

FlexForCFK – Entwicklung eines prozessautomatisierten, formflexiblen Werkzeugs zur Herstellung von CFK-Bauteilen

Prof. Dr.-Ing. Rüdiger Hornfeck

Fakultät MB/VS

Technische Hochschule Nürnberg

Mario Lušić, M.Sc. M.Eng. Dipl.-Ing. (FH)

Fakultät MB/VS

Technische Hochschule Nürnberg

Kurzzusammenfassung:

Für die Fertigung von CFK-Bauteilen sind Laminierformen erforderlich. Diese werden üblicherweise gefräst oder ebenfalls aus Laminataufbauten hergestellt. Dieser Fertigungsprozess ist gerade für die Einzelfertigung und im Prototypenbau sehr zeitaufwendig und kostenintensiv und die Formen müssen bei Änderungen verworfen werden. Abhilfe schaffen hier formflexible Werkzeuge, mit denen die Bauteilkontur individuell eingestellt werden kann und zudem schnell änderbar ist. Dies wurde in einem Verbundprojekt zwischen der TH Nürnberg und der HAW München entwickelt. Die Schwerpunkte der Arbeiten an der TH Nürnberg lagen in der Konzipierung der Ansteuerlektronik und der SW-Programmierung, in der Prozessbeschreibung der Verwendung von Rapid Tooling Einsätzen für CFK-Formteile mit einem sehr steilen Formgradienten und der Konzipierung einer Wissensdatenbank als Entscheidungshilfe zur Beurteilung eines technisch-wirtschaftlichen Einsatzes des formflexiblen Werkzeuges. Die prinzipielle Machbarkeit und der Nutzen dieses Werkzeuges wurden im Projekt nachgewiesen. Auf der Basis dieser Forschungsergebnisse können Anlagenbauer ein Serienprodukt entwickeln.

Vorwort

Das Forschungsprojekt wurde an der Technischen Hochschule Nürnberg Georg Simon Ohm bearbeitet und von Prof. Dr.-Ing. Rüdiger Hornfeck - Professor an der Fakultät Maschinenbau und Versorgungstechnik und Leiter des Kompetenzzentrums *3D-Visualisierungszentrum* - geleitet.

Als verantwortlicher Projektingenieur erarbeitete Mario Lušić, M.Sc. M.Eng. Dipl.-Ing. (FH) sämtliche wissenschaftlichen Inhalte.

Der in diesem Schlussbericht beschriebene Inhalt ist Teil eines Verbundprojektes, das zusammen mit der Hochschule München und der Gesamtprojektleitung von Prof. Maurer bearbeitet wurde.

Danksagung

Dieses Forschungsprojekt wurde aus Haushaltsmitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) im Rahmen der Förderlinie „Forschung an Fachhochschulen“ unter dem Förderkennzeichen 03FH041PA3 gefördert. Besonderer Dank gilt Prof. Christoph Maurer und Matthias Wimmer, M.Eng. seitens der Hochschule für angewandte Wissenschaften München, welche im Rahmen Ihres parallelen Forschungsprojektes unter dem Förderkennzeichen 03FH041PB3 zum Gesamterfolg von „FlexForCFK“ beitrugen.

Daneben gilt der Dank an die kooperierenden Unternehmen

- EUROCOPTER DEUTSCHLAND GmbH in 86609 Donauwörth,
- SGL Carbon GmbH in 86405 Meitingen,
- Huber Kunststoff & Technik GmbH in 86879 Wiedergeltingen,
- Putzin Maschinenbau GmbH in 91257 Pegnitz und
- 3D CAD GmbH in 90411 Nürnberg,

die während der Projektlaufzeit das Projekt aktiv begleiteten und durch die Gewährung von Einblicken in ihre unternehmerische Prozesslandschaft die Industrienähe des Forschungsprojektes ermöglichten sowie den industriellen Bedarf belegten.

Weiter gilt der Dank an sämtliche Studierende, die im Rahmen von Projekt- und Abschlussarbeiten oder als studentische Hilfskräfte einen Beitrag zum Gelingen dieses Forschungsvorhabens leisteten.

1. Kurzdarstellung

1.1. Aufgabenstellung

In Anbetracht des aktuellen Trends zur Energie- und Ressourcenschonung durch Leichtbau liegt ein möglicher Lösungsansatz in der Verwendung von Bauteilen aus CFK (Kohlenstoffaserverstärkter Kunststoff). Den Stellenwert dieser Thematik stellt eine Studie von Roland Berger/VDMA dar [1]:

- Demzufolge wird erwartet, dass der Bedarf an CFK-Bauteilen bis 2020 um jährlich 17% steigt.
- Um die Bauteile günstiger herstellen zu können, müssten aber im gleichen Zeitraum die Prozesskosten um ca. 40% gesenkt werden.

Der konventionelle Herstellungsprozess von CFK-Bauteilen bedingt die Konstruktion und den Bau von Laminier- vorrichtungen. Diese basieren auf 3D-Geometriedaten des zu produzierenden Bauteils, wodurch werkstückspezifische Vorrichtungen entstehen. Bezugnehmend auf die Anzahl der zu produzierenden Bauteile je Form ergeben sich somit bei geringen Stückzahlen (Kleinstserien, Prototypenbau) hohe Stückkosten. Weiter bedingen diese "starrten" Vorrichtungen neben einer hohen Vorlaufzeit - aufgrund der Erstellung der notwendigen Formen - auch einen hohen Bedarf und Verbrauch an Ressourcen (Material, Energie, Personal, etc.).

Hierzu fokussiert das Forschungsvorhaben FlexForCFK den Einsatz "flexibler" Laminier- vorrichtungen (Abbildung 1). Die modifizierbare Form (Endkontur wird über ausfahrbare Stößel gebildet) führt zum Wegfall der festen Zu- ordnung von Werkstück zu Werkzeug; die notwendige Werkzeugform (Laminier- vorrichtung) kann dem Werkstück - ohne die Notwendigkeit konventioneller Fertigungsprozesse (spanende bzw. spanlose Fertigung) - unmittelbar angepasst werden. Die gewünschte Formgeometrie wird unmittelbar aus 3D-CAD-Daten angesteuert. Im Ver- gleich zu konventionell gefrästen CFK-Bauteilen bezweckt dies, dass kaum Formmaterial verbraucht wird. Vor Beginn der Fertigung werden die CAD-Daten einem Fertigungscheck unterzogen. Hier wird überprüft, ob die Bau- teile mit einer vorliegenden Anlage fertigbar sind und inwieweit zusätzlich ein Rapid Tooling (RT) Einsatz für filigrane Konturen beziehungsweise Geometrien innerhalb des zu laminierenden CFK-Bauteils erforderlich sind. Ist die Fertigbarkeit geklärt, werden die Höheninformationen aus dem CAD-Modell in Ansteuersignale für die Aktua- toren umgewandelt und die Interpolationsschicht stellt sich auf die gewünschte Kontur ein. Im Bedarfsfall kann der Rapid Tooling Einsatz aufgesetzt werden.

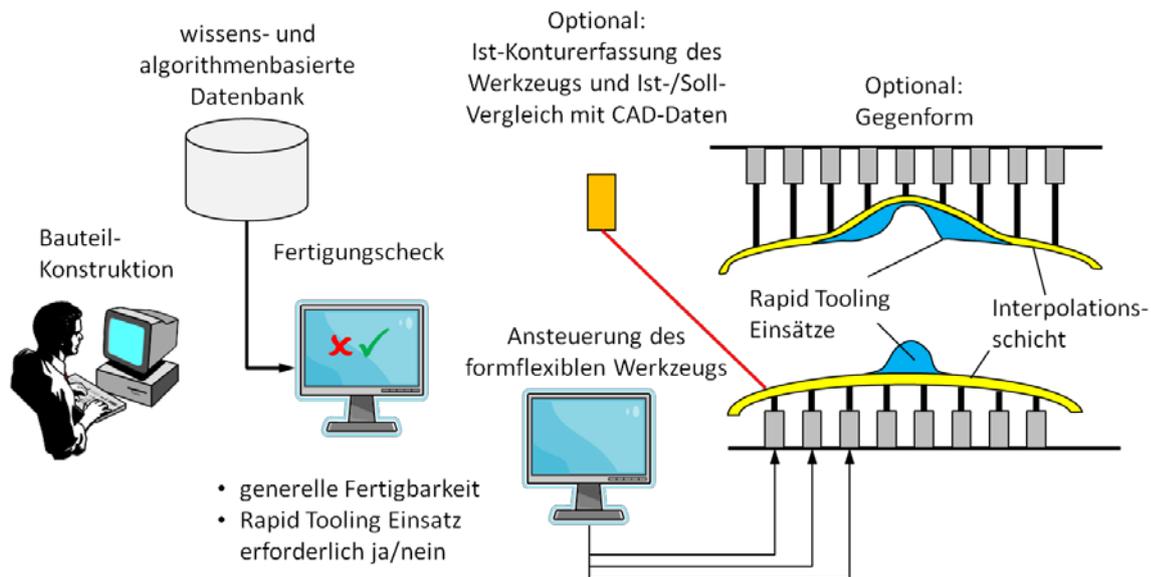


Abbildung 1. Basiselemente der FlexForCFK-Prozesskette

Das Vorhaben, welches im Rahmen der ausgewiesenen Hightech-Strategie 2020 der Bundesregierung dem Bedarf- feld "Klima/Energie" zuzuordnen ist, hat somit ein ressourcenschonendes Verfahren zum Ziel: Energie-, Ma- terial- Personal-, Zeit- und Recyclingkosten, die alle bisherigen Verfahren zur konventionellen Formerstellung benötigen, entfallen weitestgehend.

1.2. Voraussetzungen und Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Die Voraussetzungen zu Beginn des Projektstartes ergeben sich aus den Referenzen der Kooperationspartner. Die Zusammenarbeit resultierte wie folgt (Abbildung 2):

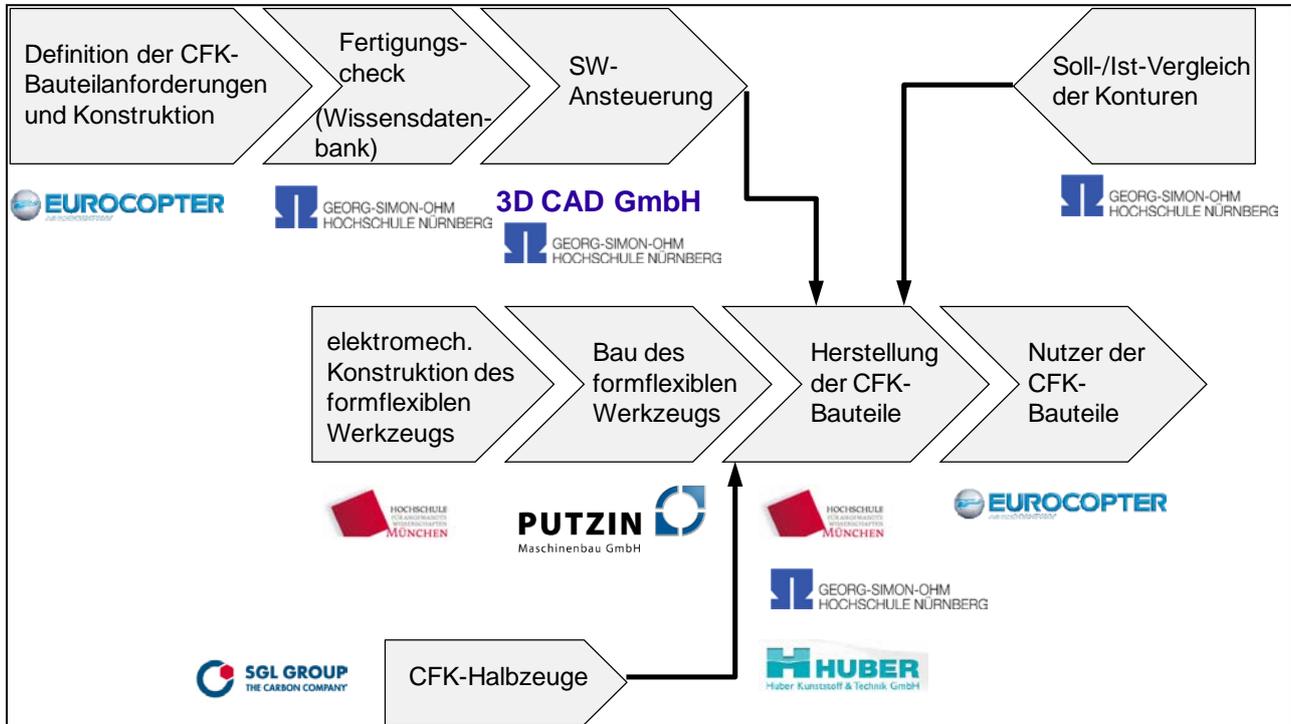


Abbildung 2. Kooperationsprinzip zwischen Hochschulen und industriellen Projektpartnern.

- Die Projektkoordination für das Gesamtprojekt liegt bei der Hochschule für angewandte Wissenschaften München, Fakultät für Maschinenbau/Fahrzeugtechnik/Flugzeugtechnik, Prof. Christoph Maurer. Hier liegen auch die wissenschaftlichen Ursprünge des Verfahrens und die Projektleitung für den Projektanteil der Hochschule München.
- Die Technische Hochschule Nürnberg Georg Simon Ohm ist die zweite Hochschule im Projekt. Die Projektleitung obliegt Prof. Dr.-Ing. Rüdiger Hornfeck.
- Als zukünftiger Anwender des Verfahrens fungiert die Firma EUROCOPTER DEUTSCHLAND GmbH. Dieses Unternehmen ist einer der Marktführer in der Anwendung von CFK Bauteilen, die nach bisherigen, klassischen CFK-Laminierverfahren hergestellt werden.
- Als weltweit führender Hersteller von CFK Halbzeugen begleitet die Firma SGL Carbon GmbH das Forschungsprojekt.
- Die Firma Huber Kunststoff & Technik GmbH vertritt im Projekt die Hersteller von CFK Bauteilen. Die Firma Huber ist daran interessiert, Bauteile nach dem neuen Verfahren für ihre Kunden herzustellen.
- Als Hersteller der neuartigen FlexForCFK-Anlage dient die Putzin Maschinenbau GmbH.
- Bei der Erstellung der für das Verfahren benötigten Software wirkt als Partner die Firma 3DCAD GmbH mit.

1.3. Planung und Ablauf des Vorhabens

Im nachfolgenden werden die Arbeitspakete entsprechend der beantragten Projektplanung erläutert. Abbildung 3 fasst die genannten Arbeitspakete in Form einer Zeitplanung auf und ordnet die industriellen Projektpartner den einzelnen Arbeitspaketen zu.

AP 1: Erstellung des Pflichtenhefts und der Verfahrensparameter

Ausgangsbasis des Pflichtenheftes für ein formflexibles Werkzeug ist das zur Antragsphase mit der Fa. Eurocopter festgelegte Autoklav-Verfahren. Diese Rahmenbedingung wird zu Beginn des Projekts mit allen Projektpartnern hinsichtlich Leistungsanforderungen der Anlage, Verfahrensparameter für die Fertigung und zu fertigende CFK-Bauteile präzisiert.

AP 2: Konzipierung der Gesamtanlage

Auf der Basis des vorhandenen Know-hows beider Hochschulen werden mit Ideenfindungsmethoden Grobkonzepte für das formflexible Werkzeug erstellt und bewertet. Diese Grobkonzepte sollen auch die Randbedingungen für ein modulares Maschinenkonzept erfüllen.

Das Ergebnis dieses Arbeitspakets ist ein optimiertes Gesamtkonzept, das im Rahmen des Konzeptreviews (M1) vorgestellt und mit den Partnern diskutiert wird.

AP 3: Definition der Schnittstellen zwischen der HM und GSO

Nachdem das Projekt von zwei Hochschulen bearbeitet werden soll, ist eine Abgrenzung der mechanischen, elektrischen und informellen Schnittstellen notwendig. Hier ist geplant, dass ein gemeinsames Schnittstellendokument erstellt wird, das unter Konfigurationsmanagement gestellt wird. Hiermit ist sichergestellt, dass beide Hochschulpartner die einzelnen Teilarbeitspakete zielorientiert und effizient abarbeiten.

AP 4: Entwicklung des formflexiblen Werkzeugs

Die Entwicklung des formflexiblen Werkzeuges gliedert sich in fünf Teilpakete. Jedes Teilpaket wird unter Verantwortung einer Hochschule bearbeitet. Die Einzelergebnisse werden dann unter AP 8 zu einem Gesamtsystem zusammengeführt.

AP 4.1: Entwicklung einer neuartigen Interpolationsschicht

Aufbauend auf vorhandenem Know-How aus dem Projekt RaProSch soll eine, an das Verfahren angepasste, Interpolationsschicht hergestellt werden. Die Auslegung der Interpolationsschicht erfolgt durch entsprechende Berechnungen (FEM) und Vorversuche. Das AP schließt zusätzlich die Testreihe der fertigen Interpolationsschicht unter den relevanten Verfahrensbedingungen mit ein.

AP 4.2: Entwicklung der Hardware für die Aktuatoren

Die Stempelmatrix, bestehend aus Ober- und Unterform, inkl. deren Steuerung und dem entsprechenden Regelungskonzept, soll in diesem AP konzipiert, umgesetzt und durch erste Handversuche abgesichert werden.

AP 4.3: Entwicklung der Anlagenbasis

Die Basis der Anlage, in welcher das Konzept aus Stempeln und Interpolationsschicht zusammengeführt werden soll, wird entwickelt.

AP 4.4: Entwicklung der Ansteuersoftware

Wie beschrieben, sind die Ausgangsdaten des 3D-CAD Modells in einem neutralen Datenformat. Höhendaten aus dem CAD-Modell für die Ansteuerung der Aktuatoren müssen nun in Ansteuersignale umgewandelt werden, die dann in das Bus-System der Anlagensteuerung eingespielt werden muss. Diese Schnittstellen-SW wird von der Fa. 3DCAD und der OHM-HS entwickelt.

AP 4.5: Entwicklung des Leistungsteils und der Bus-Ansteuerung

Die Ansteuersignale aus AP 4.4 werden in ein Bus-System eingespeist und die Aktuatoren über eine SPS-Steuerung angesteuert (welches Bus-System und welche SPS-Steuerung eingesetzt werden, wird in AP 1 bis 3 festgelegt.). Betrieben wird über einen Touchscreen. Die Hard- und Software für dieses Arbeitspaket wird hier vom OHM entwickelt.

AP 5 Untersuchungen zu den Rapid Tooling Einsätzen

Wie bereits geschildert, sind Erfahrungen auf dem Gebiet der Herstellung von Formteilen mit dem FDM-Verfahren für die Abformung von CFK-Bauteilen vorhanden [2]. Aufbauend auf dieser Basis müssen für das Projekt Flex-ForCFK drei weitere Teilpakete bearbeitet werden.

AP 5.1: Untersuchungen zum Material- und Prozesseinsatz

Die vorhandenen Untersuchungen haben sich auf das FDM-Verfahren mit ABS-Kunststoff beschränkt. Darüber hinaus müssen andere Grundwerkstoffe und generative Fertigungsverfahren analysiert werden, die als Rapid Tooling Einsätze in Betracht kommen könnten. Zu untersuchende Kriterien sind u.a. die Formstabilität, die Oberflächenrauheit, die Maßgenauigkeit und die Möglichkeiten der Oberflächenveredelung.

AP 5.2: Oberflächenveredelungsverfahren

Die Untersuchungen aus [2] haben gezeigt, dass mit bestimmten nachgeschalteten Verfahren die Oberfläche der Rapid Tooling Teile erheblich verbessert werden. Grundsatzversuche hierzu wurden bereits durchgeführt. Hier sollen die bekannten Verfahren intensiver getestet und die Eignung auf weitere Materialien, die sich unter AP 5.1 ergeben, ausgeweitet werden.

AP 5.3: Positionierungsmöglichkeit auf der Interpolationsschicht

In diesem Arbeitspaket ist ein Konzept zu entwickeln, wie die Rapid Tooling Teile positionsgenau und stabil auf die Interpolationsschicht gesetzt werden können. Dieses Konzept wird anschließend ausgearbeitet, damit eine Integration in die Gesamtanlage möglich ist.

AP 6: Aufbau Wissensdatenbank

Es wird eine Datenbank aufgebaut, auf deren Basis beurteilt werden kann, ob eine Fertigung möglich ist und ob ein Rapid Tooling Einsatz erforderlich ist. Hier werden in die Datenbank sowohl versuchstechnisch ermittelte Daten aus der FlexFor-Anlage eingespeist, als auch Algorithmen geschrieben, die eine Berechnung der Fertigbarkeit erlauben.

AP 7: Modul zum Soll-/Ist-Vergleich

Damit optional eine Kontrolle der eingestellten Interpolationskontur in Verbindung mit dem Rapid Tooling Einsatz erfolgen kann, ist angedacht, die Kontur einzuscannen. Die gescannten Formen können dann mit dem CAD-Modell verglichen werden, um Abweichungen zu erkennen. Hierzu ist angedacht, einen Laserscankopf über die Kontur zu führen, dessen Höhendaten dann in den Rechner zurückgeführt werden. Angestrebt wird, dass die hierfür erforderliche Mechanik kompatibel zum AP 5.3 ist. Diese Randbedingungen fließen zusätzlich in die Konstruktion der Positioniereinrichtung aus AP 5.3 mit ein. Darüber hinaus werden Zusatzapplikationen programmiert, damit eine komfortable und effektive Bedienung möglich ist. Zudem werden durch die Analyse des Soll-/Ist-Vergleichs die Aspekte einer Qualitätskontrolle erfüllt.

AP 8: Gesamtintegration

AP 8.1: Integrationskonzepte

Die einzelnen Teilkonzepte müssen in ein Gesamtkonzept überführt und weiterentwickelt werden. Hier muss auch die Integration der steilen Strukturen durch Platzierung und Fixierung der RT Teile eingebunden werden und in Handversuchen überprüft werden. Das Gesamtkonzept muss für die gewählten Verfahrensparameter entwickelt und umgesetzt werden.

AP 8.2: Aufbau der Anlage

Die Teilmodule werden zusammengeführt und zu einer Gesamtanlage aufgebaut. Die Software wird in Betrieb genommen.

AP 8.3: Funktionstest

Erste Tests der Gesamtanlage werden durchgeführt.

AP 9: Herstellung der CFK-Musterbauteile

Dieses AP sieht die Herstellung von Musterbauteilen mit integrierten feinen Strukturen unter verschiedenen Verfahrensparametern vor. Dadurch werden die Hard- und Software unter realistischen Bedingungen getestet und auftretende Defizite können korrigiert werden.

AP 10: Evaluierung der CFK-Musterteile

Durch die Anwender festgelegte Musterteile sollen nach neuem Verfahren hergestellt werden und anschließend ihre Qualität durch den Vergleich mit konventionell hergestellten Bauteilen begutachtet werden.

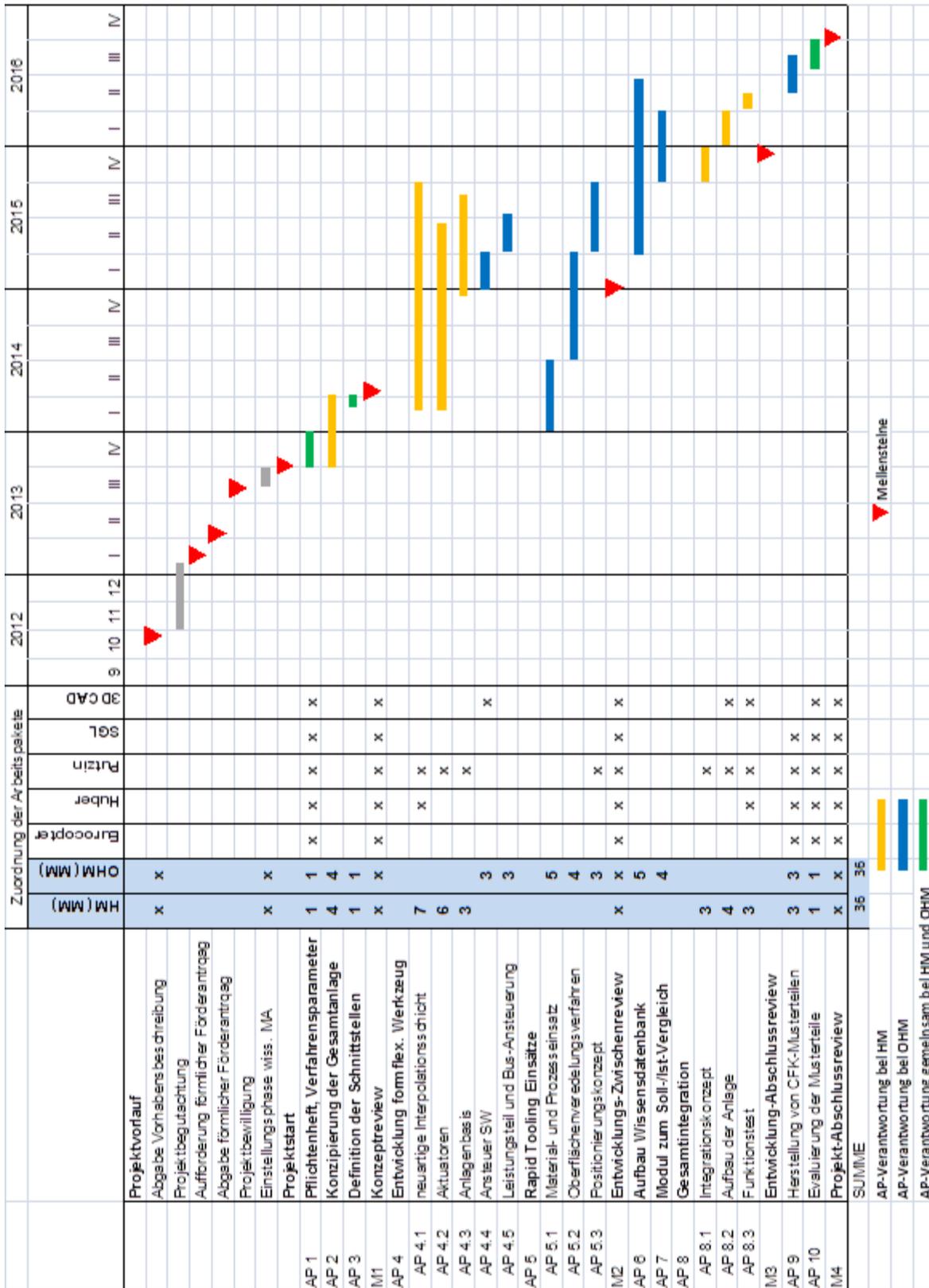


Abbildung 3. Zeitplan und Zuordnung der Industriepartner zu den Arbeitspaketen

1.4. Stand der Wissenschaft und Technik

CFK Bauteile werden derzeit erzeugt, indem zunächst eine Vorrichtung konstruiert wird, die auf den Geometriedaten des 3D-Bauteilmodells beruht. Diese Vorrichtung dient dazu, Vorformlinge in einem Warmformprozess zu konfektionieren, die dann in eine zweite Form umgesetzt werden, in denen sich die CFK-Schichten mit dem Matrixsystem verbinden können. Alternativ dazu können die CFK-Matten oder Gelege in eine Endform drapiert werden, in denen dann das CFK-Endprodukt geformt wird [3]. Vom Auftrag bis zur fertigen Laminierform vergehen in der Regel mindestens vier Wochen.

Bei der Betrachtung von Ansätzen zur Schaffung eines formflexiblen Werkzeuges werden hauptsächlich endkonturnahe Verfahren verfolgt. Das "Near-Net-Shape-Pin-Tooling-Werkzeug" (NTP) [4] beispielsweise bildet durch quadratische Segmente, welche in axialer Lage verschoben werden können, eine endkonturnahe Oberfläche des Bauteils ab. Eine Nachbearbeitung zur Erhaltung der endgültigen Form muss hierbei erfolgen. Ähnlich diesem Verfahren erfolgt beispielsweise auch das Herstellen einer Sandgussform [5]. Ein Werkzeug zur flexiblen Abformung von Bauteilen wurde von 2Phase Technologies entwickelt. Das sogenannte Reconfigurable Tooling System stellt ein Abformwerkzeug eines bereits vorhandenen Bauteils dar. Es besteht aus einer Membran, welche mit einer Flüssigkeit und Partikeln gefüllt ist. Beim Abformprozess wird die Membran evakuiert, die Flüssigkeit wird abgesaugt. Die verbleibenden Partikel bilden bei erhöhter Temperatur eine feste Form. Der Vorgang kann durch die Wiederbefüllung mit Flüssigkeit rückgängig gemacht werden. Die Verwendung dieses Systems kann ausschließlich bei bereits vorhandenen Bauteilen benutzt werden [6].

Die oben genannten Ansätze für wiederverwendbare Werkzeuge bieten grundsätzlich nur die Möglichkeit endkonturnahe Bauteile herzustellen. Andernfalls muss eine Negativform eines Bauteils bereits bestehen. Für die Herstellung von Bauteilen aus CFK können diese daher nicht angewendet werden. Ansätze zur Herstellung eines formflexiblen Werkzeuges, welches die Endkontur abbildet, bestehen größtenteils auf höhenverstellbaren Stempeln, ähnlich dem NTP-Werkzeug, welche jedoch durch eine zusätzliche Interpolationsschicht erweitert sind und somit die exakte Kontur des Bauteils wieder gibt. In der Arbeit von [7] wird ein formflexibles Formwerkzeug zur Streckformung, ebenfalls auf einer Stiftmatrix aufbauend, von Metalllegierungen vorgestellt. Die Arbeit untersucht die Einflüsse der Interpolationsschicht, sowie die Rückstelleffekte des Metalls im Hinblick auf die Endkontur. Die Umformung von Metallen bei beiden Werkzeugen stellt keine außerordentlichen Anforderungen an die Interpolationsschicht. Dies liegt an der Steifigkeit des Materials, welche jedoch bei formlabilen Materialien wie CFK-Fasern nicht mehr gegeben ist und somit die Interpolationsschicht das entscheidende Element zur Formgebung darstellt. Ein weiteres Patent zur Herstellung von Schiffssegeln aus einer Thermoplastfolie beruht auf einem Lattengerüst, welches als Gitter angeordnet ist. Dieses Gerüst ist in einer elastischen Masse eingebettet, welche nicht näher spezifiziert wird [8].

Ein durch Stifte segmentierter Anlagenaufbau wurde ebenfalls in den USA zum Patent angemeldet. Hier wird als Zwischenmaterial eine RTV Gummimischung benannt, jedoch nicht näher spezifiziert. Die Höheneinstellung erfolgt über Stempel, welche durch eine zentrale Einheit in ihrer Höhe verstellt und durch Rotation in einem Block aus oben benannter Gummimischung geklemmt werden. Als Anwendung hierfür wird die Herstellung von Composite-Materialien genannt. Es wird jedoch nicht detailliert auf ein bestimmtes Verfahren zur Herstellung dieser Composite-Materialien eingegangen. Es kann davon ausgegangen werden, dass die Form nur für das Handlaminierverfahren angewendet werden kann, da keine weiteren spezifischen Details bzgl. Druck- und Temperaturbeständigkeit der Interpolationsschicht angegeben werden. Die Form besteht aus einzelnen Modulen. Dadurch lässt sich die Fläche beliebig erweitern. Ebenso können die Module von der zentralen Steuereinheit entfernt werden, um zu einem Autoklaven transportiert zu werden [9].

Im Rahmen eines Entwicklungsprojektes zwischen der Hochschule München und der BMW AG wurde ein Verfahren bis zum Prototyp entwickelt, bei dem Plexiglasscheiben unter gänzlichem Verzicht auf eine Form hergestellt werden können. Die CAD Daten werden umgerechnet in Höhenkoordinaten und werden auf einen Tisch (Abbildung 4 links) mit einer Vielzahl von vertikal sehr genau verstellbaren Aktuatoren (Abbildung 4 rechts) übertragen. Auf den Aktuatoren liegt eine Interpolationsschicht aus einem speziellen Material. Diese Interpolationsschicht stellt das Schlüssel-know-how des Verfahrens dar. Die Aktuatoren werden automatisch so eingestellt, dass die Matte mit hoher Genauigkeit die Form annimmt, die zum Abformen des Plexiglasses gefordert wird. Das Plexiglas wird auf ca. 140°C erwärmt und dann direkt auf die kalte Matte aufgelegt. Das aufgelegte erwärmte Plexiglas kühlt innerhalb von wenigen Minuten ab und nimmt dabei die Form der Matte an. Ein 3D Plotter zeichnet die Außenkontur automatisch auf die Scheibe, die dann sofort ausgesägt werden kann. Auf diese Weise können innerhalb von ca. 2 Stunden Scheiben aus Plexiglas hergestellt werden. Das Verfahren eignet sich zur schnellen und flexiblen Herstellung von Plexiglasscheiben, wie sie vornehmlich im Prototypenbau bei Fahrzeugherstellern benötigt werden.

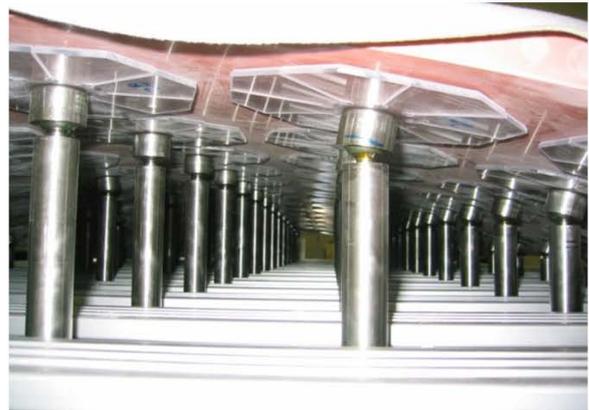


Abbildung 4. Flexible Anlage für PMMA (links) und Blick auf die Mattenunterseite und Aktuatoren (rechts) [Bildquelle: BMW]

Die Technische Hochschule Nürnberg Georg Simon Ohm beschäftigte sich bereits mit dem schnellen Prototypenbau von CFK-Bauteilen in einem Forschungsprojekt. Hier wurden CFK-Bauteile auf der Basis von Rapid Prototyping Grundformen abgeformt [10]. Dieses Thema wird im beantragten Projekt aufgegriffen werden und zur Abbildung filigraner Strukturen auf großen Freiformflächen dienen.

Diese Vorarbeiten gewährleisten eine solide Grundlage, um die Herausforderungen, die CFK-Prozesse an die Verfahrenstechnik stellen, annehmen zu können.

2. Eingehende Darstellung der Forschungsergebnisse

Im Nachfolgenden werden die Ergebnisse der Arbeitspakete detailliert erläutert, die in alleiniger Verantwortung der Technischen Hochschule Nürnberg liegen oder an denen die Technische Hochschule Nürnberg mit der Hochschule München gemeinsam beteiligt sind (vgl. Abbildung 3).

2.1. Erstellung des Pflichtenhefts und der Verfahrensparameter (AP 1)

Der nachfolgenden Tabelle 1 bis Tabelle 3 ist die Dokumentation der Pflichten entnehmbar.

Tabelle 1. Pflichtenheft CFK-Fertigungsverfahren

Forderung/Wunsch	Anforderung	Qualifizierung
Fertigungsprozess		
F	Fertigungsverfahren	Niederdruck Prepreg
W		Vakuum-Infusion (z.B. VAP)
W		Nasslaminieren
Parameter		
F	Druck	-0,95 bar (unter Vakuumfolie)
W		~5 bar (-0,95 bar unter Vakuumfolie, ~4 bar Außendruck)
F	Temperatur	max. 80°C
W		180°C
F	Dauer	Bis zu 24h
Werkstoffe		
F	Faserarten	Glasfasern, Kohlenstofffasern, Aramidfasern, andere Fasern

F	Halbzeuge	Gewebe Gelege Niederdruck-/Niedertemperatur-Prepregs
F	Matrixsysteme	Epoxidharze
W		Polyesterharze
W		Polyurethane

Tabelle 2. Pflichtenheft Musterbauteil

Forderung/ Wunsch	Anforderung	Qualifizierung
Realisierbare Bauteilgrößen		
F	Länge	510mm
F	Breite	340mm
F	realisierbare Krümmungsradien ohne Einsätze	120mm
W		60mm
F	Maximal realisierbare Krümmungsradien	10mm
F	Realisierbare Formtiefe ohne Einsatz	200mm
W		400mm
F	Maximal realisierbare Formtiefe	220mm
W		440mm
F	Geometrische Komplexität ohne Einsatz	Stetig gekrümmt in zwei Raumrichtungen
F		Positiv und negativ gekrümmt
W		Kerne (Schaum, Holz, o.ä.)
W	Geometrische Komplexität filigraner Strukturen	Verprägungen
F		Scharfe Kanten, Knicke
F		Mulden
W		Rippen
Werkstoff		
W	Form	Prepreg
F		Trockene Fasern, flüssiges Harz
F	Fasern	Kohlenstofffasergewebe
F	Matrix	Epoxidharz

Tabelle 3. Engineering Framework

Forderung/ Wunsch	Anforderung	Qualifizierung
Bedienung		
W	Bedienbarkeit von CAD-Software aus	Am Beispiel einer CAD-Software (z.B. CREO)
F	Direkte Bedienung in separatem Programm	Das Ansteuern und der Fertigungscheck sollen auch in einem Standalone-Betrieb möglich sein
W	Ansteuerung (Einrichtbetrieb) der Flex-ForCFK-Maschine	--

Funktionalitäten		
F	Ableitung von Höhendaten aus Freiformfl.	Aus Freiformflächen sollen automatisiert die Stempeldaten abgeleitet werden.
F	Datenaustausch mit gängigen Austauschformaten	Einlesen von Flächenmodellen
W	Die Freiformfläche soll automatisch eine effiziente Baulage auf dem Maschinenraster einnehmen	---
F	Interoperabilität mit RP-Anlagen	Es soll möglich sein die RP-Einsätze "direkt" an einen 3D-Drucker übertragen zu können.
Fertigungscheck		
F	Radien	Überprüfung der maximal möglichen Radien der Freiformflächen, sowie der RP Teile
F	Steigung	Untersuchung der Geometrie auf maximale Steigungen
Rahmenbedingungen		
F	Unabhängigkeit von einem speziellen CAD-Software-Anbieter	Wie z.B. AutoDesk, ptc, etc.
W	Keine teure Zusatzsoftware zum Betrieb nötig.	Im Rahmen bis 1000.- €
W	Der Quellcode soll nicht veröffentlicht werden müssen.	Es sollen keine Lizenzen von Fremdsoftware (z.B. Software unter OpenSource-Lizenz) zur Veröffentlichung des Quellcodes führen oder die Kommerzielle Nutzung verhindern.
F	Es soll etablierte Software verwendet werden	Durch einen immensen Aufwand einer Eigenentwicklung soll zur Umsetzung etablierte Fremdsoftware verwendet werden.

2.2. Definition der Schnittstellen (AP 3)

Die wesentlichen Schnittstellen und deren Umsetzung sind in Tabelle 4 zusammengefasst.

Tabelle 4. Schnittstellendefinition

Schnittstelle	Umsetzung
Mechanische Schnittstellen	
Positionierung Rapid Tooling-Laminieraufsatz auf Interpolationsschicht	Die Hochschule München nutzt eine elastische Silikonschicht. Die Technische Hochschule Nürnberg positioniert die Rapid Tooling-Laminieraufsätze, zerstörungsfrei demontierbar.
Anschluss Modul zum Soll-/Ist-Vergleich	Die Hochschule München konstruiert eine Modulbauweise. Die Technische Hochschule Nürnberg gestaltet das Soll-/Ist-Vergleich-Modul schnittstellenunabhängig, im Idealfall kontaktfrei.
Elektrische Schnittstellen	
Verbindung SPS und Aktuatoren	Die Hochschule München zentralisiert die Spannungsversorgung aller Aktuatoren in einem Stecker. Die Technische Hochschule Nürnberg konfiguriert Transformatoren für die Aktuatorenantriebe und führt die Kabelanschlüsse in zentralisierter Weise aus dem SPS-Schaltschrank in einem Spannungskabel inkl. Stecker.
Informelle Schnittstellen	
Initiale Höheneinstellung der	Die Hochschule München definiert die Übersetzung „Höhenausfahrweg pro

Pins	Schritt“. Die Technische Hochschule Nürnberg leitet den Höhengang je Stempel dokumentiert in einer Textdatei ab und programmiert die SPS-Ablaufsteuerung basierend auf CANOpen, welche auf die bauteilspezifische Textdatei zugreift, extrahiert die Höhendaten und leitet entsprechend der Übersetzung die notwendige Schrittzahl der Aktuatoren (Schrittmotoren) ab
Modul zum Soll-/Ist-Vergleich	Die Hochschule München integriert eine „Bremse“ zum starren Verharren der eingestellten Pins. Die Technische Hochschule Nürnberg führt anschließend den Soll-Ist-Abgleich aus und justiert via SPS-Zugriff gegebenenfalls Abweichungen je Pin.

2.3. Entwicklung der Ansteuersoftware (AP 4.4)

Der konzipierten und implementierten Ansteuer-Software liegt die Entwicklung eines Engineering-Frameworks zu Grunde, der die gesamte Prozesskette der Fertigung von CFK-Komponenten mittels formflexibler Pin-Type-Tools abdeckt. Dieser Engineering Framework (Kapitel 0) sei der Ansteuer-Software (Kapitel 2.3.2) vorgezogen erläutert.

2.3.1. Konzeption eines Engineering Frameworks zur Befähigung der prozesssicheren Fertigung von CFK-Bauteilen mittels formflexibler Pin-Type Tools¹

Wie in Abbildung 5 dargestellt, setzt sich der neuartige Ansteuerablauf aus nachfolgenden Bausteinen zusammen:

- Initiales Design-Review,
- Generierung der Maschinendaten und einstellen des Pin-Type-Tools
oder
- initiales Design-Review,
- Design-Review unter Berücksichtigung von Miniaturaufsätzen,
- Generierung der Maschinendaten unter Berücksichtigung von Laminieraufsätzen und einstellen des Pin-Type-Tools.

Der Prozessablauf ist abhängig von der Herstellbarkeit des CFK-Panels. Wenn das anfängliche Design Review in der Machbarkeit mit dem zu Grunde liegenden Pin-Type Tool resultiert, folgt die Generierung der Maschinendaten und das Einstellen des Pin-Type Tools. Liegt dies hingegen nicht vor, werden Gründe hierfür zurückgemeldet. Auf der Grundlage dieser kann der Konstrukteur das Design zur Befähigung der Herstellbarkeit ändern oder ein neues Design wird erstellt, mit welchem die Herstellbarkeit unter Anwendung von Miniaturaufsätzen geprüft wird. Diese Miniaturaufsätze befähigen filigrane Geometrien, welche allein mit dem zu Grunde liegenden Pin-Type Tool nicht machbar sind (Abbildung 6).

¹ Die Ausführungen entstammen teilweise der eigenen wissenschaftlichen Veröffentlichung in [11], welche im Rahmen dieses Forschungsprojektes entstanden ist.

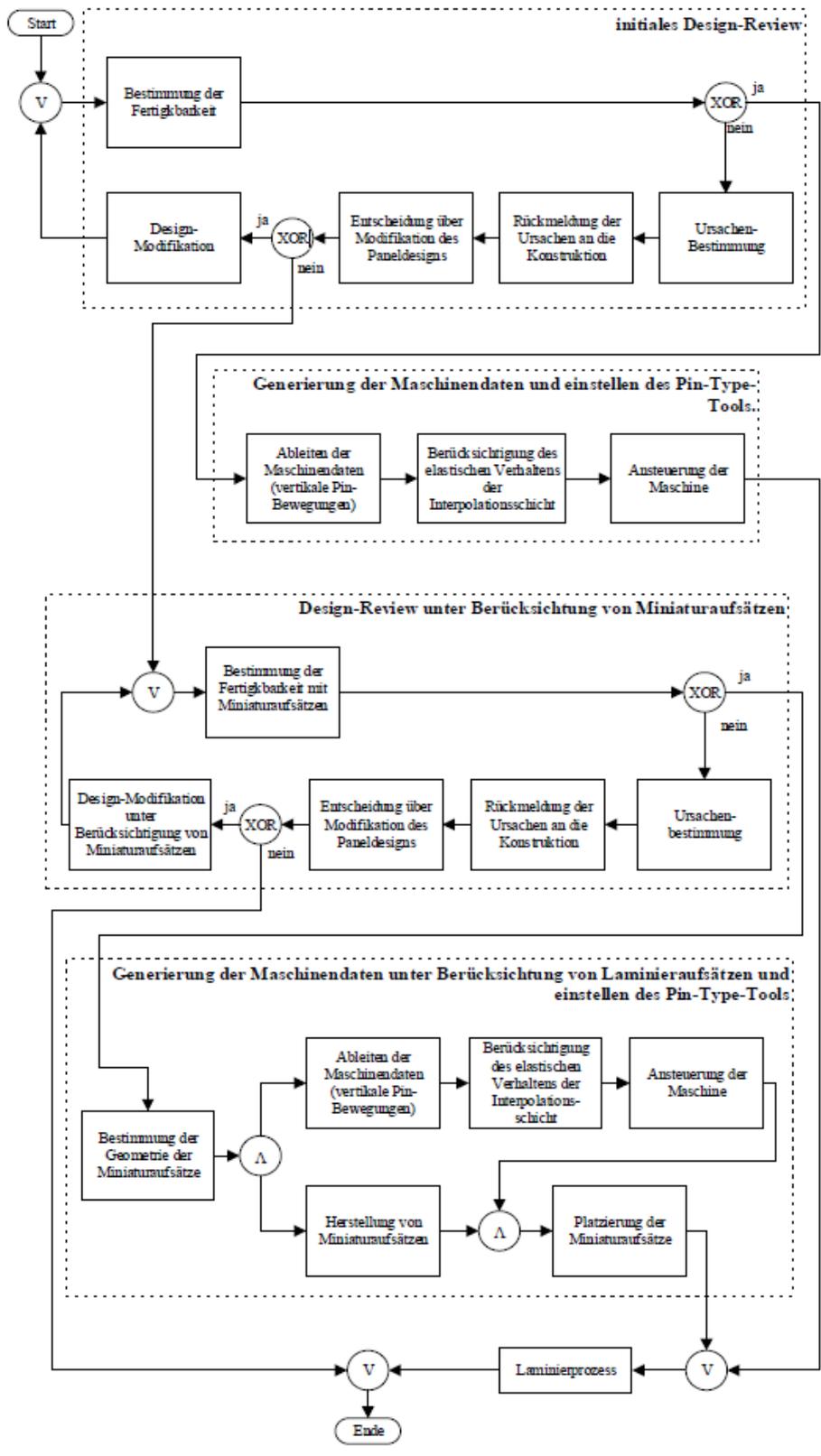


Abbildung 5. Arbeitsinhalte und deren Prozessfluss

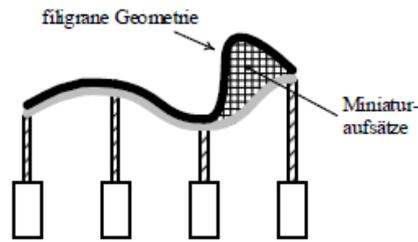


Abbildung 6. Befähigung filigraner Geometrien innerhalb eines CFK-Panels durch Miniaturaufsätze

Die Miniaturaufsätze können unterschiedlicher Art sein, beispielsweise ein herunterskaliertes Pin-Type-Tool oder ein zuvor gefertigter und wiederverwendbarer Aufsatz aus starrem Material, welcher zur Wiederverwendung gelagert wird. Der Inhalt des Design Reviews unter Berücksichtigung von Laminieraufsätzen stimmt weitestgehend mit dem Inhalt des initialen Design Reviews überein.

