

Institut für Füge- und
Schweißtechnik



Deutsches Zentrum für
Luft- und Raumfahrt e.V.
In der Helmholtz Gemeinschaft



Studienarbeit

Werkzeugintegrierte Binderaktivierung beim Preforming komplexer CFK-Strukturen

Verfasser:

Mathieu Bouchan
Matrikelnr. 4114912
Im Studiengang Maschinenbau
In der Studienrichtung Luft- und Raumfahrt

Prüfer:

Prof. Dr.-Ing. Martin Wiedemann

Betreuer:

Dipl.-Ing Jan Philip Ringert (DLR)
Dr.-Ing Robert Kaps (DLR)

Braunschweig, 31.01.2012

Veröffentlichungen über den Inhalt sind nur mit schriftlicher Genehmigung des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt zugelassen. Die Ergebnisse, Meinungen, und Schlüsse dieser Studienarbeit sind nicht notwendigerweise die des DLR.

Eidesstattliche Erklärung

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und nur unter Verwendung der angegebenen Literatur angefertigt habe.

Braunschweig, 31.01.2012

.....

Mathieu Bouchan

Kurzfassung

Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, einen Vergleich von verschiedenen Erwärmungsverfahren, die in der Industrie für das Vorformen von Kohlenstofffasern Halbzeuge benutzt werden können. Als Ergebnis des Vergleichs soll ein neues Preformkonzept entwickelt werden. Im Rahmen des vom DLR geführten Projekts AZIMUT sollen mehrere Spante verschiedener Geometrie gebaut werden. Die Hauptaufgabe des zu entwickelnden Konzepts ist es, eine schnelle Drapierung und Fixierung von verschiedenen Lagen Kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffes auf einem gebogenen Preformwerkzeug zu ermöglichen.

Bei der Entwicklung der Konzepte soll die Möglichkeit der Integration in ein voll automatisiertes System berücksichtigt werden. Erforderlich macht dies die Anforderungen der neuen Generation von Spanten, die in naher Zukunft beispielweise für den Airbus A350 angefertigt werden.

Abstract

The aim of this study is to compare the different available technologies which can be used to preform new Carbon-Fiber-Reinforced Plastics (CFRP) component part. In order to prove the results in a real application, a new concept for preforming will be developed. In the context of the project AZIMUT, we have to produce several frames which are based on different geometries. The aim of this concept is to drape and fixate as fast as possible the CFRP over curved moulds.

This concept has to be thought in the way to the incorporation in a full automatic system. The automation of the preforming process is required by the increasing employment of composite material in the Aerospace industry. In the next couple of year, it is planned to mass-produce these new frame style, especially on the chain of the Airbus A350.

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis.....	4
Tabellenverzeichnis.....	4
Abbildungsverzeichnis.....	5
1. Einleitung.....	7
2. Motivation, Geometrie des Spants.....	8
3. Stand der Technik	11
3.1) Faserverbundwerkstoffe, Fasern und Matrix.....	11
3.2) Herstellungsverfahren	12
3.3) Der Binder	14
3.4) Thermische Aktivierungsverfahren	16
3.4.1) Thermofusion und Thermobonding	16
3.4.2) Infrarotverfahren.....	17
3.4.3) Laserstrahlung	18
3.4.4) Ultraschallverfahren und Hochfrequenzverfahren	19
3.4.5) Induktionsverfahren.....	20
4. Untersuchung und Entwicklung verschiedener Konzepte.....	21
4.1) Wahl des entsprechenden Aktivierungsverfahrens	21
4.2) Vorversuche und Auswahl der Infrarot Technik.....	24
4.2.1) Versuch mit keramischen Infrarotstrahlern.....	24
4.2.2) Versuche mit Rohrstrahlern.....	29
4.2.3) Wärmeleitfähigkeit durch CFK und Folie	37
4.3) Optimierte Heizeinheit.....	42
4.4) Konzepte für eine werkzeugintegrierte Binderaktivierung Einheit	45
4.4.1) Beheiztes Drapierschwert (Variante 1a).....	53
4.4.2) Indupreform (Variante 2b).....	57
5. Zusammenfassung und Ausblick.....	61
Literaturverzeichnis	63
Anhang.....	I

Abkürzungsverzeichnis

°C:	Celsius Grad
A:	Ampere
AZIMUT:	Automatisierung Zukunftsweisender Industrieller Methoden Und Technologien für CFK Rümpfe
AZUR:	Automatisierung von Zukünftiger Rumpfkonzepete
CFK:	Kohlenstofffaserverstärkte Kunststoffe
DLR:	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
Ghz:	Giga Herz
IR:	Infrarot
MDF:	Mitteldichte Holzfaserverplatte
mm:	Millimeter
µm:	Mikrometer
Prepreg:	Pre-impregnateg
RTM:	Resin Transfert Moulding
UD:	Unidirektional
V:	Volt
W:	Watt

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Maßnahmen der Preform.....	9
Tabelle 2 Eigenschaften und Vor- und Nachteile des Aktivierungsverfahren	21
Tabelle 3 Anordnung der Versuche der Homogenität des Strahlungsfeld	33
Tabelle 4 Ergebnisse der Versuche der Homogenität des Strahlungsfeld.....	34
Tabelle 5 Eigenschaften der Komponente des Modells	39
Tabelle 6 Vor- und Nachteile der verschiedenen Optionen	52

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 CAD-Darstellung einer Türumgebung.....	7
Abbildung 2: Unfolding Preform.....	10
Abbildung 3: Gerades Preform	10
Abbildung 4 Prinzipbild eines Faserverbundwerkstoff	11
Abbildung 5 Einteilung den verschiedenen Textil-Halbzeugen, [Erm04, S.222]	13
Abbildung 6 Prinzipbild der Thermofusionsheizung.....	16
Abbildung 7 Prinzipbild der Thermobondingsheizung.....	17
Abbildung 8 Wellenlängenbereich des thermischen Infrarot, [Mic12]	18
Abbildung 9 Anwendung der Laserstrahlung für eine Schweißung	19
Abbildung 10 Kapazitiver Generator von der Firma Plustherm Point [Bru05, S.14]..	20
Abbildung 11 Prinzipsbild des Induktionsverfahren [Kon12].....	20
Abbildung 12 Module aus 64 Einzelstrahler.....	24
Abbildung 13 Keramischer Infrarotstrahler	24
Abbildung 14 Strahlungsleistungen der keramischen Strahlern	25
Abbildung 15 Strahlertemperaturen der keramischen Strahlern	25
Abbildung 16 Versuchsaufbau.....	26
Abbildung 17 Positionierung des Strahlers über dem Aufbau.....	26
Abbildung 18 Erwärmung eines CFK-Materials durch keramische Infrarotstrahler...	27
Abbildung 19 Schematische Darstellung des Strahlungswinkels.....	30
Abbildung 20 Verteilung der Messpunkte	30
Abbildung 21 Erwärmung in Querrichtung, bei 60% Leistung.....	30
Abbildung 22 Schematische Montage der Versuche mit Rohrstrahler.....	31
Abbildung 23 Gesamter Aufbau und die dazugehörigen Zubehöre	32
Abbildung 24 Graphischen Auswertung des Versuch 4.....	34
Abbildung 25 Zustand des IR-Kamera Displays während Erwärmung unter IR.....	36
Abbildung 26 Montagaaufbau des Wärmeleitungsversuchs	38
Abbildung 27 Modelaufbau für die Analyse der Wärmeübertragung	38
Abbildung 28 Vereinfachung des Modells zu einer Stab konstanter Querschnitt.....	40
Abbildung 29 CAD-Konstruktion der Heizeinheit über dem Preformwerkzeug	43
Abbildung 30 Prinzipschema der Lösung 1a	46
Abbildung 31 Draufsicht des Prinzipschemas der Lösung 1a.....	46
Abbildung 32 Prinzipschema der Lösung 1b	47

Abbildung 33 Prinzipschema der Lösung 2a	49
Abbildung 34 Prinzipschema der Lösung 2b	50
Abbildung 35 Aufbau des beheizten Schwerts	53
Abbildung 36 Beschädigte Fasern.....	55
Abbildung 37 Rauchentwicklung während Drapierung	55
Abbildung 38 Drapierung und Fixierung mit beheizten Schwert	56
Abbildung 39 Indupreform ohne Pressplatte.....	57
Abbildung 40 Indupreform mit Pressplatte.....	57
Abbildung 41 Prinzip der Bewegung der provisorische Pressplatte.....	59
Abbildung 42 Auftreten von Falten im Werkzeugbereich	60
Abbildung 43 Aussehen des Indupreformsprototyps	60

1. Einleitung

Heutzutage müssen die Flugzeuge immer mehr Anforderungen genügen. Die zunehmende Verwendung von Faserverbundwerkstoffe erfüllt diese Anforderungen der Hinblick auf ein niedriges Gewicht. Deswegen wird die Forschung in diesem Bereich immer wichtiger. Das Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) leistet im Gebiet des Kohlenstofffaserverstärktem Kunststoffe (CFK) einen bedeutenden Beitrag der heutigen Forschung. Das Projekt AZUR-AZIMUT wird durch der Bundesdeutschen Luftfahrtforderung und durch Airbus finanziert. Kern der Forschung ist die Entwicklung neuer Rumpfkonzeppte für Kurz- und Mittelstreckenflugzeugen, wie beispielsweise der Airbus A320 oder der noch zu entwickelnde A350. Das DLR in Braunschweig befasst sich mit der Türumgebungsstruktur, die aus Spanten und Stringer besteht. Derzeit existiert noch kein automatisiertes Verfahren, welches die erforderlichen Stückzahlen abdeckt.

Zwei Spante sind im Abbildung 1 in schwarz deutlich zu erkennen.

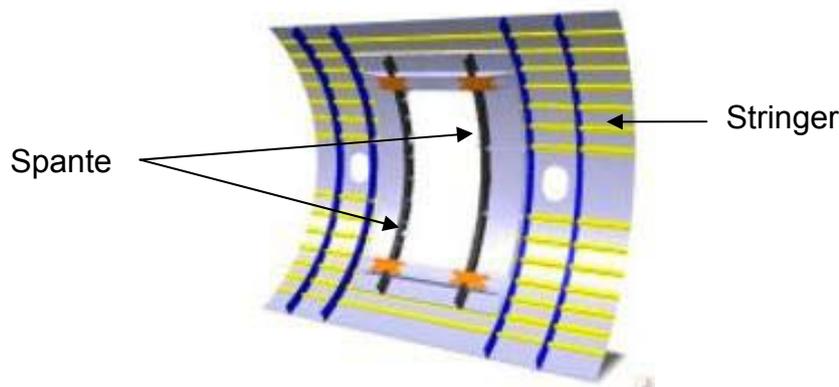


Abbildung 1 CAD-Darstellung einer Türumgebung

2. Motivation, Geometrie des Spants

In einem vorherigen Teil des Projekts wurden im DLR vom Team des Projekts AZUR drei kompletten Preforms hergestellt, die später extern infiltriert wurden. Beim Preforming wurden verschiedene, neu entwickelte Umformverfahren evaluiert und bestätigt. Dabei wurden herkömmliche thermische Verfahren zur Binderaktivierung angewendet. Mit Hilfe von Drapierreisen und Heizluftföhnen wurden so ca. 4 Arbeitstagen für die Herstellung eines Preforms benötigt. Jeder dieser Preforms besteht aus 21 Lagen CFK-Material. Die visuellen und mechanischen Tests der Bauteile zeigten eine gute Qualität. Auf Grund des hohen manuellen Einsatzes bedarf es der Nachbereitung der Zeit- und Kostenprobleme. Als weiteres Ergebnis wurde herausgefunden, dass die Aktivierung des Binders direkt nach der Drapierung des Materials stattfinden muss, um mögliche Rückstelleffekte zu verhindern.

In der Luftfahrtindustrie besteht die neue Methode für die Herstellung von neuen CFK-Bauteile aus zwei Phasen. In erste Linie muss ein trockenes Halbzeug auf einem Preformwerkzeug gelegt werden. Das ist die *Preforming* Phase. Jede Lage wird aufeinander drapiert. Dabei werden die Fasern an der Geometrie des Werkzeugs verformt. Die gesamten fertigen Lagen bilden das Preform. Dann soll das Preform in einem Injektionswerkzeug mit Harz durchtränkt werden. Das ist die sogenannte *Injektionsphase*. Am Ende der Injektionsphase ist das Bauteil aus CFK fertig. Zwischen die beiden Phasen soll das Preform transportiert und gegebenenfalls gelagert werden. Während Transport und Lagerung darf keine Nachverscherung auftreten. Daher kommt die Wichtigkeit der Binder. Eine Fixierung von jeder Lage des Preforms ist erforderlich. Das ist der Rolle der Binder. Wie im Folgenden tiefer erwähnt sollen die Binder durch Erwärmung aktiviert werden. Ein Ziel des zu entwickelnden Konzepts ist es, die Drapierung- und Aktivierungsphase zu koppeln, um die Zwischenzeit zu verringern.

Weil die Anzahl der Herstellung von Spante in naher Zukunft steigen wird, muss die Frage der hohen benötigten Zeit aufgelöst werden. Dafür muss das zu entwickelnden Verfahren viel schneller als die bisherige Methode durchführen.

Die Möglichkeit einer Automatisierung dieses Konzept soll berücksichtigt werden. Damit wird zum Einen die Reproduzierbarkeit des Prozess erhöht und zum Anderen kann die Gesamtprozesszeit zum Maximum verringern werden.

Diese Studienarbeit wird im Rahmen des Projekts AZIMUT durchgeführt. Aus diesem Grund wurde der Fokus der Arbeit während der 3 Monate mehrfach angepasst. Die Hauptänderung war die zusätzliche Konstruktion einer Infrarotserwärmungsbrücke. Außerdem mussten bei mehreren Entscheidungen Kosten- und Zeitaspekte berücksichtigt werden.

Im Rahmen des Projekts AZIMUT werden verschiedenen Preforms hergestellt werden. Es gibt 3 Geometrien: die geraden Spante, die gebogenen Spante, und die *unfolding* Spante, die nur aus einen Flansch bestehen. Jedes unfolding Preform bildet eine Form in L (siehe Abbildung 2). Die geraden und gebogenen Preforms bilden eine Form in U (siehe Abbildung 3). Die zwei kleinen Seiten sind *Flansche* (free flange und outer flange) genannt. Die große obere Seite ist *WEB* genannt.

In der Tabelle 1 sind die Anzahl dieser Preform und die dazugehörigen Maßnahmen zusammengefasst. Wegen der großen Anzahl der Preform muss eine Automatisierung des Prozess nachgedacht werden.

	Gerade		Unfolding		Gebogene
	Groß	Klein	Groß	Klein	
Anzahl der Preform	13	13	6	6	6
Flansche Höhe (mm)	60	50	70	60	40
WEB Breite (mm)	180	127	230	230	180
Länge (mm)	2000	1600	605	560	2000

Tabelle 1: Maßnahmen der Preform

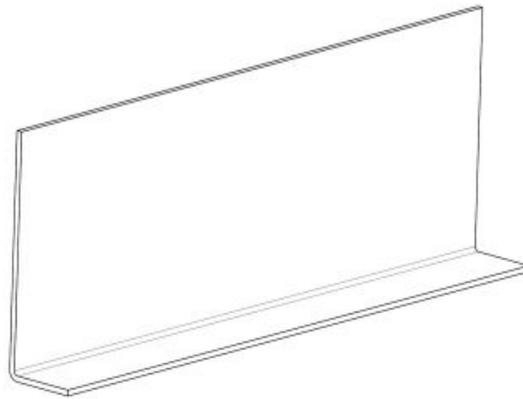


Abbildung 2: Unfolding Preform

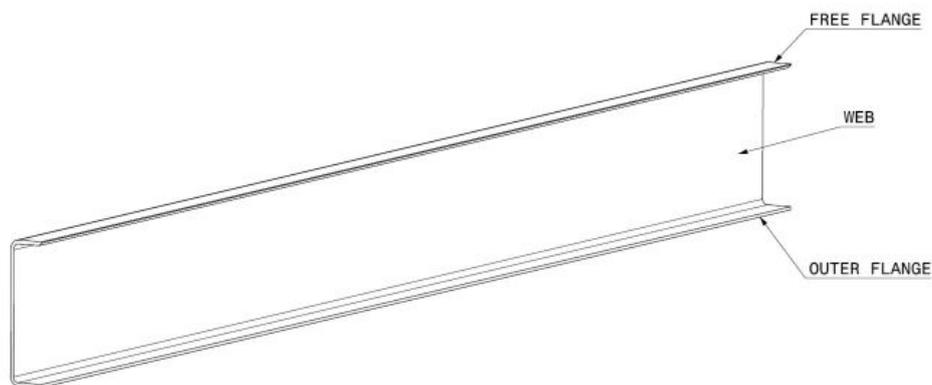


Abbildung 3: Gerades Preform

Die Konstruktion der Erwärmungsbrücke wird für die geraden Spante ausgelegt. Das Schwert wird nur für gebogene Preforms benötigt. Bei den geraden Geometrien wird das Material nicht verzerrt, weil es keine mehrdimensionale Umformung gibt.

3. Stand der Technik

3.1) Faserverbundwerkstoffe, Fasern und Matrix

Faserverbundkunststoffe in der Luftfahrtindustrie bestehen prinzipiell aus 2 Komponenten: Fasern und Matrix.

Die Kohlenstofffasern sind entscheidend für die Festigkeit des Bauteils. Im Gegenteil zu Metallen sind Fasern anisotrop und tragen Lasten im fertigen Composite hauptsächlich in Zugrichtung der Fasern. Aus diesem Grund ist die Positionierung der Fasern einen entscheidender Punkt für die gesamte Qualität des Endbauteils. Die Matrix wird mit den Fasern während des Infusionsverfahrens gemischt. Ihre Aufgabe ist prinzipiell die mechanischen Belastungen auf die Fasern zu übertragen und den Werkstoff zu verbinden und zu schützen. Das neue Material besitzt neue verbesserte Eigenschaften, die die Eigenschaften der Einzelkomponenten übertreffen. In der Luftfahrtindustrie wird eine Epoxidharzmatrix benutzt eingesetzt. Diese gehört zu den duroplastischen Polymeren [Gor11, S.6].

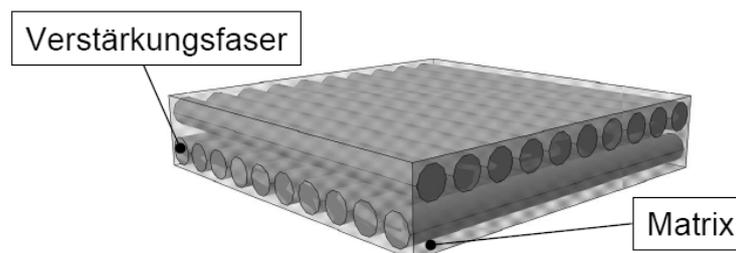


Abbildung 4 Prinzipbild eines Faserverbundwerkstoff

3.2) Herstellungsverfahren

Bei der Herstellung von endlosfaserverstärkten Bauteilen sind derzeit zwei verfahren relevant zu berücksichtigen. Zu unterscheiden sind diese nach dem Zeitpunkt der Verschmelzung der beiden Komponenten.

Zum Einen gibt es das *Prepreg* Verfahren. Prepreg ist die englische Abkürzung für *pre-impregnated*. Bei diesem Verfahren wird ein mit Harz vorimprägniertes Halbzeug verarbeitet [Rey06]. Anschließend wird das Harz im Offen aktiviert. Die Aushärtung erfolgt meistens unter hohe Temperatur und Druck während mehrerer Stunden in einen Autoklaven. Als entscheidende Nachteile der Prepreg-Technologie findet man die kostintensive Lagerung bei -18°C [Herb, S.20], um eine vorzeitige Vernetzung zu verhindern. Außerdem kann die Verarbeitung vom Harz bei Hautkontakt gesundheitsschädlich sein. Ein weiterer Nachteil ist die Aufbewahrungszeit des Harzes, die weniger als ein Jahr beträgt.

