasser Konstantklimabelastung KW-KK. Alle Proben brechen kohäsiv innerhalb des Klebstoffs.*

Abb. 84 *Verlauf der abgesetzten Einheiten und der Rendite (interne Verzinsung) für die Prozessintegration von Trennfolien in den Nasspressprozess (Stufe 1 und Stufe 2). Phase I Industrialisierung, Phase II Anlauf der Serienproduktion, Phase III volle Serienproduktion, Phase IV Auslauf der Produktion.*

Tabellenverzeichnis

Tab. 1 *Charakterisierung SPT-verursachender Dickenschwankungen von Biaxialgelegen mit dem Kennwert Sz25 und der dazugehörigen Standardabweichung der Stichprobe s.*

Tab. 2 PPT Grenzwerte für Class-A fähige Halbzeuge und Bauteile (3k Leinwandgewebe).

Tab. 3 *Auszug der relevanten Spezifikationen für das 3k CF-Leinwandgewebe eines Class-A CFK-Dachs. [83]*

Tab. 4 *Übersicht der Untersuchungsumfänge entlang der Class-A CFK Prozesskette*

Tab. 5 *Öffnungsfaktor in Abhängigkeit des RAR (Höhe zu Breite Verhältnis) bei konstanter Fadendichte.*

Tab. 6 *Öffnungsfaktor in Abhängigkeit der Fadendichte (Fd/cm) bei konstanter Rovingbreite und RAR.*

Tab. 7 Ermittelte Öffnungsflächen und Öffnungsfaktoren für zwei 3k Leinwandgewebe.

Tab. 8 *Sa-Werte (Mittelwert aus 30 Messungen und Standardabweichung s) der trockenen Stacks mit verschiedenen 3k Leinwandgewebe Sichtlagen vermessen mittels Lasertriangulation.*

Tab. 9 *Versuchsparameter und die resultierende Glasübergangstemperatur Tg*

Tab. 10 *Übersicht der Sa-Werte in Abhängigkeit der Werkzeugtemperatur, Presszeit und den resultierenden Kenngrößen Aushärtegrad, T_g und der Differenz aus Werkzeugtemperatur und T_g.*

Tab. 11 *Gegenüberstellung der Sa-Werte mit der für die jeweilige Prozesstemperatur benötigten Aushärtezeit und T_g der beiden Sichtlagenvarianten. Prämissen: T_g >111°C und $T_g \geqq T_{Werkzeug}$.*

Tab. 12 *Potentialbewertung anhand der Presszeiteinsparung durch die im Vergleich zu NP_A_3k glattere Sichtlage im NP_B_3k Lagenaufbau. Durch den Einsatz der NP_A_3k Lagenaufbaus ist eine Erhöhung der Produktivität (Output) um zwei CFK-Dächer pro Stunde bei gleichbleibender Oberflächenqualität des Rohbauteils möglich.*

Tab. 13 *Versuchsaufbau Vergleich konventionelles 2K PUR Klarlacksystem zu UV-härtendem Mono-Cure Lacksystem.*

Tab. 14 *Ermittlung der potenziellen Produktivitätssteigerung (Output) durch den Einsatz von UV-härtenden Mono-Cure Lacksystemen für Class-A CFK Bauteile.*

Tab. 15 *Verteilung der Veredelungskosten für ein Class-A CFK-Dach in Sichtoptik.*

Tab. 16 Versuchsergebnisse der Lackhaftungsprüfung mit dem Skalpellschnittverfahren. Alle drei Varianten erfüllen die Anforderungen der Lackhaftung (0mm Ablösung).