Jedoch wird der Einfluss der Geometrie des Miniaturaufsatzes – und somit die Befähigung des Herstellbarkeit – berücksichtigt. Falls das Design-Review unter Berücksichtigung von Miniaturaufätzen in einer fehlenden Machbarkeit resultiert, werden ebenso Gründe hierfür zurückgemeldet. Hieran anknüpfend kann der Konstrukteur das Design modifizieren oder das CFK-Panel ist mit dem zu Grunde liegenden Pin-Type-Tools nicht machbar. Entsprechend hängt die Fertigbarkeit in besonderem Maße von den Designparametern des Pin-Type-Tools ab.

Wenn das initiale Design-Review die Machbarkeit mittels Miniaturaufätzen bestätigt folgt die Generierung der Maschinendaten zur Höhenverstellung des Pin-Type-Tools. Diese Datengenerierung unterscheidet sich von der Datengenerierung ohne die Anwendung von Miniaturaufätzen in zweierlei Hinsicht. Zum einen ist die vertikale Pinbewegung nicht zwingend im gleichen Ausmaße wie im Falle der Fertigung ohne Miniaturaufsätze. Dies liegt darin begründet, dass die Geometrie der Miniaturaufsätze vorher notwendige Ausfahrhöhen kompensieren kann. Zum anderen bedarf es der zusätzlichen Generierung der Miniaturaufsätze. Diese Generierung hängt zudem von der Art des Miniaturaufsatzes ab.

Die Engineering Framework befähigenden Schlüsselfunktionalitäten bzw. -prozesse sind mit Lösungen in den nachfolgenden Kapiteln beschrieben.

Bestimmung der Fertigbarkeit

Die Bestimmung der Fertigbarkeit entspricht einer Verifikation auf Erfüllung von design-for-manufacturing-Kriterien [12,13], in Abhängigkeit von der genutzten Fertigungstechnologie. Im vorliegenden Fall muss das CFK-Pael Kriterien des Pin-Type-Toolings erfüllen. Da solche Konstruktionsrichtlinien in vielen Fällen erfahrungsbasiert entstehen und somit im Zeitverlauf ansteigen, wird zur Bestimmung der Fertigbarkeit mittels Pin-Type-Tools eine Datenbank vorgeschlagen, in welcher Konstruktionsrichtlinien und Algorithmen zu Verifikationszwecken abgelegt sind (Tabelle 5).

Tabelle 5. Beispielhafte Datenbasis mit Wissen über Fertigbarkeit mittels Pin-Type Tooling

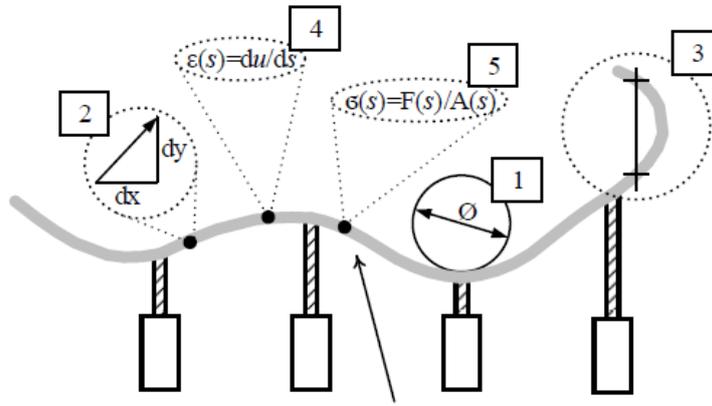
#	Konstruktionsrichtlinie	Algorithmus ¹ zur Verifizierung	Grenzwert
1	Krümmungsradius	Kleinster Radius am Bauteil > kleinster einstellbarer Radius durch Maschine	13mm
1	Maximaler Gradient	Maximaler Gradient am Bauteil < maximal einstellbarer Gradient durch Maschine	65°
3	Hinterschnitt	-90° < Gradient < 90°	0°
4	Dehnung	$\epsilon(s) = \delta u / \delta s$	80%
5	Festigkeit	$\sigma(s) = F(s)/A(s)$	5 MPa
...

Das Wissen innerhalb dieser Datenbank entsteht verschiedenartig, beispielsweise durch Simulation, versuchsbaasiert oder aus Erfahrungen aus der Serienproduktion. Abbildung 7 illustriert ausgewählte Einträge in der Datenbank. Die Konstruktionsrichtlinien können zweigeteilt werden:

- Konstruktionsrichtlinien, die vom Typ des Pin-Type-Tools (z. B. Gradienten) und

¹ Aufgrund von Platzmangel sind nur Algorithmus-Konzepte abgebildet.

- Konstruktionsrichtlinien, die von den Eigenschaften der Interpolationsschicht (z. B. Dehngrenze) abhängen.



Beispiel einer erforderlichen Form der Interpolationsschicht

Abbildung 7. Illustration ausgewählter Konstruktionsrichtlinien

Um eine ganzheitliche Fertigbarkeit zu bestimmen, müssen sämtliche in der Datenbank notierte Konstruktionsrichtlinien erfüllt werden. Abbildung 8 illustriert diesen Prozess.

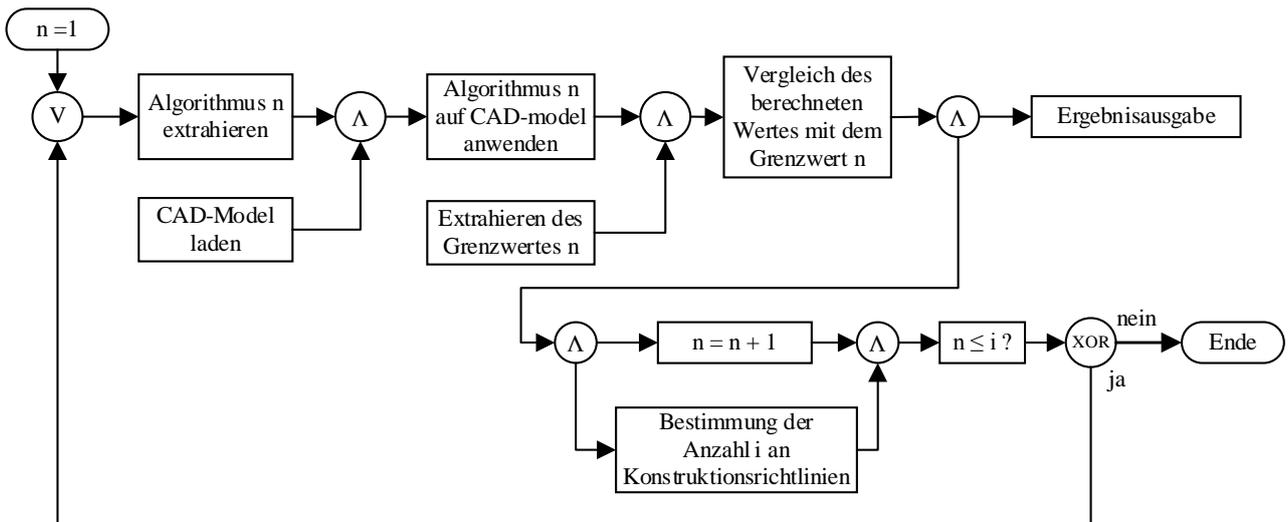


Abbildung 8. Prozessmodell zur Verifizierung der Fertigbarkeit

Im Falle der Bestimmung der Fertigbarkeit unter Berücksichtigung von Laminieraufsätzen werden nur die Konstruktionsrichtlinien berücksichtigt, die die Fertigbarkeit ohne Miniaturaufsätze nicht zuließen. Hierfür werden Geometrien abgeleitet, die mit Miniaturaufsätzen realisierbar sind und die die Erfüllung der restlichen Konstruktionsrichtlinien ermöglichen.

Ableiten der Maschinendaten (vertikale Pin-Bewegungen)

Das Ableiten der Maschinendaten entspricht der Ermittlung der Ansteuersignale für alle Pin-Aktuatoren. Dies ist im vorliegenden Fall gleichzusetzen mit der Bestimmung der vertikalen Ausfahrbewegung für jeden einzelnen Pin. Wie in Abbildung 9 dargestellt, sind konventionell verfügbare CAD-Funktionalitäten hierzu anwendbar. Zunächst sind das Maschinenraster – als Parallele Anordnung der Pins – und das CFK-Panel-Model zu überlagern. Anschließend stehen verschiedene Wege zur Bestimmung der vertikalen Ausfahrhöhen zur Verfügung. Die resultierenden Werte sind anschließend z. B. in einer Textdatei dokumentierbar.

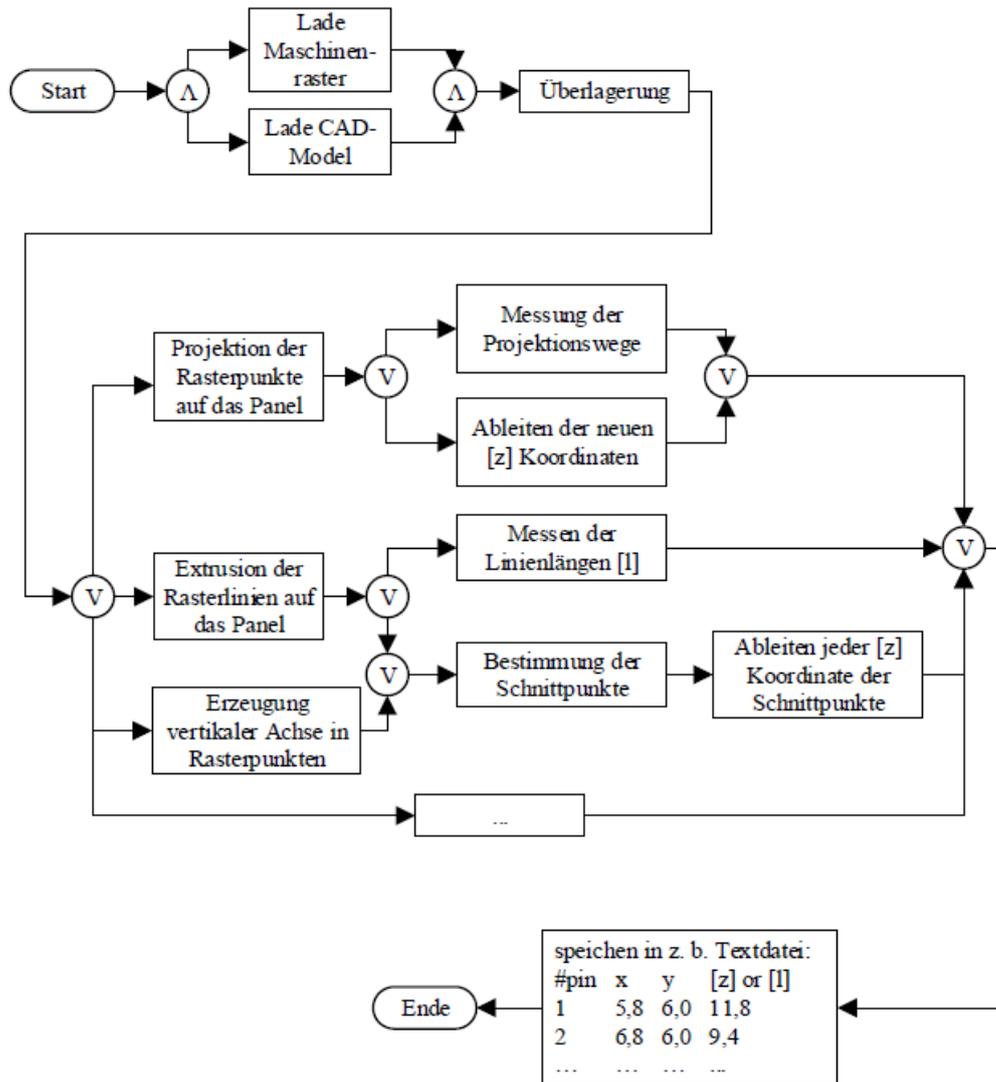


Abbildung 9. Mögliche Prozessabläufe zur Ableitung der vertikalen Pin-Ausfahrhöhen

Im Falle des Bedarfes an Miniaturaufsätzen sind die Ausfahrhöhen entsprechend dem Höhenprofil des Miniaturaufsatzes zu minimieren.

Berücksichtigung des elastischen Verhaltens der Interpolationsschicht

Die Bestimmung der vertikalen Ausfahrbewegung eines jeden Pins im vorherigen Abschnitt basiert auf einem starren Modellverhalten. Tatsächlich ist die Interpolationsschicht elastisch, weshalb ihre Dehnung zu signifikanten Schrumpfungen bzw. Dickenminimierungen führt. Die bedarf einer Kompensierung durch zusätzliche vertikale Pin-Bewegungen. Die Elastizität der Interpolationsschicht und ihre ungleichmäßige Verformung während des Formprozesses führen jedoch zu einer Abweichung zwischen der resultierenden Ist-Form und der vorgegebenen Soll-Form.

Um diese Formfehler zu kompensieren, ist eine geschlossene Steuerungsmethodik anwendbar, welche in Lage ist, elastischen Effekte und den Einfluss von Prozessparameter auszugleichen, Abbildung 10. [14–17]

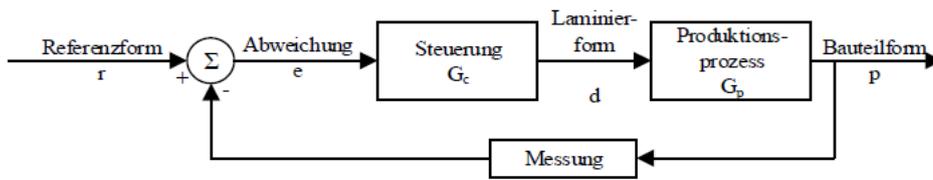


Abbildung 10. Closed-loop shape control [17]

Ableitung der Geometrie der Miniaturaufsätze

Der Einsatz von Miniatureinsätzen bezweckt die Erfüllung verbleibender Konstruktionsrichtlinien welche bis dato nicht erfüllt sind. Hierzu werden die Pins (erneut) in einer Weise eingestellt, dass die Überschreitung von Fertigungsgrenze vermieden wird. Das ganzheitliche Ziel ist hierbei eine (oder mehrere) Pin-Höhen-Einstellungen zu erhalten, welche sämtliche Konstruktionsrichtlinien erfüllen. Dies resultiert jedoch darin, dass die (initial) gewünschte Form durch die Pins nicht abgebildet wird. Die Volumendifferenz-Methode nach Abbildung 11 löst dieses Problem, in dem das Volumen zwischen initialem und finaler Pin-Höhe ermittelt wird. Diese Volumendifferenz bildet die Geometrie des Miniaturaufsatzes ab.

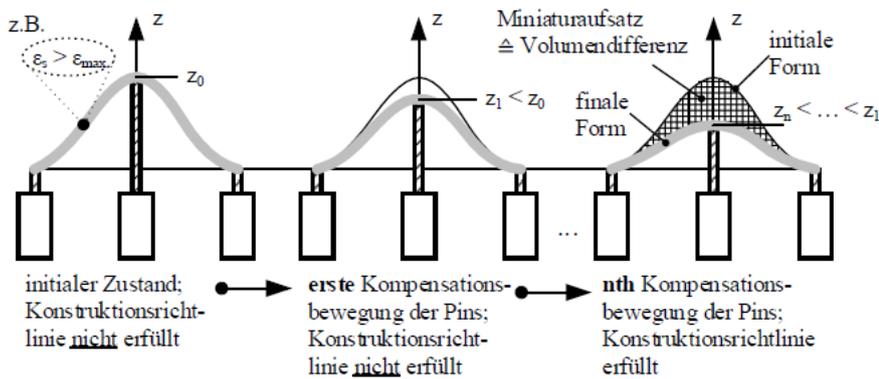


Abbildung 11. Volumen-Differenz-Methode zur Ableitung der Geometrie von Miniaturaufsätzen

2.3.2. Implementierung einer Software zur SPS-flexiblen Ableitung und Dokumentation der Ansteuerdaten mittels csv-Dateien

Die Ansteuer-Software basiert auf dem Microsoft .NET Framework, der Windows Presentation Foundation (WPF) und dem CAD Framework CADability. Zur Softwareverwaltung wird ein Subversion Repository verwendet. Microsoft .NET ist ein Framework, um Anwenderapplikationen auf Basis von Microsoft Windows zu entwickeln. Die Windows Presentation Foundation (WPF) ist ein Framework zum Gestalten von Benutzeroberflächen. CADability ist ein auf .NET basierendes CAD Framework und bietet grundlegende CAD Funktionen zur Erstellung und Darstellung von CAD Objekten mit Hilfe von OpenGL, sowie Interoperabilität zwischen anderen CAD-Anwendungen (CREO, AutoCAD, etc.) in Form der Unterstützung von verbreiteten Standardformaten wie STEP oder DXF. Die Ableitung der Maschinendaten entspricht der Bestimmung der Ansteuersignale für jeden einzelnen Pin-Aktuator. Dies spiegelt sich in der Bestimmung der vertikalen Pin-Ausfahrbewegungen wieder. Hierfür sind konventionelle CAD-Software-Funktionalitäten anwendbar. Zunächst werden das Maschinenraster – als die parallele Anordnung sämtlicher Maschinenpins – sowie das zu laminierende Bauteil in die Ansteuer-Software geladen und überlagert. Das Maschinenraster wurde aus dem entwickelten Maschinenmodell abstrahiert, siehe Abbildung 12.

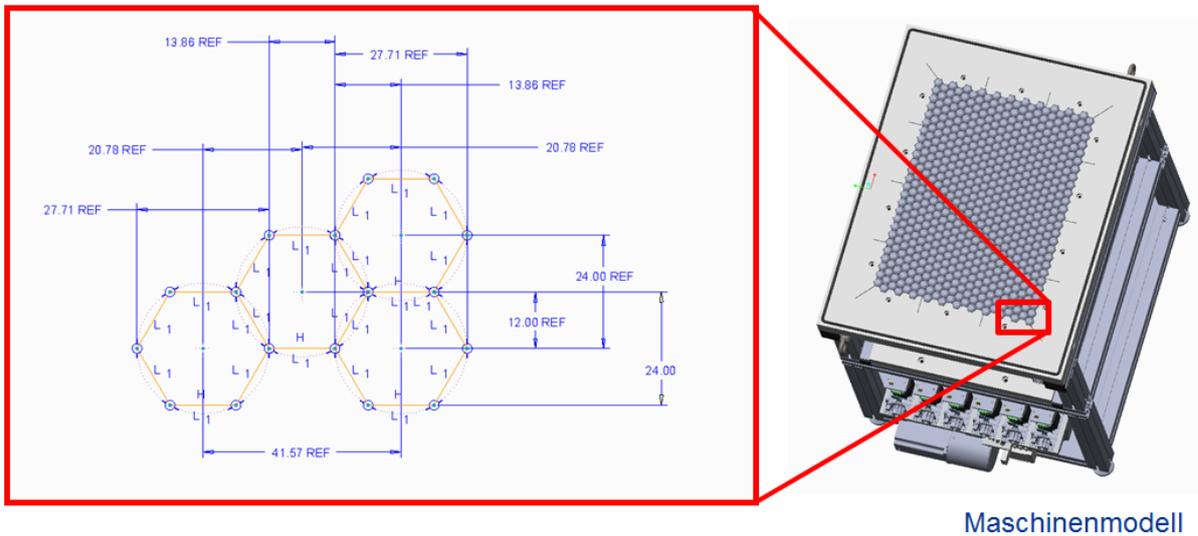


Abbildung 12. Abstrahiertes Maschinenmodell

Das Bauteil wird im STEP-Format geladen und auf dem Maschinenraster platziert, siehe Abbildung 13 links.

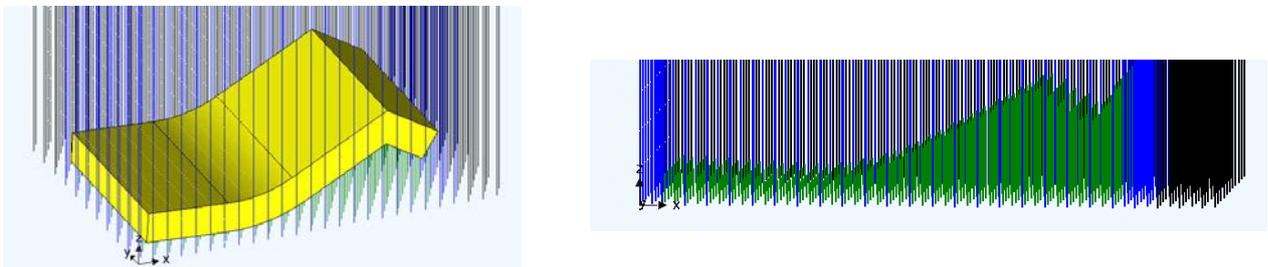


Abbildung 13. Bauteil und Maschinenraster überlagert (links Überlagerung, rechts Stempelausfahrhöhen in grün).

Anschließend stehen verschiedene Wege zur Bestimmung der vertikalen Ausfahrhöhen bereit (Abbildung 14), so beispielsweise die Projektion der Maschinenrasterpunkte auf das zu laminierende Bauteil. Aus der Messung jedes einzelnen Projektionsweges ergeben sich die einzelnen Stempelverfahrwege (Abbildung 13). Die Stempelverfahrhöhen werden in einer .csv-Datei (Abbildung 15) abgelegt, auf welche das Ablaufprogramm der Bus-Ansteuerung zugreift. In dieser .csv-Datei ist jeder Stempel (in Summe 572 Stück) mit x- und y-Wert und dem Verfahrweg (z-Wert) hinterlegt. Stempel mit einem z-Wert von „0“ verfahren nicht, da diese nicht vom Bauteil bedeckt sind. Bei Stempeln mit gleichen z-Werten ist das Bauteil an dieser Stelle waagrecht.

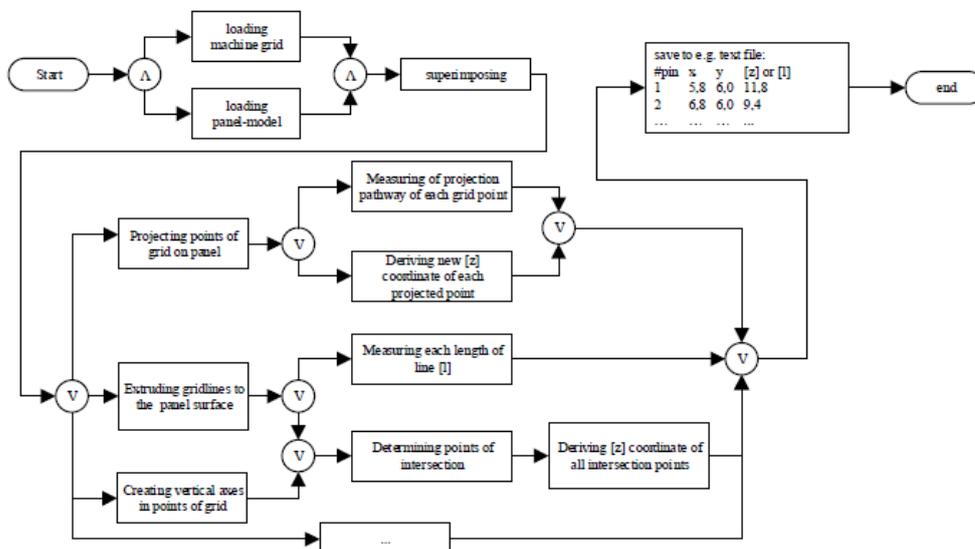


Abbildung 14. Mögliche Prozessabläufe zur Bestimmung der vertikalen Stempelausfahrhöhen [11]

	A	B	C	D
1	Index,	X,	Y,	Z
2	0,	0.00,	0.00,	0.00
3	1,	0.00,	41.57,	0.00
4	2,	0.00,	83.14,	0.00
5	3,	0.00,	124.71,	0.00
6	4,	0.00,	166.28,	0.00
7	5,	0.00,	207.85,	0.00
8	6,	0.00,	249.42,	0.00
9	7,	0.00,	290.99,	0.00
10	8,	0.00,	332.56,	0.00
11	9,	0.00,	374.13,	0.00
12	10,	0.00,	415.70,	0.00
13	11,	12.00,	20.78,	48.11
14	12,	12.00,	62.35,	48.11
15	13,	12.00,	103.92,	48.11
16	14,	12.00,	145.49,	48.11
17	15,	12.00,	187.06,	48.11
18	16,	12.00,	228.63,	48.11
19	17,	12.00,	270.20,	48.11
20	18,	12.00,	311.77,	0.00
21	19,	12.00,	353.34,	0.00
22	20,	12.00,	394.91,	0.00

Abbildung 15. Auszug .csv-Datei.

Abbildung 16 illustriert die implementierte grafische Benutzerschnittstelle.

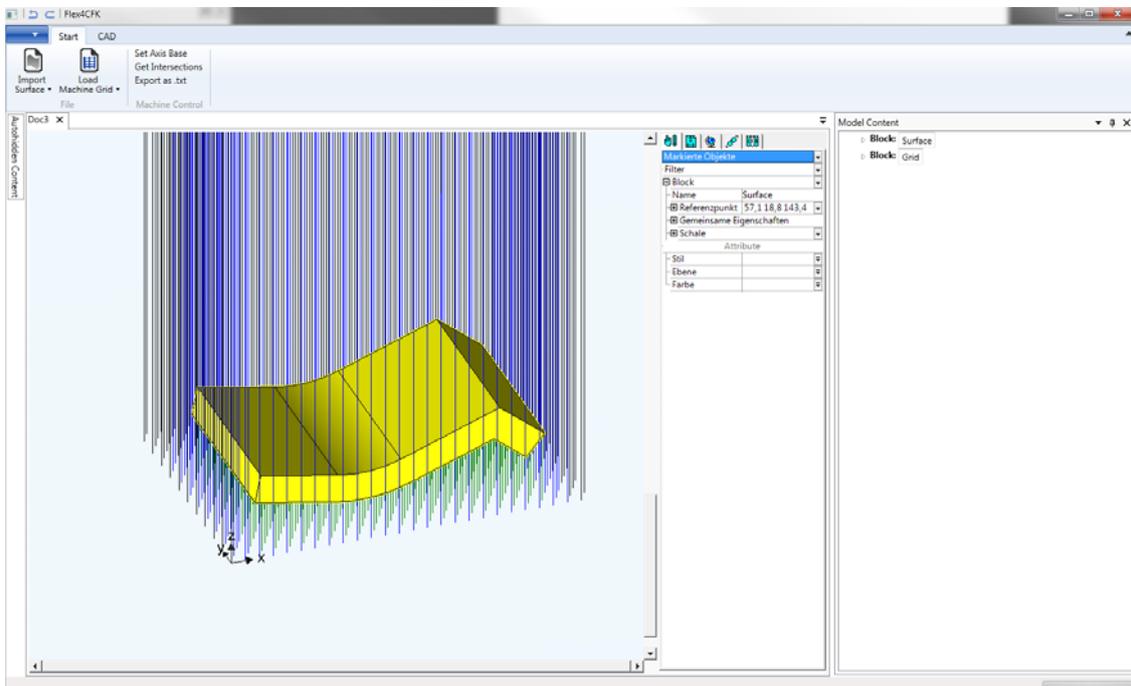


Abbildung 16. Screenshot FlexForCFK-Ansteuer-Software

2.4. Entwicklung des Leistungsteils und der Bus-Ansteuerung (AP 4.5)

Die Bus-Ansteuerung basiert auf CANOpen und wurde mittels der Software SoMachine von Schneider Electric implementiert. Abbildung 17 illustriert das Konzept der Ablaufsteuerung.

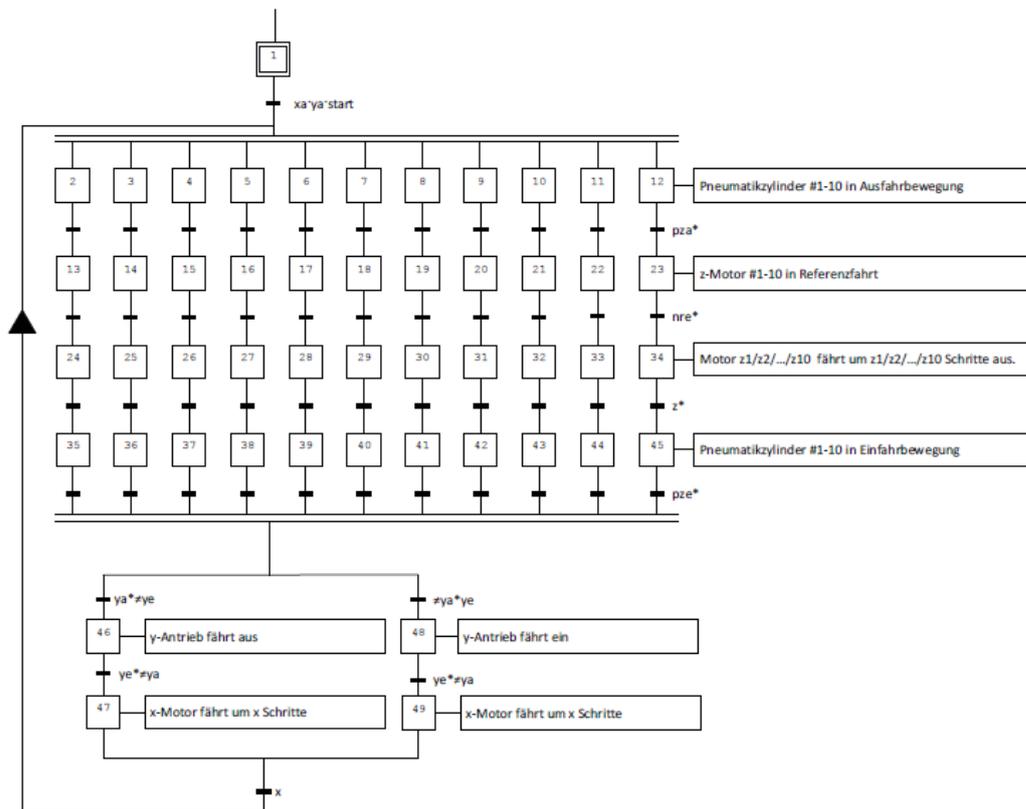


Abbildung 17. Abstrahiertes Konzept Ablaufsteuerung

Nach Programmstart wird während der Transition $xa*ya*start$ geprüft, ob die Maschine in Grundstellung positioniert ist. Ist dies der Fall, werden die ersten elf Stempel höhenverstellt. Hierzu fahren die elf Pneumatik-Zylinder aus, wodurch die jeweiligen Einstellmodule an den Stempeln andocken. Anschließend werden die Pins im Rahmen einer Referenzfahrt in Ihre Basisstellung mit der Höhe „Null mm“ zurückgefahren. Dies liegt darin begründet, da ein vorheriger Laminierauftrag in der Regel andere Ausfahrwerte erfordert. Hieran folgend, werden die Stempel entsprechend Ihres neuen Ausfahrweges eingestellt, in dem die rotatorische Bewegung der elf Einstellmotoren in eine Höhenbewegung mechanisch umgesetzt wird. Ist dies für alle elf Stempel geschehen, fahren die Einstellmodule über die Pneumatik wieder ein. Die Einstellmodule werden dann in x- und y-Richtung „eine Reihe“ weiter gefahren und der Einstellvorgang erfolgt für die nächste Stempelreihe.

Der aufgebaute Leistungsteil besteht im Wesentlichen aus (vgl. Abbildung 18):

- 11x Motoren, die die 11 Stempелеinstellmodule in rotatorische Bewegung setzen (Aktuatoren zur Stempelhöhen-einstellung in z-Richtung),
- 1x y-Antrieb zum Versetzen der obigen Motoren in y-Richtung während des Wechsels zur nächsten Pin-Reihe,
- 11x Pneumatik-Ventile, die die 11 Stempелеinstellmodule ausfahren,
- 1 Pneumatik-x-Antrieb, das die Stempелеinstellmodule um 20,78 mm in x-Richtung versetzt, da ein versetztes Maschinenraster vorliegt (vgl. Abbildung 12),
- 1x SPS,

- f) CANOpen und
- g) Schaltschrank.

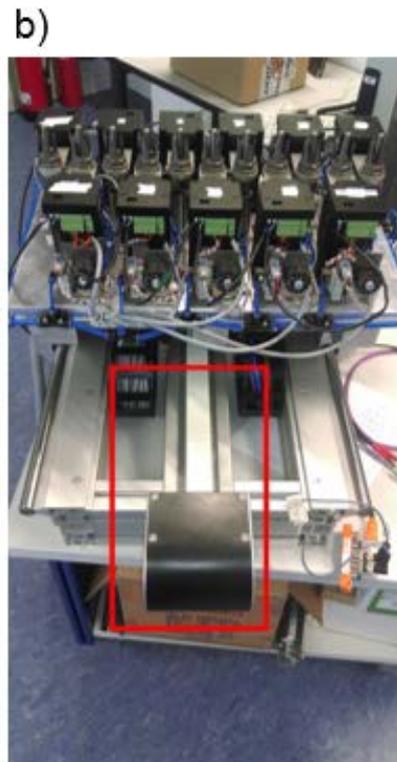
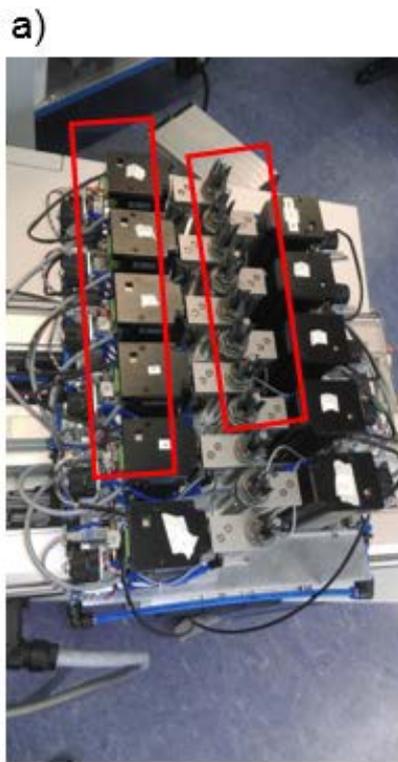


Abbildung 18. Leistungsteil

2.5. Untersuchungen zum Material- und Prozesseinsatz (AP 5.1)

Der Einsatz von Rapid Tooling Laminieraufsätzen setzt zum einen voraus, dass seine Fertigungszeitbedarf klein ist im Vergleich zur Einstelldauer der gesamten Pin-Matrix. Die Fertigungsdauer der RP-Laminieraufsätze wird neben seiner Bauzeit auch von dem Zeitbedarf zur Lösung der Stützstrukturen bestimmt. Die Verkürzung letzterer wird in Kapitel 2.5.1 untersucht.

Zum anderen wirken auf die Rapid Tooling Laminieraufsätze Druck und Temperaturbelastungen im Autoklaven. Die Steigerung ihrer Belastungsfähigkeit wird in Kapitel 0 untersucht.

2.5.1. Analyse der Einflussfaktoren auf das flüssigkeitsbasierte Lösen von Support-Strukturen beim Fused-Deposition-Modeling¹

In der Additiven Fertigung ermöglichen Support-Strukturen die Produktion überhängender Geometrien [19]. Da sie nur für die Produktion notwendig und nicht Element des herzustellenden Bauteils sind, werden sie nachträglich entfernt [20]. Im Falle des Fused-Deposition-Modelings können Support-Strukturen mechanisch an definierten Bruchstellen entfernt [21] oder beispielsweise mittels einer alkalischen Flüssigkeit gelöst werden [22]. Im letzteren Fällen ist ein ausreichender Kontakt zwischen Löseflüssigkeit und Support-Struktur notwendig, sodass dies üblicherweise durch Eintauchen in ein Flüssigkeitsbad erfolgt.

Handlungsbedarf

Wie nachfolgende Beispiele erläutern, ist die Kontaktbedingung jedoch nicht stets erfüllt:

- Entsprechend dem Archimedischem Prinzip [23] schwimmt das additiv gefertigte Bauteil auf der Flüssigkeitsoberfläche, wenn sein Eigengewicht (f_g) geringer ist als die Auftriebskraft (f_b). Befinden sich nun Einlassöffnungen oberhalb der Flüssigkeitsoberfläche, erfahren interne Support-Strukturen keinen Kontakt mit der Löseflüssigkeit, (Abbildung 19).

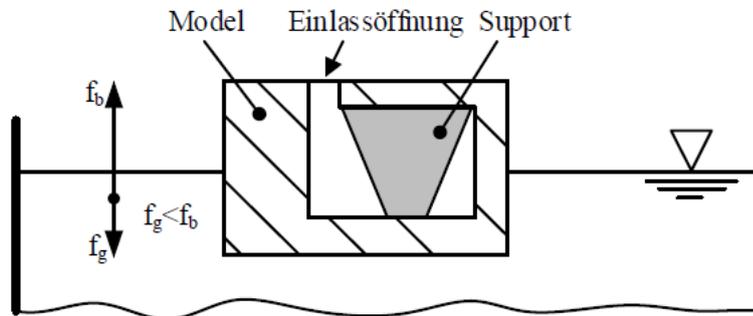


Abbildung 19. Kontaktbehinderung wenn die Einlassöffnung aufgrund von leichtgewichtigem Modell nicht eintaucht.

- Lufteinschlüsse innerhalb des additiv gefertigten Bauteils können zu Isolationen führen. Liegen diese Lufteinschlüsse ungünstig, sodass diese z. B. während des Löseprozesses nicht entweichen können, wird die Kontaktbedingungen für eine Support-Strukturen vollständig nicht erfüllt, (Abbildung 20).

¹ Die Ausführungen entstammen der eigenen wissenschaftlichen Veröffentlichungen in [18], welche im Rahmen dieses Forschungsprojektes entstanden ist.

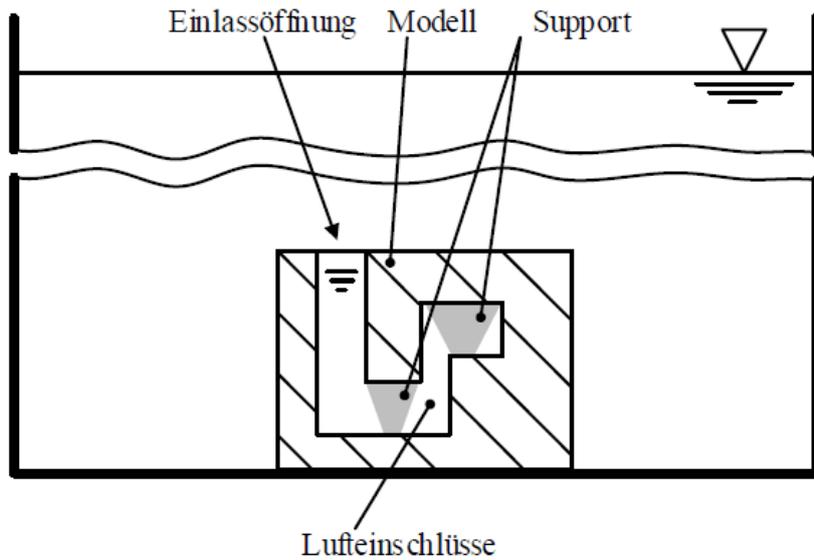


Abbildung 20. Kontaktbehinderung durch Lufteinschlüsse

- Die Strömungskraft entfernt quasi-statische Schichten – als Resultat des Löseprozesses – die an den Kontaktflächen zwischen Löseflüssigkeit und Supportmaterial entstanden sind. Ist die Strömungskraft nicht ausreichend, unterbricht die abgelagerte und gesättigte Beschichtung den Löseprozess. Ein konstanter Zufluss an ungesättigter (nicht verbrauchter) Löseflüssigkeit ist notwendig, (Abbildung 21).

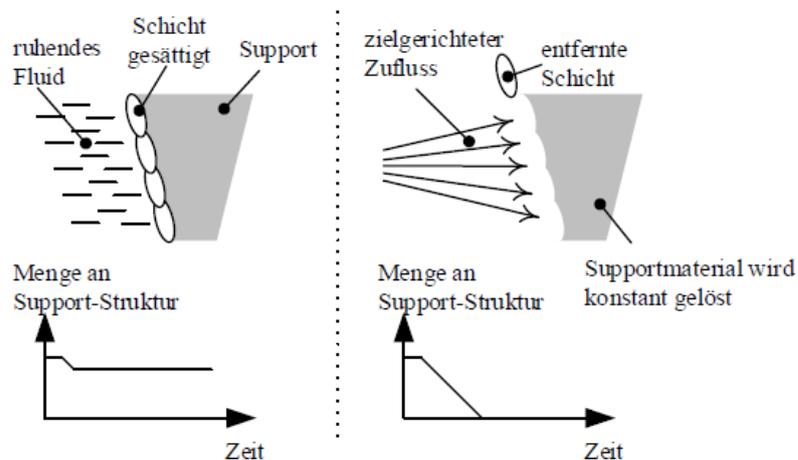


Abbildung 21. Kontaktbehinderung durch quasi-statischer Beschichtung

- Mit Bezug zur Abbildung 20 und Abbildung 21 stören Hinterschnitte und lange, kanalartige Geometrien den Zufluss von Löseflüssigkeit. Die Kontaktbedingung wird hierbei ebenso erschwert.

Folglich kann der Löseprozess länger andauernd als der vorangehende Prozess der additiven Fertigung. Im schlimmsten Fall findet ein Lösen nicht statt. Somit besteht ein Mangel an Aussagekraft bezüglich der Dauer und der Qualität des Lösevorgangs. Um einen Beitrag hierzu zu leisten, werde im Nachfolgenden Einflussfaktoren auf den Lösevorgang untersucht.

Einflussfaktoren

Wird eine Modellvorstellung zu Grunde gelegt, so bestehen im Wesentlichen nachfolgende drei Einflussfaktoren:

- Die Löseflüssigkeit,
- das zu lösende Objekt,
- der Kontakt zwischen Löseflüssigkeit und dem zu lösenden Objekt.

Löseflüssigkeit

Die in diesem Versuch verwendete Löseflüssigkeit ist eine Natriumhydroxid-Lösung mit einem pH-Wert von 13. Hierzu wird die Pulversubstanz Stratasy's WaterWorks Soluble Concentrate P400SC in einem Verhältnis von 1900 Gramm pro 84 Liter Wasser, welches auf 70°C aufgeheizt wird, verwendet.

Zu lösendes Objekt

Das zu lösende Objekt stellt ein Zylinder mit einer Höhe von 40mm und einem Durchmesser von 20mm dar. Er besteht aus dem Stratasy's Support-Material SR-30.

Kontakt zwischen Löseflüssigkeit und dem zu lösenden Objekt.

In der Cleanstation UW90 wird eine Strömung durch eine Umwälzpumpe erzeugt. Dies ist jedoch nicht ausreichend, um eingekapselte Kerne zu lösen. Der hier verfolgte Ansatz bezweckte die Beschleunigung des Löseverhaltens durch gezielte Bewässerung mittels Fluidstrom. Folgende Untersuchungsvariablen wurden herangezogen:

- Einspritzposition,
- Einlassöffnung,
- Düsenposition,
- Düsendurchmesser,
- Einspritzdruck,
- Eingetauchte versus nicht-ingetauchte Einspritzung.

Versuchsaufbau

Zur Analyse der Einflussfaktoren wurde ein Versuchsaufbau entwickelt (Abbildung 22). Es erfolgten drei Versuchsreihen. Jedes Experiment wurde zweimal durchgeführt und ein Durchschnittswert ermittelt.

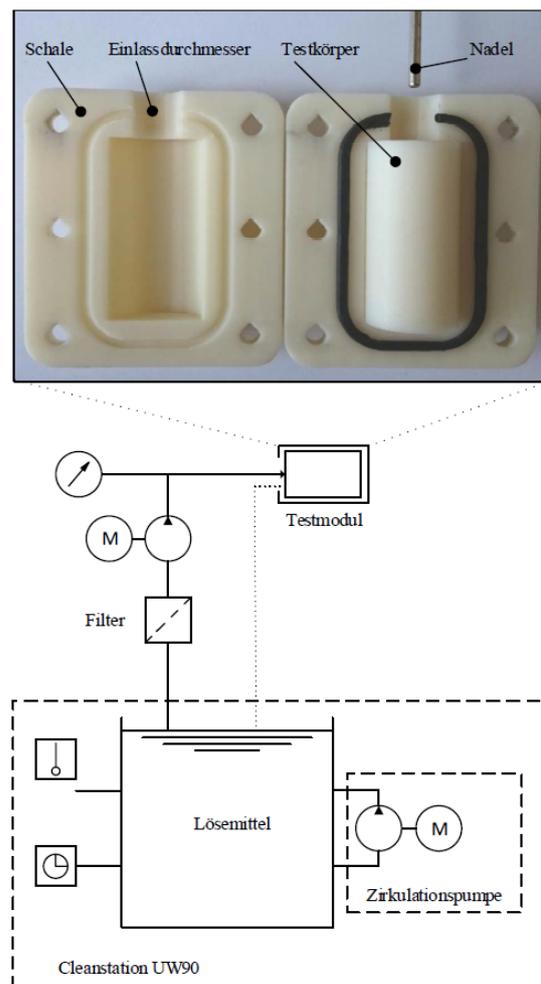


Abbildung 22. Versuchsaufbau und Testmodul im Detail vor dem Löseprozess

Grundsatzversuch

Der Zweck des Grundsatzversuches lag darin, einen Referenzwert für das Löseverhalten zu erhalten. Der Testkörper wurde am Boden der Cleanstation UW 90 befestigt. Wie in Abbildung 23 dargestellt, beanspruchte die vollständige Lösedauer mehr als acht Stunden. Im Vergleich hierzu betrug die Bauzeit der additiven Fertigung 17 min.