Zum Anderen wird trockenes Halbzeug verarbeitet [Herb11, S.17]. Dabei werden Preforms aus trockenen Halbzeugen aufgebaut. Diese werden erst später mit Harz getränkt. Die Fasern werden untereinander anordnen als Gewebe, Gelege sowie Geflechte. Die Abbildung 5 zeigt verschiedene Arten textiler Halbzeuge. Beim Projekt AZIMUT werden nur Gelegen genutzt. Bei diesem werden verschiedene Faserlagen übereinander gelegt und mit Rovings angebunden. Dadurch liegen die Fasern immer ebenerweise. Beim unidirektional liegen die gesamte Fasern in eine Richtung. Beim Biax (respektive Triax) Material besteht das Material aus zwei (respektive drei) Ebenen.

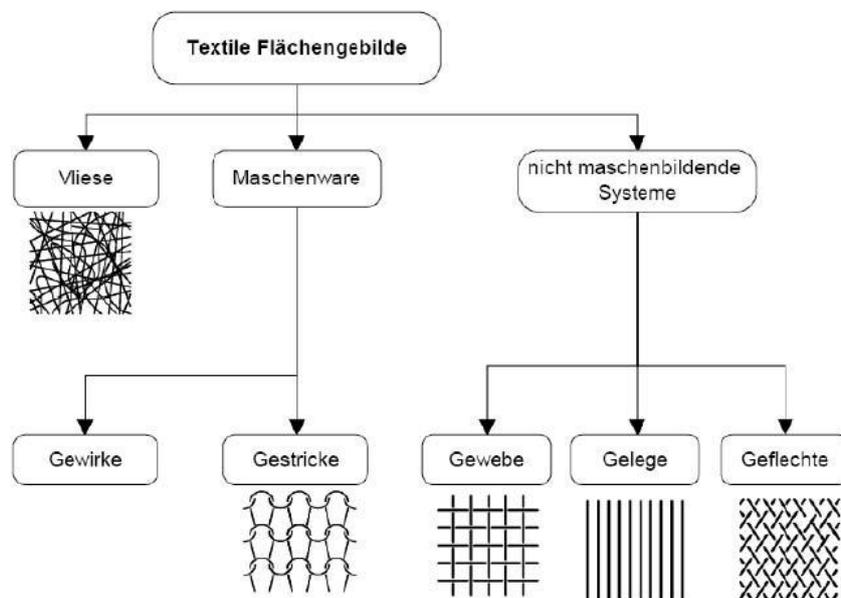


Abbildung 5 Einteilung den verschiedenen Textil-Halbzeugen, [Erm04, S.222]

Der Herstellung eines Bauteil mit trockenen Halbzeugen erfolgt in 2 Phasen: Preforming und Infusion.

Beim *Preforming* wird das Halbzeug in der Bauteilform auf einem Drapierwerkzeug abgelegt. Bei mehrfach gekrümmter Geometrie muss das Halbzeug drapiert werden. Die Schwierigkeit dieser Phase ist das Erreichen der erforderlichen Reproduzierbarkeitsanforderungen der Faserausrichtungen im Bauteil. Nach der Herstellung bleibt der Preform fragil, sodass er vorsichtig transportiert und gelagert werden muss.

Bei der *Infusion* wird der Preform in einem Infiltrationswerkzeug mit Harz durchtränkt. Ein übliches Verfahren mit geschlossenem Werkzeug ist das RTM-Verfahren [Herb11, S.27]. Hier gibt es noch ein Risiko, die Fasern zu verschieben. Aus diesem Grund werden die Lagen beim Preforming miteinander durch Binder verbunden. Für die Binderaktivierung während des Aufbaus der Preform stehen verschiedenen Verfahren zur Verfügung.

3.3) Der Binder

Binder dienen als Haftvermittler und bestehen aus thermoplastischen Werkstoffen [Erm04]. Die Thermoplaste haben einen großen Vorteil gegenüber dem Duroplast. Das Schmelzverfahren kann mehrfach wiederholt werden, angenommen dass die Binder nicht überhitzt werden. Es existiert 2 Kategorien von Binder: Bindervlies und Bindergranulat [Nei04].

Die Bindervliese werden zwischen zwei Lagen positioniert. Sie können an eine exakte Stelle eingebracht werden. Durch dieses lokale Einbringen kann die Gesamtmasse des Preforms reduziert werden, da die Durchtränkung des Laminats nur gering beeinflusst wird. Auch das Flächengewicht des Preforms kann bei diesem Fall gut kontrolliert werden.

Das Bindergranulat findet man in Form von Pulver oder Spray. Sie können entweder schon bei der Herstellung des Halbzeugs ins Material eingebracht oder manuell während der Fertigung appliziert werden. Einigen Textilien werden vom Hersteller schon mit integrierten Bindern geliefert.

Außerdem gibt es weitere Binder, bei dem der feuchtigkeitsvernetzenden Binder auf Polyurethanbasis [Hab09]. Dieses Verfahren ist auf eine Reaktion zwischen vorvernetzten Urethanbindungen und reaktionsfähigen Isocyanatgruppen bei Feuchtigkeit zurückzuführen. Es gibt bei diesem Mechanismus einen entscheidenden Nachteil: die lange Reaktionszeit. Die Aushärtung kann bis zu vier Tagen dauern. Es ist nachzuvollziehen, dass dieses Verfahren nicht für Bauteile mehreren Lagen nutzbar ist.

Die Thermoplastikklebstoffsstücken sind oft schon bereits auf dem Material. Bei Raumtemperatur haben sie festen Aggregatzustand und sehen wie kleine weiße Sandkörner aus. In diesem Zustand haben sie keine Klebeeigenschaften. Sie müssen aktiviert werden, durch Erbringung von Energie, bzw. Wärme. Während der Erwärmung schmelzen die Binder und gehen zwischen den Faserlagen, dank der Lösung der Kettenmoleküle [Sch07]. Danach sollen sie abgekühlt werden, sodass die Kettenmoleküle wieder fest sein. Damit bekommt der Preform einen festen Zustand. Im Normalfall findet sich der Schmelzbereich zwischen 80°C und 200°C [Ort04]. Für eine gute Haftfestigkeit der Lagen miteinander sollen die Binder genug lang in Schmelzzustand bleiben und kompaktiert werden, damit die

Verbindung der Lager stattfinden kann. Eine Übertritt der Temperatur über 150°C kann den Binder beschädigen [Bon09]. In diesem Fall beginnt eine Zersetzung der Binder. Aus diesem Grund kann die Reformierung der Kettenmoleküle danach nicht komplett sein. Das Bauteil kann daher unbrauchbar werden.

3.4) Thermische Aktivierungsverfahren

Hier nur die thermischen Aktivierungsverfahren relevant sind. Zur Aktivierung der Binder stehen verschiedenen thermischen Verfahren schon zur Verfügung. Sie sind diejenigen, die die Wärme in ein Material einbringen können. Die Wärmezufuhr geschieht durch die Umwandlung von der Energie in Wärme. Im Folgenden werden einigen gängige Verfahren vorgestellt: Thermofusion, Thermobonding, Infrarotverfahren, Laserstrahlung, Ultraschallverfahren, Hochfrequenzverfahren und Induktionsverfahren. Dann wird die einschlägigste Methode zur Aktivierung der thermoplastischen Binder herausgestellt.

3.4.1) Thermofusion und Thermobonding

Das Thermofusion ist ein einfaches Verfahren, bei dem das Material durch eine Quelle erwärmt und dann abgekühlt wird. Wärmequellen können beispielweise Heißluftföhn, Heizkörper, oder anderen Heizgeräte sein. Dieses Verfahren basiert auf dem Konvektionsphänomen. Dadurch dass das Verfahren berührungslos ist, wird eine Beschädigung des Materials vermieden. Ein anderer Vorteil ist die Regelbarkeit der Temperatur. Damit ist eine Überschreitung der zulässigen Temperatur unmöglich. Allerdings benötigt man eine lange Aufheizzeit, um die gewünschte Temperatur zu erreichen. Bei Thermofusion sind allen sichtbaren Geometrien einfach durch die Verwendung kleiner Düsen. So kann dieses Verfahren auch für komplexe Preformgeometrien verwendet werden.

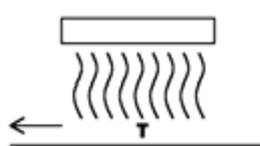


Abbildung 6 Prinzipbild der Thermofusionsheizung

Das Thermobondingverfahren ist eine Kombination vom Thermofusionsverfahren und einem zusätzlichen Druck, damit die Binder ins Material besser verteilt werden. Ein Drapiereisen kann für dieses erfahrungswerte Verfahren benutzt werden. Anderen Möglichkeiten sind beheizten Zylindern durch elektrischen Widerstand oder heißen Flüssigkeiten. Aufgrund der erforderlichen Kompaktierung ist es unmöglich, komplexe Geometrie zu erwärmen. Durch hohe Kompaktierung des Bauteils ist die Wärmestromdichte gering. Bei flächigen und kleinen Preforms wird Thermobonding gewählt.

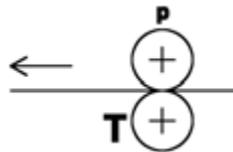


Abbildung 7 Prinzipbild der Thermobondungsheizung

3.4.2) Infrarotsverfahren

Infrarotstrahlung befindet sich im Wellenlängenbereich zwischen $7,8 \cdot 10^{-7}$ m und 10^{-3} m (780 nm und 1 mm). Das nahe Infrarot besteht aus Wellenlänge zwischen $0,78 \mu\text{m}$ und $1,4 \mu\text{m}$ (auch so genannte IR-A) und zwischen $1,4 \mu\text{m}$ und $3 \mu\text{m}$, so genannte IR-B. Von $3 \mu\text{m}$ bis $50 \mu\text{m}$ findet man das mittelwellige Infrarot und von $50 \mu\text{m}$ bis $1000 \mu\text{m}$, das ferne Infrarot. Mittleres und Fernes Infrarot werden auch IR-C genannt [DIN31]. Der technische nutzbare Bereich liegt zwischen $0,8 \mu\text{m}$ und $6 \mu\text{m}$. Das Infrarotsverfahren ist ein stoffloses und berührungsloses Verfahren, welches auf elektromagnetischen Wellen basiert. Um die Energie zu erbringen, kann man Keramik-, Halogen-, oder Quarzstrahler verwenden. Ein großer Vorteil je nach gewähltem Strahler ist der schnelle Austrag der Energie nach der Einschaltung. Eine hohe Temperatur steht innerhalb einer kurzen Zeit zur Verfügung. Um die beste Erwärmungskapazität zu erreichen, muss das Absorptionsvermögen des zu erwärmenden Materials immer berücksichtigt werden [Hab09].

Das Infrarotsverfahren ist auch mit einigen Nachteilen verbunden. Da sich die Umgebungstemperatur nicht erwärmt, ist die Temperatur im Material schwierig zu kontrollieren. Je größer die Entfernung zwischen Material und Strahler, desto ungenauer ist die Temperaturverteilung. Dadurch wird der Energiebedarf vergrößert. Endlich erwärmen die Infrarotstrahler nur die Oberfläche des Materials. Bei dickem Material dauert die Erwärmung in der Tiefenrichtung lange und wird durch Konvektion durchgeführt.

Bei unserer Anwendung werden jeweils nur Einzellagen mit einer geringen Dicken erwärmt. Dadurch ist das Problem der Erwärmung in Tiefenrichtung nicht relevant.

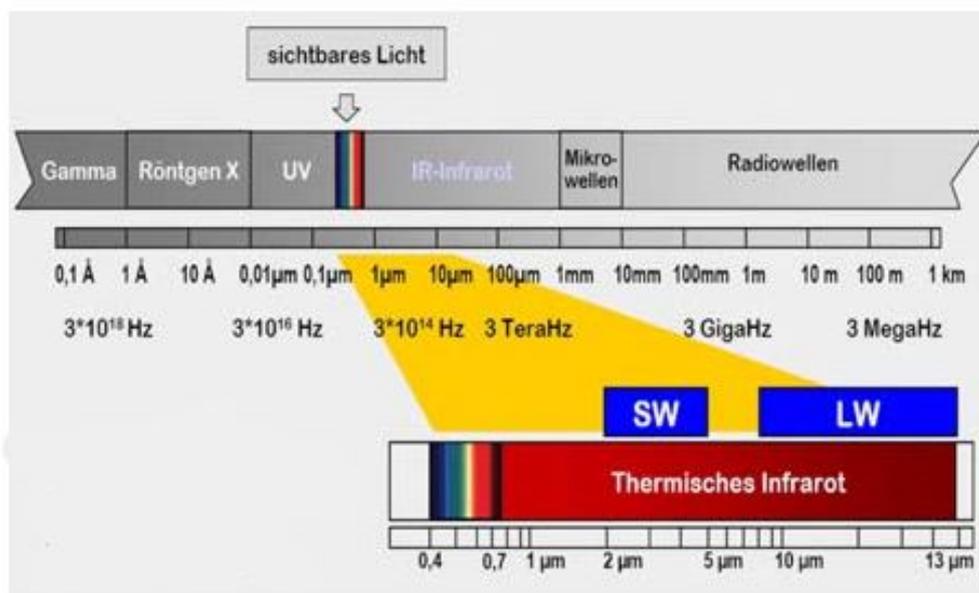


Abbildung 8 Wellenlängebereich des thermischen Infrarot, [Mic12]

SW: Short wave

LW: Long wave

3.4.3) Laserstrahlung

Das Prinzip des Lasers ist die Bündelung eines Lichtstrahls. Je gebündelter der Lichtstrahl ist, desto größer ist die Energiedichte. Das Ziel ist es, alle Elektronen in einem engen Leitungsstrahl zu bündeln. Wegen des kleinen Durchmessers des Strahles ermöglicht es das Verfahren sehr genaue Flächen zu erhitzen [Baec03]. Die Effizienz des berührungslosen Verfahrens hängt stark vom Absorptionsgrad des Materials ab. Dadurch wird das Laserverfahren nicht für alle Materialien geeignet. Die entscheidenden Nachteile dieses Verfahrens sind die hohe Anwendung- und

Aufstellungskosten. Des Weiteren ist eine homogene Erwärmung sehr schwierig zu erreichen. Einige Anwendungsbeispiele der Laserstrahlung sind das Laserschweißen, das Laserschneiden oder das Bohren mittels Laserstrahl. Letztere Verfahren sind für viele Materialarte geeignet.

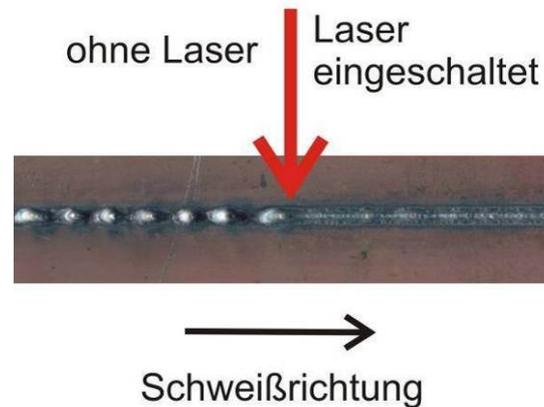


Abbildung 9 Anwendung der Laserstrahlung für eine Schweißung

3.4.4) Ultraschallverfahren und Hochfrequenzverfahren

Bei Ultraschall handelt es sich um Frequenzen oberhalb des menschlichen Hörfrequenzbereichs. Der Ultraschallebereich findet sich zwischen 16 KHz und 1 GHz [DIN20]. Darüber beginnt der Bereich der Hyperschalle. Die Erwärmung eines Materials durch Ultraschall erfolgt durch die Nutzung des piezoelektrischen Effekts: Die durch den Hochfrequenzgenerator gesendete Hochfrequenz wird in eine mechanische Schwingung transformiert. Diese Schwingung wird ins Material mit Hilfe einer Sonotrode weitergeleitet. Dieses Verfahren kann bei vielen unterschiedlichen eingesetzt werden und benötigt keine hohe Leistung.

Im Gegensatz zu allen anderen Strahlungsverfahren erwärmt sich das Material beim Hochfrequenzverfahren vom Bauteilinneren. Unter Nutzung des Kapazitiveffekts und mit Hilfe eines kapazitiven Generators können Kunststoffe und Hölzer in einem Frequenzbereich zwischen 1 MHz und 1 GHz beheizt werden. Dieses Prinzip basiert auf der Orientierung der polaren Moleküle in einem elektrischen Feld. Die Bewegungen der Moleküle verursachen Reibungserwärmung im Material [Bru05]. Wegen der hohen Produktionsgeschwindigkeit und Qualität, aber auf Grund der kostenintensiven Generatoren wird das Hochfrequenzverfahren nur für spezielle Anwendungen benutzt.



Abbildung 10 Kapazitiver Generator von der Firma Plustherm Point [Bru05, S.14]

3.4.5) Induktionsverfahren

Das schon von zwei Jahrhunderten entdeckte Verfahren ermöglicht viele verschiedene Verwendungen. Es wird z.B. zum Härten, Glühen, Schmelzen, Löten oder zum Schweißen genutzt. Die Funktionsweise des Induktionsverfahrens ist wie folgt: Eine Spule wird von einem Wechselstrom durchflossen, wodurch ein elektromagnetisches Feld entsteht [Bru05, S.9]. Es wird Wechselstrom in einem Bereich von 10kHz bis 100kHz genutzt. Wenn die Spule nah an einem leitfähigen Material positioniert wird, tritt im Material ein Wirbelstrom auf. Aufgrund des Joule-Effekts kann das Material bis zur Schmelze erwärmt werden. Aus diesem Grund hängt der Wärmewirkungsgrad stark vom elektrischen Widerstand des Materials ab. Das Prinzip ist in Abbildung 11 verdeutlicht.

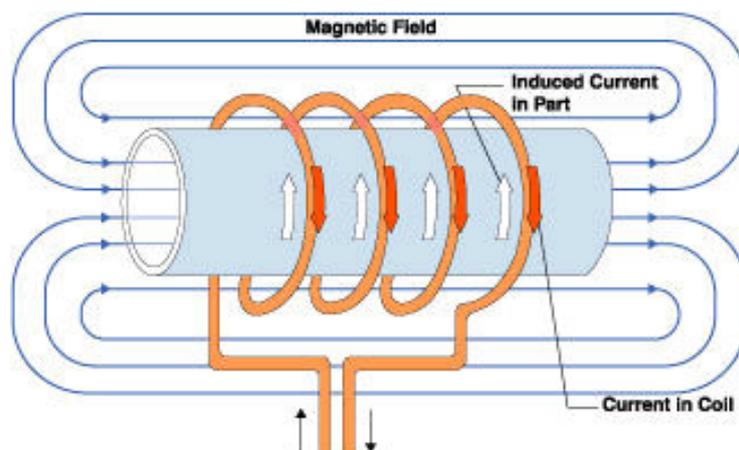


Abbildung 11 Prinzipbild des Induktionsverfahrens [Kon12]

Die Wärme wird bei diesem Verfahren direkt im Material ohne Übertragungsmittel erzeugt. Dadurch ergibt sich eine hohe potentielle Energieeffizienz. Weitere Vorteile sind die Möglichkeit lokal zu erwärmen, sowie Wärme direkt ins Innere des Bauteils zu bringen.

4. Untersuchung und Entwicklung verschiedener Konzepte

4.1) Wahl des entsprechenden Aktivierungsverfahrens

Zur Wahl eines geeigneten Verfahrens zur Binderaktivierung werden die Vor- und Nachteile vorgestellter thermischer Aktivierungsverfahren gegenüber gestellt. Diese sind in der nachstehenden Tabelle zusammengefasst.