Tab. 17 *Versuchsergebnisse der Lackhaftungsprüfung mit dem Skalpellschnittverfahren nach Xenonbewitterung. Die Varianten NP_Ref und NP_1 erfüllen die Anforderungen der Lackhaftung (0mm Ablösung).Die Variante NP_2 ohne Primer hat eine Lackenthaftung von 5-10mm.*

Tab. 18 *Skala für die Bewertung der im Peeltest erzeugten Bruchbilder. [126]*

Tab. 19 *Übersicht der Klimabelastung vor der Durchführung des Peeltests. Lagerdauer eine Woche (1W) und sechs Monate (6M) vor Klebstoffauftrag verpackt in Trennfolie.*

Tab. 20 Ergebnisse *Peeltest der trennmittelfreien CFK-Bauteile hergestellt mit Trennfolien.*

Tab. 21 *Prüfbedingungen und Lagerdauer der trennmittelfreien CFK-Zugscherprüfkörper*

Tab. 22 Übersicht der Ergebnisse der Zugscherprüfung nach verschiedener klimatischer Belastung und vorheriger Lagerung in Trennfolien für eine Woche und sechs Monate.

Tab. 23 *Herstellkosten Vergleich Referenz Prozesskette Nasspressverfahren und prozess-integrierte Trennfolie in Stufe 1 mit Zweitlack Quote 10% und Stufe 2 Zweitlackquote 1%.*

Danksagung

Diese Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als Doktorand im Rahmen des BMW Group „ProMotion“ Programms in Zusammenarbeit mit dem Institut für Materials Resource Management (MRM) der Universität Augsburg.

Ich möchte zunächst meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr. Siegfried Horn für die Übernahme der Erstbegutachtung dieser Arbeit danken. Ihre hervorragende Betreuung und unsere fachlichen Diskussionen haben maßgeblich zum Erfolg dieser Arbeit beigetragen. Herrn Prof. Markus Sause danke ich für das Interesse an meiner Arbeit und die Übernahme des Zweitgutachtens.
Herrn Dr. Thomas Henke, der mich seitens der BMW Group fachlich und persönlich ausgezeichnet betreut hat, möchte ich auch herzlich danken. Zusammen ist es uns gelungen die wissenschaftlichen Inhalte dieser Arbeit in die Projektlandschaft der BMW Group zu integrieren und so einen direkten Bezug zwischen Forschung und Anwendung herzustellen. Du hast meine akademische und berufliche Entwicklung in dieser Zeit nicht nur begleitet, sondern sehr stark geprägt.
Mein Dank gilt auch allen Kollegen der BMW AG, die mich in dieser Zeit unterstützt haben, vor allem Dr. Thomas Wolff, Hanno Pfitzer, Dr. Rüdiger Bräuning, Torben Effner und Dr. Gunnar Rieber, die dieses Promotionsvorhaben BMW-seitig in dieser Form erst ermöglicht und durchgehend gefördert haben. Besonders möchte ich auch Felix Glükher, Joachim Meeß, Christian Haas und Danny Friese für die wertvolle Unterstützung danken.

Ein besonderer Dank gilt meiner Familie und meinen Freunden für die uneingeschränkte Unterstützung in allen Lebenslagen und die beständige Zuversicht. Meine Eltern haben mich auf meinem gesamten Lebensweg immer liebevoll unterstützt und mich gelehrt über den „Tellerrand“ zu schauen. Viele Ansätze dieser Arbeit entstammen genau dieser Denkweise bekannte Strukturen und Begrenzungen konstruktiv zu hinterfragen. Ein großes Danke auch an meine Schwester Anna für die Durchsicht und sprachliche Korrektur des Manuskripts.
Meiner lieben Frau Sonja möchte ich auch von ganzem Herzen danken. Du hast mich in jeder Phase meines Studiums und dieser Arbeit unentwegt unterstützt, ermuntert sowie bestärkt, obwohl Du dadurch auf so manche gemeinsame Zeit verzichten musstest. Ohne Dich hätte ich das nicht geschafft! Zuletzt möchte ich diese Arbeit meiner lieben Tochter Emilia widmen. Ich hoffe sie wird Dir als Inspiration für Deinen Lebensweg dienen.

Kirchheim, im April 2022 Dominik Metzger