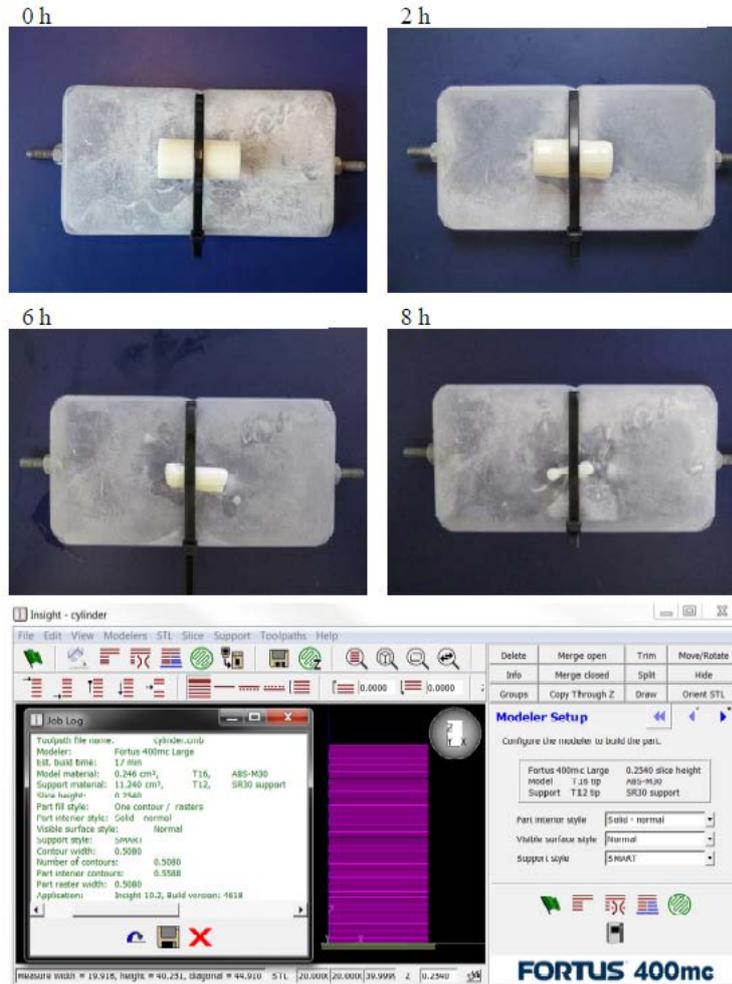


Abbildung 23. Stadien im Grundsatzversuch verglichen mit der geschätzten Bauzeit des Testkörpers

Hauptversuche

Die drei Versuchsreihen als Hauptversuche fokussierten das Löseverhalten durch druckbeaufschlagte Fluidströmung. In Versuchsreihe 1 wurde der Testkörper aus verschiedenen Anströmrichtungen bestrahlt, jedoch mit konstanten Parameterwerten. Diejenige Position, welche die kürzeste Lösedauer benötigte wurde für die anschließenden zwei Versuchsreihen herangezogen. In Versuchsreihe 2 wurden Parameterwerte variiert. Die Versuchsreihe 3 nutzte die Parametervariationen von drei Experimenten aus Versuchsreihe 2, aus welchen die kürzeste Lösedauer resultierte. Während dieser Testreihen befindet sich das zu lösende Objekt in einer Schale. Diese Schale besitzt eine Einlassöffnung, durch welche der Kontakt zum Lösemittel hergestellt wird.

Versuchsreihe 1 – Position der Einspritzung

In der ersten Versuchsreihe wurden drei Experimente ausgeführt, in welchen die Einspritzposition variiert wurde. Die Experimente wurden im nicht-eingetauchten Zustand durchgeführt. Die Einlassöffnung hatte einen Durchmesser von 10mm. Die verwendete Düse hatte einen Düsendurchmesser von 1.8 mm und liegt in koaxialer, gegengerichteter Achsenorientierung mit einem Abstand von 1mm zur Einlassöffnung. Der Einspritzdruck wurde konstant gehalten.

Die folgenden drei Einspritzpositionen wurden in Bezug auf die Lösezeit untersucht:

- senkrechte Einspritzung von oben,
- senkrechte Einspritzung von unten,
- vertikale Einspritzung.

Abbildung 24 illustriert beispielhaft das Löseverhalten.

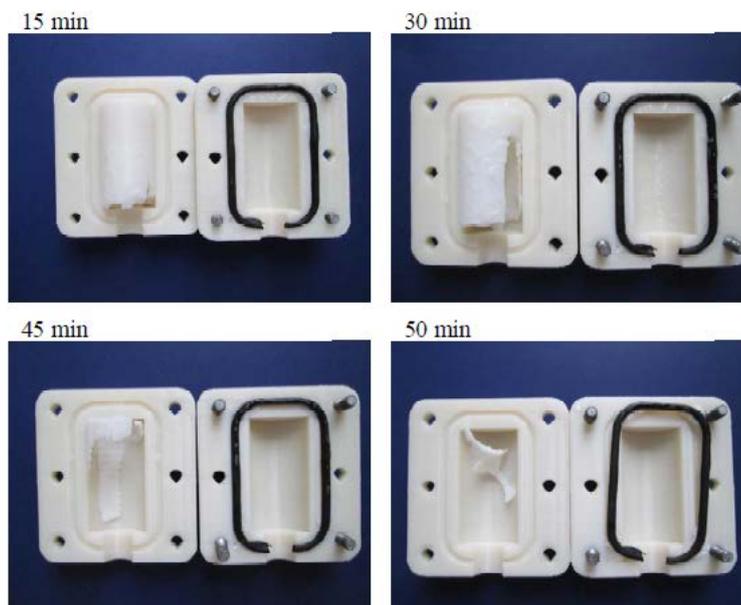


Abbildung 24. Ausgewählte Ergebnisse der Einspritzung senkrecht von oben

In sind die Versuchsergebnisse zusammengefasst, wonach die horizontale Einspritzung am vorteilhaftesten erscheint. Folglich wurden sämtliche nachfolgenden Untersuchungen in einer horizontaler Einspritzposition durchgeführt.

Tabelle 6. Ergebnisse der Versuchsreihe 1 - Einspritzposition

Einspritzposition	Durchschnittliche Lösedauer [min]
Senkrecht von oben	50
Senkrecht von unten	52,5
Horizontal	37,5

Versuchsreihe 2 – Parametervariation

Diese Versuchsreihe beinhaltet 16 Experimente, welche ebenso im nicht-eingetauchtem Zustand erfolgten. Nachfolgende vier Parameter wurden zwischen zwei festen Parameterwerten variiert:

- Einlassöffnung (DEinlass): 10mm versus 5mm.
- Position der Einspritzdüse: im „externen“ Fall befand sich die Düse außerhalb der Schale mit einem Abstand von 1mm. Im „internen“ Fall hatte die Düse während der ersten 10 Minuten die gleiche Position wie im „externen“ Fall. Danach wurde diese jedoch in Richtung des Supportmaterials eingeschoben, sodass sie bis zum Löseende auf einer Position von 10mm innerhalb des zuvor durch Materiallösung entstandenen Loches verharnte.
- Durchmesser der Einspritzdüse (DDüse): 1,3mm versus 1,8mm.
- Einspritzdruck (p_i): 2,5 bar versus 1 bar.

In Tabelle 7 sind die 16 Versuchsergebnisse zusammengefasst.

Tabelle 7. Ergebnisse der Versuchsreihe 2 - Parametervariation

Nummer	p _i [bar]	D _{Düse} [mm]	Düsen- Position	D _{Einlass} [mm]	T _{mS} [min]
1	2,5	1.8	extern	10	26
2	1	1.8	extern	10	41
3	2,5	1.3	extern	10	34
4	1	1.3	extern	10	50.5
5	2,5	1.8	intern	10	24
6	1	1.8	intern	10	38
7	2,5	1.3	intern	10	36.5
8	1	1.3	intern	10	40.5
9	2,5	1.8	extern	5	82
10	1	1.8	extern	5	134
11	2,5	1.3	extern	5	72
12	1	1.3	extern	5	162.5
13	2,5	1.8	intern	5	28.5
14	1	1.8	intern	5	35
15	2,5	1.3	intern	5	35
16	1	1.3	intern	5	48

Im Nachfolgenden werden die einzelnen Einflüsse im Detail analysiert.

Einfluss der Einlassöffnung:

In Abbildung 25 ist der Einfluss der Einlassöffnung dargestellt. Die ersten vier Versuchspaare zeigen bedeutende Unterschiede in der Lösezeit auf. In diesen Fällen lag die Düsenposition in „externer“ Stellung. In den anderen vier Versuchspaaren, in denen die Düsenposition „intern“ lag, konnte kein bedeutender Einfluss festgestellt werden. Sofern die Düse „extern“ positioniert wird, wird ein größerer Einlassdurchmesser als zu bevorzugen gewertet.

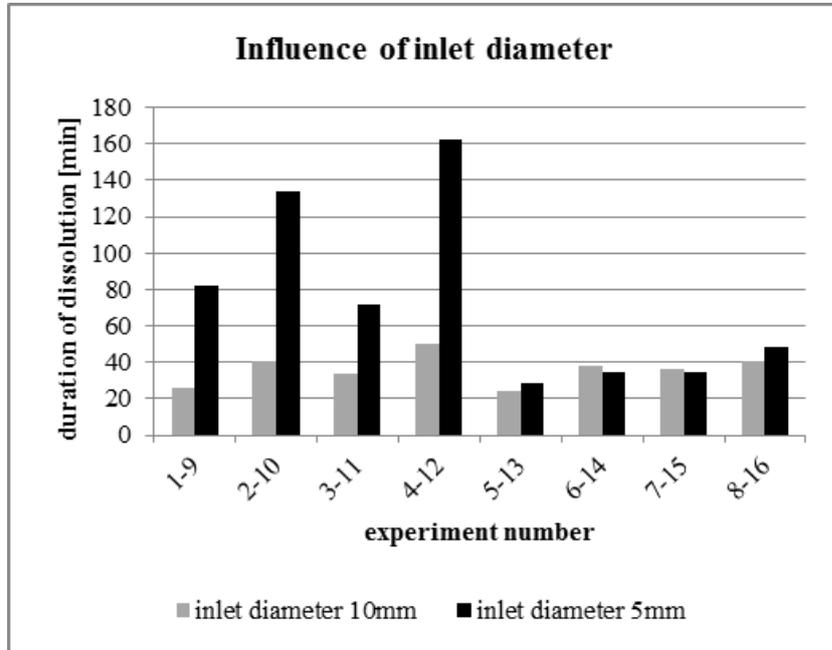


Abbildung 25. Einfluss des Einlassdurchmessers

Einfluss der Position der Einspritzdüse:

Nach Abbildung 26 ist der Einfluss der Einspritzdüsenposition für kleine Einlassdurchmesser als bedeutend zu werten (Versuchspaare 9-12, 10-14, 11-15, 12-16). In diesen Fällen ist eine „interne“ Düsenposition zu bevorzugen.

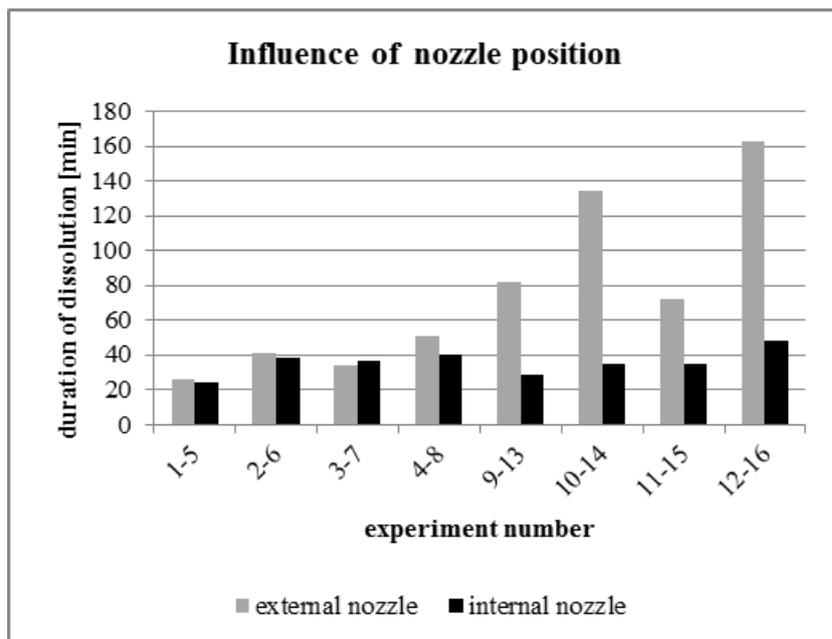


Abbildung 26. Einfluss der Düsenposition

Einfluss des Düsendurchmessers:

Die Vergrößerung des Düsendurchmessers – und hierdurch auch des Volumenstromes – führte vorwiegend zu einer leichten Verringerung der Lösedauer (Abbildung 27).

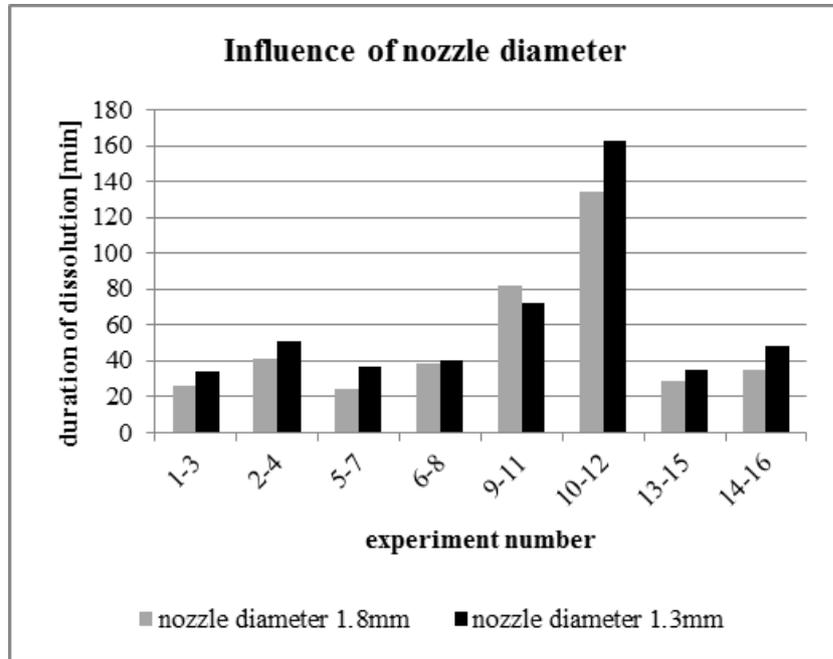


Abbildung 27. Einfluss des Düsendurchmessers

Einfluss des Druckes:

Um einen konstant gleichen Durchfluss zu gewährleisten wurde bei großem/kleinem Druck ein kleiner/großer Düsendurchmesser verwendet. Der größere Strömungsdruck führte in unterschiedlichem Ausmaß zur Minimierung der Lösezeit (Abbildung 28).

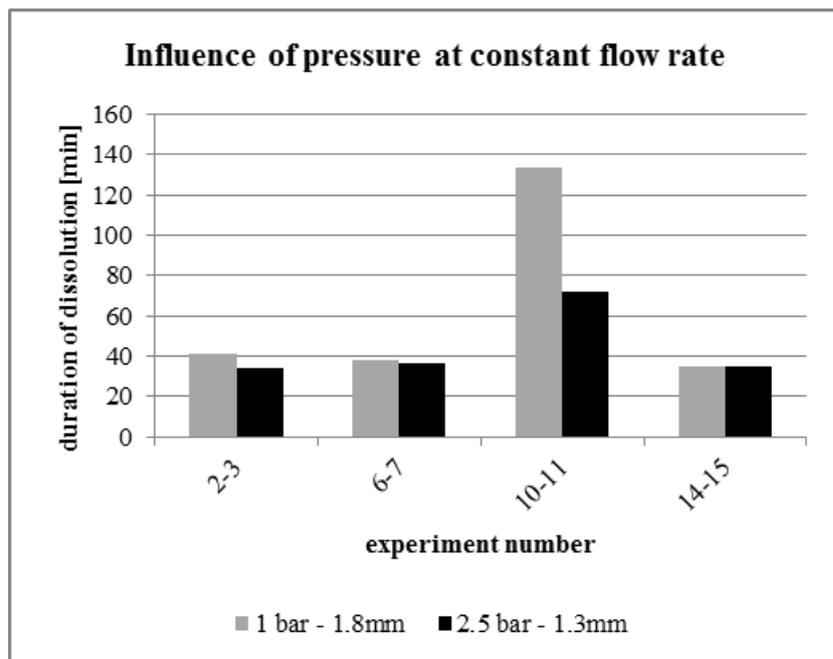


Abbildung 28. Einfluss des Druckes bei konstantem Durchfluss

Versuchsreihe 3 – Einspritzung bei Eintauchung in Laugenlösung

Die Versuchsexperimente mit der Nummer 1, 5 und 13 führten zur kürzesten Lösedauer. Diese drei Experimente wurden erneut, jedoch im eingetauchten Zustand, durchgeführt. Hierzu wurde der gesamte Versuchsaufbau am Boden der Cleanstation befestigt. Die Resultate dieser Versuchsreihen sind in Tabelle 8 gelistet. Im Vergleich zu den Versuchen im nicht-eingetauchten Zustand ergaben sich nur kaum Verkürzungen der Lösedauer.

Tabelle 8. Ergebnisse der Versuchsreihe 3 – Einspritzung während des Eintauchens in das alkalische Lösemittel

No.	pI [bar]	DDüse [mm]	Düsen- position	DEinlass [mm]	TmS [min]
1	2.5	1.8	extern	10	24.5
5	2.5	1.8	intern	10	25
13	2.5	1.8	intern	5	27

2.5.1. Analyse der Autoklav-Beanspruchung durch Druck und Temperatur¹

Die Additive Fertigung [20,25] (AM) wird vorwiegend zum Bau von Prototypen oder anderen, der Serienproduktion vorgelagerten, Prozessen genutzt. In jüngster Zeit findet sich AM jedoch auch im Serenumfeld wieder, wo es etablierte Fertigungstechnologien ersetzt. Die AM befähigt klassische Fertigungen in Bezug auf Materialverbrauch, Fertigungskosten und Leichtbau zu verbessern. So ist es möglich, komplex geformte Laminierformen direkt aus dem CAD-Modell, ohne den Umweg der CNC-Fertigung, herzustellen. Die konstruktive Gestaltung solcher AM-Laminierformen ist jedoch weiterhin aus dem Wissen der traditionellen Fertigungsprozesse getrieben [26]. Dies führt zu AM-Formen die vollständig „mit Material gefüllt“ sind. AM ermöglicht jedoch das „Aushöhlen“ des Kernes um „leicht zu bauen“. Folglich wäre eine Minimierung der Bauzeit und des Materialverbrauch möglich, jedoch sinkt die Steifigkeit des Bauteils wodurch gegebenenfalls den Belastungen während des Fertigungsprozesses der CFK-Bauteil nicht standgehalten werden kann. [27]

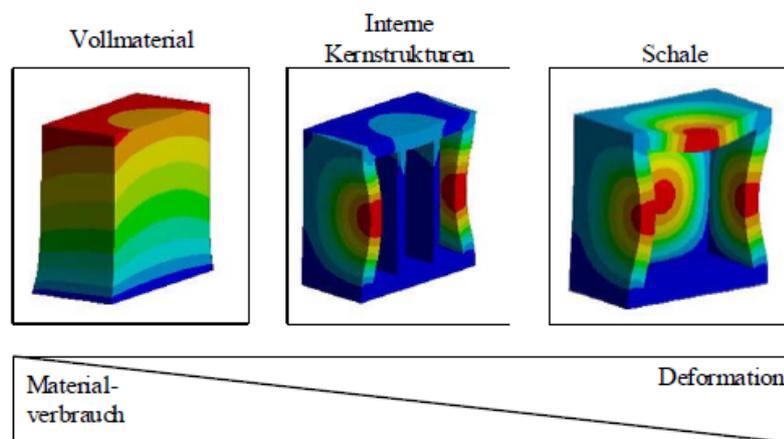


Abbildung 29. Tendenzielles Verhalten ausgewählter Eigenschaften durch die Minimierung von Kernmaterial [27]

Herausforderung in AM-gefertigten CFK-Laminierformen

In unserer Fallstudie in [27] wurde das Potential zur Vermeidung von Verschwendung in der additiven Fertigung solcher Laminierformen bereits untersucht. Diese Untersuchung basierte jedoch auf den Belastungen, die sich aus dem „Vacuum bag moulding“ [28] ergeben, weshalb nur eine statische Druckbeanspruchung von 1 bar untersucht wurde. Folglich ist dies nicht auf andere CFK-Fertigungsverfahren übertragbar, da dort andere Druckbeanspruchungen und auch Temperaturbelastungen wirken. Die vorliegende Untersuchung trägt weitere Erkenntnisse bei,

¹ Die Ausführungen entstammen der eigenen wissenschaftlichen Veröffentlichungen in [24], welche im Rahmen dieses Forschungsprojektes entstanden ist.

die sich auf die CFK-Fertigungsbeanspruchungen in einem Autoklaven [7] beziehen. Als wesentliche Untersuchungskriterien wurden daher nachfolgende herangezogen (vgl. Tabelle 9):

- Temperatur größer als die übliche Umgebungstemperatur von ca. 20°C,
- Umgebungsdruck größer als 1 bar,
- Und ein üblicherweise verwendetes, hitze-beständiges AM-Material.

Tabelle 9. Untersuchungskriterien und Abgrenzungen zu vorangegangenen Analysen

Kriterium	Galantucci et al. [29]	Lušić et al. [27]	Vorliegende Untersuchung
Art der Beanspruchung	Stauchen	Umgebungsdruck	Umgebungsdruck
Wert der Beanspruchung	Bis zur Versagensgrenze	1bar	Verschiedene Beanspruchungen aus dem Autoklaven
Material	Polycarbonate by <i>Stratasys</i>	ABS-M30 by <i>Stratasys</i>	ULTEM™ 1010 by <i>Stratasys</i>
AM-Technologie	Fused Deposition Modeling	Fused Deposition Modeling	Fused Deposition Modeling
Geometrie	Zylinder	Verdrillter Block	Symmetrischer Block
Interne Geometrie	Vollmaterial versus „narrow-waisted“	Vollmaterial versus Schale versus Kreuzstruktur versus Wabenstruktur	Vollmaterial versus Schale versus Kreuzstruktur versus Wabenstruktur
Temperatur	nicht definiert	nicht definiert	Höher als Umgebungstemperatur, nicht-konstant

Modelkonzept, Randbedingungen und Zielgrößen

Folgende Randbedingungen wurden festgelegt (Abbildung 30):

- Temperatur: 20°C bis 120°C. Die Wärmeübertragung zwischen Umgebungsluft und Testkörper wurde nicht berücksichtigt, da der Untersuchungsfokus auf dem Deformationsverhalten aufgrund der Wärmeleitung innerhalb der Laminierform lag. Entsprechend wurde die Temperatur als unmittelbar auf der Oberfläche der Laminierform wirkend angenommen.
- Druck: 1 bis p_{max} bar, wobei p in Inkrementen von 0,5 bar bis zu p = 3bar = p_{max} variiert.
- Zeit: Die Temperatur und der Druck sind nicht konstant sondern Verhalten sich entsprechend einem möglichen Anwendungsfall im Autoklav

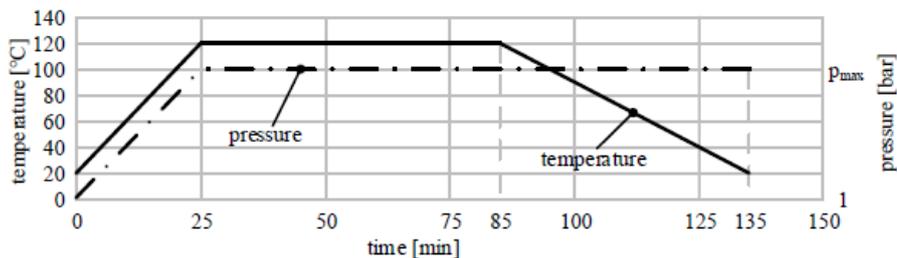


Abbildung 30. Temperatur- und Druckprofil

Das verwendete Material ist ULTEM™ 1010 (Streckgrenze = 81 MPa, E-Modul = 3,5 x 10³ MPa, thermischer Ausdehnungskoeffizient = 47 µm/(m·C)). Da die Laminierform in der praktischen Anwendung auf einer Unterlage aufliegt, wirkt der Druck nur auf dem sichtbaren Oberflächenteil und nicht an der Unterfläche (Abbildung 31). Folglich wurden die Knoten an der Unterseite als reibungsfrei gelagert definiert.

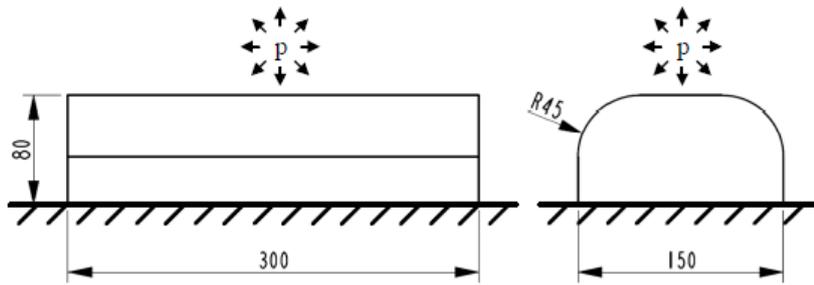


Abbildung 31. Umgebungsdruck und Laminierform mit Nennmaßen in mm.

Äquivalent zur Beschreibung in [4] wurden der Treppenstufeneffekt und das anisotrope Materialverhalten nicht berücksichtigt. Als Zielgrößen wurden festgelegt:

- Maximale totale Deformation¹,
- Fertigungsdauer und
- Materialverbrauch.

Versuchsablauf

Folgende Testkörper wurden zur Untersuchung herangezogen:

- Vollmaterialkörper: Dieser reflektiert die Referenzwerte für die Deformation, die Bauzeit und den Materialverbrauch.
- Schale: hier ist der Kern des Testkörpers ausgehöhlt.
- Innere Strukturen: Der Kern wird abgebildet in verschiedenen Kreuz- und Wabenstrukturen.

Die Schale und die inneren Strukturen dienen der Minimierung der Bauzeit und des Materialverbrauchs bei gleichzeitig nicht zu überschreitenden Maximalwerten der Deformation des Vollmaterialkörpers.

Vollmaterialkörper

Die maximale Deformation beim Vollmaterialkörper lag bei 0,28 mm und war nach außen gerichtet (Abbildung 33). Dieser Wert wurde bei 3bar und 120°C erreicht. In den anderen Fällen war die Deformation nach innen in Richtung des Körperschwerpunktes gerichtet. Die maximale Vergleichsspannung von 9 MPa entsteht bei 3,0 bar. Folglich ist der Testkörper als Vollmaterialkörper nur leicht beansprucht und leicht deformiert. Dies ist einer Überdimensionierung gleichzustellen und weist auf deutliches Potential zur Minimierung des Materialverbrauchs hin. Wie in Abbildung 33 dargestellt, beträgt die Bauzeit 38 Stunden & 13 Minuten. Der Materialverbrauch liegt bei $(3051 \text{ cm}^3 + 42 \text{ cm}^3) = 3093 \text{ cm}^3$. Diese Werte repräsentieren die zu optimierenden Referenzwerte.

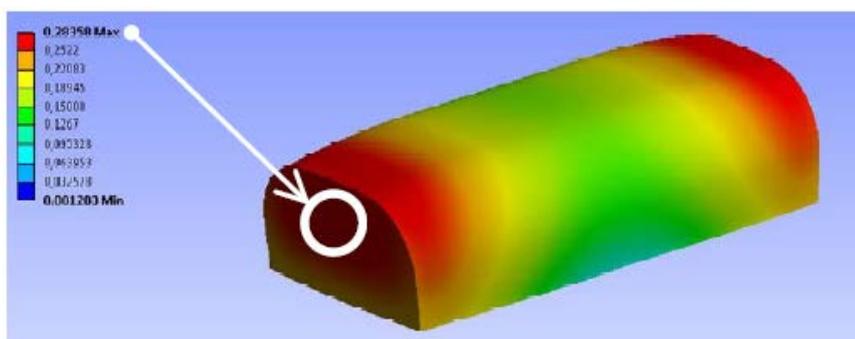


Abbildung 32. Ermittlung der maximalen, totalen Deformation (mm) mittels der Algorithmen in ANSYS Workbench 16.1

¹ Die Vergleichsspannung lag kontinuierlich unterhalb der Streckgrenze von Ultem™1010.

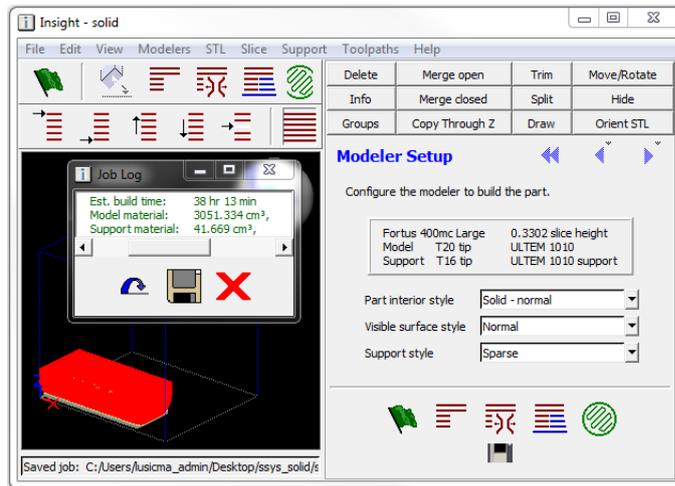


Abbildung 33. Ermittlung der Fertigungskosten mittels der Algorithmen in Stratasys' Insight 10.6

Schale

Hier dient ein Hohlraum innerhalb des Testkörpers zur Material- und Bauzeitreduzierung. In diesem Schalenmodell wird die Wandstärke in Inkrementen von 1 mm zwischen 3 mm und 10 mm variiert. Wie in Abbildung 34 dargestellt, ist der Einfluss der Wandstärke auf die Minimierung der Deformation höher als der Einfluss des Drucks.

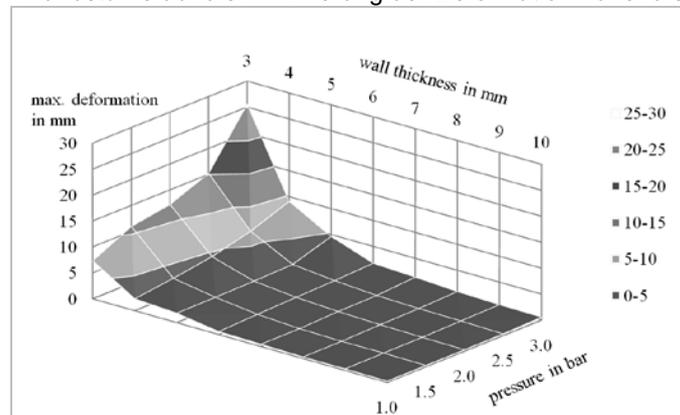


Abbildung 34. Maximale Deformationswerte in Abhängigkeit von der Wandstärke der Schale und dem wirkenden Druck; ermittelt mittels der Algorithmen in ANSYS Workbench 16.1.

In Tabelle 10 sind die Werte für $p = 3\text{bar}$ zusammengefasst. Eine Wandstärke von 12 mm minimiert die maximale, totale Deformation der Schale auf 0,28 mm – und somit auf den Deformationswert bei Vollmaterialausführung – wobei jedoch 57%¹ weniger Bauzeit und 65%² weniger Materialverbrauch notwendig sind.

Tabelle 10. Einfluss der Wandstärke auf alle Zielwert bei einem Druck von 3 bar.

Wandstärke in mm	totale Deformation in mm	Vergleichsspannung in MPa	Bauzeit in Stunden.Minuten	Materialverbrauch in cm ³
3	25,54	130,87	7,18	≈ 336
4	9,09	70,69	8,37	≈ 424
5	4,58	46,63	9,44	≈ 512
6	1,73	28,13	10,52	≈ 596
7	1,33	20,46	11,45	≈ 678
8	0,87	17,06	12,38	≈ 761
9	0,63	12,06	13,32	≈ 840
10	0,53	8,62	14,29	≈ 924
11	0,36	6,55	15,22	≈ 1001
12	0,28	5,51	16,11	≈ 1075

¹ $((38\text{ Stunden } 13\text{ Minuten} - 16\text{ Stunden } 11\text{ Minuten}) / 38\text{ Stunden } 13\text{ Minuten}) \times 100\% \approx 57\%$

² $((3093\text{cm}^3 - 1075\text{ cm}^3) / 3093\text{ cm}^3) \times 100\% \approx 65\%$

Innere Strukturen

Die Wandstärke und das Design der inneren Strukturen wurde äquivalent zu unserer Untersuchung in [27] gewählt (Abbildung 35):

- Dicke x : 1 bis 5 mm variierend in Inkrementen von 1 mm,
- Distanz z : 5 bis 20 mm variierend in Inkrementen von 5 mm.

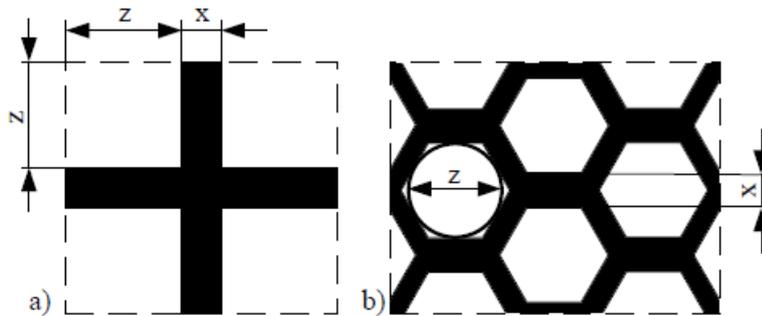


Abbildung 35. Kernstrukturen: a) Kreuzstruktur, b) Wabenstruktur. [27]

Kreuzstrukturen

Wie in Abbildung 36 und Abbildung 37 abgebildet, sinkt die Deformation mit steigendem x . Das Gleiche geschieht mit sinkendem z . Die Deformation steigt mit steigendem Druck, wobei dies mit steigendem x und sinkendem z in geringerem Ausmaß auftritt. Nur für $x = 1$ mm wurde die maximale Deformationsgrenze von 0,28 mm überschritten. In diesem Fall darf z keinen Wert größer als 10 mm annehmen. Bereits ab $x = 2$ mm ist die Deformation für sämtliche z unterhalb 0,28 mm. Für $z = 5$ mm und $z = 10$ mm beträgt die Deformation stets unter 0,28 mm, unabhängig vom x -Wert.

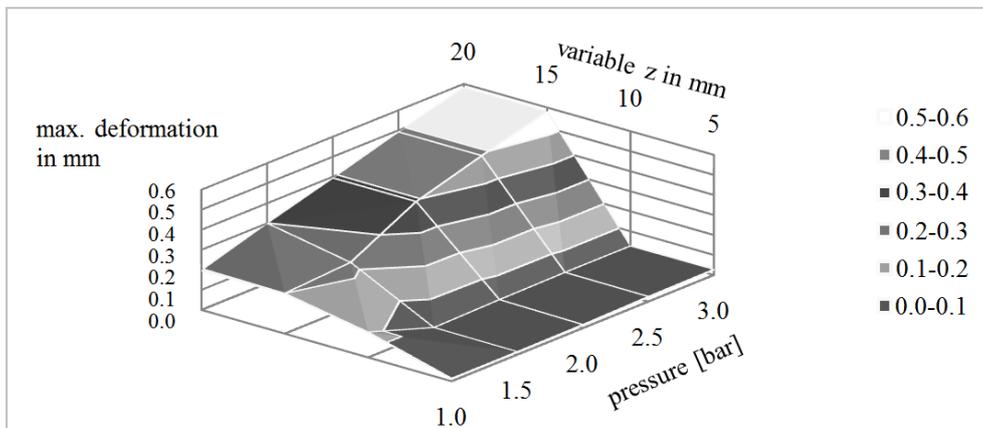


Abbildung 36. Maximale Deformationswerte (Kreuzstruktur, $x = 1$ mm); ermittelt mittels den Algorithmen in ANSYS' Workbench 16.1.

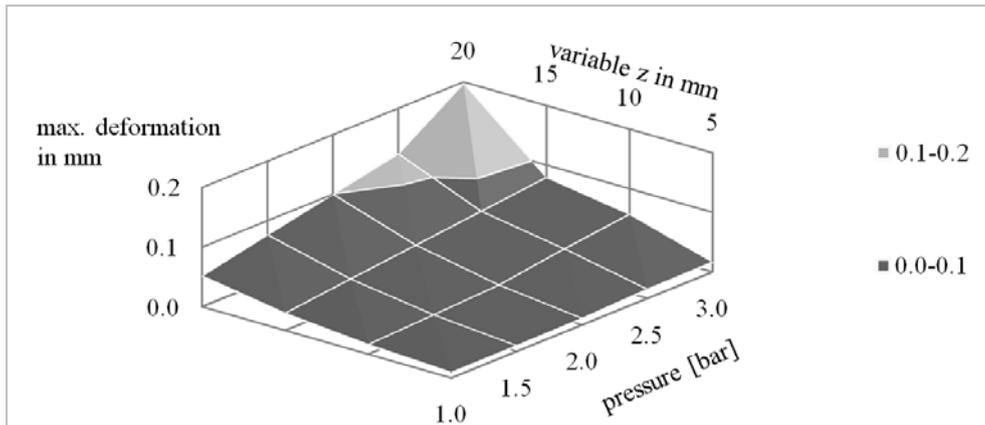


Abbildung 37. Maximale Deformationswerte (Kreuzstruktur, x = 2 mm); ermittelt mittels den Algorithmen in ANSYS' Workbench 16.1.

Wie in Abbildung 38 dargestellt, hat der z-Wert einen bedeutenderen Einfluss auf die Minimierung der Bauzeit als die Variable x. Mit steigendem z sinkt die Bauzeit. Wie in Abbildung 39 dargestellt, hat die Variable x einen größeren Einfluss auf den Materialverbrauch im Vergleich zu ihrem Einfluss auf die Bauzeit. Nichtsdestotrotz hat z den bedeutenderen Einfluss auf den Materialverbrauch im Vergleich zu x.

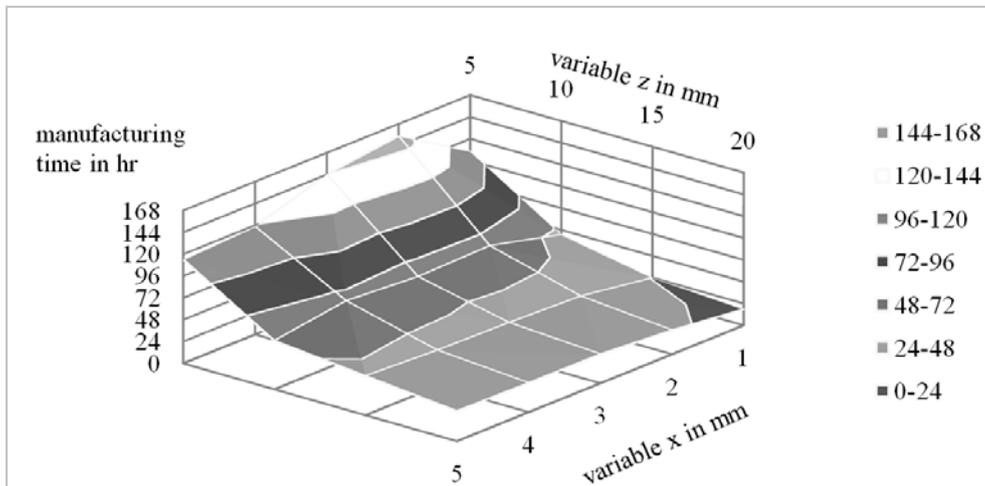


Abbildung 38. Bauzeit der Kreuzstruktur in Abhängigkeit von den Variablen x und z; ermittelt mittels der Algorithmen in Stratasys Insight 10.6.

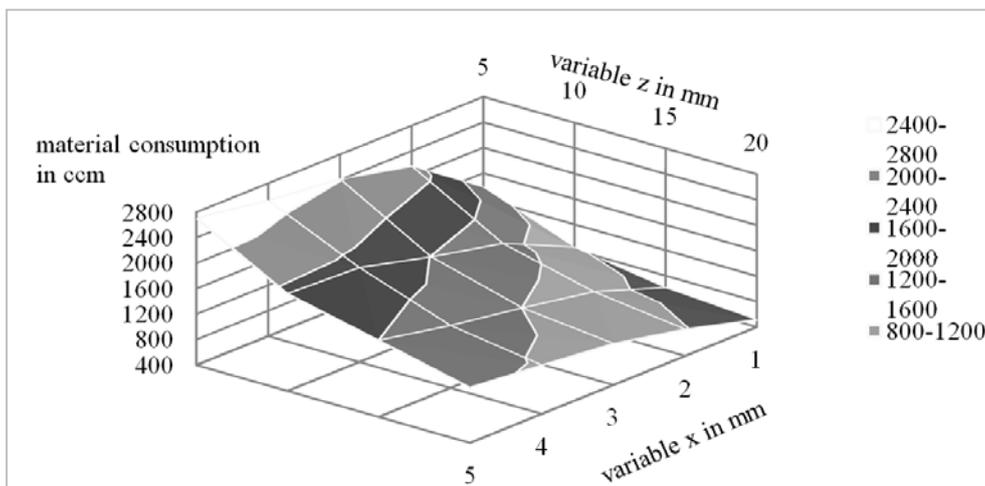


Abbildung 39. Materialverbrauch der Kreuzstruktur in Abhängigkeit von den Variablen x und z; ermittelt mithilfe von Insight 10.6.

Wabenstrukturen

Wie in Abbildung 40 dargestellt, wird die Referenzdeformation von 0,28 mm bereits für $x = 1$ mm unterschritten und folglich für alle größeren x und für alle Werte von z .

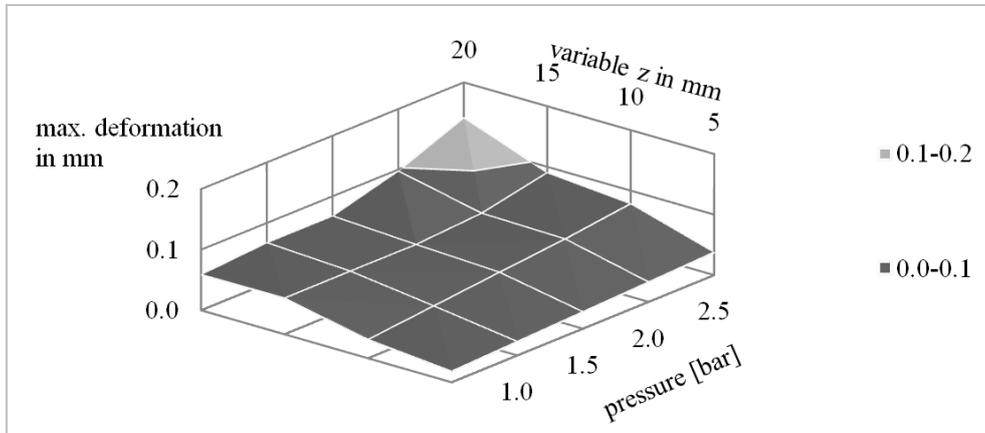


Abbildung 40. Maximale Deformationswerte (Wabenstruktur, $x = 1$ mm); ermittelt mithilfe der Algorithmen in ANSYS' Workbench 16.1.

Es wird jedoch notiert, dass mit steigendem x -Wert keine stetige Deformationsabnahme einhergeht (vergleiche Abbildung 41 mit Abbildung 42). Begründet wird dies damit, dass die Deformation in der Wand (dort, wo die maximale Deformation auftritt) vom wirkenden Hebelarm abhängt, welcher wiederum von x abhängig ist. Folglich kann eine Erhöhung von x zu einer Erhöhung des wirkenden Hebelarms und somit zu einer Erhöhung der Durchbiegung führen.

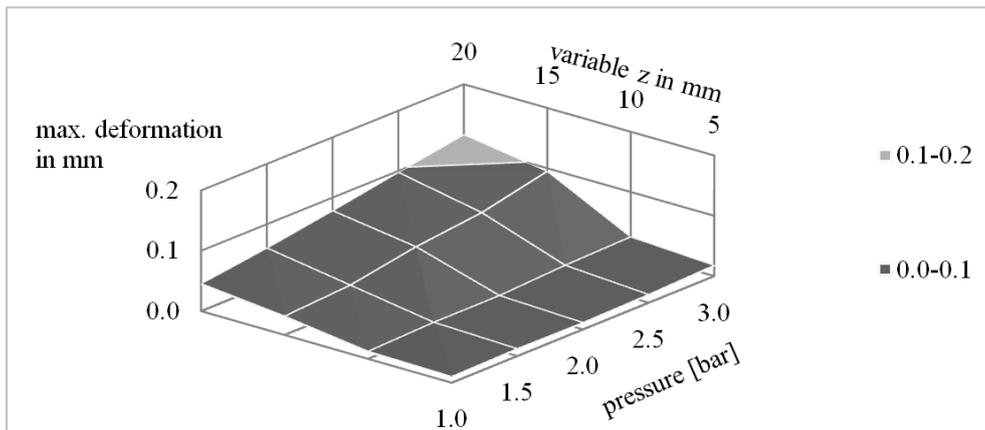


Abbildung 41. Maximale Deformationswerte (Wabenstruktur, $x = 4$ mm); ermittelt mittels den Algorithmen in ANSYS' Workbench 16.1.