Aktivierungs-Verfahren	Wärmeübertragung	Vorteile	Nachteile
Thermofusion	Erzwungene Konvektion	<ul style="list-style-type: none"> • Günstig • Berührungslos • Komplexe Geometrie denkbar 	<ul style="list-style-type: none"> • Lange Zeit benötigt
Thermobonding	Wärmeleitung	<ul style="list-style-type: none"> • Günstig • Kompaktierung und Erwärmung gleichzeitig 	<ul style="list-style-type: none"> • Lange Zeit benötigt • Nur einfache Geometrie möglich
Infrarot	Wärmestrahlung (geringe Teil mit Konvektion)	<ul style="list-style-type: none"> • Günstig wegen Energiesparung • Berührungslos • Schnelle Aufheizphase 	<ul style="list-style-type: none"> • Materialabhängig • Nur für flachen Material
Laser	Wärmestrahlung	<ul style="list-style-type: none"> • Punktgenaues Aufheizen • Berührungslos 	<ul style="list-style-type: none"> • Absorption nur an der Oberfläche • Hohe Betriebskosten • Materialabhängig
Ultraschall	Reibung durch mechanische Schwingung	<ul style="list-style-type: none"> • Günstig • Kurz Aufheizphase 	<ul style="list-style-type: none"> • Auftreten von Materialbeschädigungen
Hochfrequenz	Reibung	<ul style="list-style-type: none"> • Erwärmung im Inneren des Bauteils • Kurz Aufheizphase 	<ul style="list-style-type: none"> • Nur eingeschränkt nutzbar
Induktion	Wirbelstrom (Joule Effekt)	<ul style="list-style-type: none"> • Berührungslos • Günstig • Kurz Aufheizphase 	<ul style="list-style-type: none"> • Für unidirektionale Faserverstärkung nicht möglich

Tabelle 2 Eigenschaften und Vor- und Nachteile des Aktivierungsverfahren (angelehnt an [Nei04])

Einige der obenstehenden Verfahren werden im Rahmen der Studienarbeit direkt als ungeeignet identifiziert. Dazu zählen Laser-, Ultraschall und Hochfrequenzverfahren. Das Laserverfahren hat für eine industrielle Anwendung bei großen Preformgeometrien zu hohe Betriebskosten. Das Ultraschallverfahren ist wegen der möglichen Faserbeschädigungen nicht nutzbar. Mögliche Faserbrüche beeinträchtigen die mechanischen Eigenschaften des Bauteils unvorhersehbar. Der spezialisierte Anwendungsbereich des Hochfrequenzverfahrens macht es ungeeignet für das vorliegende Szenario des Preformings und findet deswegen keine weitere Berücksichtigung. An diesem Punkt bleiben die Thermofusion-, Thermobonding-, Infrarot- und Induktionsverfahren zur weitergehenden Betrachtung.

Zur Aktivierung des Binders beim Preforming eines neuen Bauteils aus CFK muss eine Temperatur von mindestens 120°C innerhalb einer bestimmten Zeit erreicht werden. Der Binder braucht Zeit, um aufzuschmelzen und dadurch eine Verbindung zwischen zwei Lagen Fasermaterials herzustellen. Wenn die Heizzeit zu kurz ist, wird der Binder zwischen den Lagen nicht gut verteilt. Vorversuche haben gezeigt, dass eine Heizdauer von 15 bis 30 Sekunden die gewünschte Aufteilung erzielt. Unter anderem muss die Erwärmung über dem gesamten Preform gleichbleibend sein werden, um eine hohe Qualität des Endbauteils und eine hohe Reproduzierbarkeit des Prozesses zu erreichen. Daraus wird das Thermofusionsverfahren ausgeschlossen, da eine homogene Erwärmung nur schwierig zu realisieren ist.

Als zweiter Entscheidungspunkt muss ein berührungslos und stofflos Verfahren gewählt werden, weil die Fasern nicht in ihre Lage beeinflusst oder gar beschädigt werden dürfen. Da das Thermobonding nicht kontaktlos ist, scheidet dieses Verfahren aus.

Die beschriebenen Anforderungen werden für das Infrarot- und das Induktionsverfahren erfüllt.

Weil die Preforms des Zielbauteils zu mehr als 40% aus unidirektionalem Fasermaterial bestehen, kann das Induktionsverfahren für die Binderaktivierung dieser Preforms nicht angewendet werden.

Es bleibt das Infrarotverfahren. Bei diesem Verfahren sind zwei Nachteile zu berücksichtigen: Die Materialabhängigkeit und die geringe Geometrieanpassungsfähigkeit. Bei den vorliegenden Preform bilden die drei zu

beheizenden Flächen (Flanschen und WEB) ebenen Geometrien. Außerdem ist eine Erwärmung in Tiefenrichtung nicht nötig, weil das Bauteil nach jeder Einzellage beheizt und kompaktiert wird. Außerdem hat das CFK Material einen großen Absorptionsgrad im Wellenbereich der Infrarotstrahlung.

Aus diesen Gründen fällt die Wahl des Verfahrens zur Erwärmung der Kohlenstofffasern auf Infrarotstrahler.

4.2) Vorversuche und Auswahl der Infrarot Technik

Es existieren viele unterschiedliche Techniken für die Erwärmung eines Bauteils durch Infrarot. Je nach der gewünschten Anwendung kann man entweder Halogen-, Keramik-, Glas-, oder Quarzstrahler verwenden. Die Infrarot Technik ist schon seit vielen Jahren bekannt. Bereits im Jahr 1996 hat am DLR ein Projekt über Thermoformprozesse zur Verarbeitung von abbaubarer Faserverbundwerkstoffen stattgefunden, in dem eine Heizeinheit aus keramischen Infrarotstrahler genutzt wurde. Dabei handelt es sich um zwei Module aus je 64 Einzelstrahlern [Nic96, S.21]. Diese Strahler wurden von der Firma *Elstein* geliefert und sind derzeit noch lieferbar.

4.2.1) Versuch mit keramischen Infrarotstrahlern

Es wird in diesem Kapitel Versuche mit den keramischen Strahler gemacht. Beim DLR stehen die zwei Module zur Verfügung (Abbildung 12). Das ist eine gute Gelegenheit zu prüfen, ob diese Strahlerart für unsere Anwendung geeignet wird. Dazu wurde Einzelstrahler untersucht. Jeder Strahler (siehe Abbildung 13) wird mit einer Spannung von 230 V und einer Leistung von 650 W betrieben. Für den Versuch wurde eine Wärmeisulationskiste gebaut, weil sich das Gehäuse der betriebenen Strahler während der Heizphase stark erwärmt.



Abbildung 12 Module aus 64 Einzelstrahler

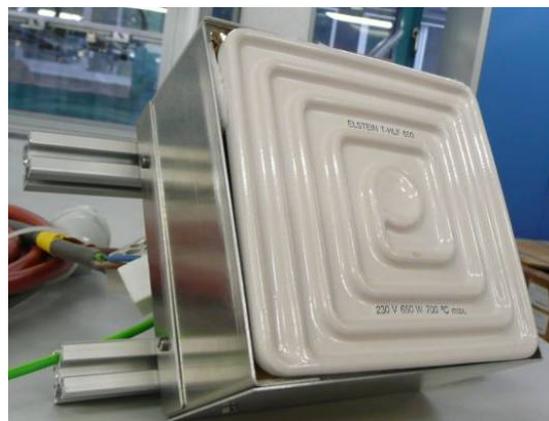


Abbildung 13 Keramischer Infrarotstrahler

Das Ziel des Versuchs ist es, erste Erfahrungen bei der Anwendung des keramischen Strahlers zur Erwärmung des CFK-Materials zu sammeln. Unbekannte sind hier der Gradient der Aufheiz- und Abkühlungsphase, die passende Entfernung vom Material, der Verlauf der Temperatur am Strahler, an der Oberfläche des Materials und an der Binderstelle.

Das Datenblatt (siehe Anhang, Seiten III und IV) der Firma Elstein gibt einige technischen Daten für die Anwendung des keramischen Infrarotstrahlers. Eine wichtige Information ist die Strahlungsleistung als Funktion der Zeit. Der Verlauf ist in der Abbildung 14 dargestellt.

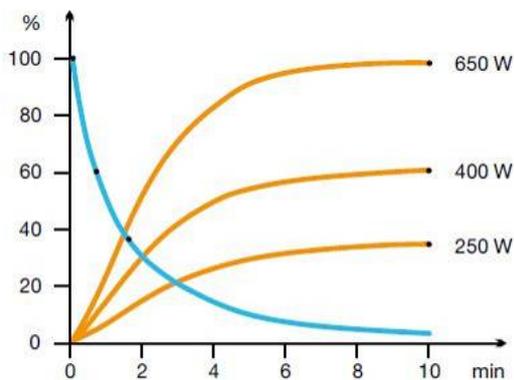


Abbildung 14 Strahlungsleistungen der keramischen Strahlern. Aufheizung, Abkühlung

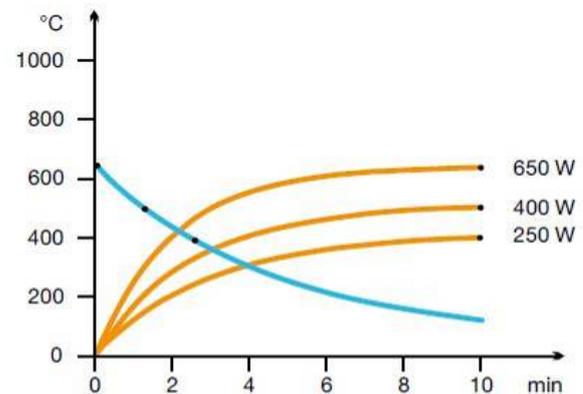


Abbildung 15 Strahlertemperaturen der keramischen Strahlern. Aufheizung, Abkühlung

Es ist deutlich zu sehen, dass die Dauer bis zum Erreichen der Maximalleistung für unsere Anwendung zu hoch ist. Abbildung 15 zeigt, dass der Strahler seine maximale Temperatur nach ca. 6 Minuten erreicht. Allerdings wird eine Temperatur von 120°C schon nach ca. einer halben Minute erreicht, wobei der Strahler nur mit 20% der maximalen Leistung strahlt. Daher ist das Ziel des ersten Versuchs zu überprüfen, ob die geforderten 120°C in Bauteil innerhalb von 30 Sekunde erreichbar sind.

Der Versuchsaufbau ist im Folgenden beschreibt und in der Abbildung 16 dargestellt. Auf einem Werkzeug aus Uriol werden zwei Lagen eines Triax Material abgelegt. Das Material wird mit einer Trennfolie (blau) und dann mit einer Vakuumfolie (farblos) abgedeckt. Die Vakuumfolie ist mit Hilfe von Siegelkitt (Dichtung) am Werkzeug fixiert. Der gesamte Aufbau wird durch Unterdruck kompaktiert. Um die

Temperaturen zu messen werden zwei Temperatursensoren integriert. Einer liegt an der Oberfläche des Aufbaus, das heißt direkt unter die Trennfolie. Der zweite Sensor wird zwischen den Lagen positioniert, dort wo sich der Binder befindet.



Abbildung 16 Versuchsaufbau

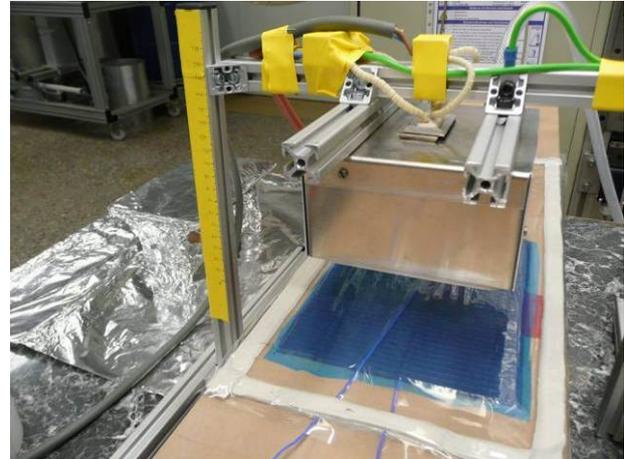


Abbildung 17 Positionierung des Strahlers über dem Aufbau

Als Temperatursensoren werden zwei Thermoelementen von Typ K genutzt. Mit Hilfe eines Speichergeräts wird die Temperatur von maximal 4 Sensoren bis je einer Messung pro Sekunde gespeichert und ausschließlich in eine Excel Datei importiert. Ein „Thermoelementstrahler“ wird benutzt, um die Temperatur direkt an dem Strahler messen zu können. Bei diesem Strahlertyp wird ein Thermoelement im Gehäuse integriert.

In der obenstehenden Abbildung 17 ist die Positionierung des Strahlers über dem Material dargestellt. Die gelbe Skalierung ermöglicht die untere Fläche des Strahlers an der gewünschten Entfernung vom Material genau zu fixieren. Das Heizungsgerät wird bei diesem Versuch 50 mm vom Material entfernt.

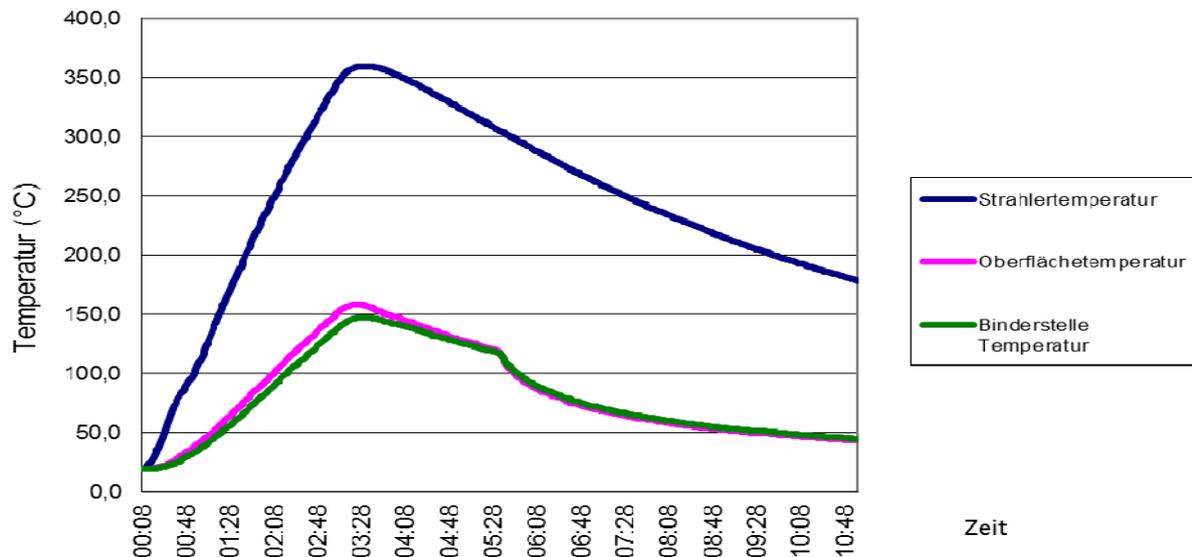


Abbildung 18 Erwärmung eines CFK-Materials durch keramische Infrarotstrahler

Nach Erreichen von 120°C an der Binderstelle wird der Infrarotstrahler ausgeschaltet. Dies war nach 2 Minuten und 45 Sekunden der Fall. Nach dieser Zeit ist der Strahler 350°C warm. Das ist ungefähr die Hälfte der maximalen Temperatur. Das bedeutet, dass die Temperatur mit einem Gradient von ca. $1,3^{\circ}\text{C}$ pro Sekunde linear steigt. Im Graph ist deutlich zu erkennen, dass das Fasermaterial die Wärme gut leitet, da eine Wärmeänderung von maximal 10 Grad zwischen die Oberfläche und die Binderstelle zu erkennen ist. Weil das Infrarot nur die Oberfläche des Bauteils erwärmt, wird der Binder nur durch Wärmeleitung erwärmt. Aus Grund der erforderlichen Zeit von 2,75 Minute erfüllen die keramischen Infrarotstrahler die Zeitanforderung nicht.

Die Abkühlungsphase des Strahlers erfolgt fast linear. Deswegen kühlt sich das Material im ersten Schritt auch linear. Bei der Versuchszeit von 5,5 Minute wird der Strahler vom Aufbau entfernt, wodurch der deutliche Temperaturabfall zu erklären ist. Davor bleibt nach Abschalten des Strahlers eine Erwärmung durch Konvektion aufgrund der hohen Temperatur des Strahlergehäuses. Der Abkühlungskoeffizient hängt stark von den Eigenschaften der Vakuum- und Trennfolie ab (siehe Abschnitt 4.2.3).

Zwischen der Erwärmungsphase zweier Einzellagen braucht das DLR-Team je nach Zuschnitt ungefähr 18 Minuten, um das Material vorzubereiten, manuell abzulegen und zu drapieren. Nach dieser Zeit hat der Strahler eine Temperatur von 100°C . Das heißt, dass die Erwärmung bei der nächsten Lage ähnlich lang wie beim ersten Aufheizen dauern wird. Es tritt keine Beschleunigung auf. Da die Kohlenstofffasern

gute thermische Leiter sind, wird eine hohe Leistung des Strahlers benötigt, welches beim keramischen Infrarotstrahler nach der vorliegende Zeit nicht dem Fall ist. Die einzige Lösung, um den Strahler warm zu halten ist es, der Strahler angeschaltet lassen. Das erscheint nach ökologischen und ökonomischen Aspekten ungünstig.

Im Folgenden werden die Anlage- und Betriebskosten betrachtet. Sie werden auf Basis des großen Spants abgeschätzt.

Weil die Strahler eine viereckige Form mit einer Kantenlänge von 125 mm haben, benötigt man zur Abdeckung der Beispielgeometrie für den WEB- und die Flanschbereich je 15 Strahler. Insgesamt sind für die große Preformsgeometrie 45 Strahler nötig. Die erforderliche elektrische Leistung berechnet sich zu:

$$P_{\text{erf}} = 45 \times 650 = 29250 \text{ W.} \quad (1)$$

Bei Aussteuerung mit 230 V ergibt sich damit eine Stromstärke zu:

$$I_{\text{erf}} = \frac{P_{\text{erf}}}{U} = \frac{29250}{230} = 127 \text{ A.} \quad (2)$$

Aufgrund der geringen Spannung wird eine hohe Stromstärke benötigt. Nach einem Kostenvoranschlag der benötigten Komponenten bei *Elstein* wurde erkannt, dass die Anlagekosten das verfügbare Budget übersteigen. Außerdem war die ausgegebene Lieferzeit nicht mit dem Projektplan zu vereinen.

Aus diesen Gründen wurden die keramischen Infrarotstrahler zur Erwärmung der Bauteile ausgeschlossen.

4.2.2) Versuche mit Rohrstrahlern

Eine andere Möglichkeit eine ebene Fläche aufzuheizen, ist die Nutzung von Rohrstrahlern aus Quarzglas. Grundlage für die Voruntersuchungen waren zwei kurzwellige Zwillingsrohrstrahler der Firma *Heraeus*. Sie bestehen aus einer beheizten Länge von 340 mm. Ein Spezialgoldreflektor steigert die Effizienz der Strahler durch einseitige Reflektion der Strahlung. Jeder Strahler hat eine Nennleistung von 1200 W. Dafür wird der passende Leistungssteller Heratron (R) Typ CB1x25 verwendet. Das Gerät erlaubt eine stufenlose Steuerung der Leistung von 0 bis 100%.

Dank vorheriger Versuche am DLR stehen schon einige Parameter des Strahlers fest. Die schnellste Erwärmung durch einen Strahler für eine flache CFK Probe wird bei 70% Leistung und 30 mm Entfernung zwischen Strahler und Materialoberfläche erreicht. Bei unserem Versuch unterscheidet sich in den Anforderungen, weil eine bestimmte Zeit und nicht die minimale untersucht wird. Im ersten Schritt werden die vorhandenen Werte überprüft. Dann müssen verschiedene Parameter ermittelt werden, die ein homogenes Strahlungsfeld ermöglichen. Dies ist notwendig, weil die Temperatur zum Aufschmelzen des Binders in einem engen Bereich von 120°C bis 150°C liegt. Auf Grund der Größe der Preforms, werden dazu mehrere Strahler benötigt.