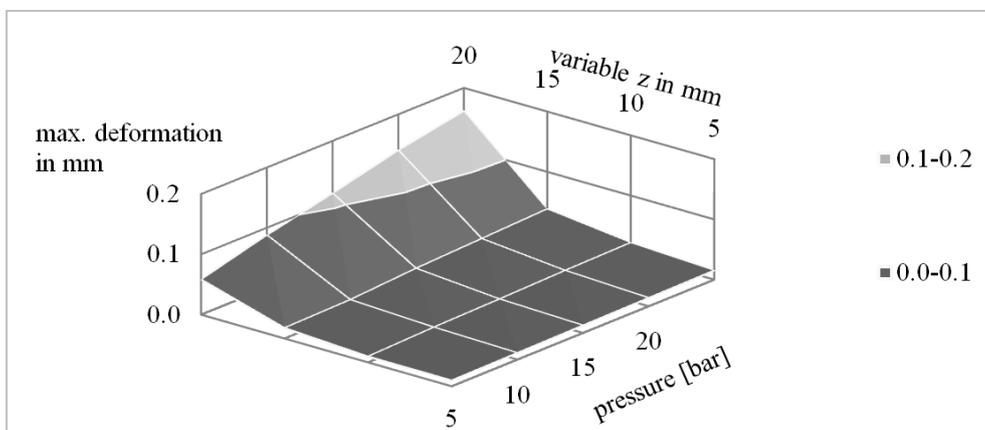


Abbildung 42. Maximale Deformationswerte (Wabenstruktur, $x = 5$ mm); ermittelt durch Verwendung von ANSYS' Workbench 16.1.



Abbildung 43. Unterschiedlich resultierende Hebelarme ($a < b$) in der Wand in Abhängigkeit vom Wert x .

Die Abbildung 44 und die Abbildung 45 spiegeln die gleiche Abhängigkeit der Bauzeit und des Materialverbrauchs von den Variablen x und z wieder wie im Falle der Kreuzstruktur (vergleiche mit Abbildung 38 und Abbildung 39).

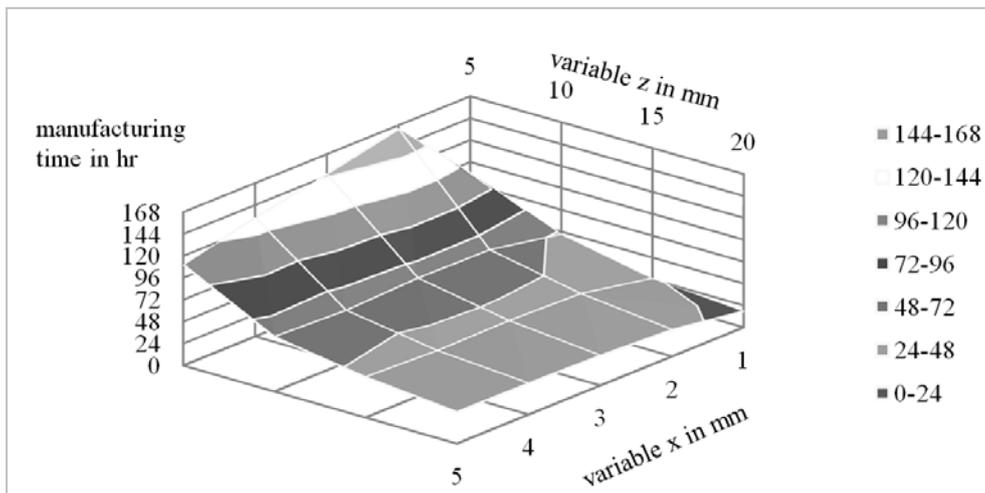


Abbildung 44. Bauzeit der Wabenstruktur in Abhängigkeit von den Variablen x und z ; ermittelt mittels der Algorithmen in Stratasys' Insight 10.6

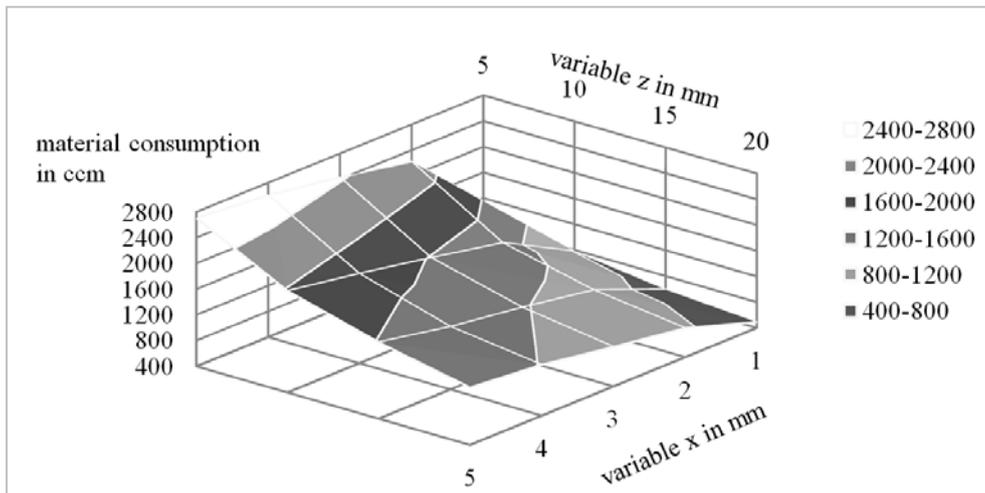


Abbildung 45. Materialverbrauch der Wabenstruktur in Abhängigkeit von den Variablen x und z ; ermittelt mittels der Algorithmen in Stratasys' Insight 10.6

Fazit

Die Zusammenfassung der Ergebnisse in Tabelle 11 verdeutlicht das Einsparpotential im additiven Bau von Laminiervorrichtungen für die CFK-Autoklav-Anwendung.

Tabelle 11. Fazit der Versuchsergebnisse.

Testkörper	Bauzeit	Materialverbrauch	Materialeinsparung
Vollmaterial	38 Stunden 13 min	≈ 3093 cm ³	---
Schale (Wandstärke = 12 mm)	16 Stunden 11 min	≈ 1075 cm ³	≈ 65%
Kreuzstruktur (x = 2mm, z = 20 mm)	26 Stunden 24 min	≈ 815 cm ³	≈ 74%
Wabenstruktur (x = 1mm, z = 20 mm)	17 Stunden 36 min	≈ 493 cm ³	≈ 84%

2.6. Oberflächenveredelungsverfahren (AP 5.2)

2.6.1. Analyse der Oberflächenansprüche an CFK-Bauteilen

In der Fachliteratur zum Themenbereich Faserverbundwerkstoffe wird die Oberfläche solcher Bauteile regelmäßig mit dem Begriff „Class A“ in Verbindung gebracht. Dieses Gütesiegel definiert qualitativ hochwertige CFK-Bauteile, die im Automobilsektor zum Beispiel für Außenhautkomponenten wie Armaturen oder Karosserien herangezogen werden. Allerdings ist dieser Begriff nicht eindeutig genormt und wird je nach Kraftfahrzeug-Hersteller unterschiedlich verstanden [30]. So können die Qualitätsmerkmale beispielsweise am asiatischen Markt gegenüber dem europäischen und amerikanischen variieren. Aber auch firmenintern werden die Standards für Fahrzeuge der Luxusklasse anders festgelegt als für diejenigen aus der Kompaktwagenklasse [31]. Grundsätzlich kann aber die Aussage getroffen werden, dass Class A-Oberflächen weitestgehend die Oberflächenansprüche (Welligkeit, Glanz, Farbeindruck) vergleichbarer metallischer Teile erfüllen und als gewichtsoptimierte Alternative verwendet werden können.

Aufgrund der subjektiven Definition von Class A, die Unternehmen für sich festlegen, gestaltet es sich schwierig allgemein gültige Kennwerte in Erfahrung zu bringen. Ein Grund hierfür könnte das Betriebsgeheimnis, unter das die Erkenntnisse zu dieser Oberflächenthematik fallen, darstellen.

Diese Problematik wurde früh erkannt und in der Zeitschrift „Kunststoffe 81“ 1991 von **G. Eßwein und W.W. Kraft** in dem Artikel „Beurteilung der Oberflächen von SMC-Karosserieteilen“ festgehalten [32]. Gerade in der Oberflächenwelligkeit darf sich das Kunststoffteil nicht vom Blechteil unterscheiden. In der Vergangenheit – und teilweise heute noch in Anwendung - ist die subjektive Bewertung geübter Gutachter. Daraus ergibt sich allerdings erwartungsgemäß eine Problematik in der Reproduzierbarkeit, als auch in der Qualitätssicherung der Produkte. Aufgrund des Wunsches nach reproduzierbaren Messwerten zur Einordnung der Kunststoffsubstrate wurden entsprechende Messverfahren entwickelt (z.B. Tastschnitt- und LORIA-Verfahren). Um eine Class-A-Oberfläche zu erreichen, sind Grenzwerte für Lang- und Kurzwelligkeit im Automobilaußenbereich von Langwelligkeit kleiner als drei und Kurzwelligkeit kleiner als eins, nötig. Die Messungen von vergleichbaren geschliffenen und geläppten Stahlplatten ergab eine Rauheit von $R_a = 0,15 \mu\text{m}$ bzw. $R_a = 0,05 \mu\text{m}$.

Das **Institut für Verbundwerkstoffe Kaiserslautern e.V. in Kooperation mit DaimlerChrysler** verwendete jedoch optische Messverfahren (Profilometrie) zur Bestimmung oben genannter Parameter zur Beurteilung von Organoblechen [33]. Aus den Messungen verschiedener Kunststoff-Substrate und Stahlblechen geht hervor, dass der Maßstab für Langwelligkeit (Stahlblech) ebenfalls bei drei, jedoch die Kurzwelligkeit mit ca. 20 deutlich über dem Wert von Eßwein und Kraft liegt. Rauheitswerte der Stahlbleche liegen nicht vor.

Dr. Ing. **Wolfram Reuter** widmete sich in seiner Dissertation „Hochleistungs-Faser-Kunststoff-Verbunde mit Class-A-Oberflächenqualität für den Einsatz in der Fahrzeugaußenhaut“ ebenfalls dem Thema der Oberflächenoptimierung von FVK-Bauteilen, die allerdings aus der Werkstoff-Verfahren-Kombination CFK-RTM gefertigt sind. Auch er verweist auf unterschiedliche Qualitätsanforderungen und somit auf unterschiedliche Maßstäbe je nach Märkten/Kontinenten (Vergleich EU, USA, Asien, oder innerhalb EU),

Marken/Firmenprofil (Qualitätsanspruch, Unternehmensrichtlinien), Zielfahrzeugen (Typensegment, PKW/NFZ, Stückzahlen, Exotenfahrzeuge), Bauteilen (Anordnung am Fahrzeug, horizontal/vertikal, Sichtbarkeit für den Kunden) und Messverfahren und Beurteilungsmethode. [34]

Für die Ermittlung von Kennwerten für die Oberflächenbeschaffenheit seiner Probekörper verwendet Reuter die optische Messmethode Wave-Scan-Plus der Firma Byk-Gardner [35], da für dieses Messverfahren in einer firmeninternen Norm der BMW AG [36] Grenzwerte für Langwelligkeit (horizontale Bauteile < 8 , vertikale Bauteile < 26) und Kurzwelligkeit (alle Bauteile < 35) vorliegen und Standardverfahren zur Lackbewertung bei BMW ist. Als Vergleichsmuster zur Beurteilung der Bauteiloberflächenqualität zieht der Autor zusätzlich lackierte Stahlbleche heran, welche bereits serienmäßig verbaut werden: „Die obere Referenz für die Class-A-Oberflächenqualität stellen lackierte Stahlblech-Bauteile aus der laufenden Serienproduktion dar, wie z.B. ein lackiertes Stahlschiebedach.“ An dieser Komponente werden Welligkeitswerte von 3,2 für Langwelligkeit und 13,3 für Kurzwelligkeit festgestellt. Hauptaugenmerk in dieser Arbeit liegt auch hier auf der Beurteilung der Welligkeiten und Rauheiten. Andere Kenngrößen werden nicht betrachtet.

Im wesentlich aktuelleren „**Handbuch Verbundwerkstoffe**“ [30] wird ein Langwelligkeitswert von $l_w < 10$ angegeben, der zur „Class A“-Zertifizierung führt und für Anwendungen im Sichtbereich nicht überschritten werden sollte. „Gängige, nicht oberflächenoptimierte RTM-Bauteile oder Organobleche mit amorpher Matrix besitzen Welligkeitswerte zwischen $l_w = 10 - 20$. SMC-Substrate, die theoretisch höchsten automobilen Anforderungen gerecht werden, erreichen sogar Langwelligkeitswerte deutlich unter 10“. Zusätzlich zur Welligkeit gehen aus Messungen diverser FKV-Substrate Rauheiten im Bereich von ca. $R_a = 0,12 \mu\text{m}$ (SMC) bis hin zu ca. $R_a = 0,61 \mu\text{m}$ (LFT) hervor.

Andere Schriftwerke wie das „**Handbuch Faserverbundwerkstoffe**“ [37] oder „**Faserverbundwerkstoffe**“ [38] gehen lediglich auf Herstellungsverfahren, Auslegung, Bearbeitung und mechanische Prüfung ein, womit die messtechnischen Vorgehensweisen oben genannter Quellen nicht weiter verifizier- oder widerlegbar sind. Lediglich „**Kunststoffprüfung**“ [39] bestätigt die Messung der Oberflächenstruktur als optisches Prüfkriterium allgemeiner Kunststofffertigteile, definiert aber ebenfalls keine zahlenmäßigen Vergleichswerte die messbar sind.

Aufgrund des Mangels an explizit genormten Vergleichsinformationen über Oberflächencharakterisierung speziell von Verbundwerkstoffen, werden zusätzlich allgemeinere Beschreibungen von Bauteiloberflächen in Erfahrung gebracht.

Da CFK-Komponenten mit Class A-Oberfläche eine Alternative zu konventionellen, metallischen Bauteilen darstellen sollen, ist es legitim sie als „technische Oberflächen“ mit der Funktion „Aussehen“ zu klassifizieren. „Aussehen als Funktion von Sichtflächen wird zwar im Schrifttum erwähnt, aber über die Anforderungen an den Oberflächenzustand fehlen meist genauere Angaben“ [40]. Allerdings gibt zum Beispiel die „**Charakterisierung technischer Bauteiloberflächen**“ [41] Aufschluss über genormte Messverfahren und daraus resultierende 2D- und 3D-Parameter, aus denen umfassende Erkenntnisse über die Topographie eines Bauteils gewonnen und mithilfe einer Festlegung eigener Grenzkennwerte die Eignung als „Class A“-Komponenten festgestellt werden kann. Auch in diesem Schriftwerk wird unter anderem auf das Tastschnittverfahren zur Erfassung der bekannten Parametern Rauheit und Welligkeit durch 2D-Profilschnitte verwiesen, welches auch schon in der Vergangenheit zur Oberflächencharakterisierung von FKV-Komponenten Anwendung fand.

Zusammenfassung

Die obigen Auszüge aus der Literaturrecherche in Bezug auf die Oberflächenbewertung von CFK-Bauteilen zeigen ähnliche Ansätze zur quantitativen und qualitativen Klassifizierung dieser modernen Leichtbaualternativen, dennoch fehlt eine Basis (z.B. durch explizite Normung), die Oberflächenansprüche an heutige Serienprodukte eindeutig definiert und vergleichbare Kennwerte festlegt, die zum Erreichen der Class A Qualität nötig sind. Aus diesem Grund legen firmeninterne Gutachter die Standards ihrer Komponenten fest, die sich jedoch je nach Einsatzzweck oder Sichtbarkeit durchaus unterscheiden können.

Dennoch können auch Gemeinsamkeiten ausgemacht werden. Das Verlangen nach reproduzierbaren Messdaten führte historisch zu einer Entwicklung von Messverfahren, die, in Anlehnung an die Wahrnehmung des menschlichen Auges, die Oberfläche in kurzwellige ($\lambda = 0,1 \dots 1,2 \text{ mm}$) und langwellige ($\lambda = 1,2 \dots 30 \text{ mm}$) Flächenstrukturen gliedert. Kurzwellige Oberflächenstrukturen können ab einer Entfernung von z.B. 2,5 Metern nicht mehr vom menschlichen Auge aufgelöst werden. Bei näherer Betrachtung der Oberfläche (z.B. aus 50 cm Entfernung) lassen sich zusätzlich zu langwelligen Objekten Elemente bis zu einer minimalen Wellenlänge von $\lambda = 0,1 \text{ mm}$ erkennen (Abbildung 46).

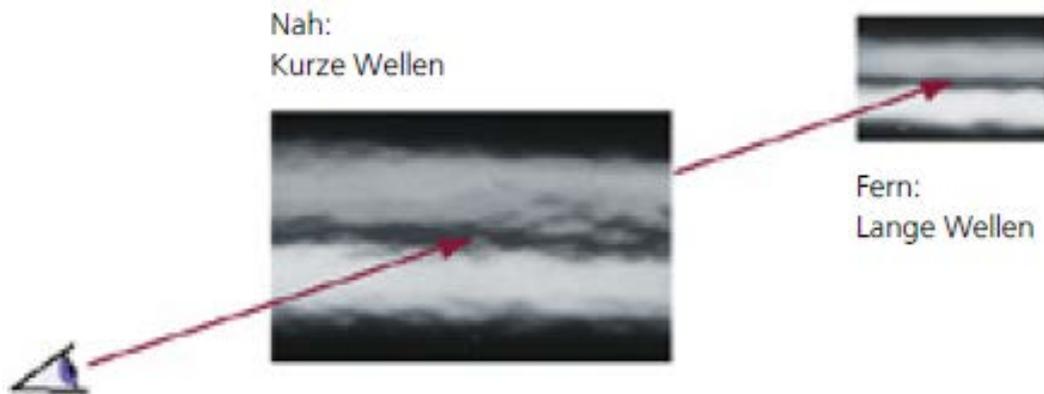


Abbildung 46. Sichtbarkeit von Oberflächenfehlern [35]

Die Unterscheidung in Kurz- und Langwelligkeit wird in der Glanzmesstechnik adaptiert, um, aufgrund der Funktionsweise des menschlichen Auges, Glanz zu beurteilen. Der Betrachter empfindet eine Oberfläche als glänzend, wenn flächendeckend Licht reflektiert wird und klare Kanten ersichtlich sind. Wellenstrukturen in der Größenordnung einiger Millimeter führen zu einer Reflektion des Lichts in sämtliche Raumrichtungen und stören somit die Gleichmäßigkeit der Reflektion in Richtung des Betrachters. Diese Lichtstreuung wird in den Kennzahlen für Kurz- und Langwelligkeit angegeben, die keine physikalische Größe definieren, sondern einen dimensionslosen Wert für die Größenordnung der Lichtstreuung in unterschiedlichen Betrachtungsdistanzen. Je kleiner die Werte für Kurzwelligkeit (engl. Short Wace, SW) und Langwelligkeit (engl. Long Wave, LW) sind, desto weniger Abweichung liegt gegenüber der ideal glatten Oberfläche vor [34].

Die, basierend auf der Oberflächenwelligkeit, unterschiedlich gerichtete Reflektion des Lichts liefert dem Betrachter Bereiche mit dunklen und hellen Flecken (Abbildung 47). Die Auswirkungen der Lichtintensitätsschwankungen der rauen Oberfläche machen sich im sog. „Orange Peel“ bemerkbar, den es zu vermeiden gilt.



Abbildung 47. Vergleich glatte Oberfläche zu „Orange Peel“, Quelle: www.drbeasleys.com

Alle einschlägigen Schriftwerke nennen neben der Rauheit die sog. Langwelligkeit als entscheidendes Qualitätskriterium, das sich aus der Topographieanalyse eines FKV-Substrates ermitteln lässt und den wesentlichen Bewertungsanteil zur Einordnung in Class A darstellt. Jedoch sollte die Kurzwelligkeit nicht außer Acht gelassen werden. Es sollte angestrebt werden, die Werte für diesen Parameter ebenfalls so gering wie möglich zu realisieren, um den Orange-Peel-Effekt im Nahsichtbereich vermeiden zu können.

Nachfolgende Tabelle 12 listet Kennwerte auf, die laut den oben genannten Autoren zu einer ausreichend hochwertigen Oberfläche im Sichtbereich führen.

Tabelle 12. Oberflächenwerte für Class-A Qualität einiger Schriftwerke.

Autoren	Quelle	Jahr	Langwelligkeit LW [-]	Kurzwelligkeit SW [-]	Rauheit Ra [µm]
Eßwein / Kraft	Fachzeitschrift Kunststoffe	1991	< 3	< 1	0,05 - 0,15
Blinzler, Neitzel, Hoecker	Fachzeitschrift Kunststoffe	1999	3	20	-
Reuter	Dissertation/ BMW Standard	2002	8-26	< 35	-
Neitzel, Mitschang, Breuer	Handbuch Verbundwerkstoffe	2014	< 10	-	0,12 - 0,61
AVK e.V.	Handbuch Faserverbundwerkstoffe	2010	-	-	-
Ehrenstein	Faserverbundwerkstoffe	2006	-	-	-
Seewig, Wiehr, Gröger	VDI Richtlinie	2011	-	-	-

Festlegung quantitativer und qualitativer Kennwerte für weitere Untersuchungen

Zur Festlegung des Ziels der Oberflächenoptimierung sind vergleichbare Grenzwerte diverser Parameter nötig. Im vorherigen Kapitel wurden derartige Zahlen in Erfahrung gebracht, die als Basis zur Oberflächenbewertung der CFK-Teile dient. Da unterschiedliche Werte der einzelnen Untersuchungen existieren, ist es sinnvoll, eigene Maßstäbe mit Hilfe der genannten Informationen zu generieren.

Erreicht werden soll, mit Einhaltung der entsprechenden Kennwerte, eine Class A Oberfläche, die bereits Anwendung in der Automobilindustrie findet. Aus diesem Grund liegt das Augenmerk auf der Bewertung der Größen, welche zu entsprechender Klassifizierung führen. Diese sind:

- Langwelligkeit LW [-]: 10
- Kurzwelligkeit SW [-]: 20
- Ar. Mittenrauwert Ra [µm]: 0,15

Die Topographie späterer CFK-Bauteile soll also dementsprechend nach dem gesamten Herstellungsverfahren mindestens obenstehende Werte aufweisen, damit sie als gleichwertige Alternative zur Oberflächenstruktur herkömmlicher Stahlbleche erachtet werden kann. Da die Faserverbundssubstrate im Fertigungsprozess im direkten Oberflächenkontakt zu den RT-Einsätzen stehen und somit die makroskopische und mikroskopische Struktur übertragen wird, dienen die festgelegten Kenngrößen auch als Vergleichswerte für die Topographie der FDM-erzeugten Kunststoffteile. Es wird erwartet, dass die Oberflächen beider Kontaktpartner nach dem Herstellungsverfahren die gleichen Abweichungen von der ideal glatten Oberfläche aufweisen.

2.6.2. Beurteilung möglicher Messverfahren zur Bestimmung des Ist-Zustands von Oberflächen

Die Tabelle 13 liefert eine Übersicht der angesprochenen Verfahren, typische Eigenschaften und Einsatzgebiete auf.

Tabelle 13. Übersicht möglicher Messverfahren

Verfahren	LW , SW , Ra	Messprotokoll	Messbare Materialien	Messbereich (vertikal)
Tastschnitt	X , X , ✓	2D-Höhenprofil	Nur harte Werkstoffe	10 µm – Wenige mm
Weißlichtsensor	X , X , ✓	2D- und 3D-Profile	Metall, Glas, Lack, Kunststoff	100 µm – 20 mm
Weißlichtinterferometrie	X , X , ✓	2D- und 3D-Profile	Metall, Glas, Lack, Kunststoff	100 µm – Mehrere mm
Laser-Profilmetrie	X , X , ✓	2D- und 3D-Profile	Laserreflektierende	Bis 22 mm
Reflektometer	✓ , ✓ , X	Kurz- und Langwelligkeitswerte, Glanzgrad	Matte bis hochglänzende	Wenige µm

Die einzelnen Messmethoden werden für unterschiedliche Anwendungsbereiche herangezogen. Das Tastschnittverfahren liefert ein Höhenprofil, das schnell Aussagen über die Rauheit, überwiegend von Metallteilen, ermöglicht. Die harte Diamantspitze grenzt allerdings die messbaren Materialien dahingehend ein, dass nur harte Werkstoffe, die keine Schädigung durch die Diamantspitze erleiden, messbar sind. Dieses Phänomen ist aber beispielsweise beim weichen thermoplastischen Kunststoff, welcher in dieser Arbeit untersucht wird, zu erwarten. Somit können taktile Verfahren, die einen invasiven Einfluss auf die Oberfläche haben, nicht weiter berücksichtigt werden, da sie die Messungen grundlegend verfälschen würden.

Moderne optische Topographiemessung, mit z.B. Weißlicht oder Laser, bietet hingegen die Möglichkeit mit einer gewissen Distanz zwischen Linse und Prüfling, die Oberfläche zu betrachten. Weil das Objektiv nicht im direkten Kontakt zur Messfläche steht, können so größere Messbereiche in Höhenrichtung ausgenutzt werden, was eine Messung von gekrümmten Oberflächen begünstigt. Des Weiteren kann relativ schnell, anstatt eines zweidimensionalen Höhenprofils, eine komplette Struktur in allen Raumrichtungen gemessen und anschließend mit entsprechender Software nötige Parameter herausgefiltert werden.

Die direkte Ermittlung von Kurz- und Langwelligkeit resultiert nicht aus der optischen Topographieuntersuchung, sondern nur über spezielle Glanzmessgeräte die auf dem Reflektionsverfahren basieren. Dazu sind relativ große, flächige Bauteile, wie lackierte Bleche nötig, um die nötige Messstrecke von z.B. 100 mm (Wave-Scan, Byk Gardner) gewährleisten zu können. Diese Mindestlänge widerspricht aber den Maßen der Rapid-Tooling-Bauteile, da die Dimensionen deutlich geringer sind und somit keine Aussage über die Welligkeiten mit dieser Methode zulassen.

Alle optischen Messverfahren bieten den Vorteil der kontaktlosen Oberflächenmessung und sind mit der DIN EN ISO 25178 konform, die die Topographieanalyse von Flächenelementen vereinheitlicht. Sie eignen sich deshalb besonders, nicht nur zweidimensionale Profilschnitte, sondern umfangreichere 3D-Bilder zu erzeugen.

2.6.3 Entwicklung eines Testkörpers zur Abbildung unterschiedlicher Oberflächen

Es wurde ein Körper konstruiert, an dem Kontaktoberflächen von Fused-Deposition-Modelling Laminieraufsätzen gemessen werden. Ziel ist es unterschiedliche Formelemente zu untersuchen und die jeweiligen Oberflächenstrukturen miteinander zu vergleichen, um Qualitätsunterschiede in den jeweiligen Bereichen aufzuzeigen. Aufgrund des Schichtaufbaus der additiven Fertigung werden unterschiedliche Oberflächenqualitäten, basierend auf dem Treppenstufeneffekt, der einzelnen Formen erwartet. Abbildung 48 zeigt das CAD-Modell des Testobjekts und die oberflächentechnisch interessanten Prüfflächen.

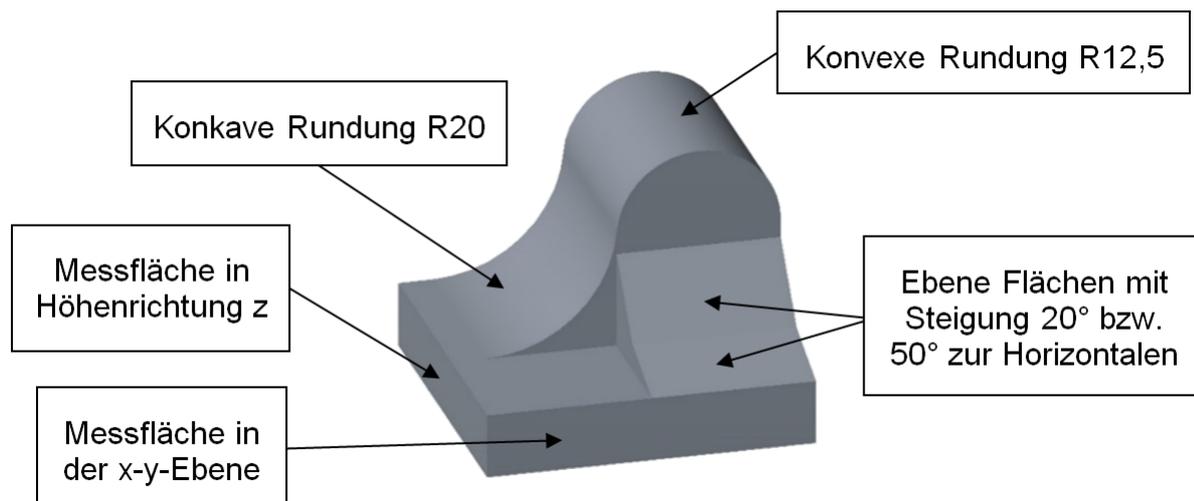


Abbildung 48. Messflächen am Testkörper.

Um möglichst unterschiedliche Konturen späterer Bauteile abbilden zu können, sind verschiedene Messbereiche am Testkörper angebracht.

Typische Anwendungsbeispiele für CFK-Bauteile z.B. im Automobilbereich sind gekrümmte flächige Bauteile, wie Karosseriebleche oder Spoiler. Diese Krümmungen werden in der Rundung des Objekts in einem deutlich kleineren

ren Maßstab realisiert. Durch Variation der Steigung an einzelnen Messpunkten der Kurven tritt der Treppenstufeneffekt (Abbildung 49) mehr (geringe Steigung) oder weniger (starker Steigung) in Erscheinung.

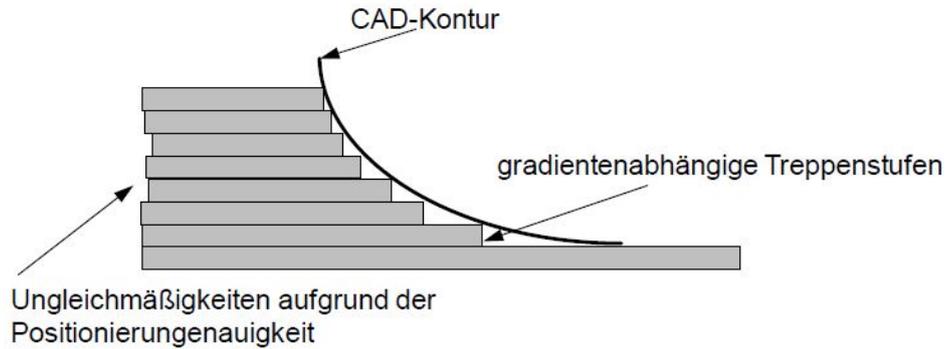


Abbildung 49. Treppenstufeneffekt [10]

Ähnliche Auswirkungen werden an den ebenen Flächen mit definierten Steigungen erwartet. Hier sollen Aussagen über den Einfluss des gezielt festgelegten Steigungsgrades auf ebenen Oberflächen ermittelt werden. Da über den Zusammenhang von Steigung und Oberflächenqualität noch keine Informationen vorliegen, werden die Steigungen anfangs auf 20° bzw. 50° festgelegt.

Ein Vergleich von horizontalen und vertikalen Flächen liefern die Messflächen in z-Richtung und der x-y-Ebene. Hier ist aufgrund der Ebenheit der Flächen weniger der Treppenstufeneffekt zu erwarten. Von Interesse sind viel mehr die Unterschiede in der Oberflächengestalt der vertikalen und horizontalen Ebene.

Untersucht werden identische Bauteile mit unterschiedlichen Herstellungsparametern. Zum einen variieren die verwendeten Schichthöhen zwischen den zwei Werten von 0,254 und 0,330 mm je nach verwendeter Düse (T14 bzw. T20) und zum anderen die Ausrichtung des Körpers im Druckraum. Einmal wird die Höhenrichtung parallel zur Grundfläche gewählt und als Vergleich dazu das Modell um 90° im Druckraum gekippt, an dem die Schichtgenerierung senkrecht zur rechteckigen Grundfläche erfolgt.

2.6.4. Erstellung von Referenzmessungen

Vorgehensweise

Die Abbildung 50 zeigt die Aufnahme und die daraus erzielbare Generierung der Höheninformationen der Oberflächenstruktur einer beispielhaften vertikalen Fläche. Dabei handelt es sich um ein Bauteil, welches mit der T14-Düse hergestellt wurde und der Schichtaufbau parallel zur Grundfläche des Testkörpers erfolgte.

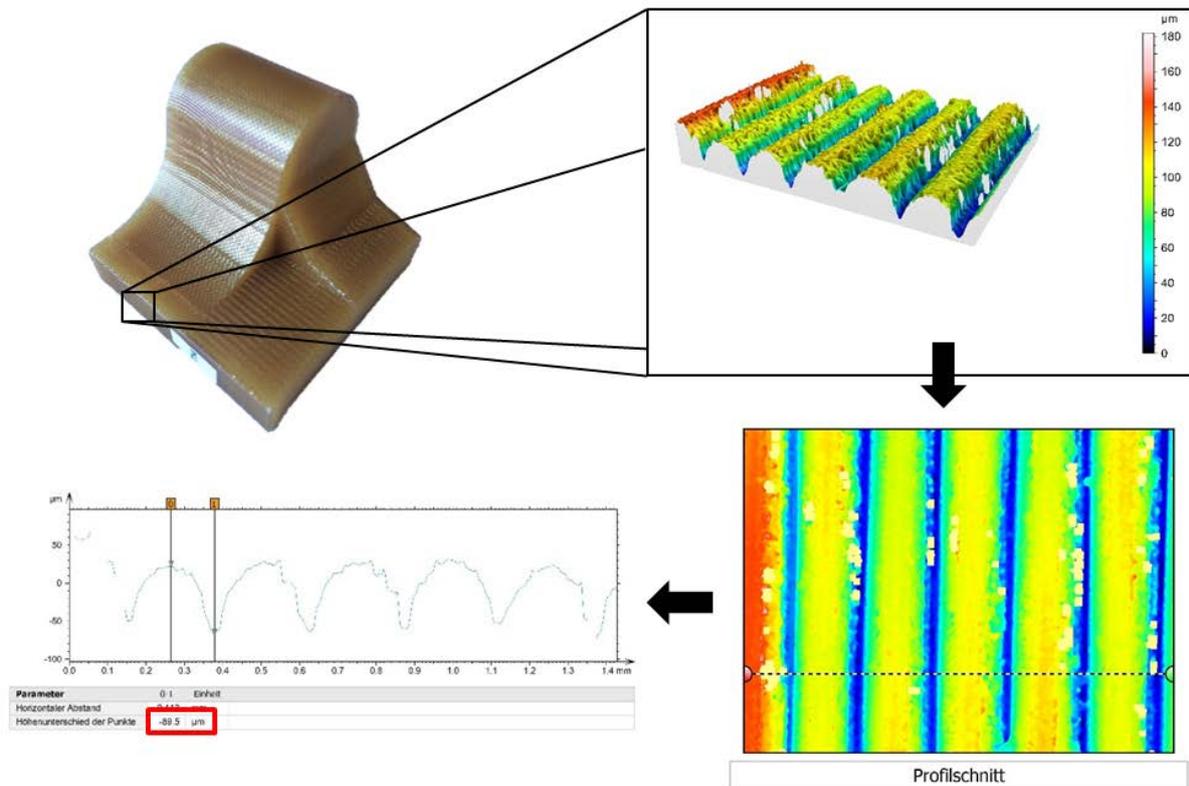


Abbildung 50. Höheninformation einer vertikalen Fläche (Messung mittels „Autofokus“).

Basierend auf dem 3D-Messdatensatz jeder Messung, werden Profilschnitte (Primärprofile nach EN ISO 4287) aus Bereichen extrahiert, die eine möglichst hohe Dichte an auswertbaren Messpunkten besitzen. Zu sehen ist die periodische Wiederholung von Spitzen und Tälern, welche in diesem Fall die aufeinanderfolgenden Höhenschichten darstellen. Der Abstand zwischen Spitze zu Spitze bzw. Tal zu Tal ist demzufolge die Schichthöhe der T-14-Düse von 0,254 mm. Für den Oberflächenveredelungsprozess ist allerdings die Unebenheit, d.h. die Differenzhöhe zwischen Spitze und Tal, von Interesse. Durch die Autoklav-Technik zur Herstellung der CFK-Bauteile, deren Form durch die RT-Einsätze erzeugt wird, übernimmt die Prepreg-Matte die mikroskopischen Formabweichungen. Da diese, bei jedem der Testkörper, in einem relativ großen Höhenintervall liegen, ist die Auswertung der mittleren Rauheit nicht zielführend. Durch die Trennung der wellenlängenspezifischen Gestaltabweichungen (Welligkeit und Rauheit) aus dem Primärprofil gehen wichtige Höheninformationen der realen Oberfläche verloren, die zur Lösung des eigentlichen Problems nötig sind (Abbildung 51).

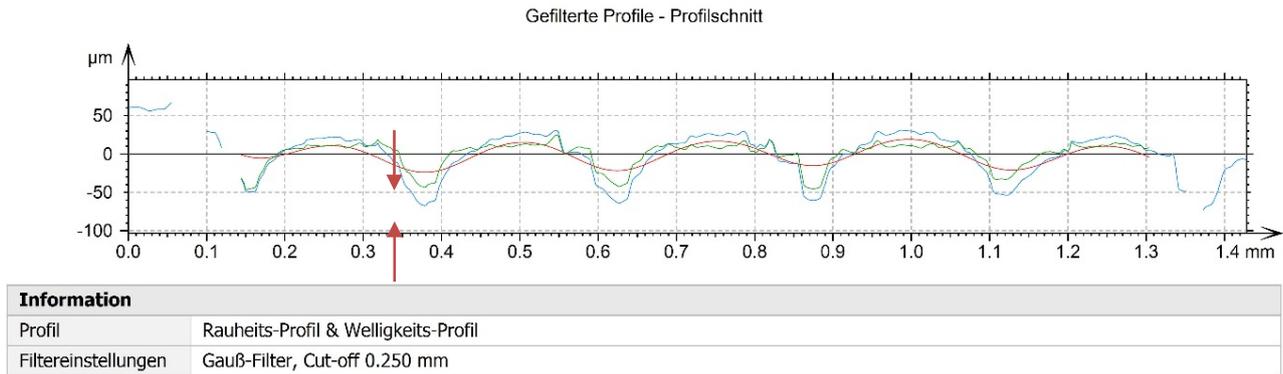


Abbildung 51. Gefilterte Profile aus dem Profilschnitt.

Betrachtet man in obenstehender Abbildung die grüne und rote Kurve, die das Rauheits- bzw. Welligkeitsprofil darstellt, wird deutlich, dass in den Materialfehlstellen eine große Höhenabweichung zum Primärprofil (blau) durch die Filterung entsteht. Durch die zu ungenaue Oberflächenerfassung mit dieser Vorgehensweise kann keine Aussage über den Glättegrad der Oberfläche mithilfe des Rauheitsprofils und der daraus generierten Größe der mittleren Rauheit R_a getroffen werden. Diese beschreibt das arithmetische Mittel der betragsmäßigen Abweichung von der Mittellinie, die wiederum das Bezugsprofil so schneidet, dass die Summe der Profilabweichungen minimal ist. Bei relativ glatten Flächen, deren Profilabweichungen in einem wesentlich kleineren Intervall liegen, ist die Beurteilung der mittleren Rauheit R_a durchaus sinnvoll, bei groben Konturen wie sie bei den RT-Einsätzen festgestellt wurden, ist die Aussagekraft jedoch zu gering.

Eine mögliche Alternative zur Rauheitsbestimmung ist die manuelle Erfassung der Höhendifferenz Δz zwischen zwei Grenzpunkten. Der Wert gibt Aufschluss über die Größe der Formabweichung, welche mit dem Oberflächenveredelungsverfahren minimiert werden soll. Dabei werden zwei Messpunkte, wie in Abbildung 50 zu sehen, an der Spitze und im Tal gesetzt und der Abstand zwischen diesen gemessen. Je geringer die Höhendifferenz zwischen Spitzen und Tälern, desto glatter ist die Oberfläche. Nachteil dieser Variante ist der Erhalt einer nicht normten Messgröße und die subjektive Setzung der Messpunkte, die durch verschiedene Personen bei der Auswertung durchaus unterschiedliche Messergebnisse liefert. Dennoch kann die Abweichung von der ideal glatten Oberfläche zahlenmäßig und ungefiltert erfasst werden, wodurch ein erster Eindruck über die Abmessungen der Unebenheiten gewonnen werden kann. Liegt eine periodische Oberflächenstruktur, wie oben zu sehen, vor, reicht eine Messung an einer beliebigen Stelle zur groben Einschätzung der gesamten Fläche aus. Bei aperiodischen Profilen ist die Messung in einem Bereich sinnvoll, der das schlechteste Oberflächenergebnis erwarten lässt.

Auswertung der Messungen

Aufgrund der genaueren Problembeschreibung mit der Höhendifferenz von Spitze zu Tal Δz wurden diese Werte an jeder Messfläche ermittelt, um einen Eindruck des Bearbeitungsaufwandes an unterschiedlichen Bauteilformen (vgl. Abbildung 48) zu erhalten. Da die Messungen eine hohe Unsicherheit, wegen der Werkstofftransparenz, der amorphen Struktur der Oberfläche und der teilweisen groben Auflösung ($20\mu\text{m}$) des Messgeräts, erzeugten, ist der Aussagegehalt nur begrenzt repräsentativ. Jedoch kann ein erster Eindruck von den ungefähren Größenordnungen der Unebenheiten gebildet werden. Ziel ist es weiterhin Abhängigkeiten zwischen der verwendeten Düse und dem entstehenden Oberflächenresultat an der jeweiligen Fläche festzustellen. Dies erlaubt Anwendungsempfehlungen, zur Ausrichtung des Bauteils im Druckraum, geben zu können, bei der die Nacharbeit minimal wird. In Abbildung 52 sind die Messergebnisse der verschiedenen Testkörper aufgeführt, an denen Oberflächenqualitätsunterschiede zwischen den jeweiligen Herstellungsparametern ausgemacht werden können.

	Konkav	Konvex	20°	50°	Horizontal	Vertikal
T-14, Parallel	285,0	274,0	216,0	114,0	100,0	89,5
T-14, Senkrecht	118,0	124,0	106,0	132,0	97,4	90,5
T-20, Parallel	369,0	387,0	246,0	152,0	134,0	130,0
T-20, Senkrecht	182,0	169,0	174,0	163,0	122,0	135,0

Abbildung 52. Höhenunterschiede Δz der maximalen Unebenheit aus den Bezugsprofilen [μm]

1. Rundungen (grün)

Die Messungen zeigen, dass Rundungen eine vergleichsweise hohe Glätte aufweisen, wenn die Düsenachse parallel zur fiktiven Achse des Radius eingestellt wird und somit der Schichtaufbau der Radiusfläche senkrecht zur x-y-Ebene des Druckraums erfolgt (T-14, senkrecht und T-20, senkrecht). Die minimale Höhendifferenz wird dabei mit der T-14-Düse erreicht und liegt bei ca. 118 μm , die durch den ebenen Schichtaufbau hervorgerufen wird. Da hier allerdings eine Krümmung in nur einer Ebene vorliegt, Freiformflächen späterer CFK-Bauteile jedoch in allen drei Raumrichtungen gekrümmt sind, muss mit einer Erhöhung der Unebenheit durch den zusätzlichen Treppenstufeneffekt gerechnet werden. Da noch keine Freiformflächen gemessen wurden, kann zu diesem Zeitpunkt noch keine Aussage über die Veränderung der Oberflächengüte getroffen werden.

2. Steigungen (blau)

Der Treppenstufeneffekt tritt bei geringer Steigung mehr auf als bei hohen Steigungen. Diese These belegen die Messungen in Zahlen. Es ist erkennbar, dass in jeder Bauteilkonfiguration, ausgenommen der T-14-Düse mit senkrechter Schichtgenerierung zur Grundfläche, die Glätte bei steigendem Gradienten zunimmt. Mögliche Gründe für die Abweichung können die Messungenauigkeit oder ein schiefes Positionieren des Bauteils zum Objektiv darstellen. Die größte Auswirkung des Treppenstufeneffekts kann an den Bauteilen festgestellt werden, deren Steigungsflächen bei der Herstellung einen Winkel zur x-y-Ebene bilden (T-14, parallel und T-20, parallel). Ist die Bezugsfläche des Steigungswinkels eine Senkrechte zur x-y-Ebene sind bessere Oberflächen erzielbar (T-14, senkrecht und T-20, senkrecht). Bei Steigungen wird ebenfalls mit der T-14-Düse das bessere Oberflächenergebnis erzielt.

3. Ebene Flächen (rot)

Horizontale und vertikale Flächen weisen erwartungsgemäß die geringste Unebenheit aller Messflächen auf. Da der Treppenstufeneffekt an diesen Formen nicht in Erscheinung tritt, ist die Oberflächenstruktur nur durch den Herstellungsprozess geprägt. An den vertikalen Flächen entsteht die Höhendifferenz durch den schichtweisen Aufbau der Kontur. Deshalb unterscheiden sich die Werte nur nach der verwendeten Düse und nicht nach der Ausrichtung im Druckraum. Die mit der T-14-Düse hergestellten Bauteile weisen eine Höhendifferenz von Spitze zu Tal in einem Bereich von ca. 90 μm an den vertikalen Flächen auf. Durch die größere Schichthöhe ergibt sich bei Verwendung der T-20-Düse ein Wert von ungefähr 130 μm . Horizontale Flächen werden in annähernd gleicher Qualität produziert. Auch hier liefert die T-14-Düse geringere Werte von ca. 100 μm im Vergleich zur T-20-Düse (ca. 130 μm).

2.6.5. Ermittlung geeigneter Glättungsverfahren durch Grundsatzversuche

Damit Aussagen über die Auswirkungen und erreichbare Ergebnisse der Glättungsverfahren getroffen werden können, kommen die Theorien zu Oberflächenglättung in Grundsatzversuchen zur Anwendung. Bearbeitet werden dazu zwei Testobjekte (T14- und T20-Düse), deren Schichtaufbau parallel zur Grundfläche erfolgte. Die Oberflächenstruktur der vertikalen Flächen des jeweiligen Bauteils ist an allen Seiten nach dem Herstellungsprozess identisch, wodurch die Messergebnisse nach der Oberflächenveredelung, bei gleicher Ausgangslage, verglichen werden können. Somit wird jedes der drei ausgewählten Oberflächenveredelungsverfahren an einer vertikalen Fläche der Testkörper appliziert (Abbildung 53).