Zunächst muss der Strahlungswinkel abgeschätzt werden. Die Firma Heraeus liefert keinen genauen Daten über diesen Winkel, sondern nur einen ungefähren Wert von 60 Grad. Viele externe Parameter wie Raumtemperatur oder Luftzug können den effektiven Strahlungswinkel beeinflussen. Deshalb muss der Strahlungsbereich geschlossen sein. Eine Möglichkeit diesen Winkel abzuschätzen ist es, bei bekanntem Abstand zwischen Material und Strahler (Abbildung 19, B), die Verteilung der Temperatur in Querrichtung zu messen. Dafür werden drei Temperatursensoren benötigt. Der Winkel α ermittelt sich aus der Beziehung von B und E. Der Sensor 1 liegt direkt unten dem Strahler. Der zweite Sensor ist 40 mm vom Ersten versetzt. Der dritte Sensor liegt 80 mm vom Ersten entfernt. Die Verteilung der Sensoren ist in der Abbildung 20 zu sehen.

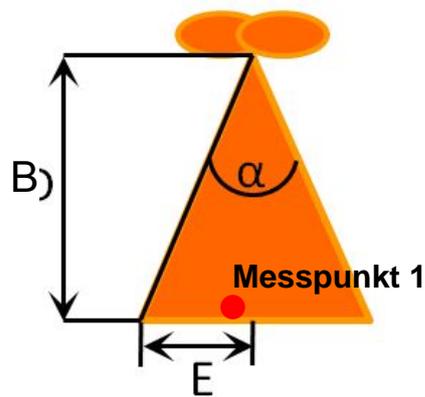


Abbildung 19 Schematische Darstellung des Strahlungswinkels

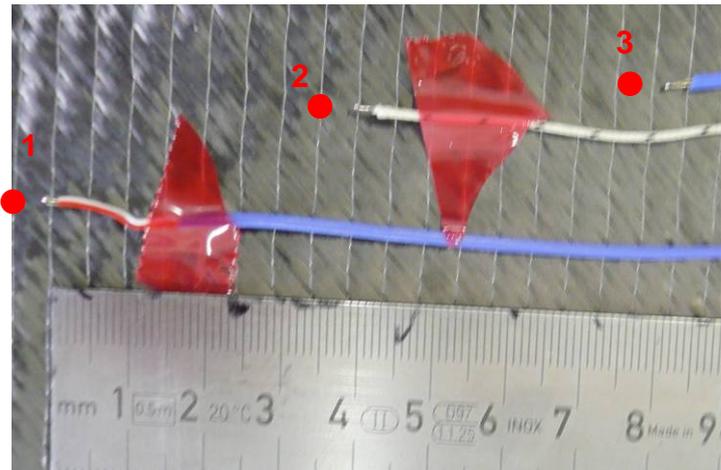


Abbildung 20 Verteilung der Messpunkte

Die Thermoelemente liegen auf einer Lage Triax Material und direkt unter der Trenn- und Vakuumfolie. Der Abstand B zwischen Strahler und Material beträgt 70 mm. Der Strahler wird solange 60% der Leistung betrieben, bis die Temperatur des Sensors 1 150°C erreicht. Aufgezeichnet wurden ebenfalls die Temperaturen der Sensoren 1, 2 und 3. Die Ergebnisse sind in Abbildung 21 dargestellt.

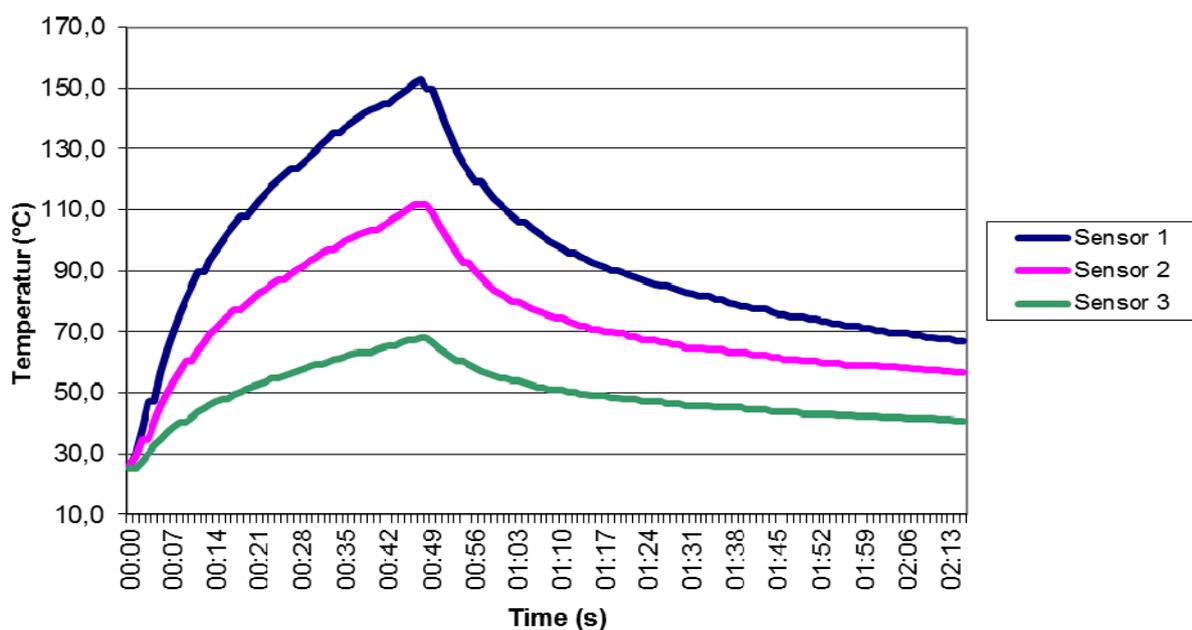


Abbildung 21 Erwärmung in Querrichtung, bei 60% Leistung

Es ist deutlich zu erkennen, dass schon Sensor 2 zu weit entfernt vom Strahler ist, weil die Temperatur nicht die geforderte Temperatur von mind. 120°C erreicht. Das heisst, dass der Abstand E maximal deutlich geringer als 40 mm sein muss. Im Folgenden werden die Rechnung mit E gleich 30 mm durchgeführt werden. Außerdem wird deutlich, dass die Aufheizphase mit fast 50 Sekunde zu lang dauert. Dank dieser Ergebnissen kann man den Strahlungswinkel abschätzen:

$$\tan\left(\frac{\alpha}{2}\right) = \frac{E}{B},$$

$$\alpha = 2 \cdot \arctan\left(\frac{E}{B}\right) = 47^\circ. \quad (3)$$

Ausschließend werden die ermittelten Werte mit zwei Strahlern validiert. Verschiedenen Abstand (A) zwischen den Strahlern wurden getestet und jeweils, die Temperaturen direkt unten dem Strahler und zwischen den Strahlern mit Hilfe der Temperatursensoren gemessen. Der Aufbau ist in Abbildung 22 schematisch dargestellt.

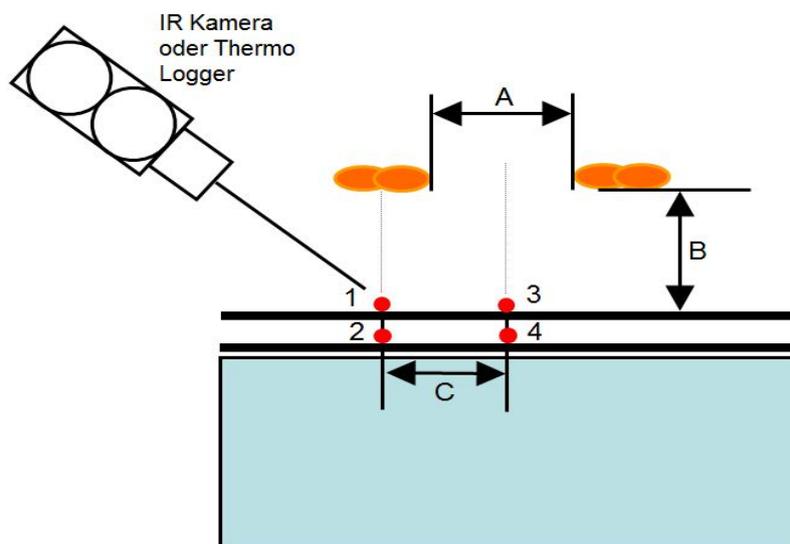


Abbildung 22 Schematische Montage der Versuche mit Rohrstrahler

Das Uriol Werkzeug ist in blau dargestellt, darüber liegen in Schwarz die Lagen des Triax CFK-Materials. In orange sind die beiden Zwillingrohrstrahler darüber angeordnet. Die Messstellen der verschiedenen Temperatursensoren sind in rot markiert. Die Trenn- und Vakuumfolie sind aus Gründen der Übersichtlichkeit nicht abgebildet. Als Vakuumfolie wird bei diesem Versuch eine Silikonfolie genutzt. Sie wird auf einem rechtwinkligen Rahmen aus Aluminiumprofilen fixiert. Der Rahmen kann luftdicht an einem Tisch mittels Schraubzwingen fixiert werden. Die Luft

unterhalb der Silikonmembran wird von der Mitte des Tisches abgesaugt. Der Aufbau kann als „Vakuumentisch“ bezeichnet werden. Der Abstand B wurde zu konstant 50 mm gewählt. Die Temperatur an der Oberfläche der Vakuumentisch wurde kontinuierlich mit Hilfe einer Infrarotkamera oder mit Hilfe eines Laserthermologgers gemessen.

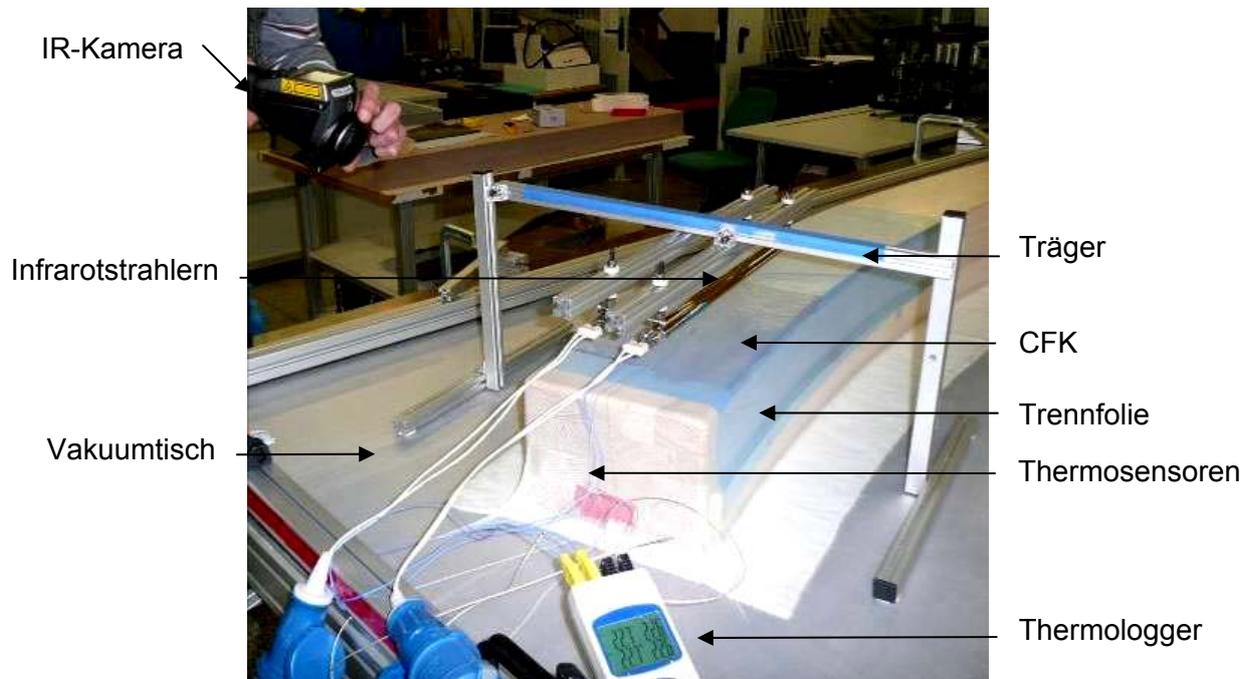


Abbildung 23 Gesamter Aufbau und die dazugehörigen Zubehöre

Die maximale Entfernung (A) zwischen den beiden Strahlern kann durch die nachstehende Formel berechnet werden:

$$A \leq 2E ,$$

$$A \leq 2 \cdot \tan\left(\frac{\alpha}{2}\right) \cdot B \leq 43,5 \text{ mm.} \quad (4)$$

Der Sensor 1 befindet sich direkt unter dem Strahler. Bei 150°C am Sensor 1 wird der Strahler abgeschaltet. Sensor 2 befindet sich unter einer Lage Fasermaterial, genau an der Binderstelle. Die Sensoren 3 und 4 werden exakt zwischen den beiden Strahlern positioniert, also mit dem Abstand C (siehe Abbildung 22). Bei der Berechnung von C

$$C = \frac{A}{2} + r \quad (5)$$

muss die Breite der Strahler berücksichtigt werden, wobei r der halben Breite eines Strahlers entspricht.

Nach Angaben des Herstellers ist ein Strahler 23 mm breit.

Es gilt die Gleichung,

$$C = B \cdot \tan\left(\frac{\alpha}{2}\right) + r = 33,2 \text{ mm.} \quad (6)$$

Weil mehr als ein Parameter gewählt werden muss, werden mehrere Versuche durchgeführt. Bei konstantem Abstand B werden zunächst A und C verändert, um die optimale Erwärmung zu parametrieren. Nach Gleichung (4) muss A kleiner als 43,5 mm sein. Es werden Fälle mit 30 und 40 mm Abstand getestet.

Die Leistung muss ebenfalls fein justiert werden, um eine homogene Strahlungsdichtung in Querrichtung zu erreichen. Die verschiedenen Parameter der Versuche sind in der Tabelle 3 zusammengefasst. Der Abstand C verändert sich in Abhängigkeit zu A.

	Leistung	Abstand A	Abstand C
Versuch 1	60 %	40 mm	31,5 mm
Versuch 2	70 %	40 mm	31,5 mm
Versuch 3	60 %	30 mm	26,5 mm
Versuch 4	70 %	30 mm	26,5 mm

Tabelle 3 Anordnung der Versuche der Homogenität des Strahlungsfeld

Als Beispiel sind die Ergebnisse des Versuchs 4 in der nachfolgenden Abbildung 24 dargestellt. Die anderen Graphen werden in Anhang (Seiten I und II) dargestellt.

Tabelle 4 fasst die Ergebnisse zusammen.

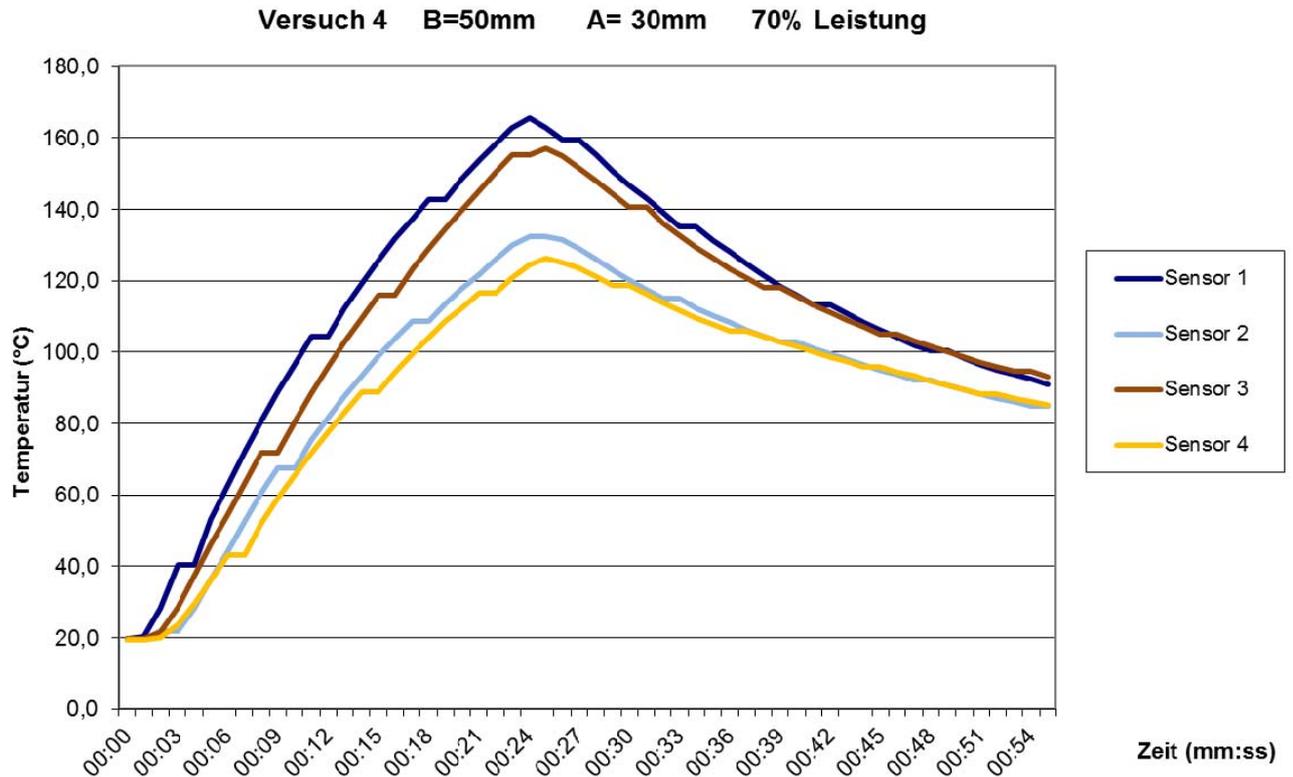


Abbildung 24 Graphischen Auswertung des Versuch 4

	Zeit	Sensor 1	Sensor 2	Sensor 3	Sensor 4
Versuch 1 A = 40mm 60 %	26 s	153 °C	141 °C	136 °C	132 °C
Versuch 2 A = 40mm 70%	23 s	152 °C	110 °C	136 °C	110 °C
Versuch 3 A = 30mm 60%	27 s	154 °C	129 °C	136 °C	110 °C
Versuch 4 A = 30mm 70%	23 s	153 °C	121 °C	145 °C	116 °C

Tabelle 4 Ergebnisse der Versuche der Homogenität des Strahlungsfeld

Die Tabelle liefert verschiedene interessante Beobachtungen. Der Einfluss der Leistung und der Entfernung der Strahler können separat untersucht werden.

Erstens ist bei 60% Leistung die Homogenität der Temperatur zwischen der Oberfläche und der Binderstelle besser als bei 70% Leistung. Erklärt werden kann dies durch die längere Dauer der Bestrahlung, wodurch die Wärme besser durch das Material leitet. Es ist in der Tabelle zu erkennen, dass der Binder bis auf 130°C aufgeheizt wird. Bei 70% Leistung dauert die Erwärmung 4 oder 5 Sekunden kürzer, allerdings erwärmt sich der Binder hier nur auf 120°C. Eine Aufheizphase bei 60% ist vorzuziehen.

Zweitens hat der Abstand A einen Einfluss auf die Homogenität der Temperaturverteilung in Querrichtung. Bei einem Abstand von 40 mm erkennt man einen Temperaturunterschied zwischen den Temperaturen der Sensoren 1 und 3 von ca. 20°C. Bei 30 mm beträgt der Unterschied lediglich 10°C.

Es ist zu beachten, dass einige Fehlerquellen auftreten können. So beeinflussen bei den Versuchen zum Beispiel die Raumtemperatur, der Luftzustand oder die Luftfeuchtigkeit die Ergebnisse. Dennoch wurden keine Reproduzierbarkeitsuntersuchungen durchgeführt, da der Einfluss gegenüber den variierten Parametern gering ist und im Fall einer Prozessautomatisierung mit stabilen Umgebungsfaktoren gerechnet werden kann.