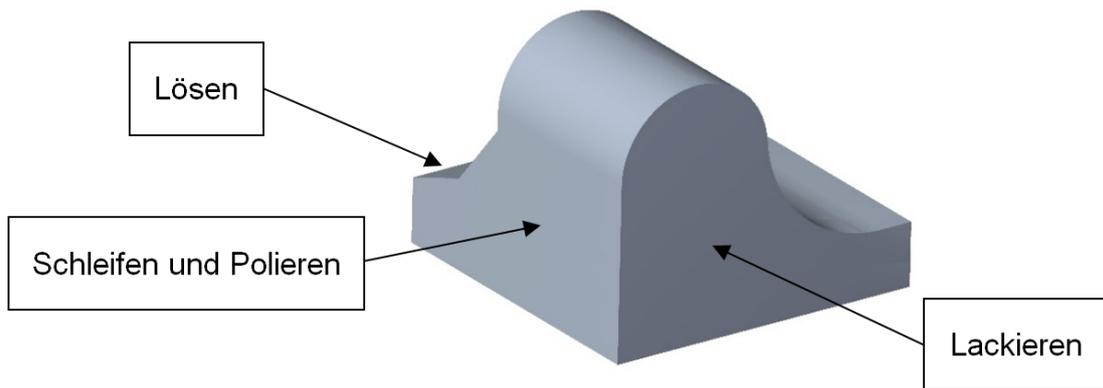


Abbildung 53. Bearbeitungsflächen an den Testkörpern.

Schleifen und Polieren

Zum Schleifen wird ein relativ feines Schleifpapier der Firma „Lux Tools“ herangezogen, dessen Körnung 100 beträgt. Die Bewegung des Schleifpapiers erfolgt manuell per Hand bei mittlerer Geschwindigkeit. Der Zeitbereich wird auf zwei Minuten festgelegt. Da aufgrund der geringen Schnittgeschwindigkeiten lediglich eine geringe Wärmeentwicklung auftritt, kann auf eine Kühlung verzichtet werden. Zur anschließenden Feinbearbeitung dient eine Polierpaste der Firma „Mellerud“, die auf die Oberfläche aufgetragen und mit einem Haushaltstuch verrieben wird. Die Bearbeitungsdauer beträgt auch hier zwei Minuten. Nach der Oberflächenveredlung liegen die geschliffenen und polierten Oberflächen in den Zuständen entsprechend Abbildung 54 und Abbildung 55 vor.

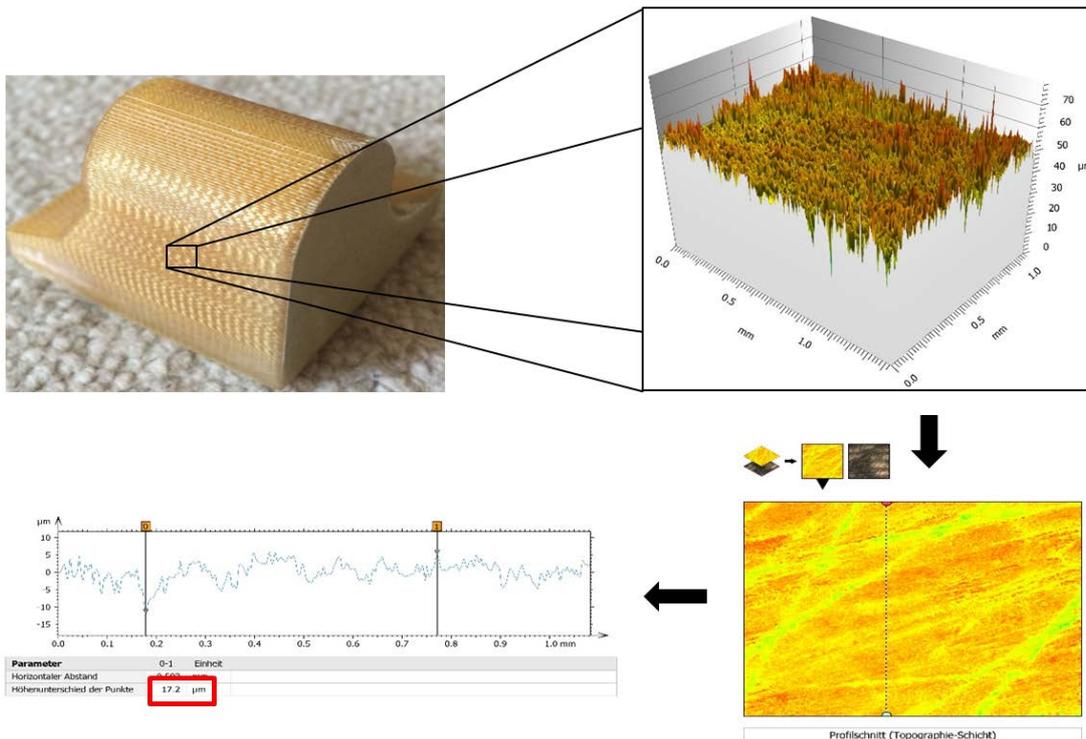


Abbildung 54. Messung der geschliffenen Oberfläche eines T14-Testkörpers.

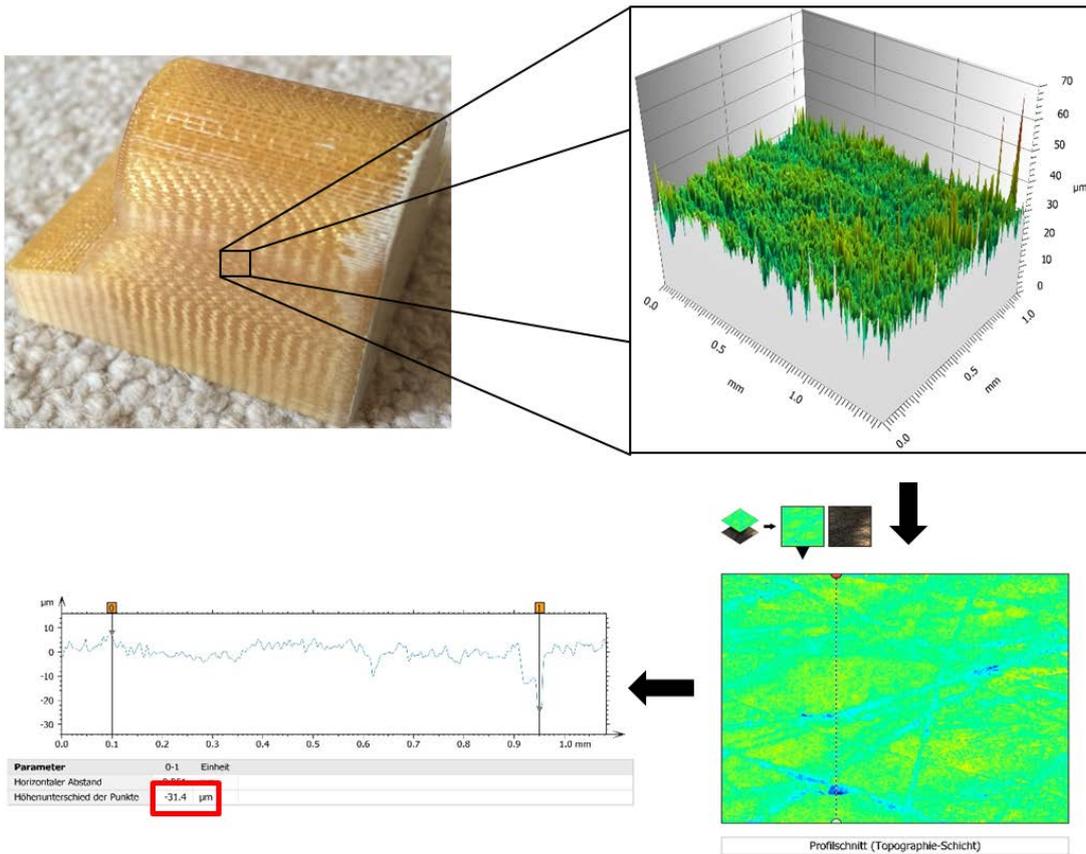


Abbildung 55. Messung der geschliffenen Oberfläche eines T20-Testkörpers.

Nach dem Schleif- und Polierprozess ist die typische Struktur erkennbar. Das Topographiebild ist geprägt von deutlichen Riefen und Rillen, welche durch die Schleifkörner hervorgerufen werden. Dennoch ist ein verbesserter maximaler Höhenunterschied im Bezugsprofil von ca. 17,2 µm erkennbar und eine Oberflächenglättung erreicht. Auch die Oberflächenstruktur der geschliffenen Fläche des T20-Körpers zeigt eine deutliche Verbesserung der Glätte. Der maximale Höhenunterschied liegt hier bei 31,4 µm.

Lackieren

Die gesamte Lackschicht ist aus zwei Schichten aufgebaut. Um die groben Unebenheiten auszugleichen wird zuerst eine Füllschicht Spritzspachtel auf Kunstharzbasis so lange aufgetragen, bis die Oberfläche homogen bedeckt ist. Dazu wird eine Spritzspachtel-Sprühdose herangezogen. Die darauffolgende Deckschicht bildet der Klarlack, welcher die finale Oberflächenglätte erzeugt. Hierzu wird ein Klarlack verwendet und bis zur lückenlosen Benetzung der Oberfläche aufgetragen. Die Prozesszeiten zum Aufbringen der einzelnen Lackschichten sind sehr gering und liegen im Sekundenbereich, die Trocknungszeiten hingegen beanspruchen ca. eine Stunde für die Spritzspachtel-Schicht bzw. zwei Stunden für den Klarlack. Die Ergebnisse nach der Messung mit dem Autofokus-System „Alicona Infinite Focus G4“ sind den Abbildung 56 und Abbildung 57 entnehmbar.

Die Lackierung bewirkt ebenfalls einen Glättungseffekt durch die Bildung einer ebenen Deckschicht. Diese weist jedoch über die gesamte Oberfläche verteilt fleckige Bereiche auf, die möglicherweise durch Lufteinschlüsse, eine unterschiedliche Lackverteilung oder eine ungleichmäßig ablaufende Trocknung hervorgerufen werden. Dennoch liegt die maximale Höhendifferenz im Profilschnitt, mit Erfassung einer derartigen Fehlstelle, lediglich bei 28,9 µm.

Die Lackschicht an dem T20-Bauteil weist erwartungsgemäß die gleichen Eigenschaften wie das T14-Bauteil auf. Die Entstehung der fleckigen Bereiche ist also dementsprechend nicht abhängig von der verwendeten Düse, sondern eher von oben genannten Einflussfaktoren. Allerdings treten die Fehlstellen ebenfalls in einem vergleichsweise geringen Ausmaß in Erscheinung; die maximale Höhendifferenz entspricht, bei Verwendung der T20-Düse, 22,6 µm.

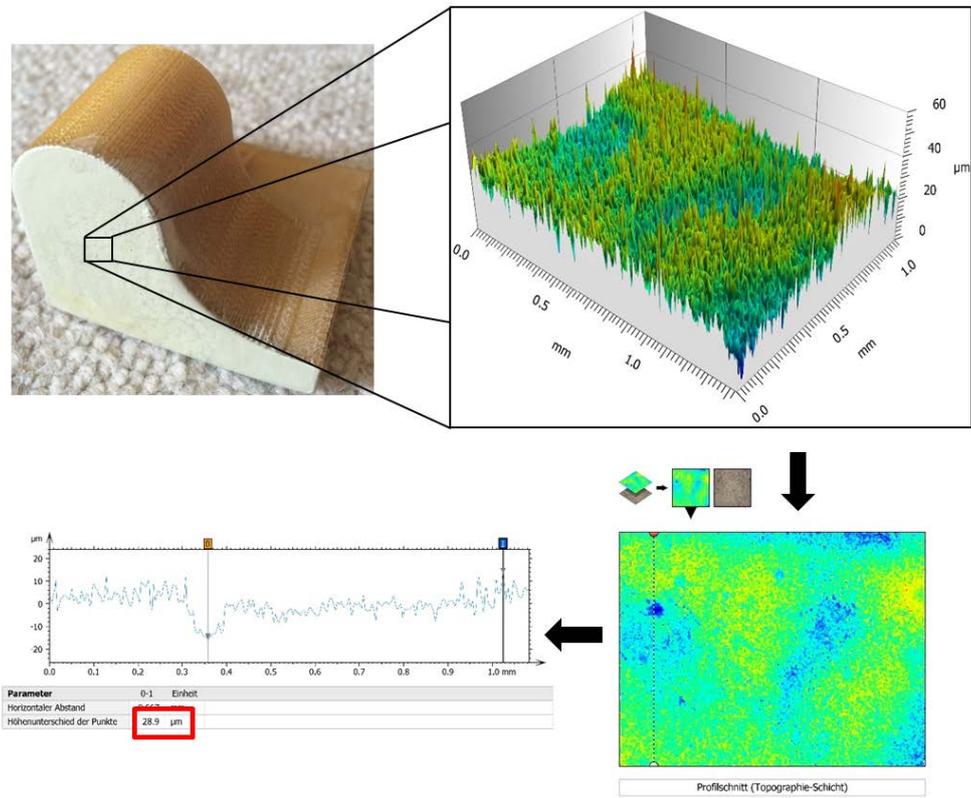


Abbildung 56. Messung der lackierten Oberfläche eines T14-Testkörpers.

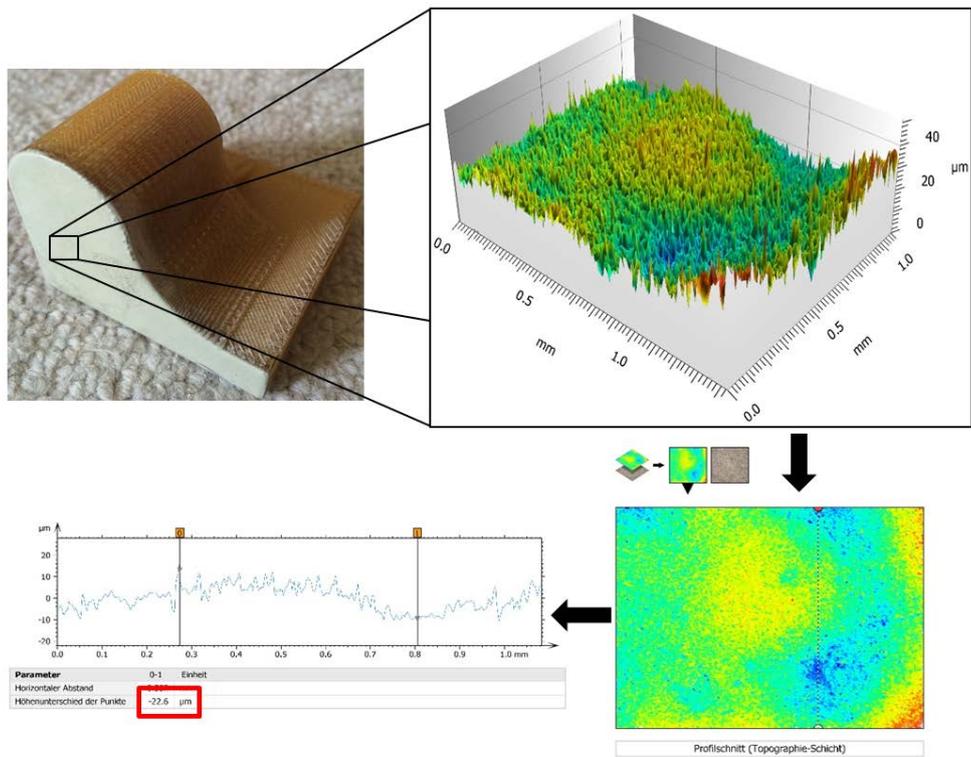


Abbildung 57. Messung der lackierten Oberfläche eines T20-Testkörpers.

Lösen

Als Lösungsmittel kam Aceton zum Einsatz, das mit einem Pinsel auf die Flächen aufgetragen wurde. Nach einer Stunde Verweilzeit konnte durch subjektives Prüfen keine merkliche Veränderung der Oberflächen festgestellt werden. Um möglicherweise doch noch eine Glättung erzielen zu können, wurden die Bauteilflächen in ein Acetonbad getaucht und für vier Stunden in dieser Position belassen. Der Kontakt mit Aceton bewirkt keinerlei Veränderung der Oberflächenstruktur, die maximale Höhendifferenz liegt nach wie vor bei ca. 89 μm (T14, Abbildung 58) bzw. 131 μm (T20, Abbildung 59).

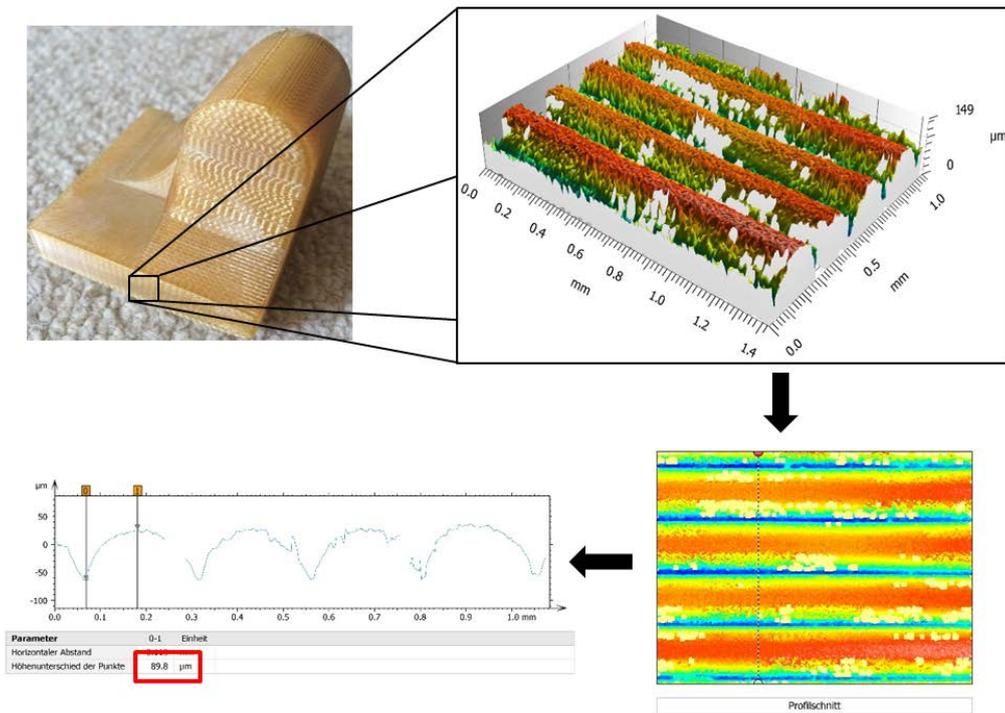


Abbildung 58. Messung der gelösten Oberfläche eines T14-Testkörpers.

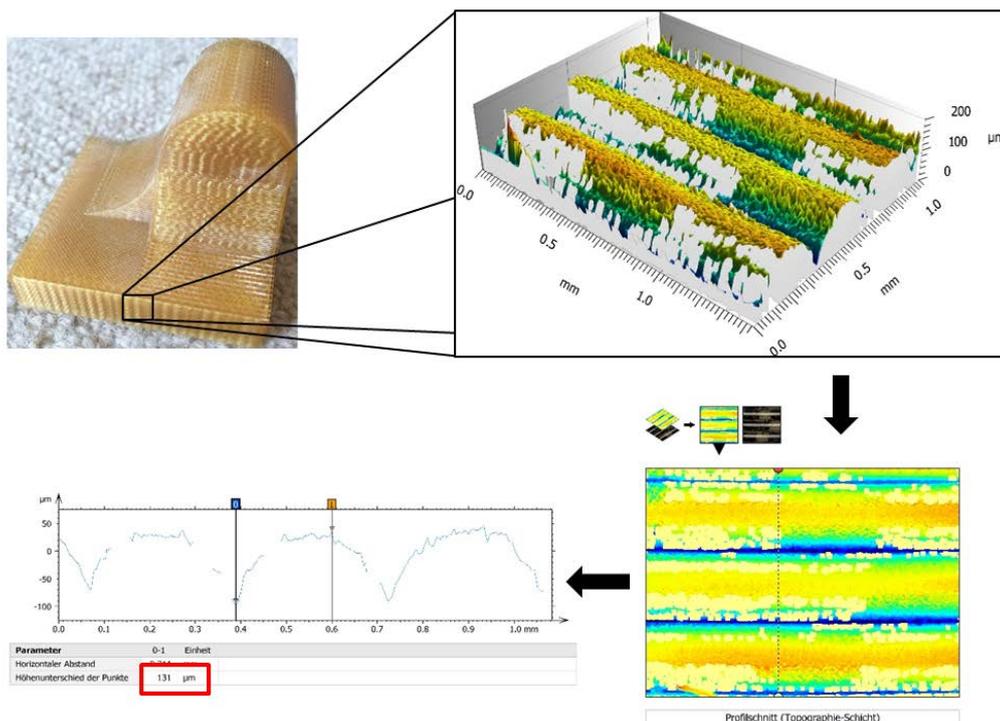


Abbildung 59. Messung der gelösten Oberfläche eines T20-Testkörpers.

Gegenüberstellung und Bewertung

Die Anwendung der einzelnen Oberflächenveredelungsverfahren zeigt unterschiedliche Ergebnisse. In folgender Tabelle 14 sind die Messergebnisse vor und nach der jeweiligen Behandlung der vertikalen Oberflächen aufgelistet. Der Wertevergleich soll Aufschluss über die Eignung der jeweiligen Verfahren liefern. Die Zahlen der unbearbeiteten Oberflächen sind ein Auszug aus den Referenzmessungen.

Tabelle 14. Max. Höhendifferenz Δz unbearbeiteter und bearbeiteter Oberflächen [μm]

FLÄCHE	UNBEARBEITET	GESCHLIFFEN / POLIERT	LACKIERT	GELÖST
T14, PARALLEL, VERTIKAL	89,5	17,2	28,9	89,0
T20, PARALLEL, VERTIKAL	130,0	31,4	22,6	130,0

Grundsätzlich kommen aufgrund des aktuellen Kenntnisstandes nur das Schleifen und Lackieren als Oberflächenveredelungsverfahren in Frage, da mit diesen Methoden, im Gegensatz zu Aceton, markante Glättungseffekte erzielbar sind. Die maximale Höhendifferenz Δz konnte beim Lackieren und Polieren, bei beiden Düsen, um ca. 80 % auf bis zu 17,2 μm gesenkt werden. Die Entstehung der Differenz der Werte von T14- und T20-Düse kann möglicherweise durch die unterschiedliche Schichtdicke oder den abweichenden Anpressdruck des Schleifpapiers hervorgerufen werden. Die Auswirkungen des Polierens konnten in diesem Versuch nicht eindeutig geklärt werden. Nach subjektiver Prüfung der Oberfläche ergab sich keine deutliche Veränderung, wodurch ein Verzicht dieses Bearbeitungsschrittes denkbar ist.

Das Lackieren der Oberflächen erwies sich ebenfalls als effektives Glättungsverfahren. Unabhängig von der Düsenkonfiguration liegt die maximale Höhendifferenz der getrockneten Oberfläche in einem Bereich von ca. 20-30 μm . Da eine sehr ungleichmäßige Oberflächenstruktur entsteht und nur eine punktuelle Messung durchgeführt wurde, kann mit den einzelnen Messwerten nicht die gesamte Fläche beschrieben werden, wodurch nur eine Schätzung abgegeben werden kann. Dennoch ergab sich eine Oberflächenverbesserung an der Messstelle des T14-Bauteils von 32,3 % auf 28,9 μm maximaler Höhendifferenz bzw. 82,6 % auf 22,6 μm maximaler Höhendifferenz an der Messstelle des T20-Bauteils.

Das Aceton hingegen lieferte keine Oberflächenverbesserung, das somit ausgeschlossen wird. Wie bereits angesprochen sind womöglich die chemischen Eigenschaften des Werkstoffes ULTEM 1010 maßgebend. Um die Theorie des Lösens doch noch zur Anwendung bringen zu können, muss im ersten Schritt ein Lösungsmittel gefunden werden, welches die Kunststoffoberfläche der RT-Einsätze erweicht. Dazu empfiehlt es sich, die chemischen Zusammenhänge zu analysieren und aus dieser Erkenntnis ein geeignetes Lösungsmittel zu bestimmen.

2.7. Positionierungsmöglichkeit auf der Interpolationsschicht (AP 5.3)¹

2.7.1. Analyse der konstruktiven Gestaltungsfreiheit mittels Pin-Type Tools

Je nach Bauteilgeometrie werden die einzelnen Stempel unterschiedlich stark in der Höhe verfahren. Die Interpolationsschicht befindet sich dabei noch über den Stempeln. Zur Befestigung der Interpolationsschicht auf den Stempelköpfen wird die Vakuumkammer aktiviert, in welcher sich alle Stempel befinden. Durch den Unterdruck wird die elastische Interpolationsschicht (im Folgenden IPL genannt) auf die Stempelköpfe gezogen und es wird die gewünschte Freiformfläche, auf der dann später das CFK-Prepreg aufgelegt wird, durch die IPL abgebildet. So entsteht eine feste Verbindung zwischen Interpolationsschicht und Stempeln.

Die Abbildungsgenauigkeit der IPL ist durch das Verfahrensprinzip des FlexForCFK-Laminierwerkzeugs jedoch beschränkt. So können ggfs. filigrane Bauteilgeometrien nicht mit dem verfügbaren Laminierwerkzeug abgebildet werden (Abbildung 60a).

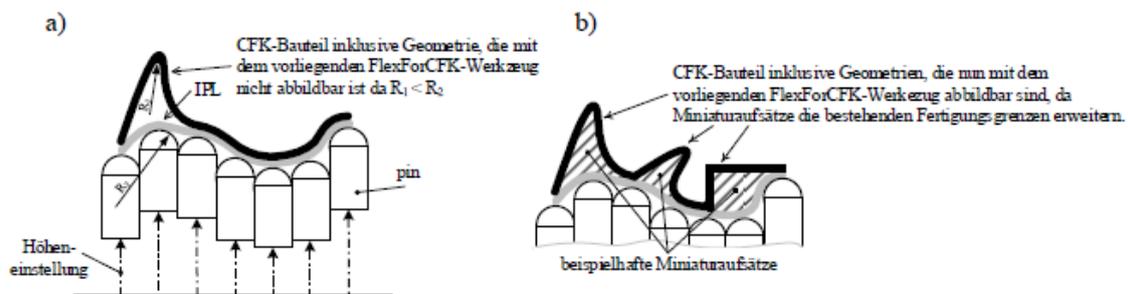


Abbildung 60. Erweiterung der Fertigungsgrenzen durch Miniaturaufsätze

Eine Verkleinerung der Stempeldurchmesse um eine Erhöhung der Stempelanzahl und folglich die Abbildung filigraner Bauteilgeometrien zu ermöglichen, führt zu einer übermäßigen Anzahl an zu verbauenden Pins. Neben der übermäßigen Erhöhung der Maschinenkosten aufgrund der hohen Anzahl an Stempeln wird auch die Einstelldauer der Laminierform erhöht, da nun eine größere Anzahl an Stempeln einzustellen ist. Um trotzdem detailliertere bzw. steilere Konturen abbilden zu können, werden Miniaturaufsätze auf die IPL aufgesetzt. Das bedeutet, nach dem die Vakuumkammer evakuiert wurde und sich die IPL auf die Stempelköpfe gezogen hat, werden ggf. ein oder mehrere Laminieraufsätze auf die IPL aufgesetzt und dort befestigt. Erst anschließend findet der Laminier- und Autoklavprozess statt. Dies befähigt eine bestehende FlexForCFK-Maschine auch filigranere CFK-Bauteilgeometrien abzubilden (Abbildung 60b).

2.7.2. Herausforderungen während der (De-)Montage von Miniaturaufsätzen auf formflexiblen Pin-Type Tools

Additiv gefertigte Rapid Tooling [20,25] Formen können zeitnah und wirtschaftlich in annähernd jeder beliebigen Geometrie gefertigt werden und sind daher besonders geeignet als Miniaturaufsätze. Für das Befestigen der Rapid Tooling Laminieraufsätze auf der IPL ist jedoch die Oberflächenkontur der IPL von entscheidender Bedeutung. Die Höhendifferenz der nebeneinanderliegenden Stempel wirkt sich auf die Unebenheit der Laminierfläche aus. Zudem führt der Unterdruck der Vakuumkammer zu einer Beulenbildung auf der IPL. Abbildung 61 illustriert unterschiedliche IPL-Ausprägungen.

¹ Die Ausführungen entstammen teilweise der eigenen wissenschaftlichen Veröffentlichung in [42], welche im Rahmen dieses Forschungsprojektes entstanden ist.



Abbildung 61. Unterschiedliche Ausprägungen der IPL

Im Rahmen der wissenschaftlichen Arbeit wurde das beschädigungsfreie (De-)Montieren der Rapid Tooling-Aufsätze auf der räumlich gekrümmten und mit dem vakuumbasierten „Beuleffekt“ versehenen Interpolationschicht als technische Herausforderung identifiziert.

2.7.3. Entwicklung von zerstörungsfrei (de-)montierbaren Befestigungsmodulen

Die manuelle Positionierung bietet hier verschiedene, zielführende Techniken. Zur Befähigung der Montage der Rapid Tooling Formen auf der IPL wurden verschiedene Designkonzepte entwickelt und als Demonstrator gefertigt. Drei Designkonzepte basieren auf Befestigungsmodulen nach Abbildung 62. Das vierte Designkonzept nutzt Vakuumkraft nach Abbildung 66. Die entwickelten Konzepte sind in der Abbildung 63, Abbildung 64, Abbildung 65 und Abbildung 66 im Detail illustriert.



Abbildung 62. Demonstratoren.

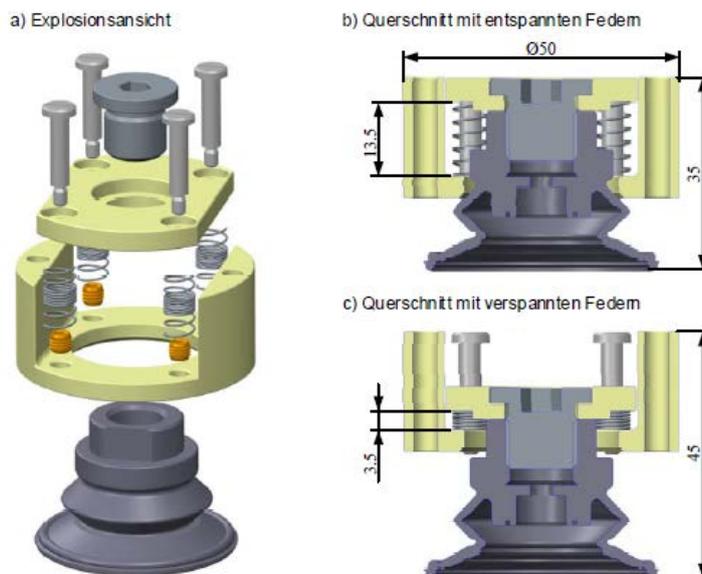


Abbildung 63. Designkonzept 1: basierend auf dem Saugprinzip

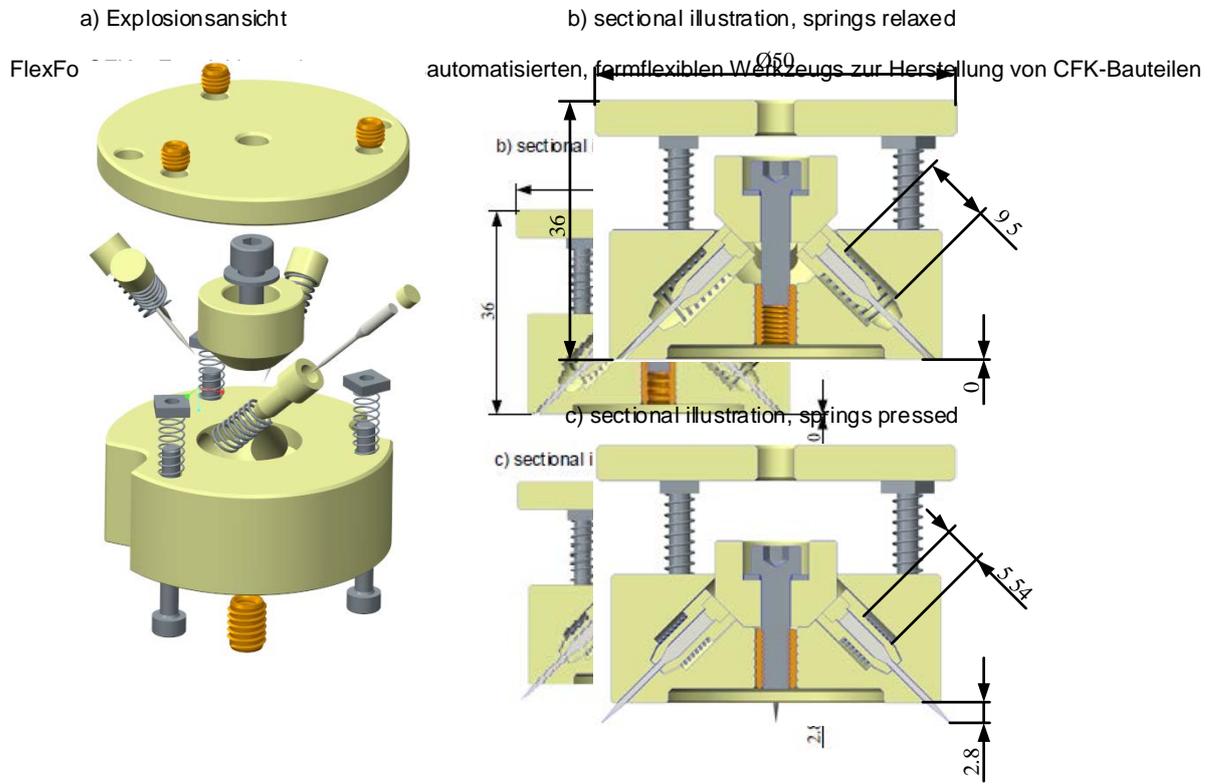


Abbildung 64. Designkonzept 2: basierend auf Nadelspannung

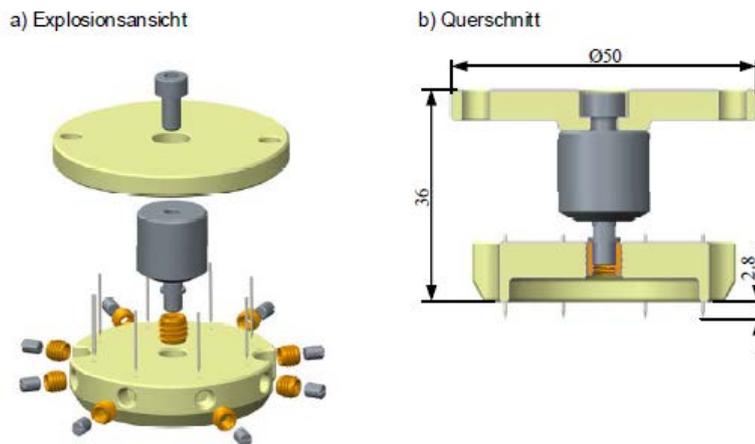


Abbildung 65. Designkonzept 3: basierend auf einsteckenden Nadeln

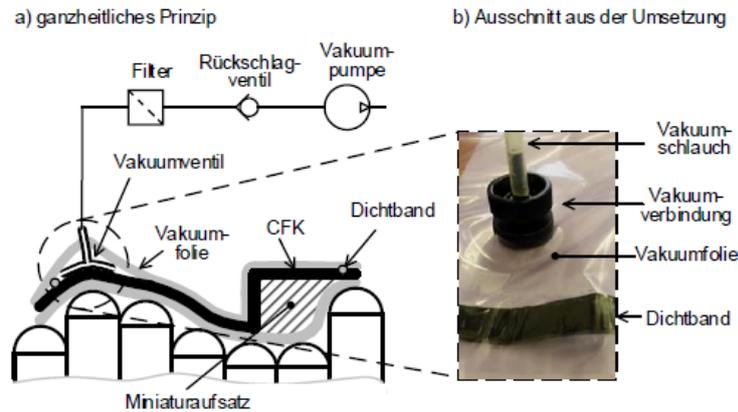


Abbildung 66. Designkonzept 4: basierend auf dem Vakuumprinzip

2.7.4. Vergleich der Befestigungsmodule durch experimentelle Ermittlung der Lösekraft

Mithilfe eines Versuchsaufbaus (Abbildung 67) wurden die ausgearbeiteten Befestigungskonzepte auf ihre Eignung bewertet. Damit zwischen allen Stempeln des Versuchsaufbaus der Unterdruck wirken kann, wurden zwei Fused Deposition Modeling-(FDM)-Bauteile konstruiert: ein Versuchsgrundkörper und ein Versuchseinsatz.

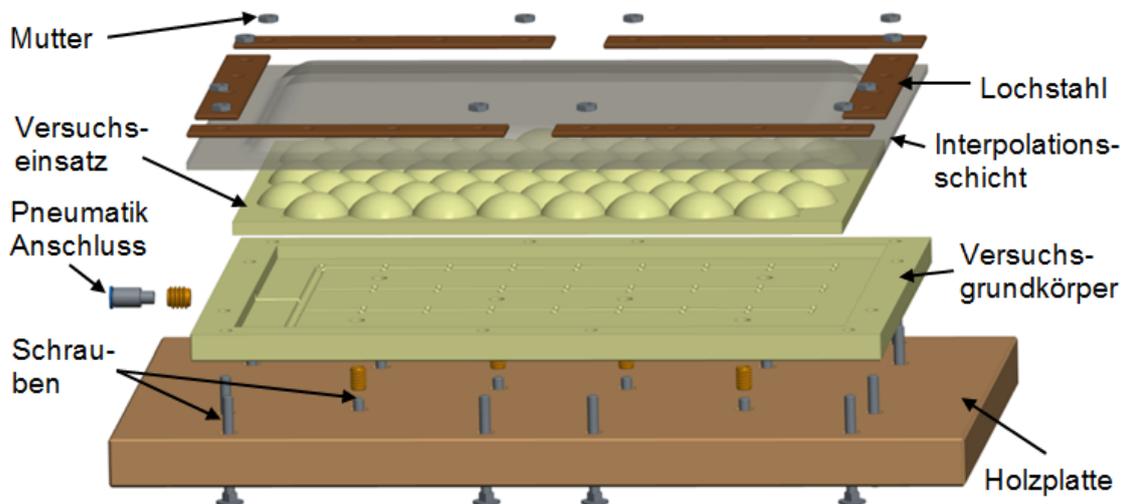


Abbildung 67. Explosionsdarstellung des Versuchsaufbaus mit ebenem Einsatz.

Im montierten Zustand bilden sie im Inneren Kanäle, die zwischen den Stempelköpfen hervorkommen. So können alle Stempel aus einem Bauteil gedruckt werden und dennoch kann der Unterdruck, wie im Originalwerkzeug, zwischen den Stempeln wirken und die IPL nach unten ziehen. Außerdem ist es dadurch möglich, dass der Versuchseinsatz der ebenen Versuchsfläche mit dem Einsatz der unebenen Versuchsfläche ausgetauscht wird.

Auch in Abbildung 68 sind die Unterdruckkanäle zu sehen. Über den Pneumatik Anschluss im Versuchsgrundkörper kann der Vakuumschlauch der Vakuumpumpe angeschlossen werden. Auf dem Versuchseinsatz befindet sich die 3 mm starke elastische Interpolationsschicht. Anhand von mehreren Lochstäben und passenden Schrauben-Muttern-Kombinationen wird der gesamte Versuchsaufbau an eine massive Holzplatte gedrückt. Der Versuchseinsatz wird mithilfe von sechs Gewindeeinsätzen ebenfalls mit der Holzplatte verspannt.

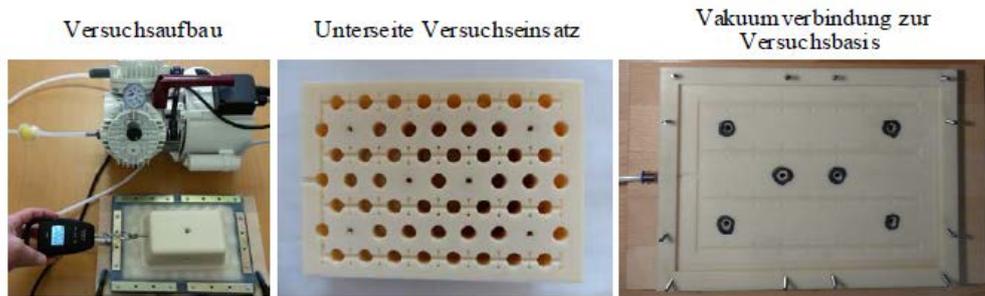


Abbildung 68. Realisierter Versuchsaufbau.

Der Befestigungsgrad wurde durch entsprechende Versuche zahlenmäßig ermittelt. Hierzu wurde der gedruckte Laminieraufsatz durch die verschiedenen Befestigungsvarianten auf dem Versuchsaufbau montiert. Anschließend wurde jeweils über eine montierte Ringschraube eine Verschiebe- bzw. Lösekraft auf den Laminieraufsatz ausgeübt. Dies geschah für drei Belastungsrichtungen. Zum einen wurde die Verschiebekraft in der horizontalen Ebene ermittelt. Ausgehend von der Form des Laminieraufsatzes bedeutet dies eine Kraft entlang der Längsachse $F_{\text{Längs}}$ und der Querachse F_{Quer} . Des Weiteren wurde untersucht, wie viel Widerstand die Befestigungskonzepte gegen Abheben aufbringen. Zur Verdeutlichung sind die Belastungsrichtungen in Abbildung 68 dargestellt.

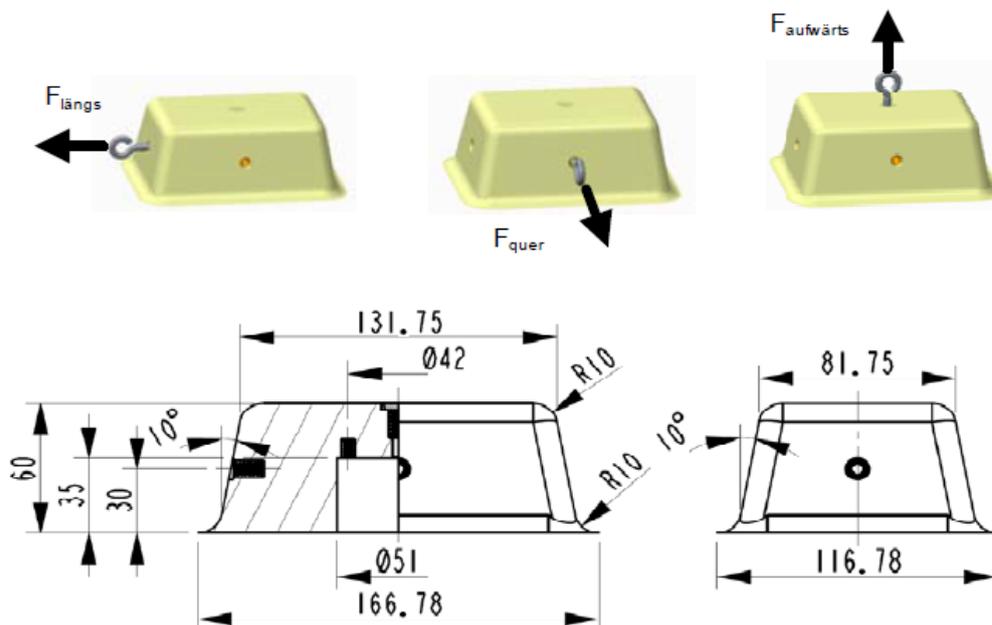


Abbildung 69. Belastungsrichtungen am Testkörper.

In Abbildung 70 sind die Lösekräfte für die vier verschiedenen IPL-Zustände (vgl. Abbildung 61) zusammengefasst. Wie die Resultate indizieren, ist in jedem Fall Designkonzept 4 (Folie) mit Abstand am lösebeständigsten. Das Designkonzept 1 versagte vollständig auf gebeulten IPL. Im Falle nicht gebeulten IPL waren beide jedoch anwendbar. Konzept 4 ist jedoch nicht nutzbar, da diese Art von Befestigung Falten in der Folie bildet. Dies würde sich im CFK-Bauteil widerspiegeln was unzulässig wäre. Zudem ist der Beuleffekt eine typische Eigenschaft der FlexForCFK-Maschine und ein Zug nach oben tritt während des Laminierens in der Regel nicht auf. Schlussfolgernd sind die Designkonzepte basierend auf Nadeln als am geeignetsten wertbar.

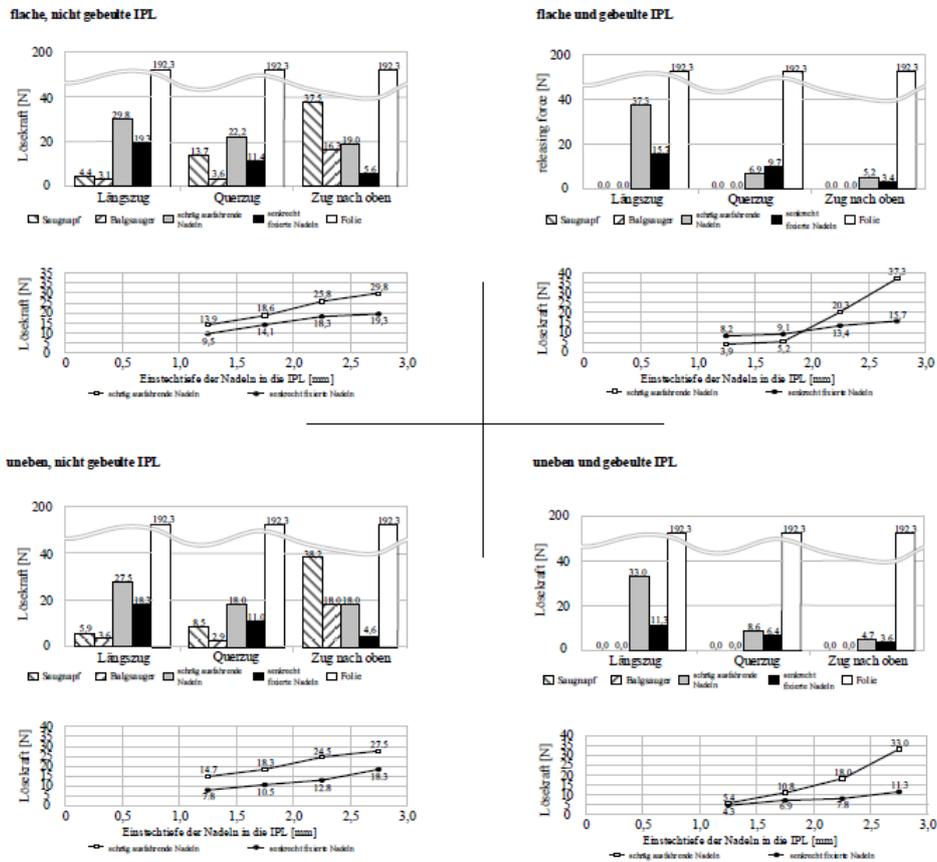


Abbildung 70. Lösekräfte.

2.8. Aufbau Wissensdatenbank (AP 6)

Damit die Menge an Daten sinnvoll geordnet und verarbeitet werden kann, wurde ein Wissensmodell erarbeitet. Das Wissensmodell basiert auf dem Prinzip der Entity Relationship Modellierung (ERM) und soll als Grundlage für eine Datenbank dienen. Grundelemente dieser Modellierung sind Objekttypen (engl. Entities) und die Beziehungen zwischen den Objekttypen (engl. Relationships) [43]. In einem Entity Relationship Modell werden die Objekttypen und die Beziehungen visualisiert. Außerdem wird jeder Objekttyp durch eine beliebige Anzahl an Attributen beschrieben. Die Syntax für die Darstellung eines Objekttyps sieht wie folgt aus:

OBJEKTYP (Attribut 1, Attribut 2, ..., Attribut n)

Mindestens eines der Attribute muss als sogenannter Primärschlüssel definiert werden. Mit Hilfe des Primärschlüssels kann jedes Objekt eines Objekttyps eindeutig definiert werden [43]. Oft wird hierfür eine fortlaufende Nummer verwendet. Der Primärschlüssel wird unterstrichen, wie im obigen Beispiel gezeigt. Somit müssen in einem ersten Schritt die notwendigen Objekttypen sowie die dazugehörigen Attribute ermittelt werden.

2.8.1 Die Objekttypen, deren Attribute und das Wissensmodell

Um die notwendigen Objekttypen sinnvoll festzulegen, wird zunächst geklärt, welche Hauptfunktionen die Datenbank am Ende erfüllen soll. Anhand der nun folgenden Datenbankfunktionen, werden die Objekttypen und Relationen in den nächsten Kapiteln definiert. Wichtig hierbei ist, dass die Datenbankfunktionen die folgenden Fragestellungen lösen können:

- Welche Konstruktionsrichtlinien sind notwendig, um ein Bauteil hinsichtlich der Fertigungsmachbarkeit zu prüfen?
- Welche Verifizierungsvorschriften müssen beachtet werden, um eine bestimmte Konstruktionsrichtlinie zu prüfen?
- Welche CFK-Bauteile können auf welcher Maschine gefertigt werden?

- Welche Interpolationsschichten können für welches CFK-Bauteil verwendet werden?
- Sind die vorhandenen Merkmale des CFK-Bauteils mit den bekannten Konstruktionsrichtlinien in Einklang?
- Sind die vorhandenen konstruktiven Werte der Interpolationsschicht mit den bekannten Konstruktionsrichtlinien vereinbar?

Mithilfe dieser Fragestellungen ist das Grundgerüst für die Datenbank bekannt und die Objekttypen können ermittelt werden. Die folgenden neun Objekttypen wurden festgelegt, um um die Fragestellungen beantworten zu können: MASCHINE, CFK-GRUNDMATERIAL und FASERTYP, CAD-MODELL und KONSTRUKTIVE WERTE_CAD, INTERPOLATIONSSCHICHT und KONSTRUKTIVE WERTE_IPS, KONSTRUKTIONSRICHTLINIEN und VERIFIZIERUNGEN. Im nächsten Abschnitt wird jeder dieser neun Objekttypen detailliert beschrieben.

Objekttyp MASCHINE

In Abbildung 71 ist ein Realbild der entwickelten Maschine dargestellt. Die Aspekte, die unter dem Objekttyp MASCHINE zu finden sind, sind Daten, die durch die Konstruktion der Maschine bestimmt sind. Hierzu zählen die Anzahl der Pins, der Durchmesser eines Pins, die Anordnung der Pins und der Verstellweg eines Pins.



Abbildung 71. FlexForCFK-Maschine

In Tabelle 15 wird der Objekttyp MASCHINE beispielhaft dargestellt.

Tabelle 15: Objekttyp MASCHINE

Maschinen#	Anzahl der Pin	Durchmesser eines Pins [mm]	Anordnung der Pins	Verstellweg [mm]
1	256	10	Ohne Abstand	200
2	128	15	Abstand 10 mm	250

Aus diesen Informationen können in einem folgenden Schritt konstruktionsrelevante Daten ermittelt werden. So z.B. der minimal einstellbare Krümmungsradius und der maximal einstellbare Gradient. Als Primärschüssel wird ein Attribut namens Maschinenummer verwendet. Die ermittelte Syntax für den Objekttyp MASCHINE sieht wie folgt aus:

- **MASCHINE** (Maschinen#, Anzahl der Pins, Durchmesser eines Pins, Anordnung der Pins, Verstellweg)

Die Objekttypen INTERPOLATIONSSCHICHT und KONSTRUKTIVE WERTE_IPS

Neben dem Objekttyp MASCHINE muss auch die Interpolationsschicht näher beschrieben werden. Hierzu werden die Objekttypen INTERPOLATIONSSCHICHT und KONSTRUKTIVE WERTE_IPS definiert. Im Objekttyp INTERPOLATIONSSCHICHT werden alle notwendigen Informationen wie Maße und Material gespeichert, wohingegen im Objekttyp KONSTRUKTIVE WERTE_IPS konkrete Werte für die einzelnen konstruktiven Werte wie mögliche Krümmungsradien, maximaler Gradient etc. abgespeichert werden. Somit sind in diesen beiden Objekttypen alle wichtigen Eigenschaften und Daten über die Interpolationsschicht hinterlegt. In der Tabelle 16 und Tabelle 17 sind beide Objekttypen exemplarisch dargestellt. Die Eigenschaften der Interpolationsschicht stellen bedeutende Parameter dar, denn je nachdem wie die Interpolationsschicht beschaffen ist, müssen unterschiedliche Grenzwerte für die Konstruktionsrichtlinien eingehalten werden. Ein wichtiges Kriterium ist die Dicke der Interpolationsschicht, da von ihr die Formbarkeit abhängig ist. Eine gute Formbarkeit wäre durch eine möglichst dünne Interpolationsschicht erreichbar. Jedoch darf die Interpolationsschicht auch nicht zu dünn sein, da die Oberfläche sonst wellig wird, da sich die Pins darin abbilden würden.

Tabelle 16: Objekttyp INTERPOLATIONSSCHICHT

Bezeichnung der Material	Dicke [mm]	Länge [mm]	Breite [mm]
IPS			
IPS_10-500-500	IPS_1	10	500
IPS_5-400-400	IPS_1	5	400

Tabelle 17: Objekttyp KONSTRUKTIVE WERTE_IPS

Bezeichnung der IPS	Bezeichnung des konstruktiven Werte der IPS	Wert
IPS_10-500-500	Maximale örtliche Spannung	4 MPa
IPS_5-400-400	Maximale örtliche Spannung	2,5 MPa

Für die beiden Objekttypen INTERPOLATIONSSCHICHT und KONSTRUKTIVE WERTE_IPS wird die Syntax wie folgt festgelegt:

- **INTERPOLATIONSSCHICHT** (Bezeichnung der Interpolationsschicht, Material, Dicke, Länge, Breite)
- **KONSTRUKTIVE WERTE_IPS** (Bezeichnung der Interpolationsschicht, Bezeichnung des konstruktiven Wertes der IPS, Wert)

Die Objekttypen CFK-GRUNDMATERIAL und FASERTYP

Die beiden folgenden Objekttypen enthalten zusätzliche Informationen, die in der CFK-Bauteilentwicklung festgelegt werden. Neben den Daten über die Anlage werden Informationen über die verschiedenen Materialvarianten zur Verfügung gestellt, da das jeweilige Materialverhalten stark von der Zusammensetzung des CFKs abhängig ist. Hierbei spielen vor allem der verwendete Fasertyp, der Faservolumenanteil und die Faserausrichtung eine wichtige Rolle. Der Schwerpunkt der gespeicherten Daten liegt auf den Materialeigenschaften und auf den Abmaßen des CFK-Rohmaterials. Die Zugfestigkeit sowie der E-Modul bei CFK-Bauteilen sind abhängig von der Fa-

serausrichtung und können deshalb je nach Krafrichtung stark variieren [44]. Allgemein gilt, dass die Festigkeit und die Steifigkeit von CFK-Bauteilen in Faserrichtung sehr hoch ist, wohingegen die Festigkeit und Steifigkeit quer zur Faserrichtung vergleichsweise eher gering ausfällt [44]. Um diesem Phänomen vorzubeugen, wird die Kohlenfasermatrix oft in mehrere Richtungen verlegt. Alle diese Eigenschaften müssen auch in der Datenbank wiederzufinden sein, um exakte Aussagen über das Materialverhalten treffen zu können. Aus diesem Grund werden hierfür zwei Objekttypen definiert – zum einen der Objekttyp FASERTYP und zum anderen der Objekttyp CFK-GRUNDMATERIAL. Der Objekttyp FASERTYP beinhaltet Informationen über Materialeigenschaften, wohingegen der Objekttyp CFK-GRUNDMATERIAL Informationen über die Dimensionen des Rohmaterials liefert. Die Syntax für die beiden Objekttypen wurde wie folgt festgelegt:

- **FASERTYP** (Bezeichnung des Fasertyps, Material#, Dichte, Zugfestigkeit, E-Modul, Bruchdehnung)
- **CFK-GRUNDMATERIAL** (Material#, Bezeichnung, Breite, Länge, Höhe, Faservolumenanteil, Faserrichtung)

Die Objekttypen CAD-MODELL und KONSTRUKTIVE WERTE_CAD

Einen weiteren wichtigen Objekttyp stellt der Objekttyp CAD-MODELL dar. Durch diesen Objekttyp wird festgelegt, welches fertige Bauteil aus dem Rohmaterial am Ende entstehen soll. Das CAD-Modell enthält wichtige konstruktive Daten, die zur Prüfung der Fertigbarkeit eines Bauteils auf der entwickelten Anlage von Bedeutung sind. Diese konstruktiven Werte werden in einem gesonderten Objekttyp gespeichert – dem Objekttyp KONSTRUKTIVE WERTE_CAD. Somit hängen die Objekttypen CAD-MODELL und KONSTRUKTIVE WERTE_CAD stark zusammen. Ein beispielhafter Wert für den Objekttyp KONSTRUKTIVE WERTE_CAD ist der maximale Gradient innerhalb des Bauteils (z. B. |35°|), abhängig von maximalen örtlichen Spannungen. Damit jedem Bauteil ein eindeutiges CAD-Modell zugeordnet werden kann, wird auch hier ein Primärschlüssel definiert. Für den Objekttyp CAD-MODELL wird eine fortlaufende Nummer verwendet die Modellnummer. Für den Objekttyp KONSTRUKTIVE WERTE_CAD hingegen wird die Modellnummer des Objekttyps CAD-MODELL in Verbindung mit der Bezeichnung des konstruktiven Wertes als Primärschlüssel definiert. Somit ergibt sich für die Syntax der beiden Objekttypen folgendes:

- CAD-MODELL (Modell#, Bauteilname)
- KONSTRUKTIVE WERTE_CAD (Modell#, Bezeichnung des konstruktiven Wertes, Wert)

Objekttyp KONSTRUKTIONSRICHTLINIEN

Jedes Fertigungsverfahren ist an bestimmte Konstruktionsrichtlinien gebunden. Auch dieses Verfahren weist Grenzen auf. Eine Auswahl der bekannten Konstruktionsrichtlinien ist in Tabelle 18 aufgelistet und zur Veranschaulichung in Abbildung 72 graphisch dargestellt.

Tabelle 18: Konstruktionsrichtlinien mit exemplarisch gesetzten Grenzwerten

Maschinen#	Konstruktionsrichtlinien#	Konstruktionsrichtlinie	Grenzwert
1	1	Minimaler Krümmungsradius	13 mm
1	2	maximaler Gradient	65°
1	3	Unterschnitte	0°
1	4	Maximale örtliche Dehnung	80%
1	5	Maximale örtliche Spannung	5 MPa

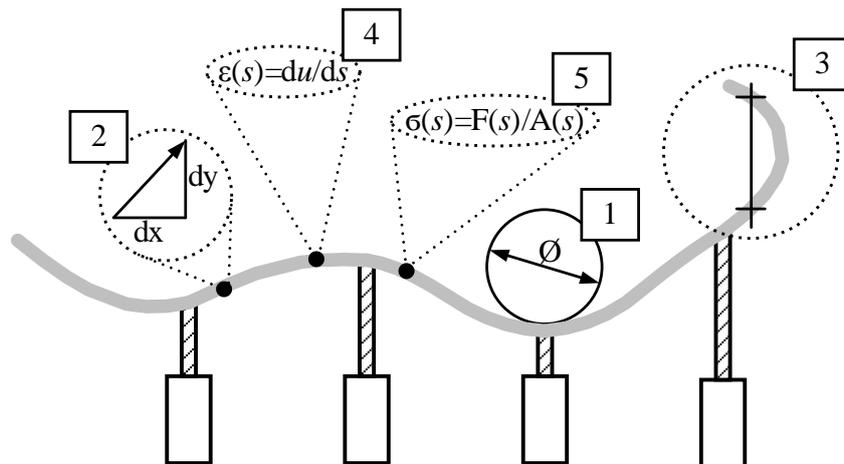


Abbildung 72: Darstellung beispielhafter Konstruktionsrichtlinien [11]

Alle Richtlinien werden im Objekttyp KONSTRUKTIONSRICHTLINIEN gespeichert. Mit Hilfe der Datenbank können somit die Informationen aus den CAD-Modellen der Bauteile mit den definierten Konstruktionsrichtlinien der Maschine und der Interpolationsschicht verglichen werden. Wichtig hierfür sind die bekannten Grenzwerte. Diese werden als ein weiteres Attribut mit der jeweiligen Konstruktionsrichtlinie verknüpft. Die Syntax für den Objekttyp KONSTRUKTIONSRICHTLINIEN sieht wie folgt aus:

- **KONSTRUKTIONSRICHTLINIEN** (Maschinen#, Konstruktionsrichtlinien#, Bezeichnung der Konstruktionsrichtlinie, Grenzwert)

Objekttyp VERIFIZIERUNGEN

Eine weitere Aufgabe der Datenbank besteht darin, die notwendigen Verifizierungsalgorithmen, die benötigt werden, um Konstruktionsrichtlinien der Maschine und der Interpolationsschicht zu prüfen, auszugeben. Die Verifizierungen werden also dazu verwendet, festzustellen, ob die konstruktiven Werte eines Bauteils mit den Fertigungsgrenzen vereinbar sind. Die Algorithmen und Vorgehen zur Verifizierung von verschiedenen Konstruktionsrichtlinien werden im Objekttyp VERIFIZIERUNGEN abgespeichert. Damit ist es möglich, mit Hilfe der Datenbank abzufragen, welche Verifizierungsvorgänge nötig sind, um eine bestimmte Konstruktionsrichtlinie zu prüfen. In Tabelle 19 sind für die in Tabelle 18 aufgelisteten Konstruktionsrichtlinien beispielhafte Algorithmen zur Verifizierung dargestellt.

Tabelle 19: Algorithmen zur Verifizierung der Konstruktionsrichtlinien

Konstruktionsrichtlinie	Algorithmus zur Verifizierung
Krümmungsradius	kleinster Radius des Bauteils > kleinster einstellbarer Radius
maximaler Gradient	max. Gradient des Bauteils < max. einstellbarer Gradient des Werkzeugs
Unterschnitte	$90^\circ < \text{Gradient} < 90^\circ$
örtliche Dehnung	$\varepsilon(s) = du/ds$
örtliche Spannung	$\sigma(s) = F(s)/A(s)$

Anhand dieser Algorithmen kann über die Fertigungsmachbarkeit bestimmter Bauteile entschieden werden. Jedoch sind viele Konstruktionsrichtlinien und deren Verifizierungen noch unbekannt und müssen erst noch ermittelt werden. Die Syntax für den Objekttyp VERIFIZIERUNGEN wird wie folgt festgelegt:

- **VERIFIZIERUNGEN** (Nummer des Algorithmus zur Verifizierung, Beschreibung des Verfahrens)

Bestimmung der Kardinalitäten der Objekttypen und Synthese zum ganzheitlichen Wissensmodell

In einem nächsten Schritt wurden die Kardinalitäten der einzelnen Objekttypen ermittelt. Die Kardinalität eines Objekttyps gibt an, wie viele Objekte eines Objekttyps A Objekten eines Objekttyps B zugeordnet werden können

[45]. Ein Beispiel hierfür wäre, dass mehrere Konstruktionsrichtlinien (Kardinalität n) mehrere Verifizierungsalgorithmen zur Prüfung benötigen können (Kardinalität m). Mit Hilfe eines paarweisen Vergleichs der Objekttypen werden die Kardinalitäten festgelegt. Beim paarweisen Vergleich werden alle Objekttypen in einer Tabelle gegenübergestellt und auf Beziehungen zwischen den einzelnen Objekttypen geprüft [46].

Tabelle 20: Paarweiser Vergleich der verschiedenen Objekttypen

	FA	CFK	CAD	MA	KW_CAD	IPS	KW_IPS	KR	VERI
FA	-	n:m	-	-	-	-	-	-	-
CFK	-	-	n:m	-	-	-	-	-	-
CAD	-	-	-	n:m	-	-	-	-	-
MA	-	-	-	-	-	n:m	-	-	-
KW_CAD	-	-	-	-	-	-	-	n:m	-
IPS	-	-	-	-	-	-	-	-	-
KW_IPS	-	-	-	-	-	-	-	n:m	-
KR	-	-	-	-	-	-	-	-	n:m
VERI	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Die sich hieraus ergebenden Kardinalitäten dienen als Grundlage, um in einem nächsten Schritt die Relationen zwischen einzelnen Objekttypen zu ermitteln. Die ermittelten Kardinalitäten bzw. Beziehungen müssen je nach Anwendung unterschiedlich definiert werden. Das bedeutet, es müssen nicht alle möglichen Beziehungen dargestellt werden, sondern nur eben diese, die in Bezug zur Anwendung stehen. In Tabelle 20 ist der paarweise Vergleich für die definierten Objekttypen dargestellt. Anhand von Tabelle 20 sind alle Kardinalitäten bekannt und die notwendigen Relationen zwischen den einzelnen Objekttypen können ermittelt werden. Aus der Tabelle 20 wurde das ER-Modell (Abbildung 73) abgeleitet.

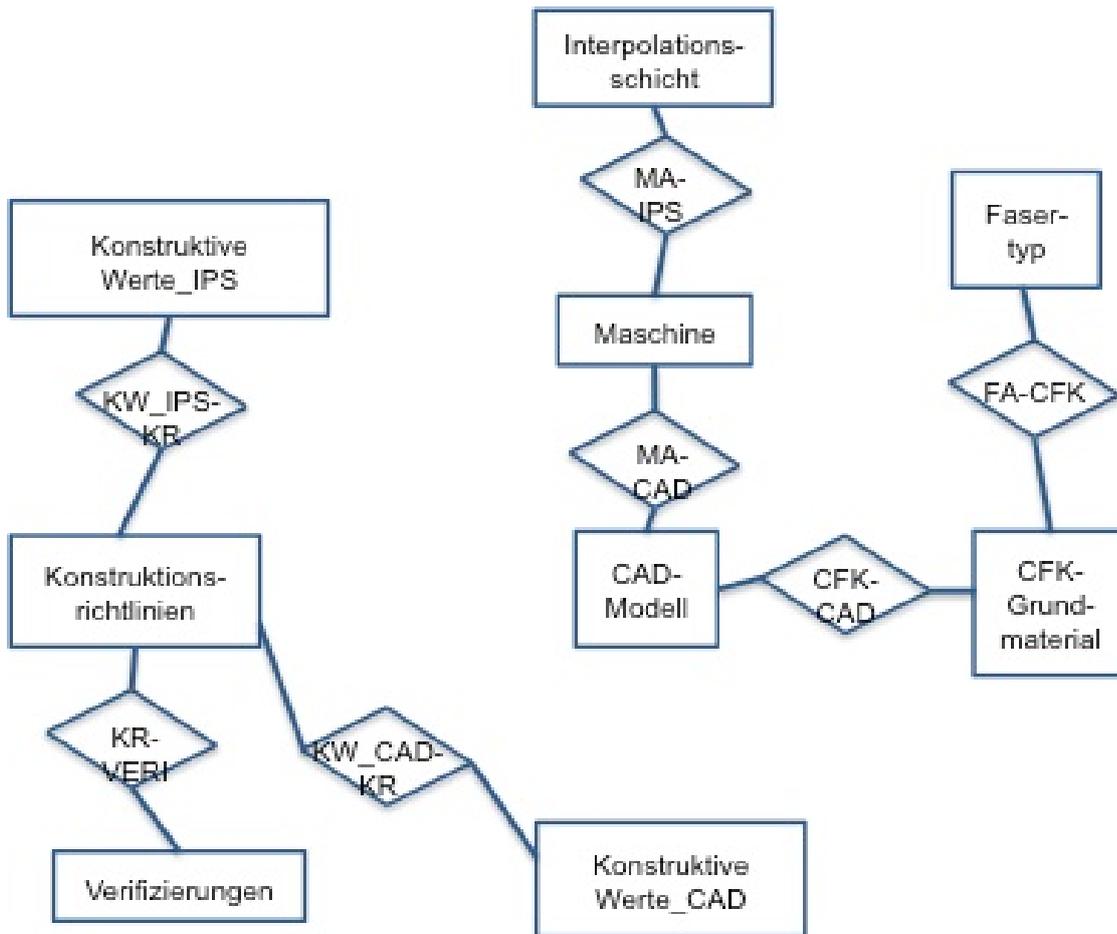


Abbildung 73. Entity Relationship Modell

Das in Abbildung 73 dargestellte ER-Modell und die in Tabelle 20 ermittelten Kardinalitäten wurden im Anschluss verwendet, um festzustellen, für welche Beziehungen Relationen abgeleitet werden müssen und für welche ein Fremdschlüssel definiert werden muss. Grundsätzlich gilt, dass für alle n:m-Beziehungen eine Relation abgeleitet und für alle n:1- oder 1:m-Beziehungen ein Fremdschlüssel definiert werden muss [45]. In diesem Fall sind alle Beziehungen n:m-Beziehungen, d.h. es muss für jede Beziehung eine Relation abgeleitet werden. Das Vorgehen beim Ableiten einer Relation wird am Beispiel der Beziehung zwischen dem Objekttyp KONSTRUKTIONSRICHTLINIEN und dem Objekttyp VERIFIZIERUNGEN erläutert. Die Relation zwischen diesen beiden Objekttypen wird KR-VERI bezeichnet. Eine Relation enthält im Allgemeinen die Primärschlüssel der beiden in Beziehung stehenden Objekttypen [45]. Für das Beispiel gilt demzufolge folgende Syntax:

- KR-VERI (Konstruktionsrichtlinien#, Nummer des Algorithmus zur Verifizierung)

Durch diese Beziehung sind die Konstruktionsrichtlinien mit den notwendigen Algorithmen zur Verifizierung verknüpft. Alle anderen notwendigen Relationen sind in Tabelle 21 aufgelistet.

Tabelle 21: Liste aller notwendigen Relationen

Bezeichnung	Objekttypen	Notwendige Attribute
MA-IPS	Maschine, Interpolationsschicht	Maschinen#, Bezeichnung der Interpolationsschicht
MA-CAD	Maschine, CAD-Modell	Maschinen#, Modell#
CFK-CAD	CFK-Grundmaterial, CAD-Modell	Material#, Modell#
KR-VERI	Konstruktionsrichtlinien, Verifizierungen	Konstruktionsrichtlinien#, Nummer des Algorithmus zur Verifizierung
KW_CAD-KR	Konstruktive Werte_CAD, Konstruktionsrichtlinien	Bezeichnung des konstruktiven Wertes_CAD, Maschinen#, Bezeichnung der Konstruktionsrichtlinie
KW_IPS-KR	Konstruktive Werte_IPS, Konstruktionsrichtlinien	Bezeichnung des konstruktiven Wertes_IPS, Maschinen#, Bezeichnung der Konstruktionsrichtlinie
FA-CFK	Fasertyp, CFK-Grundmaterial	Bezeichnung des Fasertyps, Material#

2.8.2. Implementierung des Wissensmodells mittels PostgreSQL

Ziel der Datenbank ist es, die Prüfung der Fertigungsmachbarkeit von CFK-Bauteilen auf der FlexForCFK-Maschine zu erleichtern. Inwiefern die soeben erzeugte Datenbank bei der Prüfung der Fertigungsmachbarkeit helfen kann, muss differenziert betrachtet werden. Es werden zwei Fälle unterschieden. Das Entscheidungskriterium ist, ob es sich um ein Bauteil handelt, dessen Daten bereits vollständig in der Datenbank abgespeichert wurden, oder ob das Bauteil unbekannt ist.

Sind die Informationen über ein Bauteil bereits bekannt, kann die Fertigbarkeit durch eine Datenbankabfrage geprüft werden. In Abbildung 74 wird die Abfrage im graphischen Abfragegenerator von PostgreSQL dargestellt.

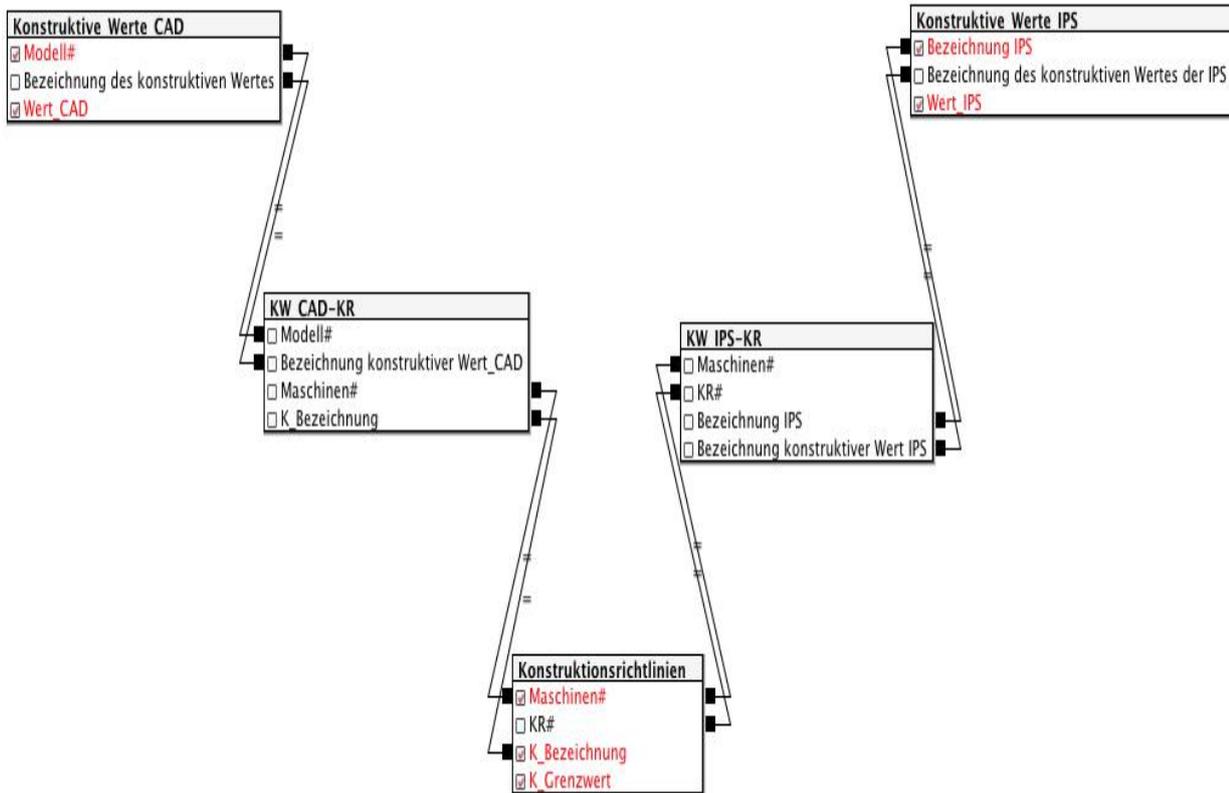


Abbildung 74: Graphischer Abfragegenerator von PostgreSQL

Die Abfrage in Abbildung 74 umfasst alle Daten hinsichtlich der konstruktiven Werte des CAD-Modells und der Interpolationsschicht in Abhängigkeit von der Modell# bzw. der verwendeten Interpolationsschicht. Außerdem werden die Grenzwerte für alle bekannten Konstruktionsrichtlinien ausgegeben. Die Objekttypen und Relationen mit den zugehörigen Attributen werden in Abbildung 74 durch die fünf Kästen repräsentiert (die FROM-Abfragen). Die Verbindungslinien zwischen den Kästen verkörpern die Bedingungen (die WHERE-Abfragen) der SQL-Abfrage. Die rot markierten Attribute zeigen die Attribute, die in der Datenbank gesucht werden sollen (SELECT-Abfragen). Durch dieses Werkzeug von PostgreSQL kann der Rahmen für bestimmte Abfragen schnell und einfach festgelegt werden.

Wenn für ein oder mehrere Attribute die Werte als feste Eingabewerte definiert werden sollen, kann man diese Bedingungen im SQL-Editor manuell ergänzen [47]. Beispielsweise wird eine Abfrage formuliert, bei der die Maschinennummer und die Bauteilnummer fest vorgegeben werden. Die Abfrage für das eben genannte Beispiel ist in Abbildung 75 dargestellt.

```

SELECT
"Konstruktionsrichtlinien"."Maschinen#",
"Konstruktive_Werte_IPS"."Bezeichnung IPS",
"Konstruktive_Werte_CAD"."Modell#",
"Konstruktionsrichtlinien"."K_Bezeichnung",
"Konstruktionsrichtlinien"."K_Grenzwert",
"Konstruktive_Werte_IPS"."Wert_IPS",
"Konstruktive_Werte_CAD"."Wert_CAD"
FROM
public."Konstruktive_Werte_CAD",
public."Konstruktive_Werte_IPS",
public."KW_CAD-KR",
public."KW_IPS-KR",
public."Konstruktionsrichtlinien"
WHERE
"Konstruktionsrichtlinien"."Maschinen#" = 1 AND
"Konstruktive_Werte_CAD"."Modell#" = 1 AND
"Konstruktive_Werte_CAD"."Modell#" = "KW_CAD-KR"."Modell#" AND
"Konstruktive_Werte_CAD"."Bezeichnung des konstruktiven Wertes" = "KW_CAD-KR"."Bezeichnung konstruktiver Wert_CAD" AND
"Konstruktive_Werte_IPS"."Bezeichnung IPS" = "KW_IPS-KR"."Bezeichnung IPS" AND
"Konstruktive_Werte_IPS"."Bezeichnung des konstruktiven Wertes der IPS" = "KW_IPS-KR"."Bezeichnung konstruktiver Wert IPS" AND
"KW_CAD-KR"."Maschinen#" = "Konstruktionsrichtlinien"."Maschinen#" AND
"KW_CAD-KR"."K_Bezeichnung" = "Konstruktionsrichtlinien"."K_Bezeichnung" AND
"KW_IPS-KR"."Maschinen#" = "Konstruktionsrichtlinien"."Maschinen#" AND
"KW_IPS-KR"."KR#" = "Konstruktionsrichtlinien"."KR#";
    
```

Abbildung 75: SQL-Abfrage zum Vergleich der konstruktiven Werte mit bekannten Grenzwerten

Das Ergebnis für diese Abfrage folgt im dargestellten Schema in Tabelle 22. Die gefundenen Datensätze sind abhängig von den zu Beginn frei gewählten Informationen. Anhand des Ausgabefeldes können die Werte aus dem CAD-Modell und die Werte der Interpolationsschicht mit den Grenzwerten für die einzelnen Konstruktionsrichtlinien verglichen werden. Daraus können schnell Schlüsse in Bezug auf die Fertigungsmachbarkeit eines Bauteils gezogen werden.

Tabelle 22: Ergebnis für die SQL-Abfrage in PostgreSQL

Maschinen# integer	Bezeichnung IPS text	Modell# integer	K_Bezeichnung text	K_Grenz- wert inte- ger	Wert_IPS integer	Wert- CAD integer
1	IPS_10-500-500	1	Minimaler Krümmungsradius	13	12	12
1	IPS_10-500-500	1	Maximale örtliche Spannung	5	4	4
1	IPS_5-400-400	1	Minimaler Krümmungsradius	13	13	12
1	IPS_5-400-400	1	Maximale örtliche Spannung	5	5	4

Sind alle Daten über zu prüfende Bauteile und die Konstruktionsrichtlinien bekannt, ist die Fertigungsmachbarkeit schnell nachprüfbar. In vielen Fällen sind aber noch nicht alle Daten über das Bauteil vorhanden und in der Datenbank hinterlegt. Ist das der Fall, ist das Vorgehen zur Prüfung der Fertigungsmachbarkeit ein anderes. Es können auch in diesem Fall einige Informationen aus der Datenbank gewonnen werden, jedoch eben nicht alle.

Die Datenbank enthält Informationen darüber, welcher Algorithmus bzw. welches Vorgehen nötig ist, um die Erfüllung einer bekannten Konstruktionsrichtlinie zu prüfen. Diese Informationen können durch eine SQL-Abfrage, die in Abbildung 76 dargestellt ist, gewonnen werden. Auch hier sollte festgelegt werden, welches Bauteil geprüft und auf welcher Maschine es gefertigt werden soll. Denn ohne Angabe dieser beiden Kriterien werden durch die SQL-Abfrage alle möglichen Daten, unabhängig von Bauteil oder Maschine, im Ausgabefeld dargestellt. Die Liste im Ausgabefeld kann dann unter Umständen sehr lang und unübersichtlich sein. Aus diesem Grund ist die Angabe der Maschinenummer verpflichtend, da so die Grenzwerte nur für eine bestimmte Maschine ausgegeben werden. Außerdem ist es geschickt, auch die Bauteilnummer von vornherein festzulegen. Die in Abbildung 76 dargestellte Abfrage beinhaltet diese beiden Bedingungen. Es wird hier die Bauteilnummer und die Maschinenummer vorgegeben. Das daraus folgende Ausgabefeld für diese SQL-Abfrage wird direkt im Anschluss in der Tabelle 23 dargestellt. Es wird schnell ersichtlich, dass durch die Verwendung der Datenbank die notwendigen Informationen schnell bereitgestellt werden können.

```

SELECT
    "Konstruktive_Werte_CAD"."Modell#",
    "Konstruktive_Werte_IPS"."Bezeichnung IPS",
    "Konstruktionsrichtlinien"."Maschinen#",
    "Konstruktionsrichtlinien"."K_Bezeichnung",
    "Konstruktionsrichtlinien"."K_Grenzwert",
    "Konstruktive_Werte_CAD"."Wert_CAD",
    "Konstruktive_Werte_IPS"."Wert_IPS"
FROM
    public."Konstruktive_Werte_CAD",
    public."KW_CAD-KR",
    public."Konstruktionsrichtlinien",
    public."Konstruktive_Werte_IPS",
    public."KW_IPS-KR"
WHERE
    "Konstruktive_Werte_CAD"."Modell#" = 1 AND
    "Konstruktionsrichtlinien"."Maschinen#" = 1 AND
    "Konstruktive_Werte_CAD"."Modell#" = "KW_CAD-KR"."Modell#" AND
    "Konstruktive_Werte_CAD"."Bezeichnung des konstruktiven Wertes" = "KW_CAD-KR"."Bezeichnung konstruktiver Wert_CAD" AND
    "KW_CAD-KR"."Maschinen#" = "Konstruktionsrichtlinien"."Maschinen#" AND
    "KW_CAD-KR"."K_Bezeichnung" = "Konstruktionsrichtlinien"."K_Bezeichnung" AND
    "Konstruktive_Werte_IPS"."Bezeichnung IPS" = "KW_IPS-KR"."Bezeichnung IPS" AND
    "Konstruktive_Werte_IPS"."Bezeichnung des konstruktiven Wertes der IPS" = "KW_IPS-KR"."Bezeichnung konstruktiver Wert IPS" AND
    "KW_IPS-KR"."Maschinen#" = "Konstruktionsrichtlinien"."Maschinen#" AND
    "KW_IPS-KR"."KR#" = "Konstruktionsrichtlinien"."KR#";
    
```

Abbildung 76: SQL- Abfrage zur Ermittlung der notwendigen Verifizierungs-algorithmen in Abhängigkeit von der Modell- und Maschinenummer

Tabelle 23: Ausgabefeld für die Bestimmung der notwendigen Verifizierungs-algorithmen

Maschinen# integer	K_Bezeichnung text	K_Grenzwert integer	Beschreibung des Verfahrens text
1	Minimaler Krümmungs- radius	13	kleinster Radius des Bauteils > kleinster einstellbarer Radius
1	Maximale örtliche Spannung	5	$\sigma(s) = F(s)/A(s)$

Im Anschluss müssen die einzelnen ermittelten Algorithmen auf das CAD-Modell angewendet werden, damit festgestellt werden kann, ob eine oder mehrere Konstruktionsrichtlinien nicht erfüllt werden. Die ermittelten Werte, die durch die Anwendung der Algorithmen ermittelt wurden, müssen dann noch in der Datenbank abgespeichert werden. Der gesamte Prozess ist in Abbildung 77 graphisch dargestellt.

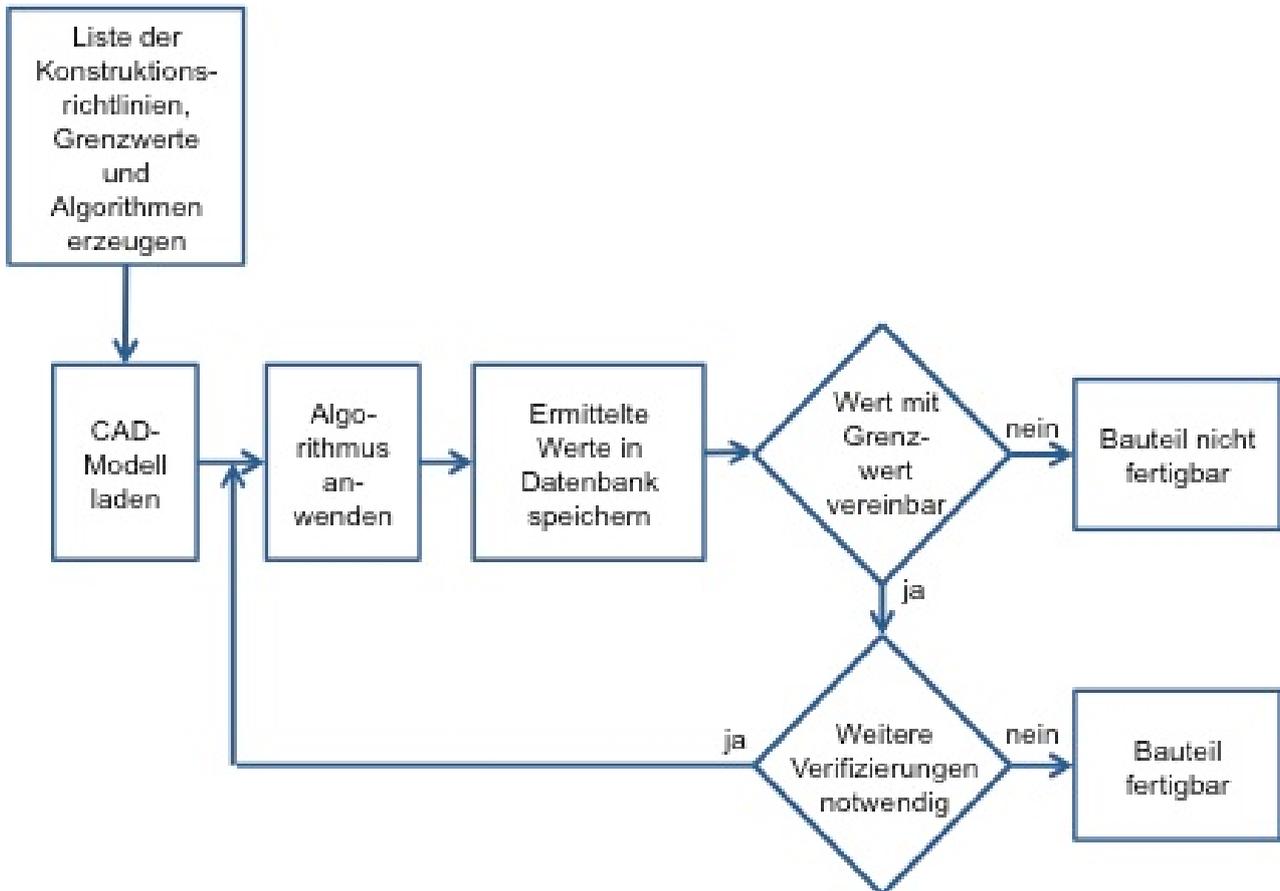


Abbildung 77: Prozessschaubild zur Prüfung der Fertigungsmachbarkeit

2.8.3. Entwicklung von Konstruktionsrichtlinien

Im Nachfolgenden werden Konstruktionsrichtlinien beschrieben, welche im Rahmen des Projektes erarbeitet wurden.

Minimaler Krümmungsradius

Im Fall der FlexForCFK-Maschine stellt der Krümmungsradius den kleinstmöglichen Radius dar, welchen die Maschine aufgrund von unveränderlichen Gegebenheiten nicht unterschreiten kann. Um einen Grenzwert für diese Konstruktionsrichtlinie zu ermitteln, muss ein Kriterium gefunden werden, von dem der einstellbare Krümmungsradius der Maschine abhängt. Hierfür muss darauf eingegangen werden, wie der Krümmungsradius auf der Maschine eingestellt wird. Maßgeblich für den kleinsten Krümmungsradius ist der Durchmesser eines einzelnen Pins. In Abbildung 78 ist solch ein einzelner Pin dargestellt.

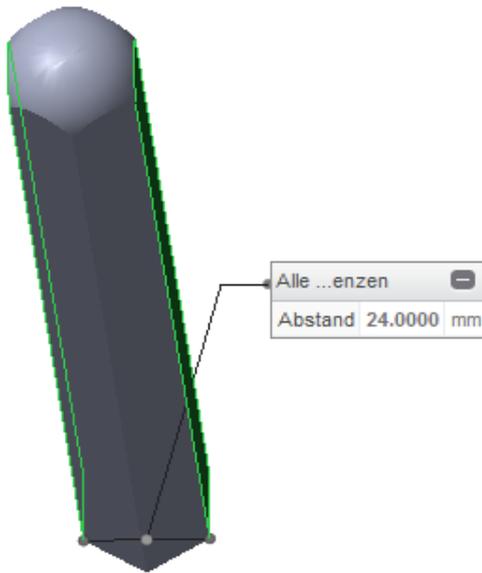


Abbildung 78: Ein einzelner Pin

Darin ist auch erkennbar, dass jeder Pin an der Oberseite eine Rundung aufweist. Die Größe der Rundung stellt den kleinstmöglich einstellbaren Krümmungsradius der Maschine dar. Für die in diesem Projekt entwickelte Maschine ergibt sich ein kleinstmöglicher Krümmungsradius von 12 mm. Dieser Wert variiert in Abhängigkeit von der verwendeten Maschine. Dies ist in der Datenbank berücksichtigt. Im nächsten Schritt muss eine Vorschrift entwickelt werden, um ermitteln zu können, ob der kleinste Krümmungsradius des Bauteils in Einklang mit dem kleinstmöglich einstellbaren Radius der Maschine zu bringen ist. Dafür müssen der kleinstmöglich einstellbare Radius der Maschine und des zu fertigenden Bauteils ermittelt und verglichen werden. Den minimal einstellbaren Krümmungsradius der Maschine kann man entweder durch eine Datenbankabfrage finden oder durch Messen des Durchmessers eines Pins im CAD-Modell der Maschine. Die zweite Variante ist nur notwendig, wenn in der Datenbank keine Angabe zum Durchmesser des Pins hinterlegt ist. Aus diesem Vorgehen kann somit folgender Algorithmus entwickelt werden:

- kleinster Radius des Bauteils > kleinster einstellbarer Radius der Maschine. Grenzwert z. B. gleich 12mm.

Maximale örtliche Spannung

Die örtlich entstehende Spannung stellt ebenfalls eine Fertigungsgrenze dar. Die örtliche Spannung wird in der Einheit MPa angegeben und ist im Allgemeinen durch $\sigma = F/A$ definiert. Hierbei ist F die Kraft und A der Ausgangsquerschnitt der Probe. Die Spannungen entstehen bei der FlexForCFK-Maschine durch die anfänglich eingestellte Anordnung der Pins und dem darauf folgenden Anpressen der Interpolationsschicht. Ziel ist es, die maximale örtliche Spannung zu bestimmen. Dieser maximale Grenzwert wird dann als Grenzwert für die Konstruktionsrichtlinie festgelegt. Der Grenzwert der Konstruktionsrichtlinie variiert je nach verwendeter Interpolationsschicht. Ein bewährtes Mittel, um entstehende Spannungen zu ermitteln, ist die Methode der Finiten Elemente. In Abbildung 79 ist zur Veranschaulichung eine FE-Simulation in ANSYS dargestellt.