Die besten Ergebnisse zeigen sich im Versuch 3. Die Temperaturverteilung ist nicht nur in Querrichtung, sondern auch in Tiefenrichtung homogen. Die Homogenität in Querrichtung wird mit dem Abstand $A = 30$ mm geregelt. Die Homogenität in Tiefenrichtung wird durch die vergleichsweise niedrige Leistungsstufe von 60% ermöglicht. Bei diesen Parametern wird eine Aufheizphase von 25 bis 30 Sekunden benötigt.

Die Thermokamera liefert bei allen Versuchen wertvollen Erkenntnissen bezüglich der Temperatur der Silikonfolie. Ab Temperaturen von ca. 220°C kann die Folie beschädigt werden. Die Kamera gibt in Echtzeit die Temperatur mit einer Genauigkeit 1 Grad wieder. Sie ermöglicht es auch Bilder zu speichern. Abbildung 25 zeigt eine Darstellung des Strahlungsfeldes.

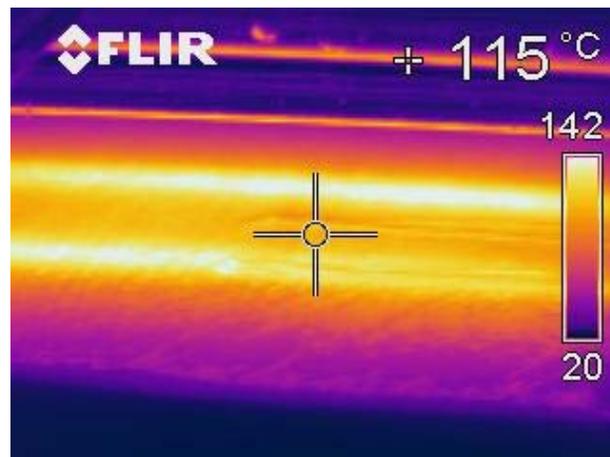


Abbildung 25 Zustand des IR-Kamera Displays während Erwärmung unter IR

Während der Versuche wurde es bemerkt, dass die Temperatur der Folie nie 130°C übertraf hat. Dies ist mit einem geringer Absorptionsgrad zu erklären. Die Infrarotstrahlen dringen also leicht durch die Folie und werden vom Fasermaterial absorbiert. Die auftretende Erwärmung der Folie resultiert hauptsächlich aus der Wärmeleitung vom Fasermaterial. Damit ist eine Überhitzung durch Bestrahlung von IR auszuschließen. Solange die Temperatur des Fasermaterials unter der kritischen Temperatur der Folie liegt, ist die Folie nicht gefährdet. Um die Wärmeeintrag mittels Infrarotquelle bis zur Binderschicht zu studieren, bedarf es eines geeigneten, theoretischen Modells, welches den Versuchsaufbau widerspiegelt.

4.2.3) Wärmeleitungsfähigkeit durch CFK und Folie

Bei den vorliegenden Versuchen wird mit Hilfe einer IR-Kamera erkennbar, dass die Temperatur an der Oberfläche der Silikonfolie geringer als die Temperatur an der Oberfläche des Materials ist. Die Effizienz der Erwärmung eines Körpers ist durch seinen Absorptionsgrad geregelt. Wenn der Absorptionsgrad des Materials im Bereich des A-Infrarots (0,78 bis 1,4 μm) gering ist, wird das Material für Infrarotstrahlung durchlässig werden. Wenn der Absorptionsgrad in dem gleichen Wellenlängenbereich groß ist, erwärmt das Material stark.

Die Effizienz der Erwärmung durch Infrarot bei den Komponenten des Aufbaus wird im Folgenden abgeschätzt. Der Versuch besteht aus zwei Teilen:

Erstens wird die Silikonfolie an der freien Luft mit Infrarot bestrahlt. Die Temperatur wird mittels Thermokameras und Infrarot-Thermometer gemessen, um die Genauigkeit der Messung zu erhöhen. Nach einer Zeit von 25 Sekunden wird eine Temperatur von 90°C erreicht. Dies bestätigt, dass die Silikonfolie die Strahlung nur in geringem Maße absorbiert, was für unser Herstellungsverfahren von Preforms ein großer Vorteil ist. Bei Infrarotheizung erwärmt sich die für die Kompaktierung genutzte Folie dementsprechend wesentlich weniger als das CFK Material.

Im zweiten Teil wird ein kompletter Aufbau (Abbildung 26) aufgebaut. Dabei ändert sich der Abstand A zu 20 mm. Das Ziel dieses Versuchs ist es, die Temperatur an der Oberfläche der Folie (Sensor 3) zu bestimmen, um eine Beziehung zwischen den Temperaturen der Binder (Sensor 2) und der Oberflächentemperatur des Materials (Sensor 1) zu erhalten. Wenn der Binder die Schmelztemperatur von 120°C erreicht, hat die Oberfläche der Folie eine Temperatur von 140°C und das Material an der Oberfläche eine Temperatur von 145°C. Zusätzlich wird mittels IR-Kamera eine Temperatur an der Oberfläche der Folie bis zu 120°C gemessen. Die gemessene Temperatur am Sensor 1 ist größer als die Temperatur am Sensor 1. Daraus lässt sich vermuten, dass ein Großteil der Erwärmung der Silikonfolie aus der Wärmeleitung des Fasermaterials resultiert. Es wird ausgenommen, dass der Unterschied von 20°C (140°C-120°C) durch die Selbsterwärmung des Thermoelements zu erklären ist.

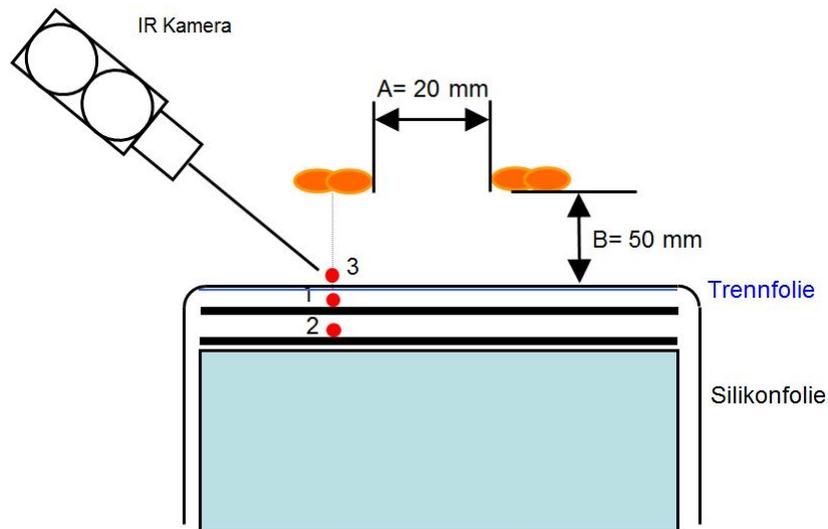


Abbildung 26 Montagaufbau des Wärmeleitungsversuchs

Um das Verhalten der Wärmeübertragung bei der verschiedenen Komponente des Aufbaus zu untersuchen, wird im Folgenden ein vereinfachtes Modell entwickelt. Dadurch kann die Temperatur des Binders theoretisch aus mehreren Parametern berechnet werden. Dabei sind zwei verschiedene Fälle zu berücksichtigen. Einerseits muss bei bekannter Oberflächentemperatur die Bindertemperatur ermittelt werden. Andererseits muss unter gleichen Bedingungen die Zeit berechnet werden, die zur Erwärmung der Binderstelle auf 120°C benötigt wird.

Diese Temperaturen können analytisch bestimmt werden. Die nachstehende Abbildung 27 stellt das Modell dar.

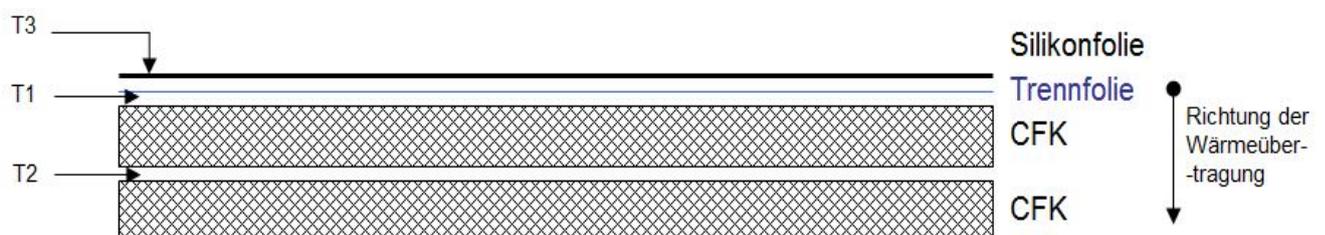


Abbildung 27 Modelaufbau für die Analyse der Wärmeübertragung

T1 ist die Temperatur an der Oberfläche des Materials, unter den Silikon- und Trennfolie. T2 ist die Temperatur unter der ersten Lage. T3 ist die Temperatur an der Oberfläche der Silikonfolie.

Die Eigenschaften der unterschiedlichen Materialien sind in der Tabelle 5 zusammengefasst.

Eigenschaften	Einheit	Silikonfolie	Triax CFK - Gelege	Trennfolie
Wärmeleitwert	λ W / (m.K)	0,24	17	/
Dichte	ρ g / cm ²	1,17	1,78	0,004375
Dicke	s mm	0,5	0,582	0,025

Tabelle 5 Eigenschaften der Komponente des Modells

Weil die Trennfolie sehr dünn ist, kann sie nicht berücksichtigt werden. Im Folgenden werden daher die Silikonfolie und das Triax CFK berücksichtigt.

Die Wärmeleitungsgleichung lautet:

$$\rho \cdot C_p \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \cdot \nabla^2 T + \dot{Q}_v, \quad [\text{Bae98}] \quad (7)$$

wobei T als die Temperatur, t als die Zeit und \dot{Q}_v als dem volumetrischen Wärmestrom definiert sind.

Dazu gilt die Wärmedurchgangsgleichung:

$$\dot{Q}_{a-b} = k \cdot A \cdot (T_a - T_b), \quad (8)$$

wobei A als die Querschnittsfläche der Wand und T_a , T_b als die Temperaturen vor und nach dem Wärmedurchgang definiert sind. Die Wand ist im ersten Fall die Silikonfolie und im Zweiten, das Triax Material. k ist als Wärmedurchgangskoeffizient definiert:

$$k_i = \frac{\lambda_i}{s_i}. \quad (9)$$

In unserem Fall liegen gleiche Querschnittsflächen vor, sodass von einer Reihenschaltung der Wärmeleitungsübergänge ausgegangen wird.

$$\frac{1}{k_{ges}} = \sum_i \frac{1}{k_i}. \quad (10)$$

Weil die Dicke des Materials vernachlässigbar gegenüber der Fläche ist, kann hier das komplexe Problem des Wärmeeintrags durch die verschiedenen Schichten auf den eindimensionalen Fall reduziert werden. Die x -Richtung zeigt von oben nach unten. Die Stelle $x = 0$ ist die Oberfläche der Silikonfolie. Das Problem ist mit einem Stab konstanten Querschnitts zu vergleichen (Abbildung 28). In $x = 0$ wird eine konstante Wärmequelle hinzugefügt. x_{erm} ist die Stelle, an der die Temperatur ermittelt wird. Es ist zu beachten, dass die Wärmequelle in der Realität erst nach einigen Sekunden konstant ist.

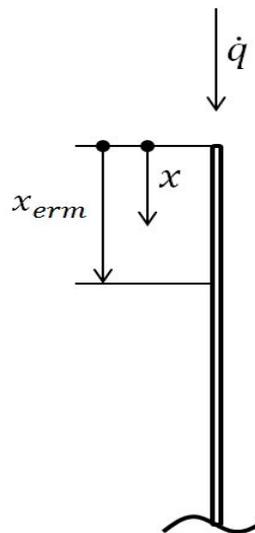


Abbildung 28 Vereinfachung des Modells zu einer Stab konstanter Querschnitt

Mit diesen Vereinfachungen ist es möglich, eine zeitabhängige Temperatur an der Ermittlungsstelle abzuschätzen [Wil10, S.118]. Die Randtemperatur bei $x = 0$ muss konstant bleiben. In unserem Fall nimmt die Randtemperatur bei $x = 0$ allerdings immer zu. Man setzt:

$$\theta(x,t) = T(x,t) - T(x=0,t), \quad (11)$$

als die Temperaturdifferenz gegenüber dem Startzeitpunkt.

Jetzt ist die notwendige Wärmestromdichte $\dot{q}(x=0,t)$ berechenbar:

$$\dot{q} = \frac{\lambda \cdot \theta(x,t)}{2\sqrt{a \cdot t} \cdot \text{ierfc}(\xi)}, \quad (12)$$

wobei $a = \frac{\lambda}{\rho \cdot c_p}$ und $\theta(x=0,t)$ die konstante Randtemperatur ist. Das ist die

Temperatur des Strahlers.

Es gilt die Abkürzung

$$\xi = \frac{x}{2\sqrt{a \cdot t}}, \quad (13)$$

der integrierten Fehlerfunktion

$$\text{ierfc} = \frac{1}{\sqrt{\pi}} e^{-\xi^2} - \xi \cdot \text{erfc}(\xi), \quad (14)$$

und der komplementären Fehlerfunktion

$$\text{erfc}(\xi) = 1 - \text{erf}(\xi), \quad (15)$$

Zur Erinnerung lautet die Fehlerfunktion

$$\text{erf}(\xi) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\xi} e^{-\tau^2} d\tau, \quad [\text{Abr72}] \quad (16)$$

Aus (11) und (12) resultiert

$$T(x_{\text{Wachs}}, t) = \frac{\dot{q}}{\lambda} \cdot 2\sqrt{a \cdot t} \cdot \text{ierfc}(\xi) + T(x_{\text{Wachs}}, t = 0), \quad (17)$$

wobei $T(x_{\text{Wachs}}, t = 0)$ die Umgebungstemperatur ist.

Das vorliegende Modell wird für stationären eindimensionalen Fall zu berücksichtigen. Bei diesem ist der Verlauf der Wärmeeintrag entlang dem Stab linear. Beim vorliegenden Fall des Preformings nimmt die Temperatur an der Stelle $x = 0$ immer zu. Das ist daher ein unstationärer Fall. Aus Grund der starken Vereinfachung des ursprünglichen Problems können viele Fehlern auftreten. Aus diesen Gründen ist es nicht sinnvoll, die komplexe und zeitintensive Behandlung dieses Problems im Rahmen der Studienarbeit weiterzuführen.

4.3) Optimierte Heizeinheit

Bei den vorhergehenden Vorversuchen wurden nicht nur der Typ der Heizung und des Strahler sondern auch die passenden Parameter ausgewählt. Rohrstrahler aus Quarzglas sind für das Preforming flachen Bauteilen gut geeignet. Sie werden im Abstand von 50 mm vom Fasermaterial montiert. Mit einem Abstand zwischen jeder Quelle von 30 mm ist das Strahlungsfeld angemessen homogen. Da die maximale Temperaturabweichung 10°C entspricht, werden die Strahler unter Berücksichtigung der Vorversuche mit 60% der maximalen Leistung der Leistungsteller Heratron Typ CB1x25 betrieben.

Um diese Entscheidung zu bekräftigen, wird ein reales Projekt durchgeführt. Es führt zur Entwicklung und Fertigung einer optimierten Heizeinheit. Das Ziel dieser Heizeinheit ist es, die bisher benötigte Zeit zu reduzieren. Mit dem Heißluftföhn dauerte die Aufheizung zu lang. Außerdem ist es schwierig, ein homogenes Strahlungsfeld manuell zu erzeugen. Ziel der neuen Heizeinheit ist es, eine schnellere und bessere Binderaktivierung zu ermöglichen.

Außer der Erhöhung der Prozessgeschwindigkeit wird durch die Verwendung einer Heizeinheit auch die Reproduzierbarkeit verbessert. Bei gleichen Strahlungsparametern (Leistung und Zeit) werden die verschiedenen Lagen immer gleich fixiert.

Die Einheit wird in Anlehnung an die in Abschnitt „2. Motivation, Geometrie des Spants“ beschriebenen Geometrien konstruiert. Sie soll sowohl für den kleinen als auch für den großen Spant Verwendung finden.

Da die Preformgeometrien eine rechtwinklige Form bilden, sieht die Heizeinheit wie eine Brücke aus. Die beheizbare Länge muss mindestens zwei Meter betragen. Nach dem Katalog von Heraeus existieren Strahler mit einer beheizten Länge von 2100 mm mit einem Querschnitt von 23x11 mm. Sie gehören zum Bereich „Schneller mittelwelliger Zwillingsrohr-IR-Strahler aus Quarzglas“ [Her12]. Sie sind beidseitig anzuschließen. Um den Träger zu bauen, werden mehrere Aluminium Profile benutzt. Weil die Strahler sehr lang sind, ist neben den Fixierungen an den Enden der Strahler eine Mittelfeder erforderlich. Dafür werden drei Profile, die eine Form in U bilden, miteinander mittels 2-meter lang Stäbe fixiert.

Angelehnt an die bisherigen Versuche wird die benötigte Anzahl an Strahler berechnet. In Korrelation mit dem Abmaße der Preform werden 2 Strahler je Flansch und 6 auf dem WEB benötigt. So werden insgesamt 10 Strahler benötigt. Beim kleinen Spant wird die Brücke nicht umgebaut. Eine Erhöhung der Leistung kompensiert den großen Abstand zwischen Strahler und Material.

Die CAD-Konstruktion der gesamten Brücke ist in der Abbildung 29 dargestellt. Der Träger wiegt insgesamt weniger als 4kg. Bei einem Gewicht der Strahler von maximal 3 kg, kann die gesamte Einheit gut manuell bewegt werden.

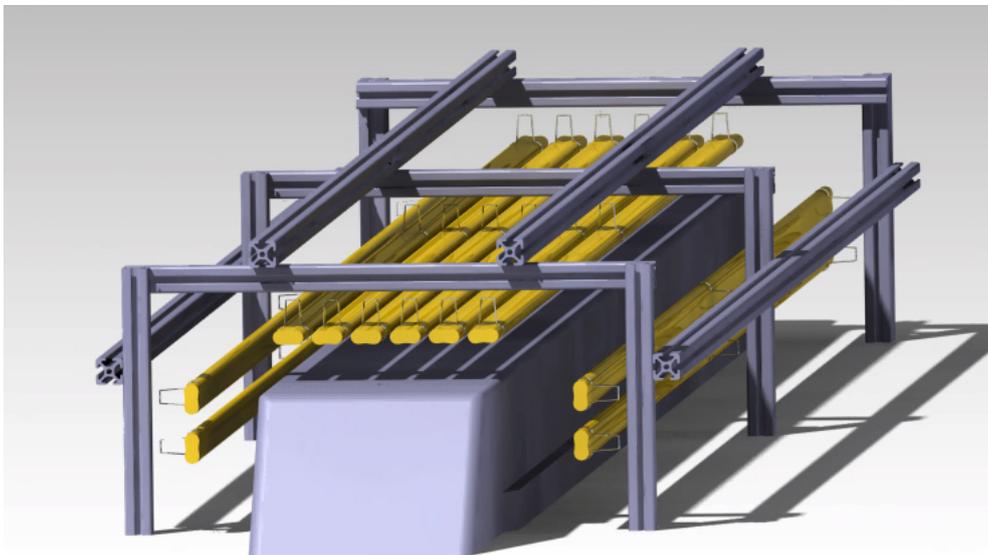


Abbildung 29 CAD-Konstruktion der Heizeinheit über dem Preformwerkzeug

Im letzten Schritt soll der Leistungsbedarf berechnet werden, um den Leistungssteller auswählen zu können. Jeder den gewählten Strahler erfordert eine Leistung von 5030 W bei einer Spannung von 400 V. Die WEB- und Flanschbereiche müssen separat angesteuert werden können. Daraus sind 2 Leistungssteller für 2 Strahler und ein für 6 Strahler benötigt. Die Leistung ist als das Produkt der Spannung mit der Intensität definiert.

$$P = U \cdot I. \quad (18)$$

Das heißt, dass die von dem CB1x25 mögliche lieferbare Leistung ist gleich:

$$P_{\text{Leistungssteller}} = 25 \times 400 = 10000 \text{ W}. \quad (19)$$

Nach dem *Heraeus* Datenblatt erlernt man, dass die 25 A mit einem Sicherheitskoeffizient verbunden sind. Es ist deshalb davon auszugehen, dass ein Leistungssteller Typ CB1x25 für zwei Strahler reicht. Für den WEB-Bereich werden 6 Strahler benötigt. Insgesamt müssen 30180 W aufgebracht werden. Die Firma *Heraeus* schlägt hier einen größeren Leistungssteller vor. Der „CB 3x25“ kann bis zu 75 A mit einer Spannung von 400 V aufbringen.

$$P_{\text{Leistungssteller}} = 75 \times 400 = 30000 \text{ W}. \quad (20)$$

4.4) Konzepte für eine werkzeugintegrierte Binderaktivierung Einheit

In diesem Kapitel wird ein Konzept für eine werkzeugintegrierte Binderaktivierung während des Preformings der gebogenen Spante entwickelt.

Die bisherigen Erfahrungen vom Projekt AZIMUT haben gezeigt, wie wichtig die sofortige Fixierung des Materials ist, nachdem es umgeformt wurde. Je kürzer die Zeit zwischen Drapierung und Fixierung ist, desto besser ist die Qualität des Endbauteils. Die Qualität eines Bauteils wird dabei anhand der Faserorientierung bewertet.

Beim DLR findet aktuell das zweistufigen Drapierverfahren Verwendung: In der ersten Stufe findet die Umformung von Einzellagen statt (Subpreforming). Anschließend wird der Subpreform auf das zweite Preformwerkzeug transportiert. Auf dem zweiten Werkzeug wird der Preform Lage für Lage aufgebaut. Das größte Problem des zweistufigen Drapierverfahrens ist der Transport. Beim Transport können Faserabweichungen auftreten, bis zu Schäden des Materials. Bei der Entwicklung eines neuen Konzepts wird versucht, die Vorteile des zweistufigen Verfahrens zu bewahren, und dabei ein „einstufiges“ Preforming zu ermöglichen. Zwei wichtigen Anforderungen müssen bei Preforming respektiert werden: das Material sollte unter Spannung drapiert werden, um Ondulationen zu vermeiden. Außerdem müssen die Einzellagen bis zur Abkühlung der Binder kompaktiert werden.

Nach der Reflexionsphase werden zwei Grundideen weiter untersucht. Die erste Idee ist eine Kopplung der Drapierphase und der Erwärmung. Die zweite Idee versucht eine mögliche Rückstellung der Fasern vor der Aktivierung direkt zu verhindern.

Im Folgenden werden vier Lösungen zur ersten Grundidee erläutern:

- Lösung 1a: Ein Drapierschwert wird in drei Teile unterteilt: Ein Drapierung-, ein Erwärmungs- und ein Abkühlbereich. Das Prinzip dieses Schwerts ist in Abbildung 30 und Abbildung 31 zu sehen. Die Drapierung erfolgt nur an der runden Kante des Schwertes. Eine Schicht PTFE kann hinzugefügt werden, um die Reibung zwischen das Material und das Schwert zu verringern. Durchbrüche im Aluminium ermöglichen das Durchstrahlen der Strahler. Die Strahler müssen aufgrund der störseitigen Kontaktierung überlappend werden, um keine unbeheizte Zone zu bekommen (Abbildung 31). Schließlich gibt es einen Abkühlbereich. Er ermöglicht es mit einer relativ hohen Geschwindigkeit zu drapieren. Da der Druck aus dem Material bis zur Abkühlung der Binder erhalten bleiben muss, beschleunigt eine aktive Abkühlung das Verfahren. Die Abkühlung kann einfach durch einen geschlossenen Wasserkühlkreis oder durch einen kontinuierlichen Durchfluss erfolgen. Bei diesem Verfahren ist es schwierig, einen konstanten Druck auf dem Preform zu bringen. Weil die Geometrie des Spants aus kleineren Webhöheänderungen besteht, wird es schwerlich den Druck zu erbringen. Dazu wird auch eine zusätzliche Erwärmung für die Fixierung der Flansche benötigt.

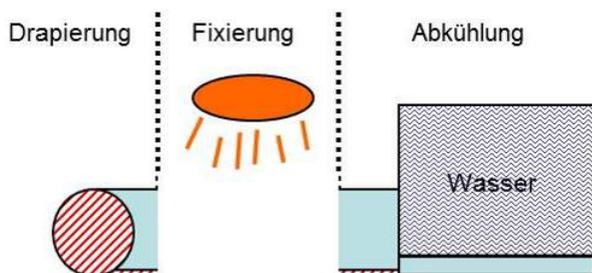


Abbildung 30 Prinzipschema der Lösung 1a

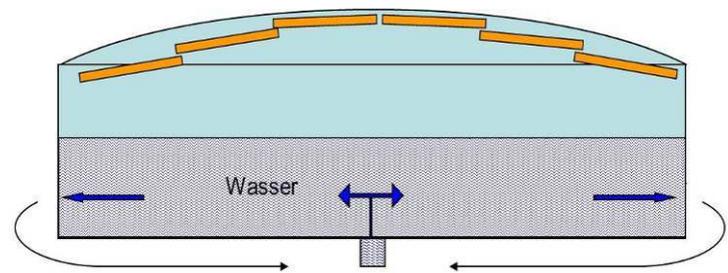


Abbildung 31 Draufsicht des Prinzipschemas der Lösung 1a

- Lösung 1b: Angelehnt an Lösung 1a, wird bei dieser Variante der Strahler nicht an der Mitte des Schwertes montiert, sondern vor den Spitze (Abbildung 32). Genauso bei der ersten Lösung wird das Material an dem inneren Flansch festgehalten, um das Material während der Drapierung unter Spannung zu halten. Bei diesem Verfahren heizt der Strahler die noch nicht drapierte Lage und das Schwert erwärmt sich nicht. Das ermöglicht einen einfachen Aufbau ohne aktives Kühlsystem. Der Nachteil ist, dass der Binder schon während der Drapierung geschmolzen wird. Es existiert das Risiko, dass sich der Binder nur auf der Oberseite der Faserlage befindet. Dadurch kann keine Verbindung mit der vorherigen Lage hergestellt werden. Für diesen Fall ist das Verfahren ungeeignet und muss daher noch verbessert werden, besonders bei der Positionierung des Strahlers. Dazu wird auch eine zusätzliche Erwärmung für die Fixierung der Flansche benötigt.

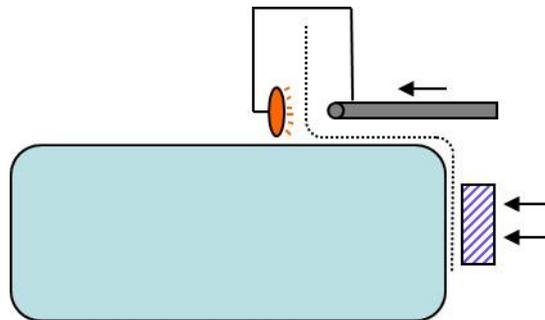


Abbildung 32 Prinzipschema der Lösung 1b

- Lösung 1c: Das Verfahren 1c ist die Verbesserung der Lösung 1b. Der Strahler wird nach unten gerichtet. Das heißt, dass nur die untere Lage direkt bevor sie mit der oberen Lage Kontakt erhält, beheizt wird. Damit wird der Binder während der Drapierung schon geschmolzen aber noch nicht aktiviert. Erst nach der Abkühlungsphase ist der Binder aktiviert, da die Kettenmoleküle wieder reformiert sind. Weil das Schwert kalt bleibt, findet die Abkühlung des Binders direkt nach der Drapierung statt. Es bleibt ein große Nachteil: Der Binder befindet sich immer auf der Unterseite jeder Lage. Die Binder müssen per Konvektion und Wärmeleitung geschmolzen werden. Dafür muss die untere Lage sehr warm sein. Daraus resultieren zwei Nachteile: Eine hohe Energieverbrauch, und das Risiko, dass die Fasern der unteren Lage beschädigt werden. Dazu wird auch eine zusätzliche Erwärmung für die Fixierung der Flansche benötigt. Aus genannten Gründen sind die Lösung 1b und 1c nicht verwendbar.

- Lösung 1d. Als Variation der ersten Idee gibt es eine Version mit beweglichem Strahler. Um die Anwendungskosten noch reduzieren zu können, werden nur die zur Verfügung stehenden Strahler benutzt. Die Strahler werden auf zwei Schienen am Schwert montiert und entweder manuell oder automatisch entlang des Spants bewegt. Mit zwei parallel eingestellten Strahlern (beheizbare Länge von 340mm) kann die Bewegungsgeschwindigkeit abgeschätzt werden. Wenn 20 Sekunden zur Erwärmung auf jedem Punkt nötig sind, gilt für die maximale Geschwindigkeit

$$\frac{340}{20} = 17 \text{ mm/s.} \quad (21)$$

Weil die gebogene Länge ca. 2000 mm entspricht, benötigt man für den gesamten Preform:

$$\frac{2000 + 2 * 34}{17} = 121 \text{ Sekunde} \approx 2 \text{ min.} \quad (22)$$

Dazu gilt diese Rechnung mit zwei parallelen Strahlern nur für eine Breite von 100 mm. Weil der WEB 180mm breite ist, muss die Phase „Drapierung + Fixierung“ mind. zweimal wiederholt werden. Das Preforming einer Lage dauert bei diesem Verfahren zu lang.

Der zweite Ansatz war es, jede mögliche Ruckstellung des Materials zwischen der Drapierphase und der Fixierung durch die Aktivierung des Binders zu verhindern. Der Ursprung des nachstehenden Prinzips ist eine gleichzeitige Verformung des CFK und der Vakuumsilikonfolie. Es werden drei Teillösungen betrachtet:

- Lösung 2a: Die Ausgangsidee ist die gleichzeitige Drapierung vom Fasermaterial und der Silikonfolie mit dem Schwert. In der Abbildung 33 ist die Vakuumsilikonfolie als schwarze dargestellt. Das Fasermaterial ist punktiert. Um unter Spannung zu drapieren, muss das Material am inneren Flansch festgehalten werden. Die Folie wird am Werkzeug luftdicht mit Hilfe von Siegelkitt befestigt. Im zweiten Schritt (Step 2) erfolgt die Drapierung des äußeren Flanschbereichs in vertikaler Richtung. Abschließend wird die Vakuumsilikonfolie erneut am Werkzeug gedichtet. Beim Step 3 wird ein Unterdruck unter der Folie erzeugt. Dann wird der Binder mittels einer Strahlerbrücke aktiviert.

Bei der Analyse des Konzepts sind folgenden Nachteile deutlich geworden. Erstes wird die Luft lediglich an einer Stelle des Aufbaus entzogen. Besser wäre eine Verteilung über das gesamte Geometrie. Zweitens ist die Vakuumsilikonfolie durch das Verkleben nur einmal einsetzbar. Bei einer Serienfertigung von Spanten sind den entsprechend hohe Kosten zu berücksichtigen. Außerdem dauern der Zuschnitt und das Aufkleben der Folie bei jeder Lage aufgrund des hohen manuellen Aufwands lang.

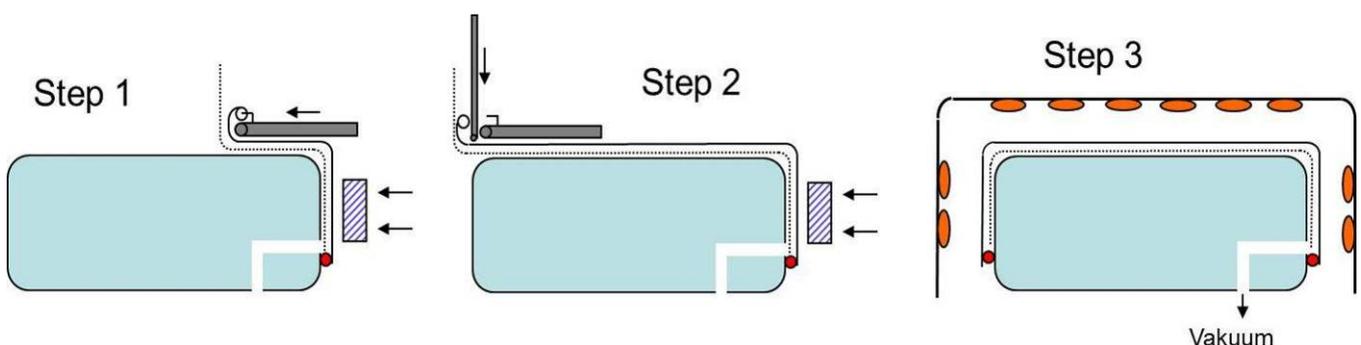


Abbildung 33 Prinzipschema der Lösung 2a

- Lösung 2b: Der Hauptunterschied zur Variante 2a ist der Einsatz einer mehrfach verwendbaren Vakuumfolie. Dafür wird ein Vakuumtisch benötigt. Durch die Fixierung der Folie an einem gelenkigen Rahmen kann die Folie während der Drapierung mitgeführt werden. Abbildung 34 verdeutlicht den Aufbau. Das Material liegt unter der Folie vom inneren bis zum äußeren Flansch. Im ersten Schritt (Step 1) wird der Rahmen auf dem Tisch durch mehrere Schraubzwingen befestigt. Um die Folie am inneren Flansch zu fixieren wird ein zusätzliches Teil benötigt. Beim Step 2 wird das Material im WEB-Bereich drapiert. Hierbei wird der obere Teil des Rahmens nach vorne geschoben. So wird die Spannung der Folie reduziert. Beim Step 3 wurde die Lage komplett drapiert. Abschließen wird der Raum unter der Silikonfolie evakuiert. Damit gelingt eine gute Kompaktierung des Aufbaus, der mittels einer Erwärmungsbrücke fixiert wird.

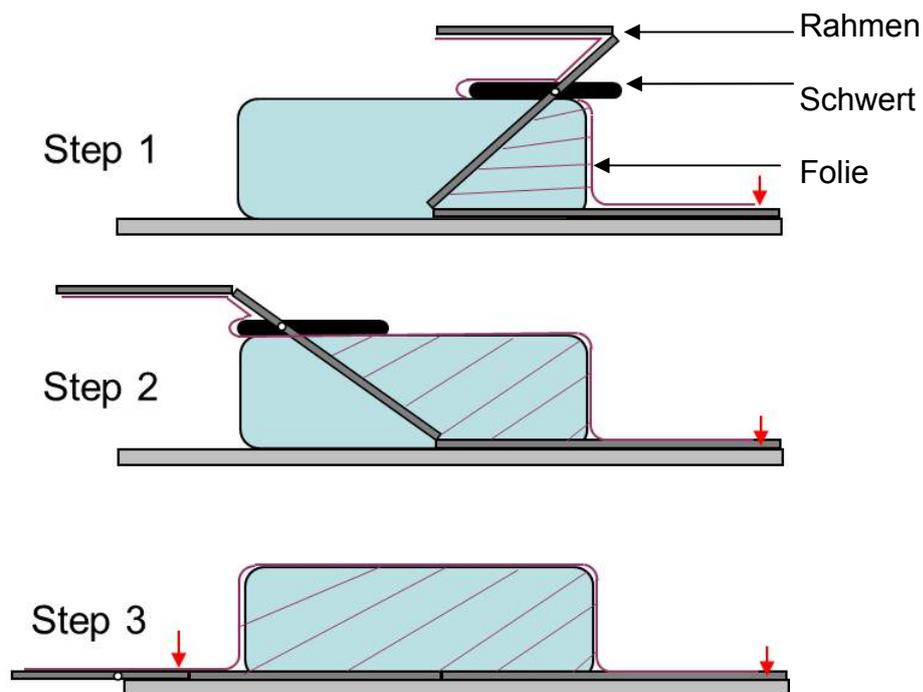


Abbildung 34 Prinzipschema der Lösung 2b

- Lösung 2c: Hier wird das Schwert durch mehrere Zylinderrollenlager ausgetauscht, damit auch der Flanschbereich mit demselben Werkzeug drapiert werden kann. Bei der Drapierung des Materials „arbeitet“ nur die Vorderkante des Schwerts. Der benötigte Druck wird durch die Spannung der Silikonfolie aufgebracht. Der Nachteil dieser Lösung ist, dass das gebogene Profil aufgrund der Krümmung des Bauteils gelenkig sein muss. Dies verringert die Stabilität gegenüber einem starren Profil.

In der nachstehenden

Tabelle 6 sind die entscheidenden Vor- und Nachteile der verschiedenen Lösungen zusammengefasst.

Lösung	Verfahren	Vorteile	Nachteile
1a	Beheiztes Drapierschwert	<ul style="list-style-type: none"> • Kopplung von allen Phasen • Fixierung direkt nach der Drapierung 	<ul style="list-style-type: none"> • Aktives Kühlsystem erforderlich • Druck während und nach der Drapierung schwer aufzubringen • Zusätzliche Erwärmung im Flanschbereich nötig
1b	Drapierte Lage beheizt	<ul style="list-style-type: none"> • Keine Kühlsystem notwendig 	<ul style="list-style-type: none"> • Keine gute Verbindung der Einzellagen durch Binder • Zusätzliche Erwärmung im Flanschbereich nötig
1c	Untere Lage beheizt	<ul style="list-style-type: none"> • Keine Kühlsystem notwendig 	<ul style="list-style-type: none"> • Keine gute Verbindung der Einzellagen durch Binder • Zusätzliche Erwärmung im Flanschbereich nötig
1d	Beweglicher Strahler	<ul style="list-style-type: none"> • Günstig in Anwendung 	<ul style="list-style-type: none"> • Hoher Zeitaufwand
2a	Folie am Werkzeug festgeklebt	<ul style="list-style-type: none"> • Perfektes Vakuum während Aktivierung des Binders 	<ul style="list-style-type: none"> • Ungenügendes Vakuum • Folie einmalig verwendbar
2b	Gelenkiger Rahmen mit Schwert	<ul style="list-style-type: none"> • Perfektes Vakuum während Aktivierung des Binders • Kombination der Bewegung des Schwerts und des Rahmens möglich 	<ul style="list-style-type: none"> • Fixierung des Materials am inneren Flansch schwierig
2c	Gelenkiger Rahmen mit Lager	<ul style="list-style-type: none"> • Perfektes Vakuum während Aktivierung des Binders • Kombination der Bewegung des Schwerts und des Rahmens möglich 	<ul style="list-style-type: none"> • Gebogenes Drapierprofil nicht stabil • Fixierung des Materials am innere Flansch schwierig

Tabelle 6 Vor- und Nachteile der verschiedenen Optionen

Nach näherer Betrachtung der obenstehenden Tabelle können zwei Lösungen weiter verfolgt. Bei den Optionen 1a und 2b beruhen die Nachteile lediglich auf konstruktiven Problemen. Also werden diese Konzepte weiterentwickelt, um mögliche Verbesserungen zu bringen. Bei allen anderen Lösungen führen die aufgezeigten Nachteile zum Ausscheiden.

Im Folgenden werden die beiden Konzept 1a und 2b tiefer detailliert und durch mehrere Versuche untersucht.

4.4.1) Beheiztes Drapierschwert (Variante 1a)

Der prinzipielle Aufbau wurde bereits in Abbildung 30 und Abbildung 31 dargestellt. Das Verfahren beruht auf 2 Stufen. Während der ersten Stufe wird das Material auf dem Preformwerkzeug drapiert und fixiert. Die Fixierung erfolgt durch das Aufschmelzen und Eindringen des Binders, welches sich ausschließlich ins Material wieder verfestigt. Bei der zweiten Stufe wird der Preform unter Vakuum kompaktiert und durch IR-Strahler erwärmt, um auch der Binder an den Flanschbereich zu aktivieren.

Die zu berücksichtigenden und konstruktiv zu verbessernden Nachteile sind wie folgt. Während der Drapierung muss ein hoher Druck aufgebracht werden, da der Preform im WEB-Bereich mehrere Aufdichtungen enthält. Auch während der Binderaktivierung ist eine Kompaktierung erforderlich. Beim beheizten Schwert kann der Druck zurzeit nur manuell aufgebracht werden. Dabei ist darauf zu achten, dass der Druck gleichmäßig verteilt und ausreichend hoch ist.