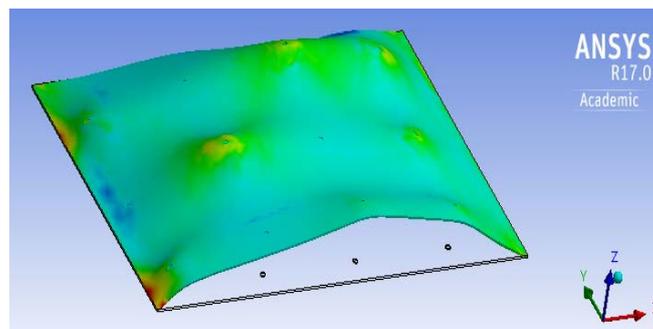


Abbildung 79: FE-Simulation zur Bestimmung der maximalen örtlichen Spannungen

Bei dieser Simulation sind zwei Enden fest eingespannt und werden durch unterschiedlich starke Kräfte in verschiedenen Punkten verformt. Die entstehenden Spannungen können im Anschluss abgelesen werden. Die sich aus der FE-Simulation ergebenden maximalen Werte für die Spannung können in einem weiteren Schritt mit dem bekannten Grenzwert der Interpolationsschicht im Hinblick auf die örtlichen Spannungen verglichen werden. Der sich daraus ergebende Algorithmus zur Verifizierung der Konstruktionsrichtlinie sieht wie folgt aus:

- Maximale örtliche Spannung der Interpolationsschicht < größte örtliche Spannung der Interpolationsschicht für das zu fertigende Bauteil. Grenzwert z. B. gleich 5 MPa.

Maximale örtliche Dehnung

Neben der örtlichen Spannung spielt die örtliche Dehnung ebenfalls eine Rolle. Die Dehnung wird dimensionslos als Prozentwert mittels $\epsilon = \Delta L / L_0$ angegeben. Hierbei steht ΔL für die Längenänderung der Probe und L_0 für die Ausgangslänge der Probe. Ähnlich wie bei Spannungen entstehen örtliche Dehnungen in der Interpolationsschicht durch die unterschiedlich hoch eingestellten Pins und das in einem nächsten Schritt folgende Anpressen der Interpolationsschicht. Auch für diese Konstruktionsrichtlinie muss ein Grenzwert bestimmt werden. Der Grenzwert für die örtliche Dehnung kann durch denselben Versuch ermittelt werden wie der Grenzwert für die örtliche Spannung. Da Dehnung und Spannung voneinander abhängig sind, bietet sich ein Zugversuch an, um die maximalen Spannungen und Dehnungen in Abhängigkeit von einer ansteigenden Kraft zu ermitteln. Damit können für verschiedene Interpolationsschichten die maximalen Werte für Spannung und Dehnung bestimmt werden. In Abbildung 80 ist zur Veranschaulichung ein Spannungs-Dehnungsdiagramm eines Elastomers als Prüfmaterial dargestellt. Auch bei der örtlichen Dehnung muss eine Vorschrift festgelegt werden, um, je nach zu fertigendem CFK-Bauteil, die maximal entstehende Dehnung mit den Grenzwerten zu vergleichen. Es bietet sich an, die Werte für die Dehnungen ebenfalls wie bei den Spannungen durch FE-Simulation zu berechnen.

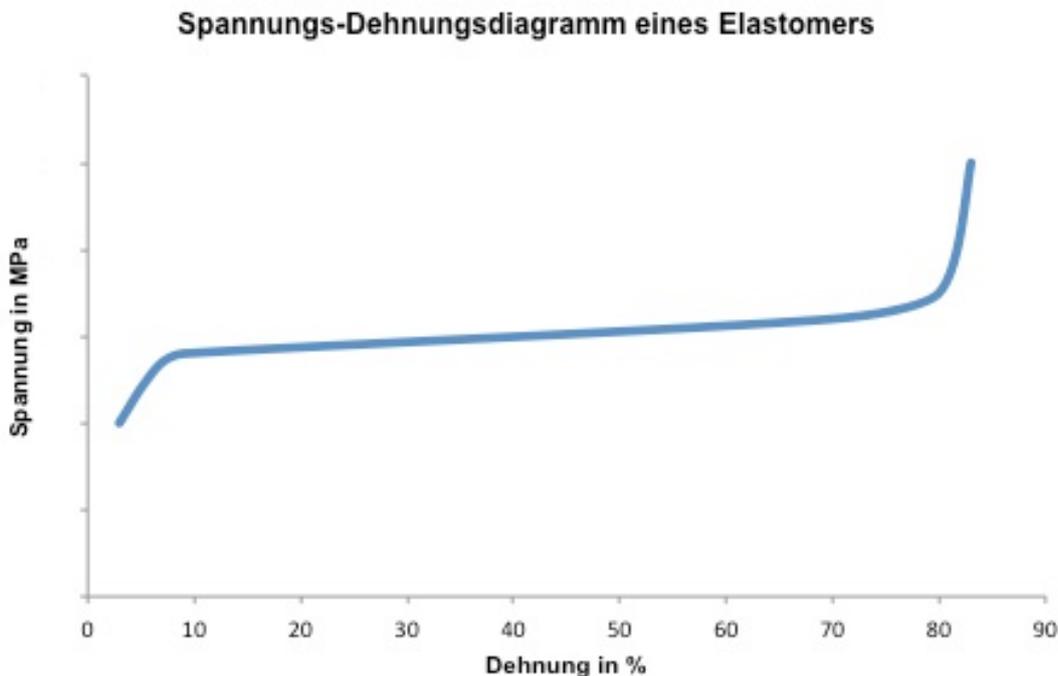


Abbildung 80: Spannungs-Dehnungsdiagramm eines Elastomers

Daraus wird folgende Vorschrift für die Konstruktionsrichtlinie örtliche Dehnung abgeleitet:

- Maximale örtliche Dehnung der Interpolationsschicht < größte örtliche Dehnung der Interpolationsschicht für das zu fertigende Bauteil. Grenzwert z. B. 80%.

Maximaler Gradient

Eine weitere Konstruktionsrichtlinie ist der Gradient. Der Gradient in einem Punkt kann als Vektor aufgefasst werden, der in Richtung des steilsten Anstieges in dem vorgegebenen Punkt zeigt. Im Fall der FlexForCFK-Maschine

stellt der Gradient ein wichtiges Kriterium der Fertigungsmachbarkeit dar. Die beiden vorher beschriebenen Konstruktionsrichtlinien, die örtliche Spannung und die örtliche Dehnung, sind vom Gradienten abhängig, denn es gilt: Je größer der Gradient ist, desto höher sind auch die örtliche Spannung und Dehnung. Bei der FlexForCFK-Maschine ist der Gradient abhängig vom Höhenunterschied zwischen den einzelnen Pins sowie vom Durchmesser der Pins. Bei geringem Höhenunterschied ist der entstehende Gradient klein, bei sehr großem Höhenunterschied ist auch der Gradient dementsprechend groß. In Abbildung 81 wird dargestellt, wie sich der Gradient bei der FlexForCFK-Maschine schematisch zusammensetzt.

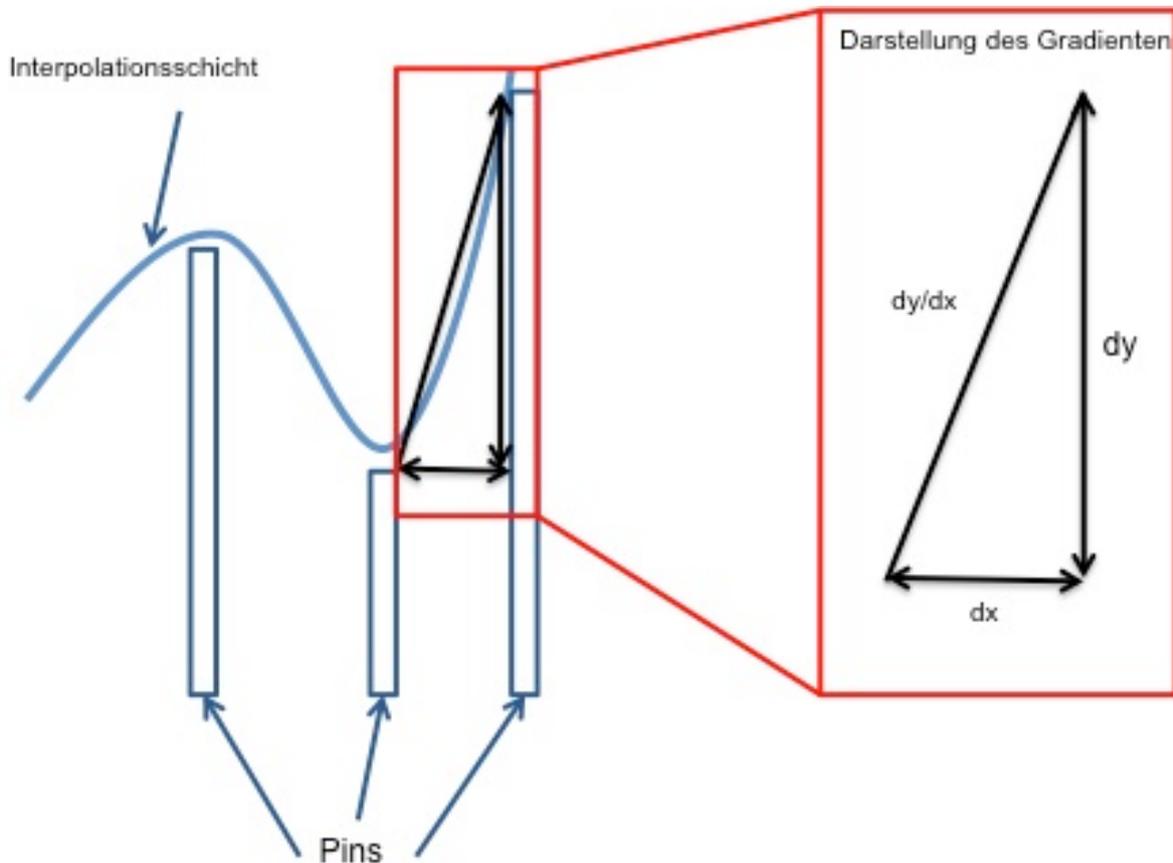


Abbildung 81: Detaillierte Darstellung des Gradienten

Auch für diese Konstruktionsrichtlinie muss ein Vorgehen entwickelt werden, um die Fertigungsmachbarkeit verschiedener CFK-Bauteile zu prüfen. Der Gradient kann vereinfacht als Dreieck mit Katheten der Länge x und y aufgefasst werden, wie in Abbildung 81 zu sehen ist. Die Länge x ist hierbei abhängig von den Durchmessern der verwendeten Pins und dem Abstand zwischen den einzelnen Pins. Die Länge y wird durch den Höhenunterschied von zwei aneinander angrenzenden Pins festgelegt. Diese beiden Informationen müssen bereitgestellt werden, um den Gradienten zu berechnen. Somit kann der Gradient ähnlich wie die Steigung einer Geraden berechnet werden. Ist der maximale Gradient bestimmt, sollte noch geprüft werden, ob der maximale Gradient der Maschine in Abhängigkeit von den entstehenden Spannungen und Dehnung überhaupt gefertigt werden kann. Im Allgemeinen ergibt sich damit folgende Konstruktionsrichtlinievorschrift:

- maximaler Gradient des Bauteils < maximal einstellbarer Gradient der Maschine. Grenzwert z. B. $[65^\circ]$.

Hinterschnitt

Als Hinterschnitte werden Bereiche eines Bauteils bezeichnet, die durch ihre Form eine Fertigung deutlich erschweren oder, wie im Fall der FlexForCFK-Maschine, die Fertigung nicht möglich machen. Als Indiz, ob ein Hinterschnitt vorhanden ist oder nicht, dient der Winkel der Interpolationsschicht, der sich durch die unterschiedlich eingestellten Pins ergibt. Dieser Winkel kann mit Hilfe des Gradienten berechnet werden. Außerdem wird in Abbildung 82 die Gestalt eines Hinterschnitts veranschaulicht. Hinterschnitte sind bei der FlexForCFK-Maschine nicht möglich, da die Pins nur in der Höhe verstellt werden können. Damit werden Formen unmöglich, die parallel zur Grundfläche der Maschine geformt sind, wie in Abbildung 82 veranschaulicht wird.

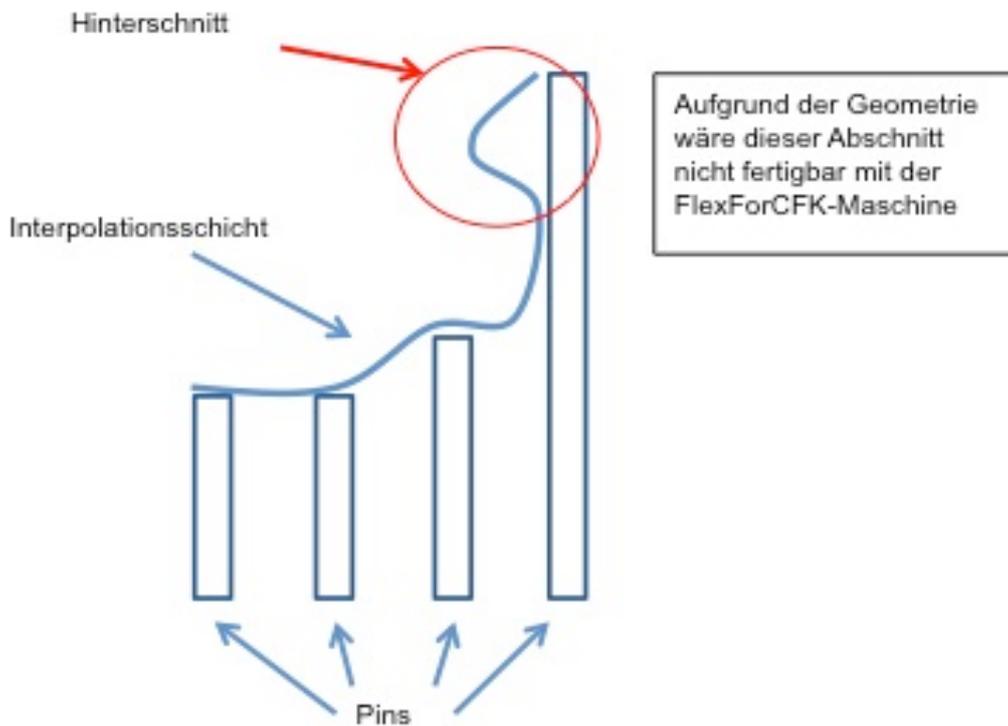


Abbildung 82: Darstellung eines Hinterschnitts

Somit kann in diesem Fall als Grenzwert für die Konstruktionsrichtlinie angenommen werden, dass keine Hinterschnitte möglich sind und damit Biegungen, die einen Winkel aufweisen, der größer als 90° ist, nicht gefertigt werden können. Demzufolge ergibt sich die hier beschriebene Vorschrift für die Konstruktionsrichtlinie zu:

- $-90^\circ < \text{Gradient} < 90^\circ$. Grenzwert z.B. 90° .

Maximale Welligkeit

Das Verformungsverhalten der Interpolationsschicht ist dickenabhängig. Jedoch kann die Interpolationsschicht nicht beliebig dünn gewählt werden, da bei einer zu dünnen Interpolationsschicht die Oberfläche gewellt ist. Diese Welligkeit tritt auf, weil die Interpolationsschicht durch das angelegte Vakuum stark an die Oberfläche der Pins gedrückt wird und die Oberfläche infolgedessen zu genau abgebildet wird. Wenn die Interpolationsschicht andererseits zu dick gewählt wird, wird die Formbarkeit stark beeinträchtigt. In diesem Kapitel wird der untere Grenzwert definiert, der die minimale Dünne der Interpolationsschicht festlegt. Der untere Grenzwert wird durch die Welligkeit der Interpolationsschicht beschrieben. In Abbildung 83 ist ein Toleranzfeld mit einer Ober- und einer Untergrenze dargestellt.

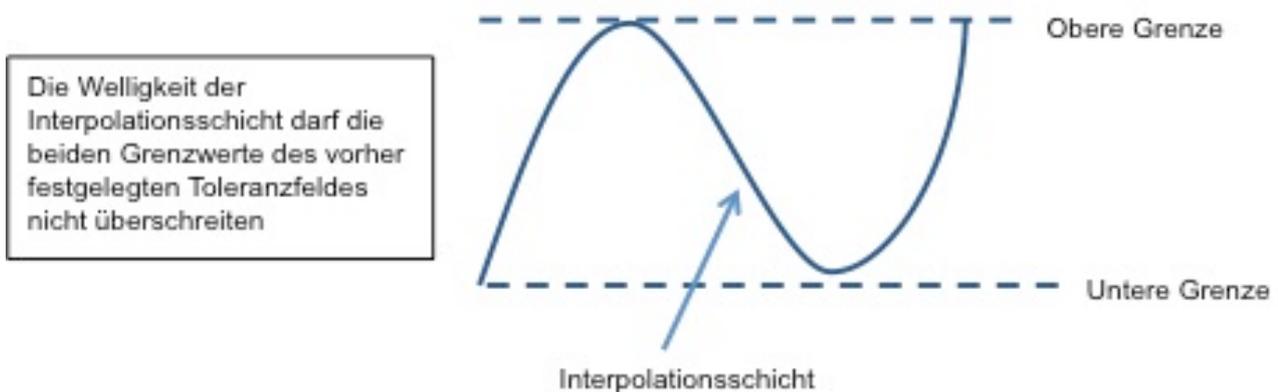


Abbildung 83: Toleranzfeld für die Welligkeit mit oberer und unterer Grenze

Die durch die Verformung entstehenden Spannungen und Dehnungen müssen ebenfalls in die Betrachtungen mit einbezogen werden, um die minimale Dicke der Interpolationsschicht festzulegen. Deshalb müssen die Grenzwerte, die sich aus den Konstruktionsrichtlinien für örtliche Spannung und örtliche Dehnung ergeben, mit dem Grenzwert für die Welligkeit verglichen werden. Dieser Vergleich wird durch den Einsatz der Datenbank ermöglicht. Ist der Grenzwert mithilfe von optischen Messungen, einem Taster oder durch Simulation ermittelt, muss auch hier eine Vorschrift erarbeitet werden, um die durch das Bauteil entstehenden Werte mit dem Grenzwert zu vergleichen. Wie schon erwähnt, ist die Formbarkeit abhängig von der Dicke der Interpolationsschicht, d.h. bei Bauteilen, die eine hohe Formbarkeit der Interpolationsschicht voraussetzen, muss eine möglichst dünne Interpolationsschicht verwendet werden. Durch eine dünne Interpolationsschicht steigt, wie oben erwähnt, die Gefahr einer zu großen Welligkeit der selbigen. Dieser Konflikt muss bei der Lösung dieses Problems in Betracht gezogen werden. Hierfür muss ein Welligkeitskennwert der Interpolationsschicht berechnet werden. Dieser Welligkeitskennwert ist abhängig von der Dicke der Interpolationsschicht. Außerdem ist die Dicke der Interpolationsschicht abhängig von der notwendigen Formbarkeit der Interpolationsschicht, bedingt durch das zu fertigende Bauteil. In Abbildung 84 wird dieser Zusammenhang zwischen zu fertigendem Bauteil, Dicke der IPS und sich ergebendem Welligkeitskennwert dargestellt.

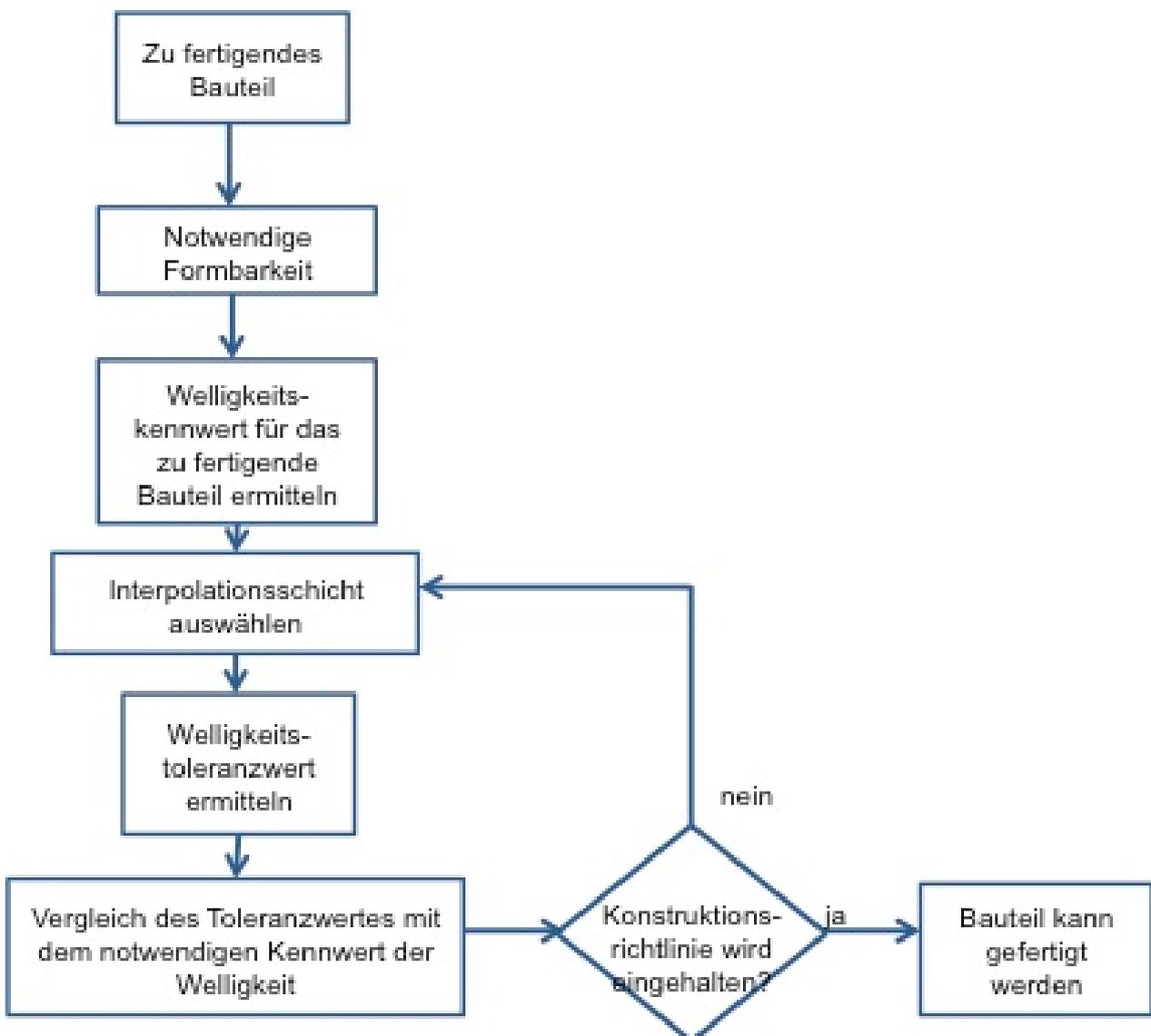


Abbildung 84: Vergleich des Welligkeitstoleranzwertes der IPS mit dem notwendigen Welligkeitskennwert des Bauteils

Als Vorschrift für die Konstruktionsrichtlinie ergibt sich:

- Welligkeitstoleranzwert der IPS > entstehender Welligkeitskennwert der IPS durch die notwendige IPS-Dicke. Grenzwert z.B. 0,3.

Maximaler Verformungsgrad

Im nächsten Schritt wird der Grenzwert für die maximale Dicke der Interpolationsschicht ermittelt. Dieser Grenzwert wird als maximaler Verformungsgrad bezeichnet. Wie oben erläutert, limitiert die Dicke der IPS auch das Verformungsverhalten. Denn durch eine dickere Interpolationsschicht besteht zwar keine Gefahr einer welligen Oberfläche, jedoch können durch die höhere Steifigkeit auch weniger Details durch die Interpolationsschicht nachgebildet werden. Was das bedeutet, wird in Abbildung 85 graphisch dargestellt.

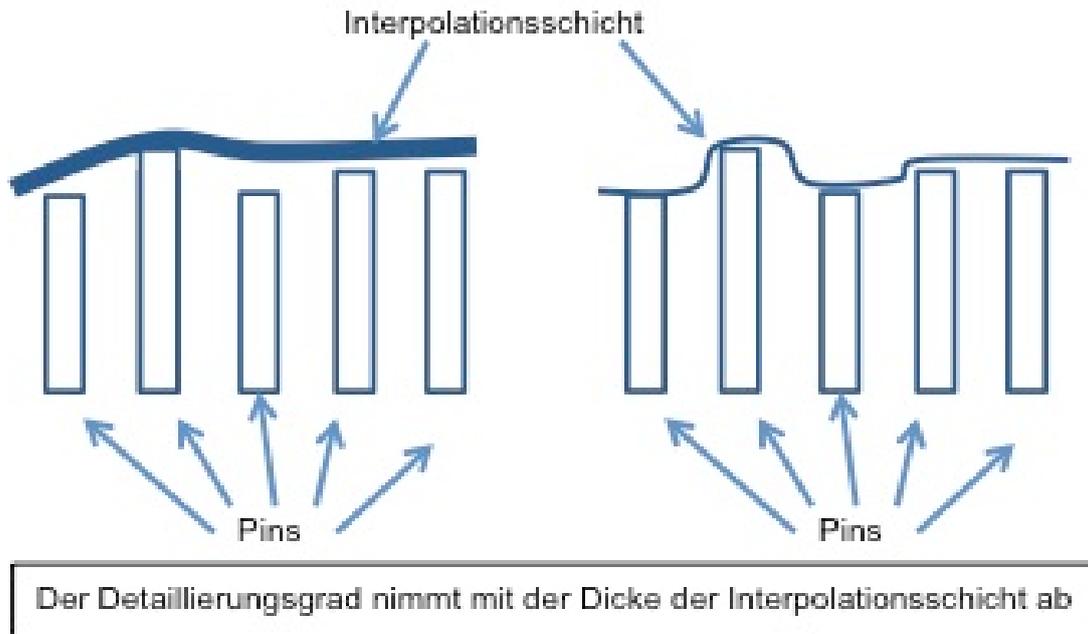


Abbildung 85: Vergleich des Verformungsgrades in Abhängigkeit von der Dicke der IPS

Daraus folgt: Es muss untersucht werden, ob die jeweilige Interpolationsschicht die nötige Formbarkeit aufweist, um das untersuchte Bauteil gut abzubilden. Ein Maß für die Verformbarkeit eines Bauteils ist die Steifigkeit. Sie stellt den Widerstand dar, den ein Bauteil gegen elastische Verformung durch eine äußere Kraft aufweist. Im Fall der FlexForCFK-Maschine muss besonders die Biegesteifigkeit der Interpolationsschicht betrachtet werden. Die allgemeine Formel für die Berechnung der Biegesteifigkeit eines Rechtecks sieht wie folgt aus: Biegesteifigkeit = $E \cdot I_y$ mit $I_y = b \cdot h^3 / 12$. Die Biegesteifigkeit ist abhängig vom E-Modul des Werkstoffes und vom axialen Flächenträgheitsmoment 2. Ordnung. In der obigen Formel steht b für die Breite der Interpolationsschicht, h für die Höhe der Interpolationsschicht, E für den E-Modul und I für das Trägheitsmoment. Anhand von diesen beiden Formeln wird ersichtlich, dass die Biegesteifigkeit stark von der Höhe der Interpolationsschicht abhängt. Als Grenzwert für diese Konstruktionsrichtlinie muss also für jede Interpolationsschicht die Biegesteifigkeit berechnet werden. Mithilfe der ermittelten Steifigkeit kann auf den maximal möglichen Verformungsgrad geschlossen werden, der mit der jeweiligen Interpolationsschicht möglich ist. Der Verformungsgrad ist insbesondere abhängig von der Steifigkeit und den am Bauteil anliegenden Kräften. Der Verformungsgrad wird als dimensionslose Kennzahl definiert, ähnlich wie die Dehnung.

Ist der Grenzwert für die Konstruktionsrichtlinie, der in Abhängigkeit von der Steifigkeit variiert, bekannt, muss auch hier wie bei allen anderen Konstruktionsrichtlinien eine Vorschrift gefunden werden, die es ermöglicht zu prüfen, ob ein Bauteil mithilfe der Interpolationsschicht und der FlexForCFK-Maschine gefertigt werden kann. In Abbildung 86 wird verdeutlicht, um welchen Zusammenhang es bei der Konstruktionsrichtlinie geht. Aus Abbildung 86 geht zum einen hervor, dass aufgrund einer zu dicken Interpolationsschicht die Struktur des Bauteils nicht nachgebildet werden kann und zum anderen, wie durch Reduzierung der Dicke das Bauteil fertigbar wird.

Daraus leitet sich folgender Algorithmus ab:

- Maximaler Verformungsgrad in Abhängigkeit von Steifigkeit > maximaler Verformungsgrad der Bauteilstruktur. Grenzwert z. B. gleich 80%.

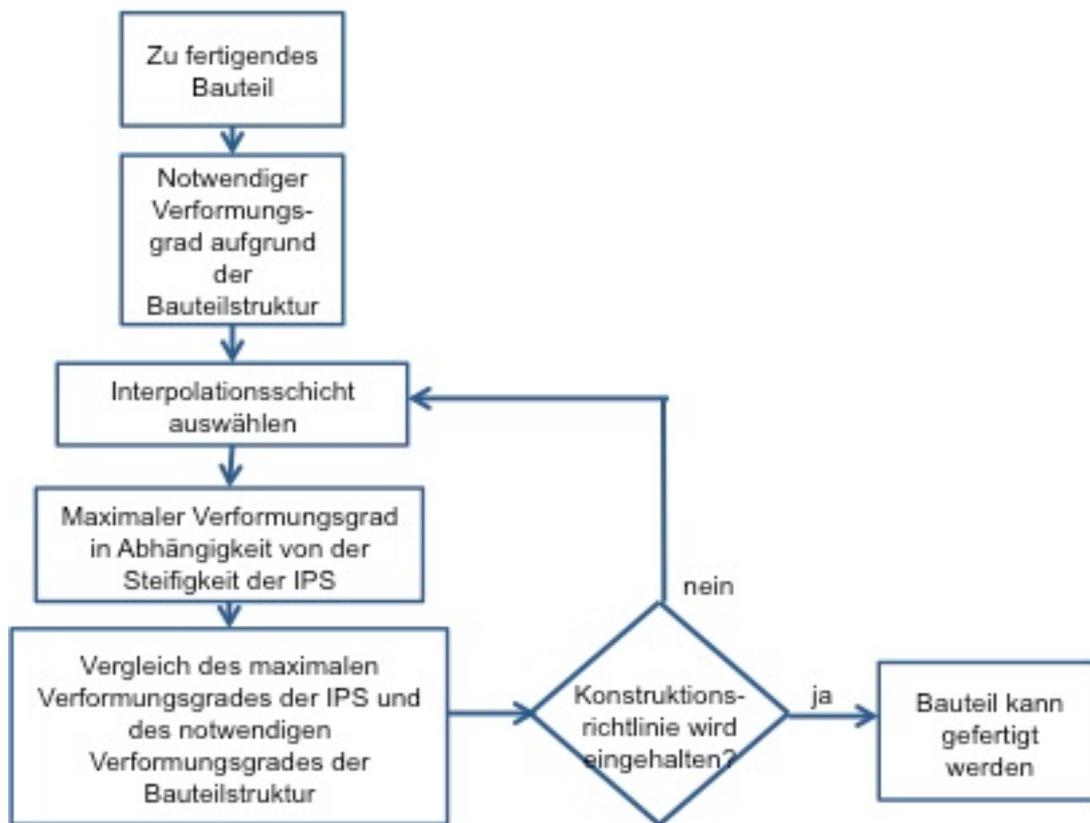


Abbildung 86: Vergleich des maximalen Verformungsgrades der IPS mit dem Wert des Bauteils

Maximaler Verstellweg der Pins

Eine weitere Konstruktionsrichtlinie, die von der Maschine festgelegt wird, ist der maximal mögliche Verstellweg jedes einzelnen Pins. Der Verstellweg wird in der Einheit mm angegeben und ist abhängig von der Gewindelänge eines Pins. Denn jeder Pin wird durch ein Gewinde in der Höhe verstellt. Der Verstellweg eines Pins bei der Fertigung eines Bauteils ist abhängig vom notwendigen Höhenunterschied, der vom höchsten bis zum niedrigsten Punkt des Bauteils zurückgelegt werden muss (Abbildung 87).

Der für die Konstruktionsrichtlinie notwendige Grenzwert für den maximalen Verstellweg wird im vorliegenden Fall lediglich über die Gewindelänge der Pins ermittelt. Um nun zu prüfen, ob ein Bauteil mithilfe der FlexForCFK-Maschine gefertigt werden kann, muss der eben ermittelte Grenzwert mit dem Wert verglichen werden, der sich aus der Analyse des Bauteils für den Höhenunterschied vom höchsten zum niedrigsten Punkt ergibt. Daraus lässt sich folgender Algorithmus definieren:

- Maximal möglicher Verstellweg der Pins > maximaler Höhenunterschied in der Bauteilstruktur. Grenzwert z.B. 300 mm.

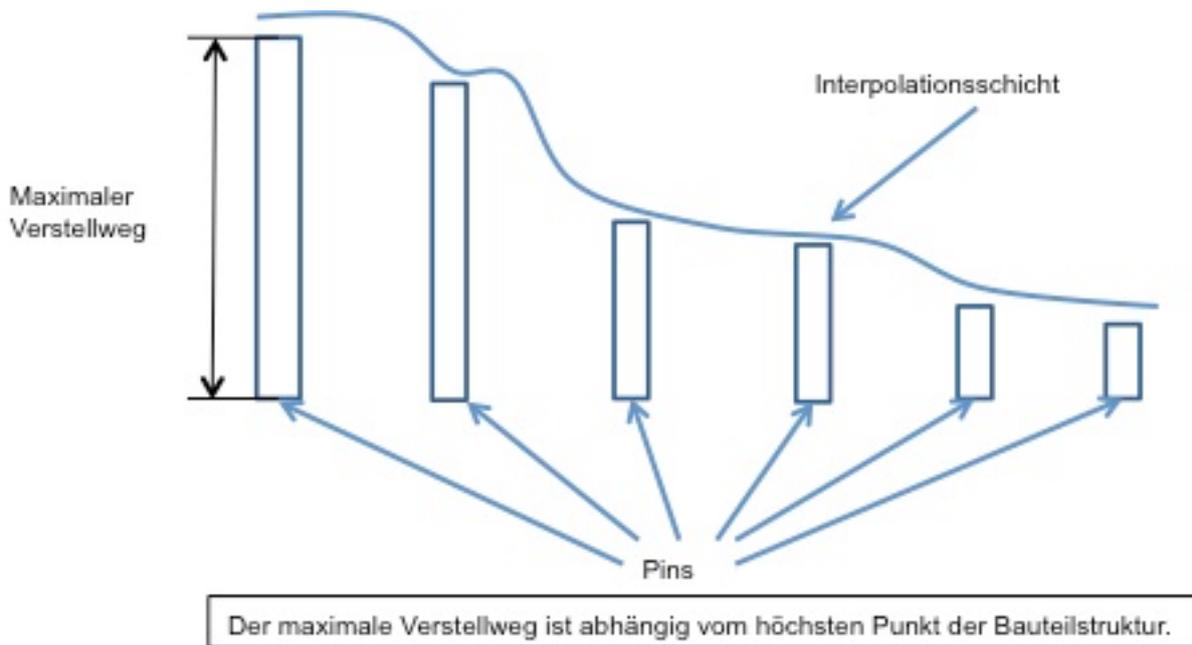


Abbildung 87: Darstellung des maximalen Verstellwegs eines Pins in Abhängigkeit von der Bauteilstruktur

Minimale ebene Länge

Eine weitere Konstruktionsrichtlinie, die vom Durchmesser der Pins abhängig ist, ist die minimale Länge einer ebenen Fläche des Bauteils. Diese Konstruktionsrichtlinie wird ebenfalls in der Einheit mm angegeben. Der Grenzwert für diese Richtlinie variiert mit dem Durchmesser der Pins. Deshalb muss zur Ermittlung des Grenzwertes der Durchmesser einmal gemessen werden und kann im Anschluss in der Datenbank hinterlegt werden. Damit kann auf den Grenzwert immer wieder schnell zugegriffen werden. Anhand der Abbildung 88 wird veranschaulicht, was diese Konstruktionsrichtlinie aussagt.

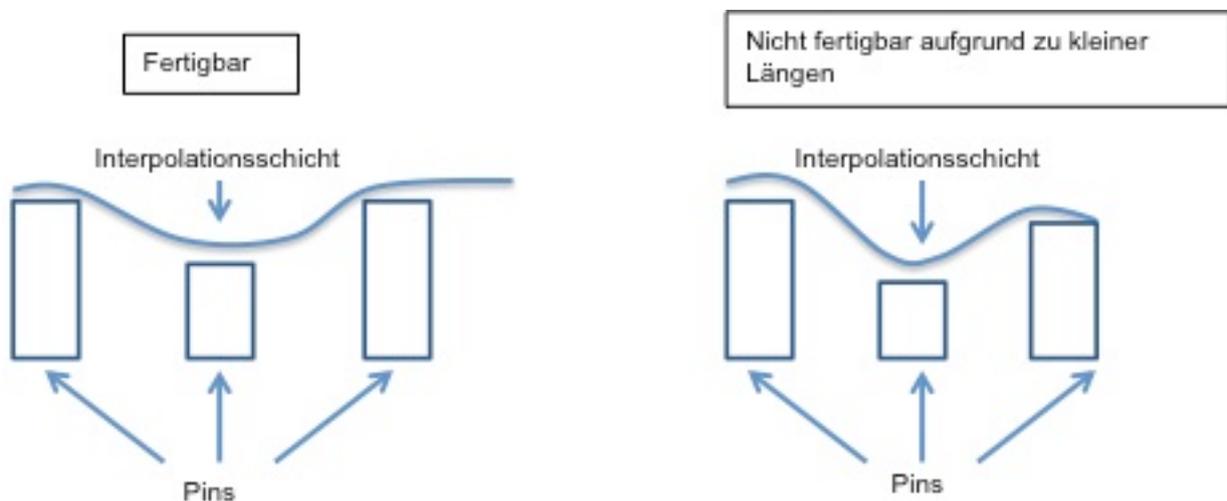


Abbildung 88: Fertigbarkeit eines Bauteils in Abhängigkeit von der minimalen ebenen Länge in der Bauteilstruktur

Das Vorgehen, um diese Richtlinie zu verifizieren, ist ähnlich wie bei vorher beschriebenen Konstruktionsrichtlinien. Der ermittelte Grenzwert muss mit der minimalen Länge einer ebenen Fläche des jeweiligen Bauteils verglichen werden. Die minimale Länge im Bauteil kann aus dem CAD-Modell entnommen werden. Daraus ergibt sich folgende Vorschrift zur Verifizierung der Konstruktionsrichtlinie:

- Durchmesser der Pins < minimale Länge einer ebenen Fläche des Bauteils. Grenzwert z.B. 12mm.

2.9. Modul zum Soll-/Ist-Vergleich (AP 7)¹

2.9.1. Analyse der Grenzen der Genauigkeitssteigerung durch Konstruktionsmodifikationen

Im Vergleich zu konventionellen, starren CFK-Laminierformen verschlechtern flexible Laminierformen die Genauigkeit. Dies liegt zum einen darin begründet, dass eine steigende Anzahl an verwendeten Pins eine steigende Anzahl an mechanischen und steuerungstechnischen Ungenauigkeiten führt. Zum anderen führt die elastische Interpolationsschicht zu Schrumpfungen bei Dehnungsbeanspruchung. Diese Dickenabnahmen führen zu Höhenverlusten. Beide Ungenauigkeitsarten akkumulieren sich über das gesamte Pin-Type Tool.

Bezugnehmend zum ersten Grund besteht eine Möglichkeit zur Steigerung der mechanischen Genauigkeit in der Anwendung von präziseren Fertigungs- und Montagethoden. Dies führt jedoch zur Steigerung der Produktionskosten. Eine weitere Möglichkeit besteht darin, die Anzahl an Pins zu verringern. Dies führt jedoch zu einer Verringerung der Gestaltungsfreiheit der CFK-Konstruktion. Dies liegt daran, dass eine geringere Anzahl an Pins, bei gleichzeitiger Erhaltung der Laminierfläche in größeren Pins resultiert. Dies ermöglicht wiederum keine kleinen Geometrielemente (Abbildung 89).

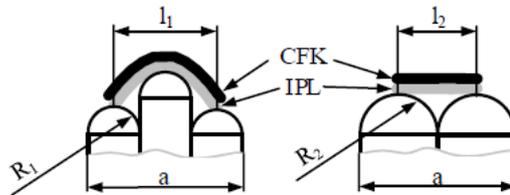


Abbildung 89. Eine Verringerung der Pin-Anzahl bedingt mehr Pins um die gleiche Laminierfläche zu erhalten: $l_2 < l_1$ mit $R_2 > R_1$

Bezugnehmend zum zweiten Grund führt eine dickere Interpolationsschicht zwar zu einem geringeren Einfluss auf die Schrumpfung. Jedoch sinkt die Flexibilität der Interpolationsschicht und somit die Fähigkeit filigrane Geometrien abzubilden.

¹ Die Ausführungen entstammen teilweise der eigenen wissenschaftlichen Veröffentlichung in [48], welche im Rahmen dieses Forschungsprojektes entstanden ist

2.9.2 Konzipierung einer dynamische Kompensation von Ungenauigkeiten mittels 3D-Scanning

Um den zuvor genannten Aufwand zu umgehen, wurde ein Steuerkreis mit integrierter 3D-Oberflächenerkennung entwickelt (Abbildung 90). Hierdurch müssen vorhandene Pin-Type-Formen nicht modifiziert werden, sondern werden befähigt vorhandene Ungenauigkeiten zu kompensieren.

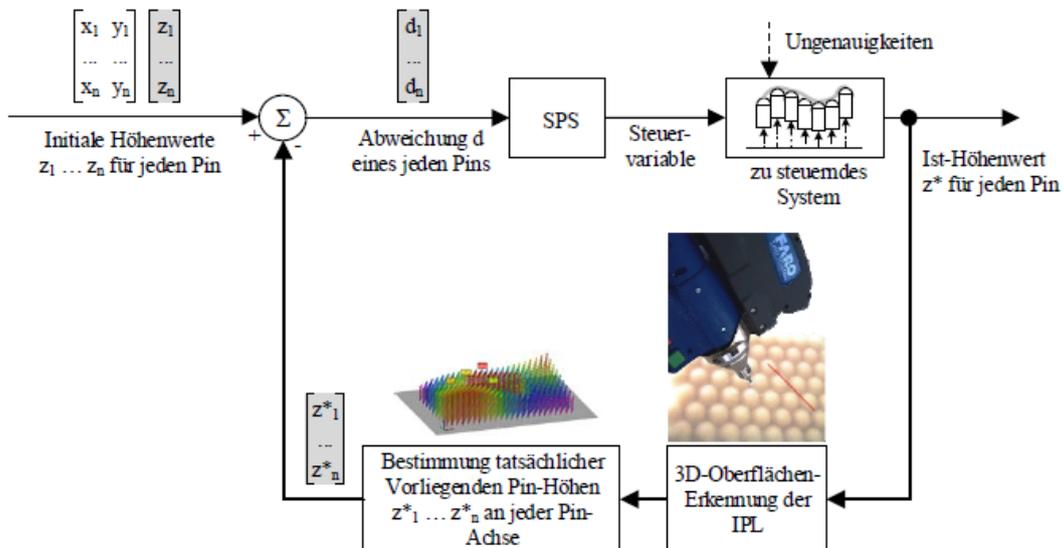


Abbildung 90. Kompensierung der Ungenauigkeiten der Pin-Type-Laminierform durch die Integration von 3D-Oberflächenerkennung

2.9.3. Entwicklung eines Prozesses zur Integration der 3D-Oberflächenerkennung in den Steuerkreis von Pin-Type Tools

Die ganzheitliche Methode besteht aus folgenden Prozessen:

- Initiale Höheneinstellung der Pins,
- 3D-Oberflächenerkennung,
- Ableitung der pin-spezifischen Abweichungen, und
- Integration der 3D-Oberflächenerkennung in den SPS-Steuerkreis.

Initiale Höheneinstellung der Pins

Die initiale Höheneinstellung der Pins folgt dem Ablauf nach Abbildung 91.

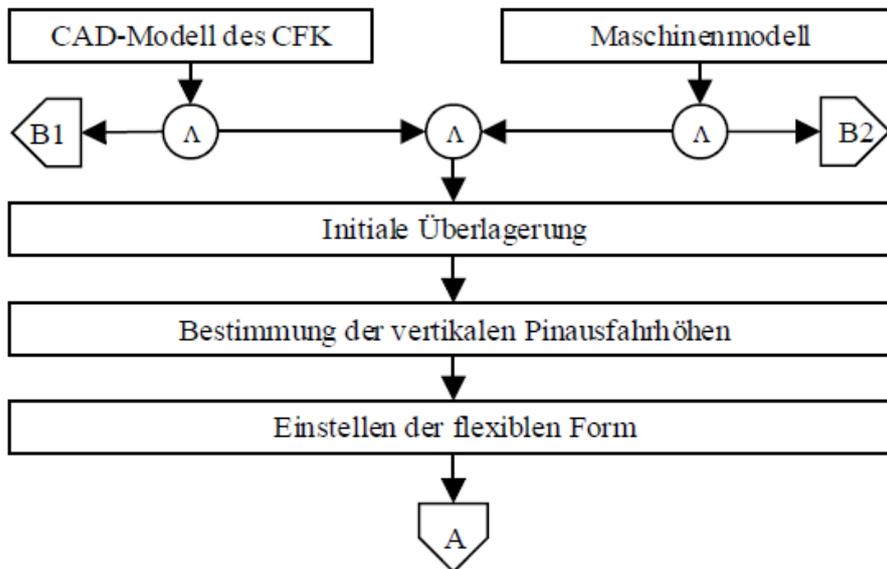


Abbildung 91. Initiale Höheneinstellung der Pins

Zunächst sind das CAD- und das Maschinenmodell zu überlagern (Abbildung 92). Im Anschluss werden die vertikalen Ausfahrhöhen bestimmt, nach denen die einzelnen Pins anzusteuern sind. Hierzu präsentiert das Maschinenmodell eine geordnete Menge an Punkten, durch welche jeweils eine vertikale Achse verläuft (vgl. Abbildung 12). Dies basiert auf der Bestimmung der Schnittpunkte zwischen der Unterseite des CAD-Modells und der Pin-Achsen, von denen jeweils eine vertikal durch die abstrahierten Pins läuft. Im Anschluss werden alle Pin-Höhen in beispielsweise einer Textdatei gespeichert [11]. Wie in Abbildung 96 dargestellt, befähigt die Implementierung von n Variablen z für n Pins des Maschinenrasters innerhalb des SPS-Ablaufprogrammes die Nutzung des selben SPS-Ablaufprogramms um verschiedene Pin-Höhen für verschieden CFK-Formen abzubilden. Für jedes CFK-Modell wird eine Textdatei generiert.