In diesem Kapitel wird nur die erste Stufe getestet, da die Zweite aus den bisherigen Versuchen bereits bekannt ist.

Im Folgenden wird erstens die Konstruktion des Schwerts erklärt und zweitens, der Versuch beschrieben. Der Aufbau wird in Abbildung 35 dargestellt.

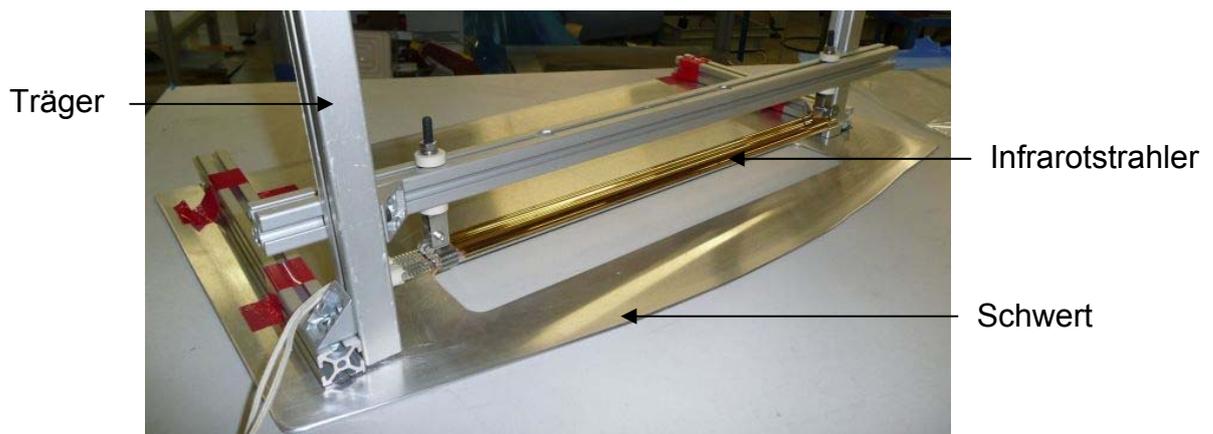


Abbildung 35 Aufbau des beheizten Schwerts

Das verwendete Schwert besteht aus einer 2 mm dicken Aluminiumplatte, deren Geometrie an die Abmae des kleinen Rohrstrahlers angepasst wurde. Die Größe des Durchbruches richtet sich ebenfalls noch dem verfügbaren Infrarotstrahler. Der Radius an den Kanten des Schwertes wurde sehr fein geschliffen, damit der Reibungskoeffizient zwischen Aluminium und Fasermaterial vernachlässigbar ist und die Faserbeschädigungen vermieden werden. Da nur ein Strahler zur Verfügung steht, und eine möglichst hohe Drapiergeschwindigkeit erreicht werden soll, wird der Strahler 20 mm oberhalb des Fasermaterials montiert. Bei diesem Versuch spielt die Homogenität eine untergeordnete Rolle. Für eine Strecke von 70 mm Material sind bei diesen Parametern 10 Sekunden nötig. Eine maximale Drapiergeschwindigkeit von 7 mm/s ermöglicht die Aktivierung des gesamten WEB-Bereichs in 25 Sekunden. Für die Versuche wird der schon vorher benutzte Träger auf dem Schwert montiert. Die Versuche werden ohne aktives Kühlungssystem durchgeführt, um seine Entbehrlichkeit zu prüfen. Abbildung 35 zeigt ein Foto des Aufbaus.

Der Versuch wird dreimal wiederholt. Bei den ersten beiden Versuchen wird das Material auf einem geraden und sehr breiten Werkzeug drapiert. Hauptziel der ersten Versuche war das Abschätzen der Drapiergeschwindigkeit, des Gleitens des Schwertes und allgemeiner Parameter.

Nach der Durchführung des ersten Versuchs wurden mehrere Ergebnisse ermittelt. Aufgrund von abgeschmolzenem Binder auf der Faseroberfläche könnte das Schwert auf dem Material nicht gut gleiten. Deswegen war es schwierig, die berechnete Geschwindigkeit bei manueller Führung einzuhalten. Die Führung des Schwertes erfolgte deshalb eher schrittweise. Aus diesem Grund wurden die Fasern der Oberfläche beschädigt (siehe Abbildung 36). Man merkt, dass das Schwert zu heiß geworden ist, um die Funktion der Abkühlung zu erfüllen. Außerdem wurde eine beträchtliche Rauchentwicklung beobachtet (siehe Abbildung 37), dessen Ursache noch nicht geklärt werden könnte. Die Haftfestigkeit wurde ausschließend qualitativ geprüft. Der Binder wurde nicht ausreichend aktiviert. Dafür gibt es zwei Erklärungen: Die schlechte manuelle Führung des Schwertes oder ein zu geringer aufgebracht Druck. Um die relevante Begründung zu finden, wurde der zweite Versuch durchgeführt. Diesmal wird die Platte ohne Druck geschoben, damit die Geschwindigkeit beachtet wird. Daher erfolgt die Führung des Schwertes

kontinuierlich. Die Verbindung der Lagen ist bei diesem Versuch gut und es sind keine Faserbeschädigungen aufgetreten. Der Nachteil dabei ist, dass der Binder nach der Führung durch das Schwertes aktiviert wird, weil die Platte während der Drapierung zu warm ist. Wie beim vorherigen Versuch entstand eine beträchtliche Rauchentwicklung.

Aus den Versuchen 1 und 2 kann man folgende Ergebnisse extrahieren:

- ein aktives Kühlsystem auf jeden Fall nötig wird, da das Drapierschwert zu viel Wärmeenergie aufnimmt und selbst zu langsam abkühlt.
- der Aufbau mit Aluminium erzeugt Faserbeschädigungen bei der Drapierung unter Druck, wenn der Binder aufgelöst ist.
- die manuelle Führung mit gleichzeitiger Aufbringung von Druck ist nicht möglich.
- eine Rauchentwicklung tritt auf.



Abbildung 36 Beschädigte Fasern



Abbildung 37 Rauchentwicklung während Drapierung

Der dritte Versuch wird auf einem gebogenen Drapierwerkzeug durchgeführt, um eine mögliche Rückstellung des Materials nach der Drapierung beobachten zu können. Nach Verlauf des Versuchs kann jedoch keine Rückstellung beobachtet werden, wenn das Material vollständig um den Flansch abgeklappt wird. An den Rändern des Drapierschwertes tritt Faserbeschädigung auf. Dieses Problem kann jedoch prinzipiell dadurch verhindert werden, dass die Breite des Schwertes größer als die des Preforms ist. Wiederum tritt eine Rauchentwicklung auf. Allerdings bleibt das Schwert bei vorliegendem Versuch aufgrund der Schlanken der Preform kalt. Das aktive Kühlsystem ist daher nur bei breiten Preform erforderlich.

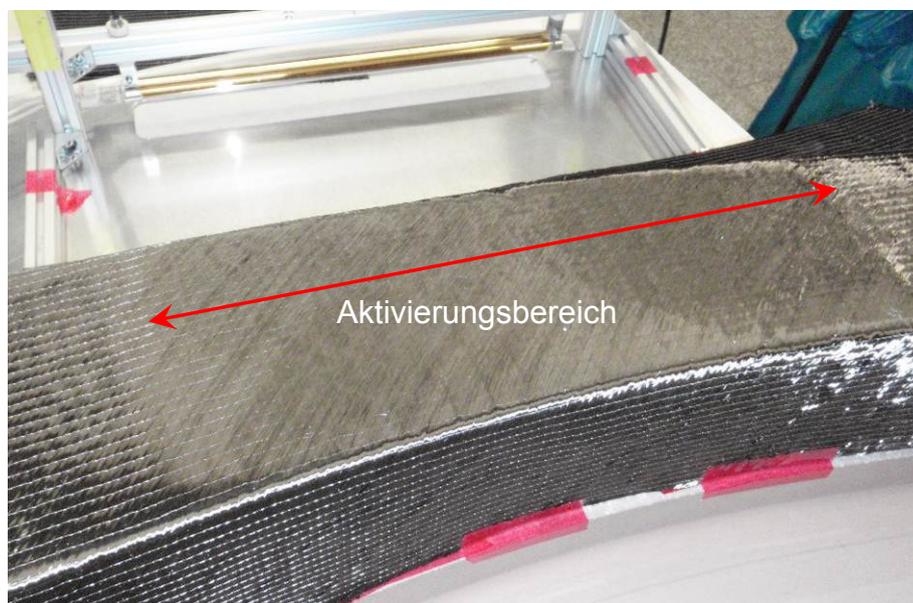


Abbildung 38 Ergebnis Versuch 3: Drapierung und Fixierung mit beheizten Schwert

Die Versuche 1 bis 3 zur Variante „beheizte Schwert“ zeigen, dass dieses Konzept bei gebogenen Spanten gut funktioniert, sofern einige Punkte berücksichtigt werden. Um eine rückfreie Bewegung zu ermöglichen, muss die Schwertführung automatisiert werden. Eine Automatisierung ermöglicht außerdem die Einbringung eines konstanten Druck. Bei größeren Geometrien muss ein aktives Kühlsystem integriert werden, um die Fixierung des Binders unter Druck zu ermöglichen. Außerdem muss die Reibung zwischen Schwert und CFK-Material konstruktiv verringert werden. Die entstehende Rauchentwicklung erfordert eine geeignete Kapselung.

4.4.2) Indupreform (Variante 2b)

Als zweites Konzept wird die Variante 2b untersucht. Das Konzept wird „Indupreform“ genannt. Die Grundidee ist die Kopplung von Drapierung und Fixierung des Materials durch Mitführen der Vakuumfolie. Das Prinzip wurde bereits am Anfang des Kapitels 4.3) schematisch erklärt. Dieses Konzept bringt theoretisch viele Vorteile, wie beispielweise die Vermeidung einer Ruckstellung der drapierten Lagen, die mehrfache Nutzung der Silikonfolie, oder die gute Automatisierbarkeit des Prozesses. Problematisch ist die Berechnung der Geometrie der elastischen Silikonfolie. Die Folie muss immer gespannt sein, damit keine Falten entstehen. Wegen der komplexen und gekrümmten Geometrie des Werkzeugs ist es in der Realität schwierig die optimale Form der Folie zu finden. Da die Form der Folie von der Werkzeuggeometrie abhängt, muss diese bei Änderung der Bauteilgeometrie ebenfalls angepasst werden.

Um die Machbarkeit des Prozesses nachzuweisen und zu analysieren, wird ein Prototyp der Indupreformeinheit gebaut. Dabei wird eine gekrümmte Spantgeometrie als Preformwerkzeug benutzt. Ein CAD-Modell des Werkzeug und der Drapiereinheit wird konstruiert und ist in Abbildung 39 und Abbildung 40 dargestellt.

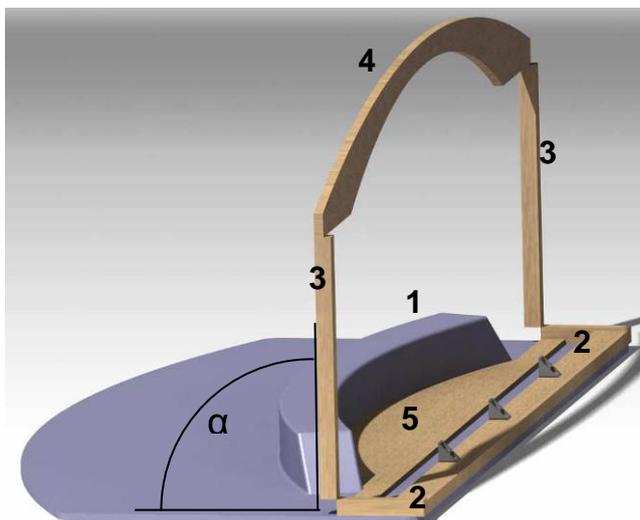


Abbildung 39 Indupreform ohne Pressplatte

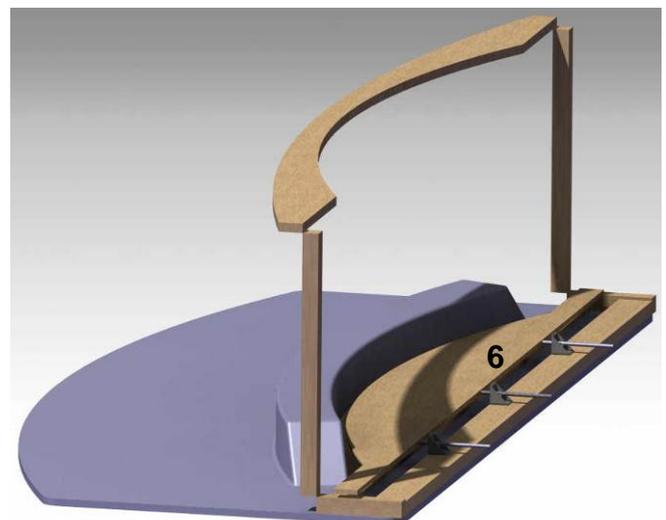


Abbildung 40 Indupreform mit Pressplatte

- | | | |
|--------------------|-----------------------------|-----------------|
| 1- Drapierwerkzeug | 2- Am Tisch fixierte Rahmen | 3- Längsführung |
| 4- Querspannung | 5- Formgeber | 6- Pressplatte |

Der Prototype wird aus Kosten- und Zeitgründen aus MDF, Vierkanthölzer und Scharnieren gebaut.

Das Drapierwerkzeug wird am Tisch festgeschraubt, damit keine ungewollte Bewegung möglich ist. Der Rahmen 2 wird ebenfalls mittels Schraubzwingen am Tisch befestigt. Die Längs- und Querführungen 3 und 4 werden mittels metallischer Scharniere am Rahmen 2 fixiert, sodass eine Bewegung von α zwischen 70° und 180° stattfinden kann. Außerdem wird bei diesem Aufbau die Folie an den unteren Seiten des Rahmens festgeklebt. Die Folie ist in den Abbildungen nicht dargestellt.

Ziel des ersten Versuchs ist, die Reaktion der Folie unter Zugspannung bei der Drapierung des Fasermaterials zu testen. Diese Problematik hängt damit zusammen, dass eine ebene Silikonfolie prinzipiell nicht geeignet ist eine komplexe Geometrie abzudecken, ohne eingeschnitten zu werden. Da die Verwendung vorliegender Folie gesetzt ist und Einschnitte aus Gründen der Dichtigkeit nicht zulässig sind, wird versucht Falten in unkritische Bereiche zu verlegen. Der Effekt der Krümmung des Werkzeugs spielt dabei ebenfalls eine große Rolle. Es wird untersucht, unter welchen Voraussetzungen sich die Folie aufspannen lässt. Der erste Versuch hat gezeigt, dass die Folie bei Beginn der Umformung am Innenradius des Werkzeugs anliegen muss, da sonst die Spannung der Folie zu stark ist. Ein Formgeber (5) aus MDF trägt daher zur Positionierung der Folie bei. Der Vorderkante dieses Teils entspricht genau die innere Kontur des Werkzeugs. Um diese Tunnelform an der gegenüberliegenden Seite des Rahmens zu gewährleisten, entspricht das Gegenstück eben der gleichen Krümmung. Um der Spannung der Folie während der Umformung regeln zu können, wird auch dieser Teil ebenfalls gelenkig verbunden.

Ein anderer wichtiger Punkt bei der Drapierung von CFK-Material ist die Fixierung des Zuschnitts am inneren Flansch. Wie schon erwähnt, muss das Material immer unter Spannung drapiert werden, sodass keine Falten auftreten. Daher wird die Pressplatte (6) benötigt. Ihre Aufgabe ist es, das Material an dem inneren Flansch zu fixieren. Sie besteht aus einer Platte, die die gleiche Krümmung wie der Formgeber (5) hat. Auf dem Rahmen 2 werden drei gebohrte Winkel aus Aluminium befestigt. Durch Gewindestangen kann die Pressplatte in Längsrichtung verschoben und fixiert werden.

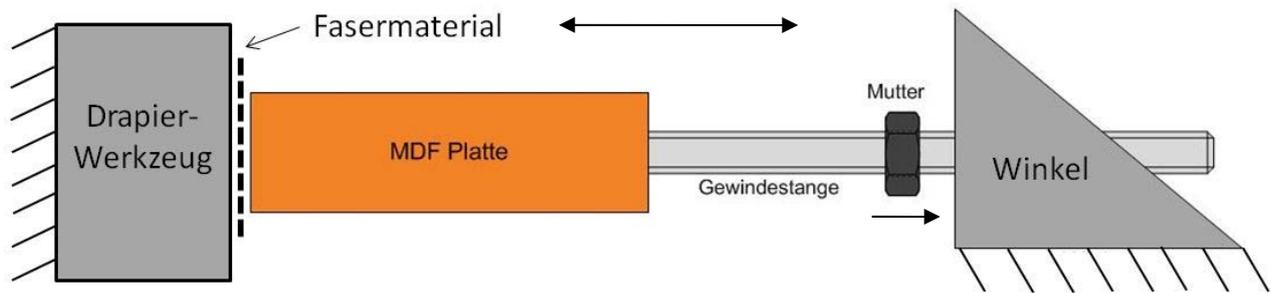
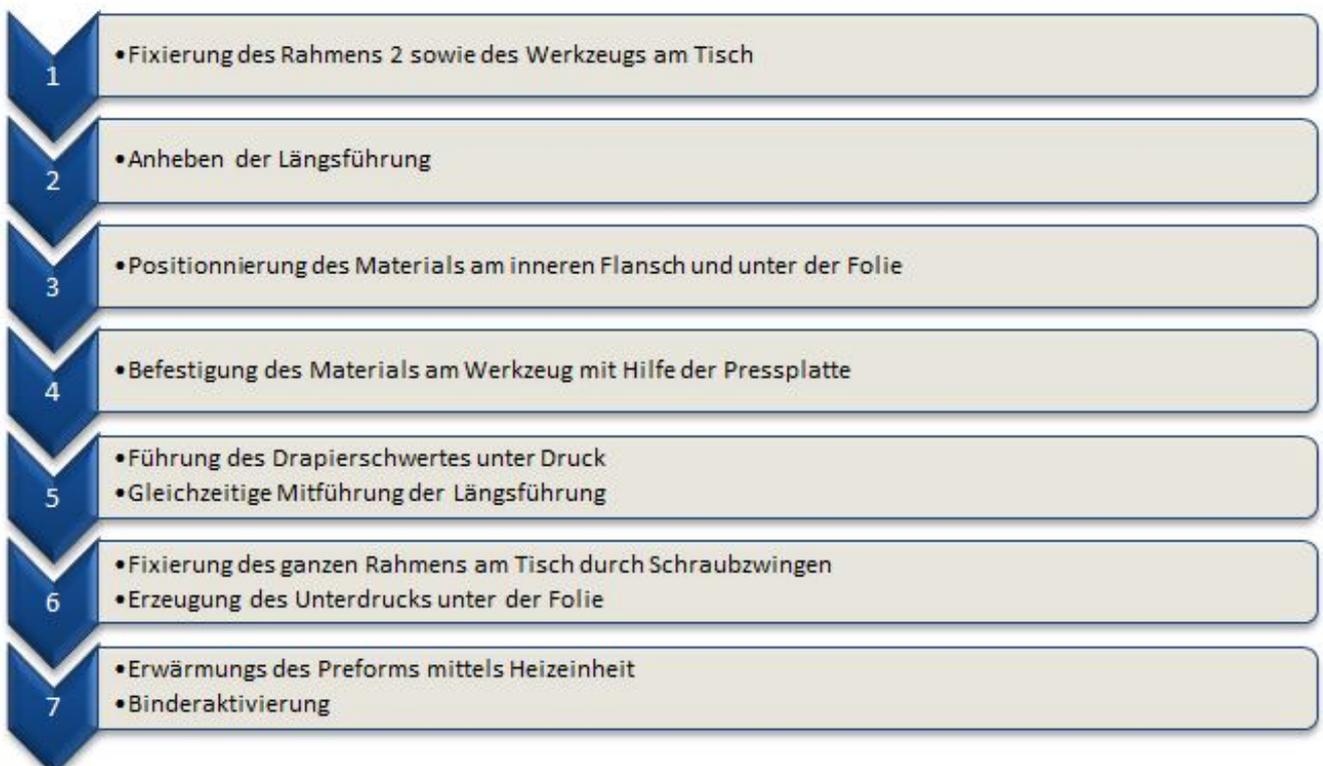


Abbildung 41 Prinzip der Bewegung der provisorische Pressplatte

Zur Erzeugung einer gleichmäßigen Pressung an der Kontaktstelle wird ein Gummiprofil an der Vorderkante befestigt. Damit wird der aufgebrauchte Druck auf das Material annähernd konstant entlang der Presskante übertragen.