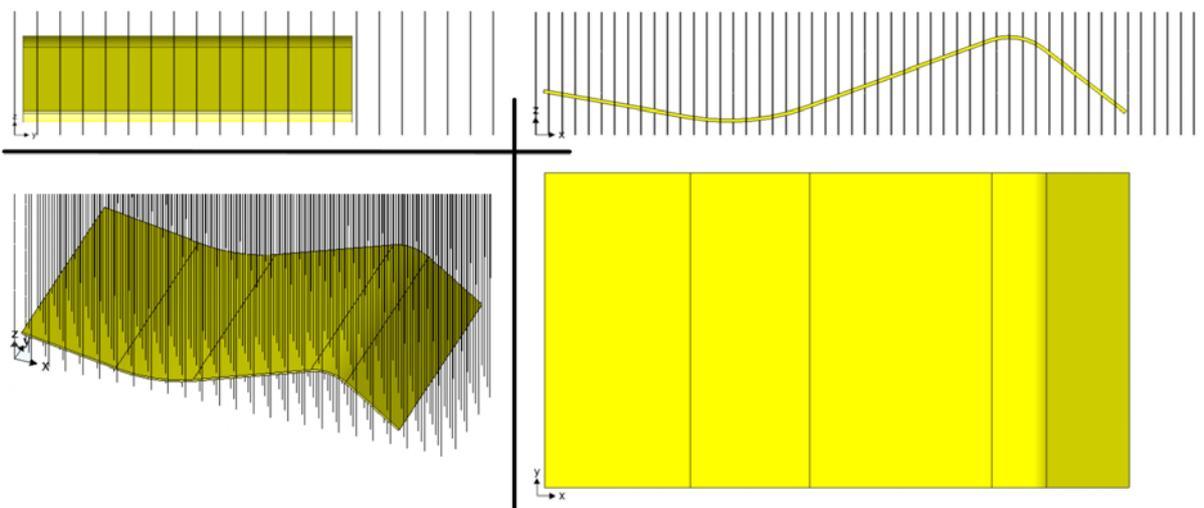


Abbildung 92. Ein exemplarisches Ergebnis der Überlagerung von CAD- und Maschinenmodell.

3D-Oberflächenerkennung

Die 3D-Oberflächenerkennung zur Dokumentation der tatsächlichen Ist-Fläche folgt der initialen Höheneinstellung der Pins (Abbildung 93).

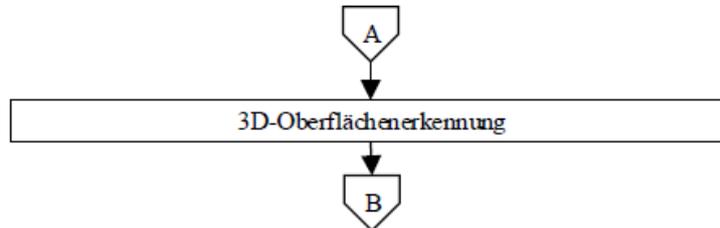


Abbildung 93. 3D-Scannen im Anschluss an die initiale Formeinstellung und vor der der Ermittlung der Pin-Abweichungen

Zur Ermittlung der tatsächlichen Oberfläche bieten sich optische Messsysteme an, da diese kontaktlos messen. Das Lichtschnittverfahren, welches auf dem Triangulationsprinzip basiert, ist hierfür vorwiegend in Verwendung [49]. Typische kommerzielle Geräte sind (Abbildung 94):

- Laserlicht-Methode. Eine deformierte Linie, die vom Objekt durch Projizieren des Laserlichts reflektiert wird, wird durch eine Kamera dokumentiert. Diese Kamera wird relativ zum Objekt in einem definierten Winkel und in definiertem Abstand positioniert. [50]
- Streifenprojektion. Ein zeit-kodiertes binäres Muster wird auf ein Objekt projiziert. Die deformierten Linien werden reflektiert und großflächig mittels Kamera dokumentiert. [51]

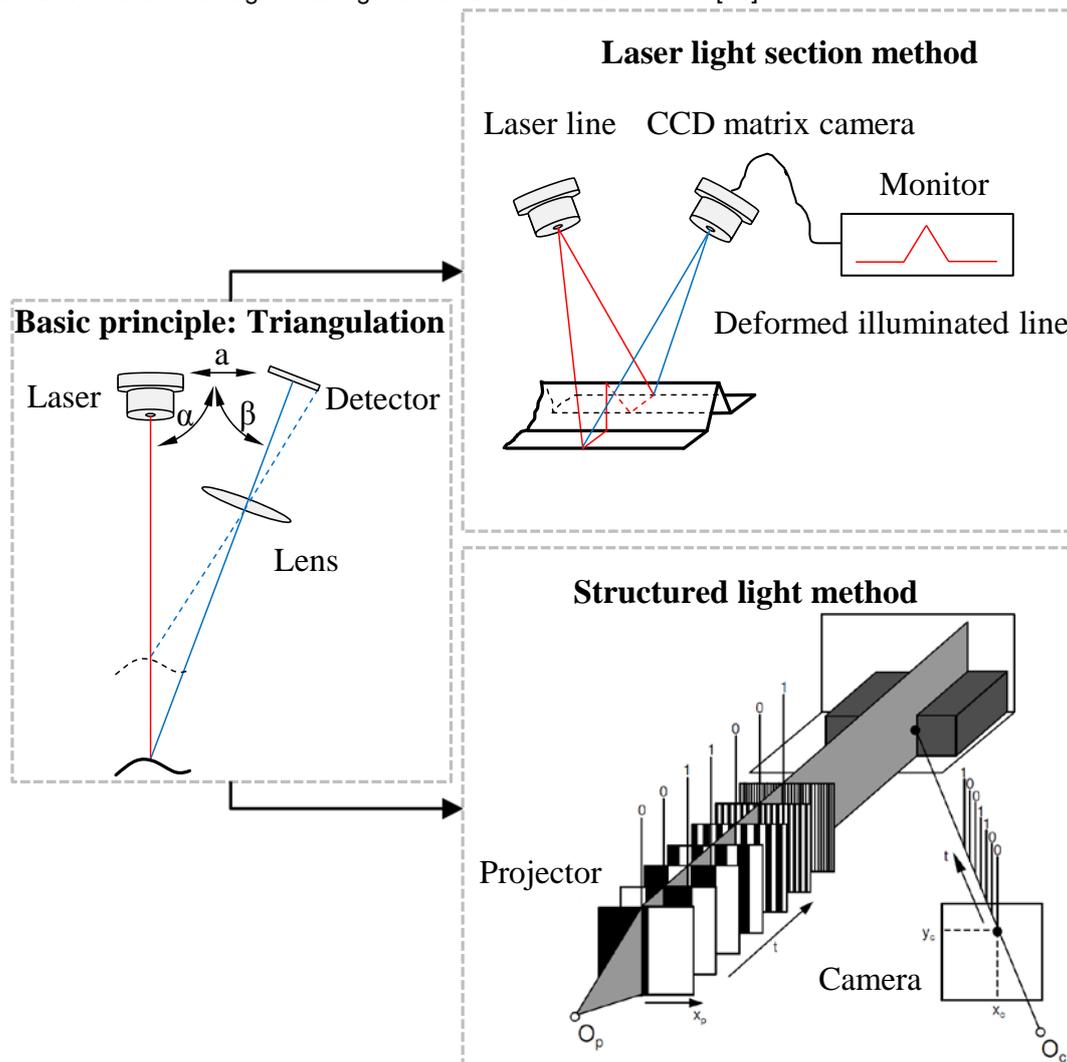


Abbildung 94. Das Triangulationsprinzip und seine Anwendung im Lichtschnittverfahren [5] und in der Streifenprojektion mit zeit-kodiertem, binärem Muster [8].

Der Laser bedarf der Bewegung wohingegen das Streifenprojektionsgerät stationär verharren kann [52].

Ableitung der pin-spezifischen Abweichungen

Die Ableitung der pin-spezifischen Abweichungen startet mit einem zweiten Überlagern. Diese verwendet im Gegensatz zum initialen Überlagerung zusätzlich den 3D-Scan der Oberflächenerkennung (Abbildung 95).

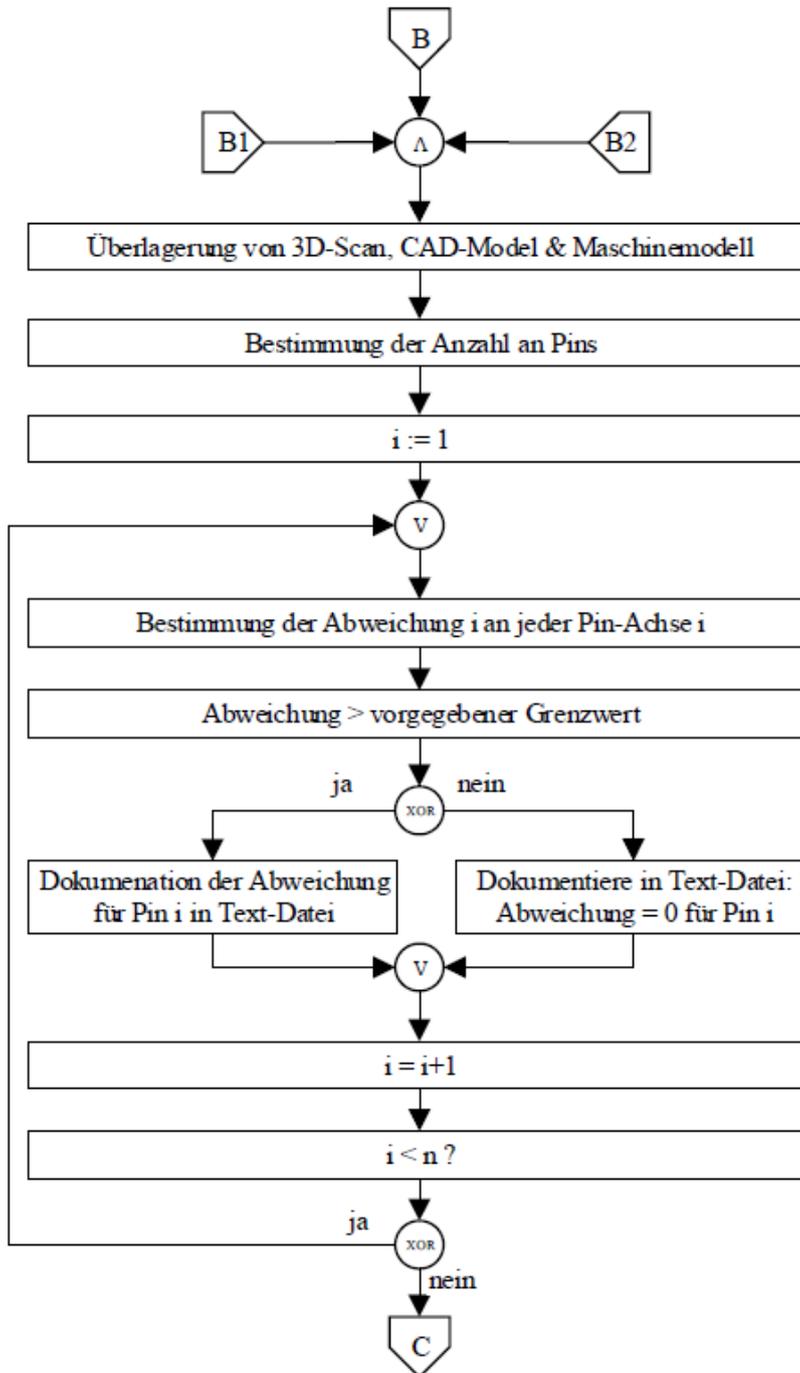


Abbildung 95. Prozessfluss zur Bestimmung der pin-spezifischen Abweichungen

Nach diesem Überlagern folgt der Prozessablauf zur Ermittlung von n Abweichungswerten für n Pins, welche beispielsweise in einer Textdatei gespeichert werden.

Integration der 3D-Oberflächenerkennung in den SPS-Steuerkreis.

Die Integration der 3D-Oberflächenerkennung in den SPS-Steuerkreis basiert auf der Kommunikation zwischen SPS und der Textdatei, in welcher sämtliche Pin-Abweichungen vom Soll-Wert dokumentiert sind (Abbildung 96). Jedem Pin-Aktuationswert ist eine Zeile in der SPS-Ablaufsteuerung zugeordnet. Neben der x- und y-Position der jeweiligen Pins ist jedem Pin zusätzlich der Abweichungswert zugeordnet. Sobald der Ablaufschritt zur Nachjustierung von Pin p erreicht ist, greift die SPS auf die Textdatei zu und extrahiert den Abweichungswert, um welchen die Pinhöhe nachjustiert wird.

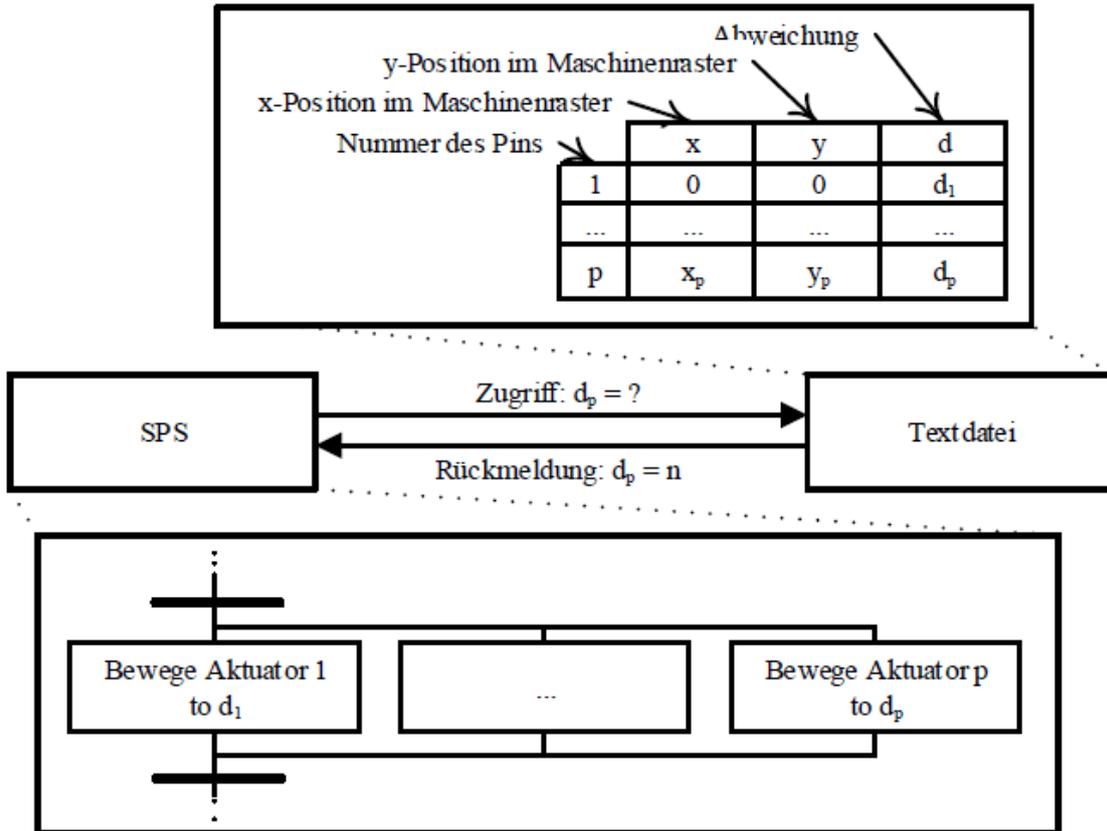


Abbildung 96. Integration der Textdatei-Werte z in die Ablaufsteuerung der SPS

Der Gesamtprozess wird in Abbildung 97 dargestellt. Nur den Pins, deren Abweichungswert außerhalb der Toleranzgrenze liegt, werden Abweichungswerte zugeordnet, da diese Pins nachzustellen sind. Sämtlichen anderen Pins wird der Abweichungswort „Null“ zugeordnet, da kein Nachstellen erforderlich ist.

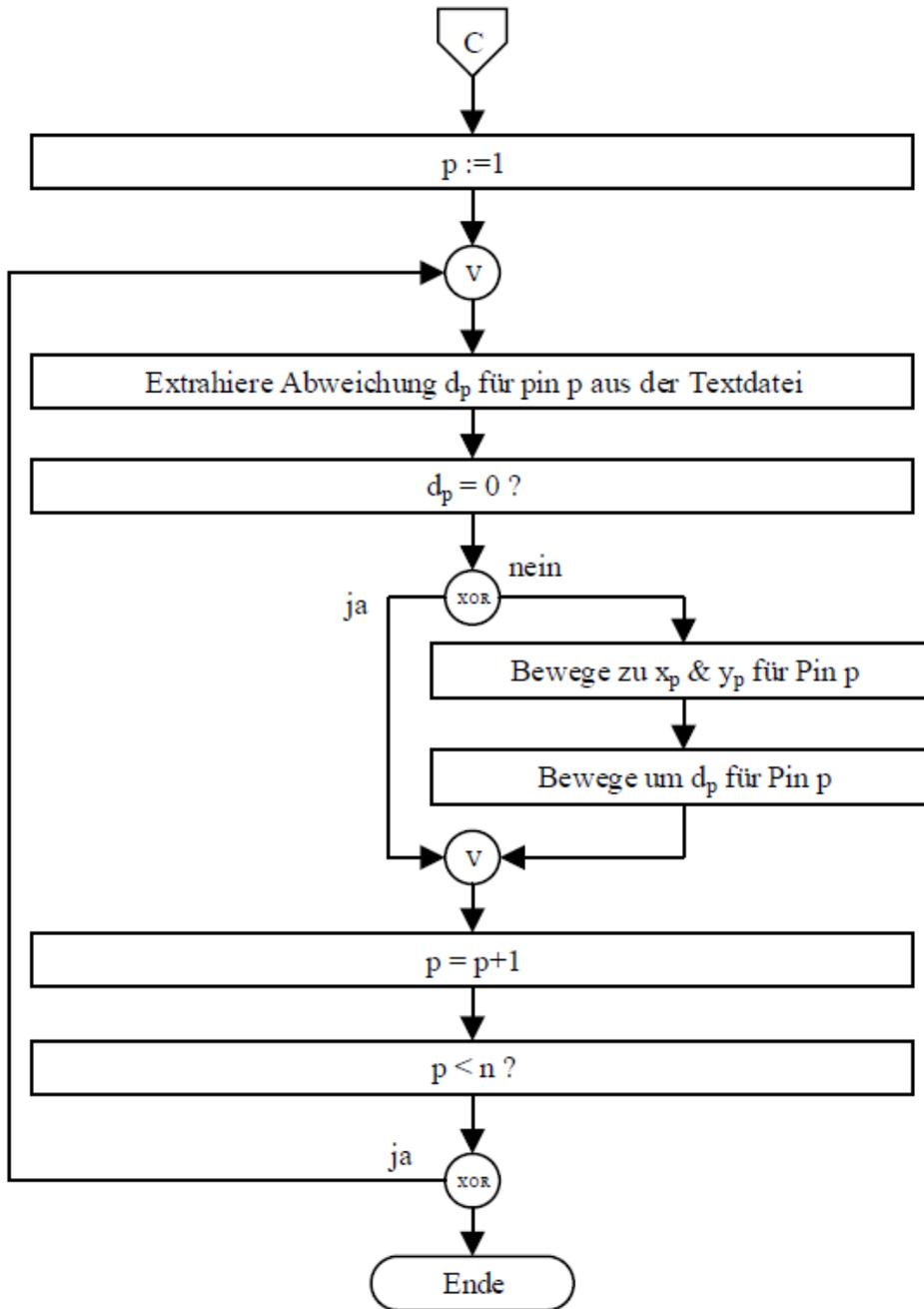


Abbildung 97. Prozessfluss zur Kompensation der Abweichungen

2.9.4. Fallbeispiel

Beginnend mit der Ermittlung der Pin-Höhendaten durch Überlagerung des CAD-Modells und des zu laminierenden CFK-Bauteils mit dem Maschinenraster erfolgt ein initiales Einstellen sämtlicher Pins. Mit den ermittelten Werten werden die Aktuatoren der formflexiblen Laminierform angesteuert. Die eingestellte Maschine bzw. Laminieroberfläche wird im Anschluss mittels Streifenlichtprojektion gescannt. Eine Falsch-Farben-Abbildung wird genutzt, um mittels der Best-Fit-Registrierung Abweichungen zwischen Soll und Ist festzustellen (Abbildung 98)

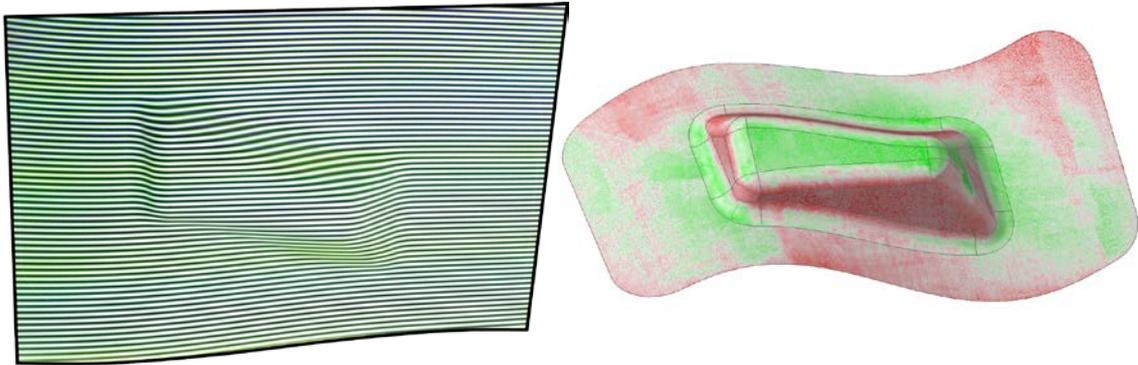


Abbildung 98. Strukturiertes Lichtmuster (links) und Abbildung der positiven und negativen Abweichungen an der Laminierform (rechts).

Als Resultat der Überlagerung (Abbildung 99) werden die jeweiligen Pin-Abweichungen in einer Textdatei gespeichert und ein Nachjustieren erfolgt, sodass die Pin-Abweichungen solange minimiert werden, bis sie innerhalb der zulässigen Abweichungstoleranz liegen.

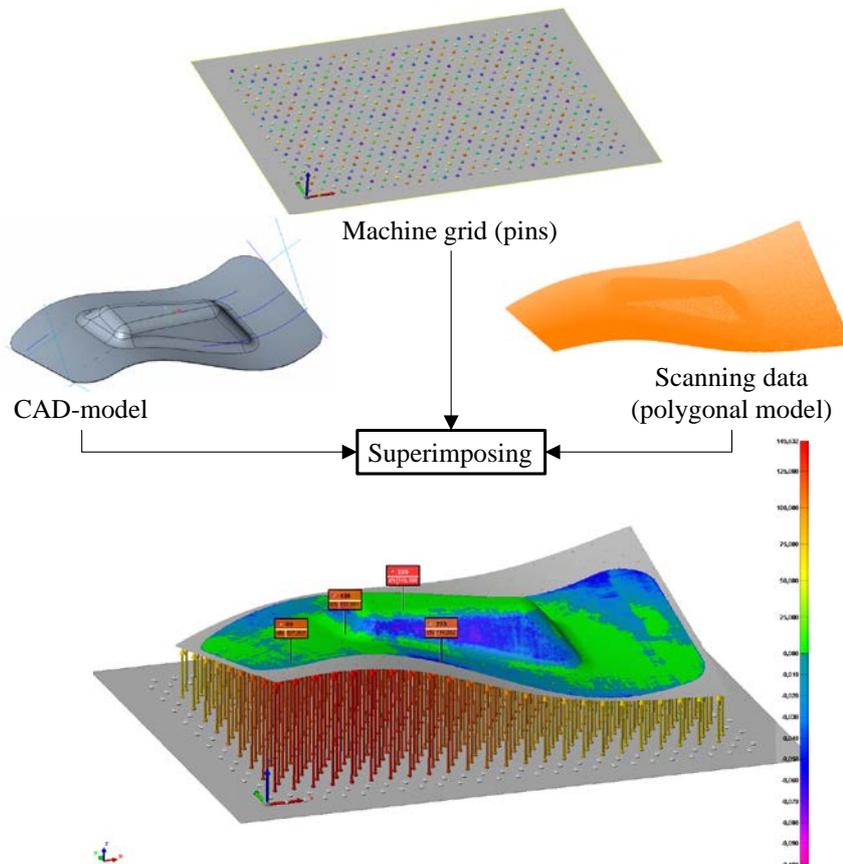


Abbildung 99. Überlagerung des CAD-Modells, des Maschinenrasters und der 3D-Scan-Daten

2.10. Herstellung der CFK-Musterbauteile (AP 9)

Die Herstellung der CFK-Musterbauteile erfolgte auf zwei Weisen. Zunächst wurden die Bauteile nach dem klassischen Herstellprozess erstellt. Anschließend wurden dieselben Bauteile mit der neuen FlexForCFK-Form hergestellt, um Vergleichsprodukte zu erhalten.

Hierzu wurden zwei Musterbauteile definiert (Abbildung 100). Ein Musterbauteil besitzt zusätzlich eine „Mulde“, um den Einsatz von Rapid Tooling Laminieraufsätzen abzubilden.

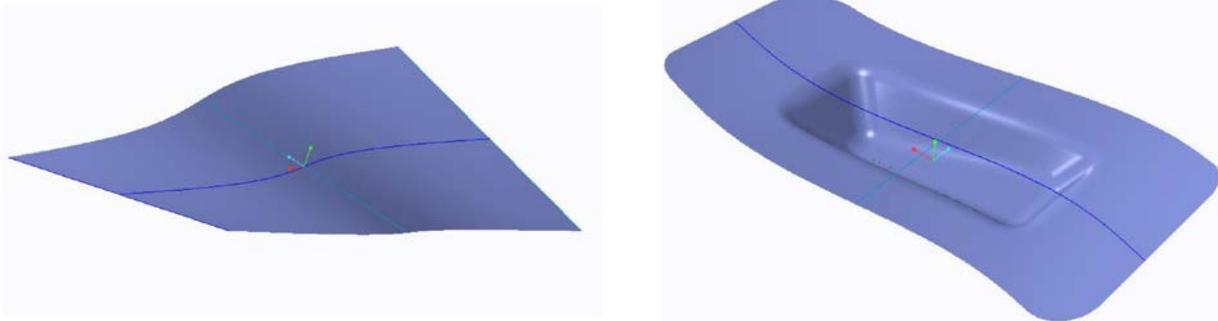


Abbildung 100. FlexForCFK-Musterbauteile: Freiformfläche (links) und Freiformfläche mit Mulde (rechts).

Zwei Formen wurden gebaut (Abbildung 101 und Abbildung 102), um Bauteile im klassischen Verfahren als Referenz herzustellen.

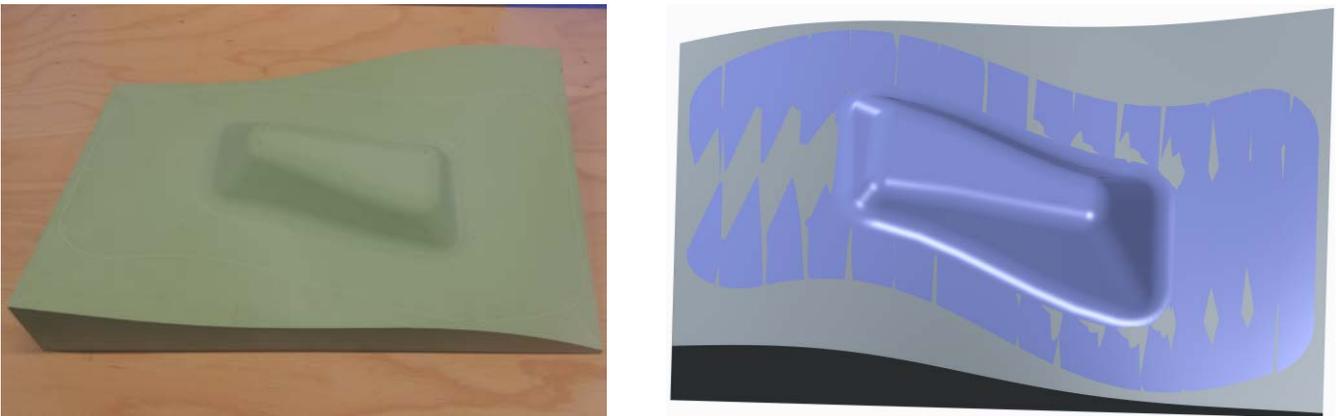


Abbildung 101. Musterbauteil mit Mulde: links die Laminierform, recht das CAD-Modell des Musterbauteils



Abbildung 102. Musterbauteil ohne Mulde: links die starre Laminierform, rechts das CAD-Modell des Musterbauteils.

In Tabelle 24 ist der konventionelle CFK-Autoklav-Herstellprozess dokumentiert.

Tabelle 24. Konventioneller CFK-Autoklav-Herstellprozess (hier exemplarisch am Musterbauteil ohne Mulde dargestellt)

<p>1 Auflegen Abreißgewebe</p>	
<p>2 Auflegen Lochfolie</p>	
<p>3 Auflegen Saugvlies</p>	
<p>4 Einbetten in Vakuumfolie, Montage Vakuum-Anschluss, Montage Dichtband</p>	
<p>5 Autoklav-Prozess</p>	
<p>6 Fertiges CFK-Bauteil (noch mit überschüssigem, zu entfernendem Randmaterial)</p>	

Das neue (flexible) Verfahren unterscheidet sich im Laminierprozess qualitativ nicht vom Fall der Nutzung einer starren Form. Lediglich die Form ist nicht starr sondern flexibel, die CFK-Produktionsschritte sind jedoch gleich.

2.11. Evaluierung der CFK-Musterteile (AP 10)

In Abbildung 103 sind die Verläufe der kumulierten Formkosten und der Bauteilkosten, getrennt nach „starre Form“ und „flexible Form“, qualitativ abgebildet. Die im Rahmen des vorliegenden Forschungsprojektes erbrachten Herstellkosten für die flexible Form belaufen sich auf ca. 50.000€. Die starren Laminierformen (vgl. Kapitel 0) wurden zu je ca. 1.000€ hergestellt. Werden diese 1.000€ Formkosten als je Form notwendig angenommen, so steigen die kumulierten Kosten linear an. Nach 50 starren Formen sind die Kosten der flexiblen Form erreicht, welche als Fixkosten angenommen wurden¹. Alle Folgeformen wären somit günstiger im Vergleich zur Herstellung als starre Form.

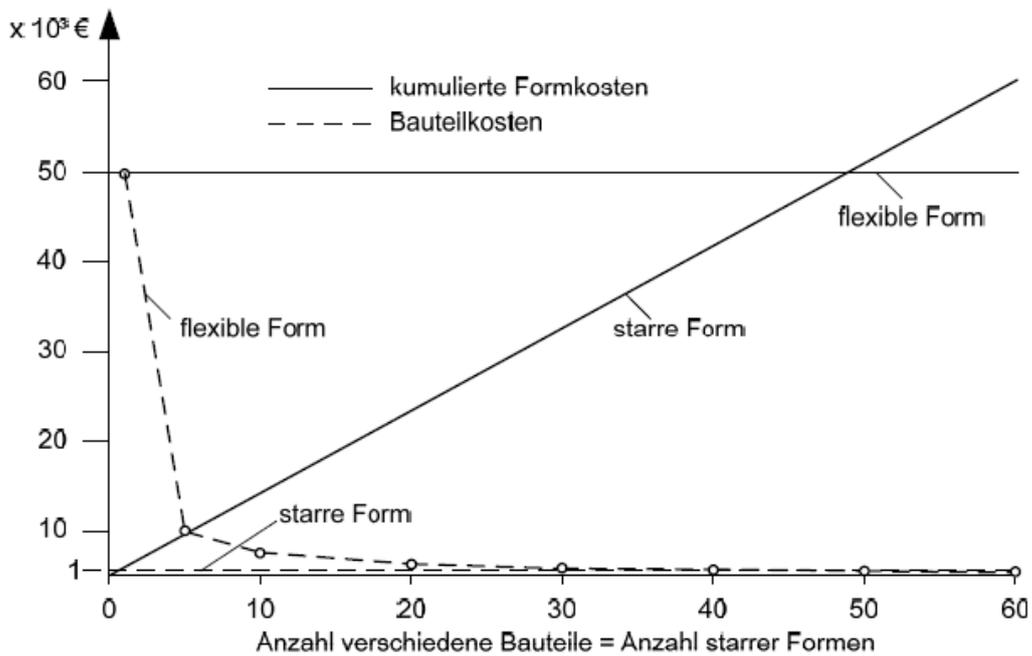


Abbildung 103. Qualitativer Vergleich des Kostenverlaufs²

¹ Die zur Pin-Aktuatorik notwendigen Stromkosten wurden vernachlässigt.

² Sämtliche anderen Kosten (z.B. CFK-Material, Vakuumpolie, Saugfließ, etc.) sind in beiden Fällen gleich und wurden nicht berücksichtigt, da sie keinen relativen Unterschied erbringen.

3. Zusammenfassung der erfolgten Veröffentlichungen im Rahmen des Forschungsprojekts

- (1) Lušić, M.; Feuerstein, F.; Morina, D.; Hornfeck, R.:
Fluid-based removal of inner support structures manufactured by fused deposition modeling: an investigation on factors of influence. In: Procedia CIRP, Volume 41, 2016, S. 1033-1038.
- (2) Lušić, M.; Barabanov, A.; Morina, D.; Feuerstein, F.; Hornfeck, R.:
Towards zero waste in additive manufacturing: a case study investigating one pressurised rapid tooling mould to ensure resource efficiency. In: Procedia CIRP, Volume 37, 2015, S. 54-58.
- (3) Lušić, M.; Wimmer, M.; Maurer, C.; Hornfeck, R.:
Engineering framework for enabling mass customisation of curvilinear panels with large surfaces by using pin-type tooling. In: Procedia CIRP, Volume 37, 2015, S. 265-270.
- (4) Wimmer, M.; Lušić, M.; Maurer, C.:
Vacuum Assisted Multipoint Moulding – A Reconfigurable Tooling Technology for Producing Spatially Curved Single-Item CFRP Panels. In: Procedia CIRP, CIRP CMS 2016, accepted, in print.
- (5) Lušić, M.; Schneider, K.; Hornfeck, R.:
A case study on the capability of rapid tooling thermoplastic laminating moulds for manufacturing of CFRP components in autoclaves. In: Procedia CIRP, Volume 50, 2016, S. 390-395.
- (6) Lušić, M.; Hausleider, S.; Hornfeck, R.:
Flexible attachment designs for rapid tooling: a contribution to greater design freedom within pin-type moulding spatially curved CFRP panels. In: Procedia CIRP, Volume 50, 2016, S. 396 - 401.
- (7) Lušić, M.; Katona, S.; Hornfeck, R.:
Compensating deviations during flexible pin-type moulding of spatially curved CFRP by using 3D-surface detection. In: Procedia CIRP, Volume 55, 2016, S. 158-163

4. Literatur

- [1] LÄSSIG, R., EISENHUT, M., ARNE, M., SCHULTE, R. T., PETERS, F., KÜHMANN, T., WALDMANN, T., BEGEMANN, W.: Serienproduktion von hochfesten Faserverbundbauteilen. Perspektiven für den deutschen Maschinen- und Anlagenbau. Roland Berger Strategy Consultants, VDMA (Hrsg.).
- [2] HORNFECK, R.: Entwicklung eines Rapid Shaping Verfahrens zur Herstellung von CFK-Bauteilen auf der Basis von Rapid Prototyping Grundformen. Georg-Simon-Ohm-Hochschule Nürnberg (Hrsg.).
- [3] SCHÜRSMANN, H.: Konstruieren mit Faser-Kunststoff-Verbunden. Springer, Berlin u. a., 2007.
- [4] Surface Generation Ltd: Reconfigurable Pin Tooling - Reducing Time & Cost to Market for Large & Low Volume Components., Leicestershire, 2007.
- [5] WESTKÄMPER, E., SCHRAFT, R., SCHAAF, W.: ROBOTYPING – Neue Rapid-Prototyping Verfahren mit Industrierobotern. In: wt Werkstatttechnik online 90, (2000), Nr. 5, S. 217–219.
- [6] WOHLERS, T.: Wohlers Report 2007. Wohlers Associates, 2007.
- [7] BAI, X., ZENG, Y., WU, W., LI, Z., ZOU, F.: Research on the Process of Stretch Forming with Reconfigurable Tooling. In: International Technology and Innovation Conference, 2006.
- [8] ALEXANDRE, U.: VORRICHTUNG UND VERFAHREN ZUM HERSTELLEN VON PLATTEN MIT EINER DREIDIMENSIONALEN KRÜMMUNG AUS FLÄCHENMATERIAL, ZUM BEISPIEL ZUM WÄRMEOFORMEN VON SEGELN AUS EINEM THERMOPLASTMATERIAL. In: Alexandre, U., 2002.
- [9] HOFFMAN, P. L.: Reconfigure modular tooling. In: Hoffman, P. L., 1997.
- [10] HORNFECK, R.: Rapid Shaping Prozess zur Herstellung von CFK-Bauteilen. Schriftenreihe der Georg-Simon-Ohm-Hochschule Nürnberg, Nürnberg, 2013.
- [11] LUŠIĆ, M., WIMMER, M., MAURER, C., HORNFECK, R.: Engineering framework for enabling mass customisation of curvilinearpanels with large surfaces by using pin-type tooling. In: Procedia CIRP 37, 2015, S. 265–270.
- [12] BOOTHROYD, G., DEWHURST, P., KNIGHT, W. A.: Product Design for Manufacture and Assembly. CRC Press, Hoboken, 2011.
- [13] POLI, C.: Design for manufacturing. A structured approach. Butterworth-Heinemann, Woburn, 2001.
- [14] HARDT, D. E., WEBB, R. D., SUH, N. P.: Sheet Metal Die Forming Using Closed-Loop Shape Control. In: CIRP Annals - Manufacturing Technology 31, (1982), Nr. 1, S. 165–169.
- [15] HARDT, D. E., ROBINSON, R. E., WEBB, R. D.: Closed-loop control of die stamped sheet metal parts: algorithm development and flexible forming machine design. In: Manufacturing Systems Program (Hrsg.): Advanced Systems for Manufacturing. Conference proceedings. Society of Manufacturing Engineers, Dearborn, Mich, 1985, S. 21–28.
- [16] GRODZINSKY, M. S.: Testing a closed loop forming algorithm on a part created by discrete die stretch forming., Cambridge, Massachusetts.
- [17] VALJAVEC, M.: A Closed-loop Shape Control Methodology for Flexible Stretch Forming over a Reconfigurable Tool., Cambridge, Massachusetts.
- [18] LUŠIĆ, M., FEUERSTEIN, F., MORINA, D., HORNFECK, R.: Fluid-based removal of inner support structures manufactured by fused deposition modeling: an investigation on factors of influence. In: Procedia CIRP 41, 2016, S. 1033–1038.
- [19] GRIMM, T.: User's Guide to Rapid Prototyping. Society of Manufacturing Engineers, Dearborn, Michigan, 2004.
- [20] GIBSON, I., ROSEN, D., STUCKER, B.: Additive Manufacturing Technologies. 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing. Springer, New York, 2015.
- [21] CRUMP, S., COMB, J., PRIEDEMANN, W., ZINNIEL, R.: Process of support removal for fused deposition modeling. In: Crump, S; Comb, J; Priedemann, W.: Zinniel, R., 1996.
- [22] PRIEDEMANN, W., BROSCHE, A.: Soluble material and process for three-dimensional modeling. In: Priedemann, W.: Brosch, A., 2004.
- [23] SCHASCHKE, C.: Fluid mechanics: worked examples for engineers. Institution of Chemical Engineers, Rugby, UK, 1998.
- [24] LUŠIĆ, M., SCHNEIDER, K., HORNFECK, R.: case study on the capability of rapid tooling thermoplastic laminating moulds for manufacturing of CFRP components in autoclaves. In: Procedia CIRP, Volume 50, 2016, S. 390–395.
- [25] GEBHARDT, A.: Understanding Additive Manufacturing. Rapid Prototyping, Rapid Tooling, Rapid Manufacturing. Carl Hanser, Munich, 2011.
- [26] GAO, W., ZHANG, Y., RAMANUJAN, D., RAMANI, K., CHEN, Y., WILLIAMS, C. B., WANG, C. C., SHIN, Y. C., ZHANG, S., ZAVATTIERI, P. D.: The status, challenges, and future of additive manufacturing in engineering. In: Computer-Aided Design 69, 2015, S. 65–89.
- [27] LUŠIĆ, M., BARABANOV, A., MORINA, D., FEUERSTEIN, F., HORNFECK, R.: Towards zero waste in additive manufacturing: a case study investigating one pressurised rapid tooling mould to ensure resource efficiency. In: Procedia CIRP, Volume 37, 2015, S. 54–58.

- [28] BALL, P.: Manufacturing Processes. In: Hollaway, L. (Hrsg.): Handbook of polymer composites for engineers. Woodhead Publishin, Abington, 1994, S. 73–98.
- [29] GALANTUCCI, L., LAVECCHIA, F., PERCOCO, G.: Study of compression properties of topologically optimized FDM made structured parts. In: CIRP Annals - Manufacturing Technology 57, 2008, S. 243–246.
- [30] NEITZEL, M., MITSCHANG, P., BREUER, U.: Handbuch Verbundwerkstoffe. Hanser, München, 2014.
- [31] Maschinenmarkt: Faserverstärkte Thermoplaste mit Entwicklungsansätzen für Class-A-fähige Oberflächen: <http://www.maschinenmarkt.vogel.de/faserverstaerkte-thermoplaste-mit-entwicklungsansaetzen-fuer-class-a-faehige-oberflaechen-a-814/>, Zugriff am 14.07.2016.
- [32] ERWEIN, G., KRAFT, W.: Beurteilung der Oberflächen von SMC-Karosserieteilen. In: Kunststoffe 81, 1991, S. 1113–1122.
- [33] BLINZLER, M., NEITZEL, M., HOECKER, F.: Oberflächentexturen bei gewebeverstärkten Thermoplasten. In: Kunststoffe 89, 1999), Nr. 11, S. 128–130.
- [34] REUTER, W.: Hochleistungs-Faser-Kunststoff-Verbunde mit Class-A-Oberflächenqualität für den Einsatz in der Fahrzeugaußenhaut. Institut für Verbundwerkstoffe, Kaiserslautern, 2002.
- [35] BYK-Gardner: Gardner Soft. Wave-Scan-plus. Bedienungsanleitung. BYK-Gardner, 1996.
- [36] BMW-Group Standard: Oberflächenklassifizierung für lackierte Kraftfahrzeuge / Surface Classification for painted motor vehicles., München, 2000.
- [37] AVK-Industrievereinigung Verstärkte Kunststoffe: Handbuch Faserverbund-Kunststoffe. Vieweg+Teubner, Wiesbaden, 2010.
- [38] EHRENSTEIN, G. W.: Faserverbundwerkstoffe. Carl Hanser, München, 2006.
- [39] GRELLMANN, W., SEIDLER, S.: Kunststoffprüfung. Carl Hanser, München, 2015.
- [40] WEINGRABER, H., ABOU-ALY, M.: Handbuch Technische Oberflächen. Friedr. Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft mbH, Braunschweig, 1989.
- [41] SEEWIG, J., WIEHR, C., GRÖGER, S.: Charakterisierung technischer Bauteiloberflächen. Stand der Oberflächenmesstechnik heute. Metrologie in der Mikro- und Nanotechnik 2011. Messprinzipien - Messgeräte - Anwendungen. 4. Fachtagung, Erlangen. In: VDI Verlag, 25. und 26. Oktober 2011.
- [42] LUŠIĆ, M., HAUSLEIDER, S., HORNFECK, R.: Flexible attachment designs for rapid tooling: A contribution to greater design freedom within pin-type moulding, spatially curved CFRP panels. In: Procedia CIRP, Volume 50, 2016, S. 396–401.
- [43] KLEUKER, S.: Grundkurs Datenbankentwicklung - Von der Anforderungsanalyse zur komplexen Datenbankabfrage. Springer Vieweg, Wiesbaden, 2013.
- [44] LENGSELD, H.: Faserverbundwerkstoffe: Prepregs und ihre Verarbeitung. Hanser, München, 2014.
- [45] STEINER, R.: Grundkurs Relationale Datenbanken: Einführung in die Praxis der Datenbankentwicklung für Ausbildung, Studium und IT-Beruf. Vieweg+Teubner, Wiesbaden, 2009.
- [46] STUDER, T.: Relationale Datenbanken: Von den theoretischen Grundlagen zu Anwendungen mit PostgreSQL. Springer, Berlin, Heidelberg, 2016.
- [47] FRÖHLICH, L.: PostgreSQL 9: Praxishandbuch für Administratoren und Entwickler. Hanser, München, 2012.
- [48] LUŠIĆ, M., KATONA, S., HORNFECK, R.: Compensating deviations during flexible pin-type moulding of spatially curved CFRP by the use of 3D-surface detection. In: Procedia CIRP Volume 50, 2016, S. 808–812.
- [49] TEUTSCH, C.: Model-based Analysis and Evaluation of Point Sets from Optical 3D Laser Scanners. Shaker Verlag, Aachen, 2007.
- [50] KATONA, S., KOCH, M., WARTZACK, S.: Reverse Engineering – Prozess, Technologien und Anwendungsfälle. In: Rieg F, Hackenschmidt R, Editors. 16. Bayreuther 3D-Konstrukteurstag, Lehrstuhl für Konstruktionslehre und CAD, Bayreuth, 2014.
- [51] BESL, P.: Active, Optical Range Image Sensors. In: (Hrsg.): In: Machine Vision and Applications, S. 127–152.
- [52] KATONA, S., LUŠIĆ, M., KOCH, M., WARTZACK, S.: Integrating optical 3D measurement techniques in pipe bending: a model-based approach minimizing waste by deriving real functional design behaviour. In: Procedia CIRP, Volume 50, 2016, S. 808–812.