Der Prozess der Umformung läuft folgendermaßen ab:



In dieser Art werden zwei Versuche gemacht, um das Konzept realerweise zu testen. Bei dem ersten Versuch werden die Teile 3 und 4 zusammen festgeschraubt, damit kein Abklappen der Querführung möglich ist. Am Ende des Versuchs wurden mehrere positive Punkte beobachtet. Die Fixierung des Materials an dem inneren Flansch durch die Pressplatte hat gut funktioniert, da kein Hochschieben des Materials aufgetreten ist. Dazu wurde keine Rückstellung des Materials nach der Drapierung entdeckt. Das heißt, dass die manuell erzeugte Spannung bei der Umformung bis zum Ansaugen der Folie für die Herstellung eines Preforms reicht. Als Nachteil bei der Fixierung der Teile 3 und 4 ist die große Anfangsspannung der Folie zu nennen. Diese Spannung erzeugt große Schwierigkeiten bei Preforming, weil sie nicht gleichmäßig verteilt ist.

Ein zweiter Versuch muss daher gemacht werden. Bei diesem ist ein Scharnier zwischen 3 und 4 frei, wodurch sich die Querführung (4) gegenüber der Längsführung (3) abklappen kann. In dieser Konfiguration bildet die Folie in der Startposition des Rahmens eine Tunnelform mit dem gleichen Radius wie das Preformwerkzeug. Während der Drapierung kann man durch Anpassung der Stellung vom Teil 4 die Spannung der Folie regeln, sodass keine Falten im Werkzeugbereich auftreten, wie beim vorherigen Versuch beobachtet (Abbildung 42). Das Ergebnis der Umformung bei diesem Versuch überzeugt durch eine gleichmäßige Verscherung des Fasermaterials.



Abbildung 42 Auftreten von Falten im Werkzeugbereich



Abbildung 43 Aussehen des Indupreformsprototyps

Die Untersuchungen in Kapitel 4 haben gezeigt, dass sich das letzte Konzept prinzipiell dafür eignet, um industriell umgesetzt zu werden. Die mittels Prototyp getestete Prozesse erlauben eine Automatisierung des Verfahrens 2b.

5. Zusammenfassung und Ausblick

Der gestiegene Bedarf an Bauteilen aus Faserverbundwerkstoffen in der Luftfahrtindustrie und ein Kostenbewusstsein erfordern die Neuentwicklung von Preformingverfahren für hohe Stückzahlen. Im Kontext dieser Studienarbeit werden verschiedene Konzepte zur Umformung und zur werkzeugintegrierten Binderaktivierung bei Preforming komplexer Geometrien aus CFK entwickelt.

Die Studienarbeit wurde im Rahmen des DLR-Projekts AZIMUT geschrieben, welches sich mit Fertigungskonzepten für Spante einer Flugzeug-Türumgebungsstruktur befasst. Die bisherigen Erfahrungen der DLR Forscher haben gezeigt, wie wichtig die sofortige Fixierung des Materials nach dessen Umformung ist. Deswegen ist ein Konzept mit werkzeugintegrierte Binderaktivierung zu entwickeln.

Die Arbeit liefert zwei Hauptergebnisse:

Einerseits wurde die Erwärmung des Fasermaterials mittels Infrarotstrahlung ausgewählt und untersucht. Dafür wurde im ersten Schritt die geeignete Erwärmungstechnik zur Aktivierung des Binders durch mehrere Versuche ermittelt. Dabei wurden die besten Anwendungsparameter gewählt, und mittels einer realen Heizeinheit getestet. Zwei Anforderungen sind zu erfüllen. Einerseits muss die Heizphase innerhalb von 30 Sekunden stattfinden. Andererseits muss das Strahlungsfeld homogen sein, um einen Toleranzfeld von maximal 10°C zu erreichen. Es wurde bestätigt, dass die Erwärmung durch Infrarotstrahlung für die Binderaktivierung von Bauteilen aus kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffe gut geeignet ist. Besonders die Kombination mit einer Silikonfolie zur Kompaktierung scheint gut geeignet.

Desweiteren wurden verschiedene Konzepte zur Umformung entwickelt. Nach Eliminierung der ungeeigneten Varianten wurden zwei Lösungen als Prototyp gebaut und getestet. Bei der ersten Variante findet die Umformung durch ein Drapierschwert statt. Die Integration eines Infrarotstrahlers ermöglicht die Kopplung der Drapierung und der Erwärmung. Die zweite Variante erlaubt eine gleichzeitige Umformung und Kompaktierung des Fasermaterials durch Mitführen einer Silikonfolie. Dadurch kann eine Rückstellung der Fasern aufgrund der Elastizität des Halbzeugs vermieden

werden. Unter Berücksichtigung von Zeit-, Kosten-, und Automatisierungsfragen wurde letztere Variante als geeignet identifiziert.

Am Ende der Arbeit wurden mehrere Ideen zur Automatisierung des Konzepts vorgelegt, sodass die Fertigung von Spanten mit hohen Stückzahlen in der Industrie möglich ist.

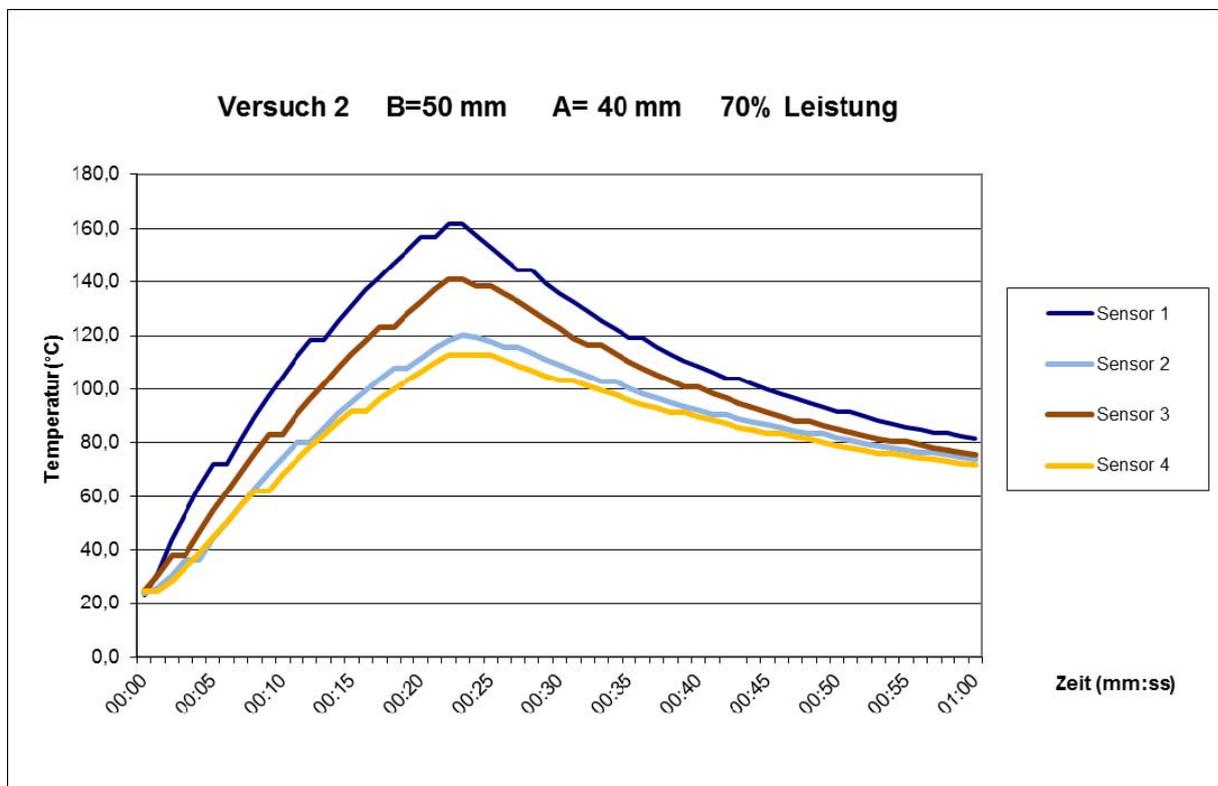
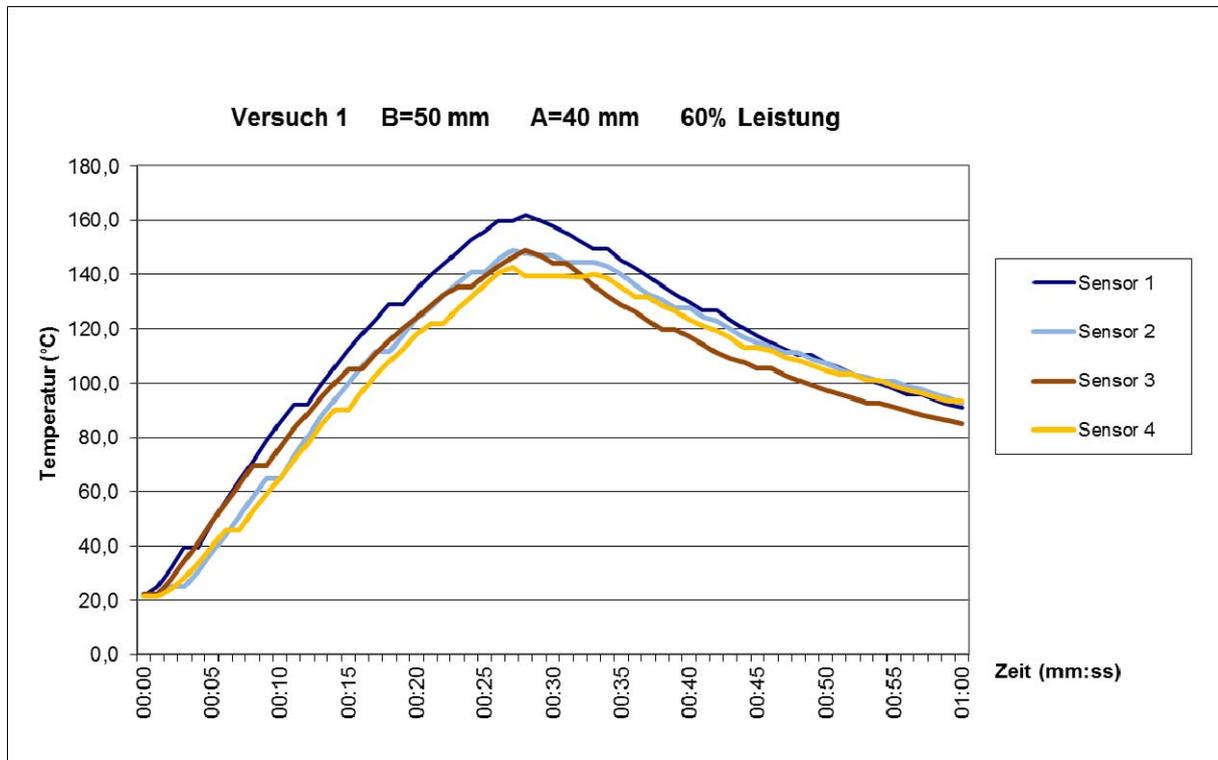
Denkbare zukünftiger Arbeiten wären die Motorisierung der Rotation der Längs- und Querführung, der Führung des Drapierschwerts und der Positionierung des Materials am inneren Flansch durch beispielweise einen Roboterarm. Die angehende Einsetzung der Pressplatte, ist durch ein hydraulisches System mit Druckmessgerät denkbar.

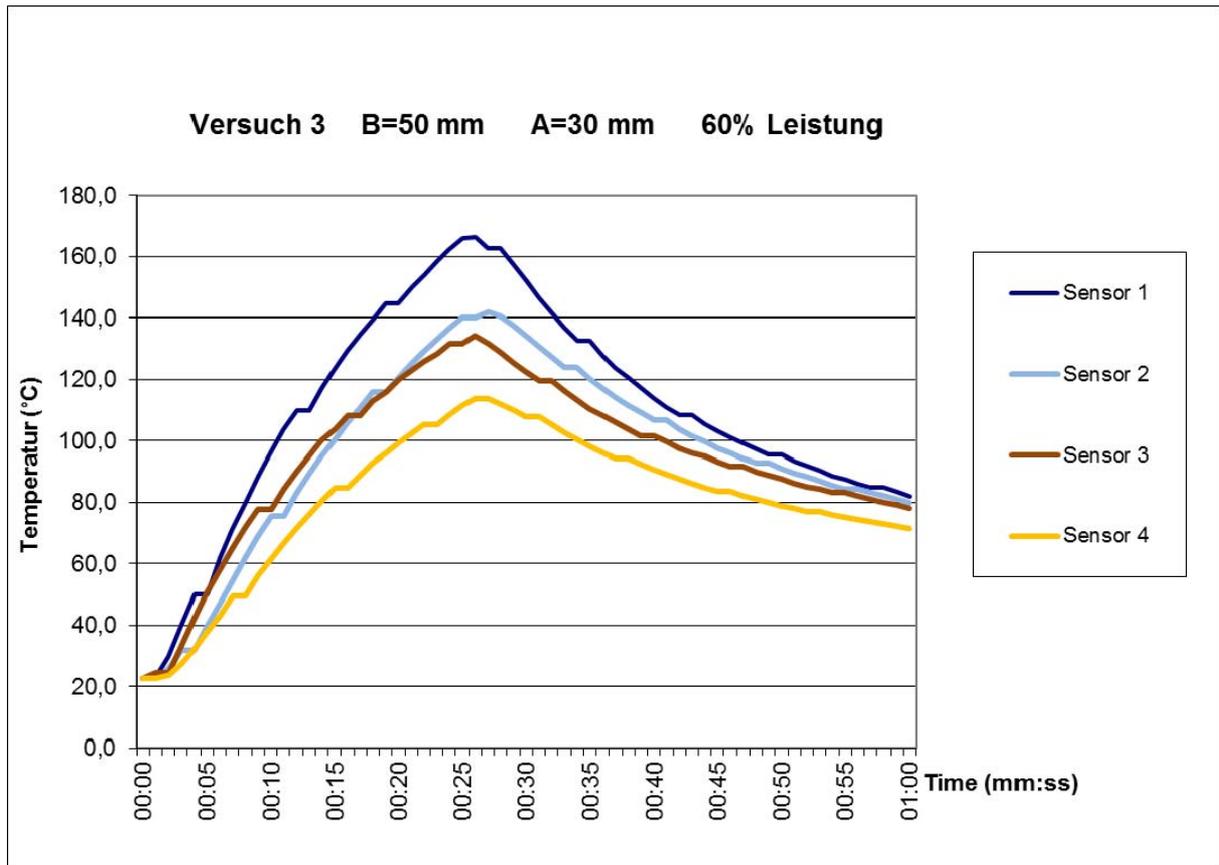
Literaturverzeichnis

- [Abr72] Abramowitz, Stegun, *Handbook of Mathematical Functions with Formulas, Graphs, and Mathematical Tables*, United States Department of Commerce, National Bureau of Standards, 1972
- [Bae98] Baehr, Stephan, *Wärme- und Stoffübertragung*, 3. Auflage, Springer, 1998
- [Baec03] Bäckmann, R., *Indirekte Schweißtechniken für Filtertextilien*, Textilveredelung, Band 38 (2003)
- [Bon09] BONNET M., *Kunststoffe in der Ingenieur Anwendung*, Wiesbaden GWV Fachverlage GmbH, 2009
- [Bru05] Brunner Matthias, *Mittel- und Hochfrequenz Erwärmung*, Berufs Bildung Baden, Februar 2005
- [DIN20] *DIN 1320 Akustik Begriffe*
- [DIN31] Deutsches Institut für Normung (Hrsg.): *Strahlungsphysik im optischen Bereich und Lichttechnik; Benennung der Wellenlängenbereiche*. DIN. 5031 Teil 7, 1984-01
- [Erm04] Ermanni Paolo, *Composites Technologien*, Skript zur Vorlesung, ETH Zürich, Oktober 2004
- [Gor11] Gornet Laurent, *Généralités sur les matériaux composites*, Ecole Centrale Nantes, Mai 2011
- [Hab09] Habenicht, G.: *Kleben- Grundlagen, Technologien, Anwendungen*, 6.Auflage, Berlin Heidelberg, Springer, Verlag, 2009

-
- [Her12] Heraeus, Infrarot-Strahler für industrielle Prozesse, Produktkatalog, (via Internet), www.heraeus-noblelight.com, 20.01.12, 10:07 Uhr
- [Herb11] Herbeck Lars, *State of the art der LCM Technologie*, DLR Braunschweig, März 2011
- [Kon12] (Autor unbekannt), EWS Robert Konnerth, Himmelwerk Hoch- & Mittelfrequenzanlagen für induktive Erwärmungsprozesse www.ews-konnerth.at/de/himmelwerk/ 19.01.2012, 16:05 Uhr
- [Mic12] (Autor unbekannt), Michael Gola Thermographie, Infrarot service, (via Internet) www.infrarot-service.de, 16.12.11, 11:03 Uhr
- [Nei04] Neitzel, M., Mitschang, P., *Handbuch Verbundwerkstoffe*, München, Wien, Carl Hanser Verlag, 2004. – ISBN 3-446-22041-0
- [Nic96] Nickel Jörg, Schubert Bernd, *Der Thermoformprozess zur Verarbeitung biologisch abbaubarer Faserverbundwerkstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen*, DLR Forschungsbericht IB 131 - 96 / 36, September 1996
- [Ort04] Ortner, Hensler, *Beurteilung von Kunststoffbränden*, Anlage II-IV der 12. BImSchV, September 2004
- [Rey06] Reyne Maurice., *Composite Solutions, Thermosets and Thermoplastics*, JEC Group, Paris, 2006
- [Sch07] Schürmann H., *Konstruieren mit Faser-Kunststoff-Verbunden*, Berlin Heidelberg, Springer-Verlag, 2007
- [Wil10] Tobias Wille, *Simulationsbasierte Produktionsprozess-Optimierung am Beispiel der Infrarottrocknung*, DLR Forschungsbericht 2010-36, September 2010

Anhang







Keramische Infrarot-Flächenstrahler

HLF



Bild 1: Elstein Flächenstrahler HLF

Elstein Flächenstrahler HLF sind keramische Infrarotstrahler, die für Betriebstemperaturen bis 700 °C und Flächenleistungen bis 42 kW/m² einsetzbar sind.

Der langgezogene Sockel der HLF-Strahler ermöglicht das Einbringen einer Wärmeisolationsschicht zwischen der Strahlungsfläche und dem Montageblech.

Durch diese Bauform in Verbindung mit Wärmeisolation wurde die Strahlungseffizienz eines keramischen Infrarotstrahlers erstmals deutlich gesteigert, hatte aber eine relativ voluminöse Heizfläche zur Folge.

Im Zuge der weiteren Entwicklung wurde die Wärmeisolation deshalb in den Strahler integriert, was zu unserem Hochtemperaturstrahler HTS mit kurzem Standardsockel führte. Heute sind die Strahler der HTS-Serie der industrielle Standard für Erwärmungs- und Trocknungsmaschinen.

Elstein Flächenstrahler HLF decken den Leistungsbereich von 250 W bis 650 W ab.

HLF

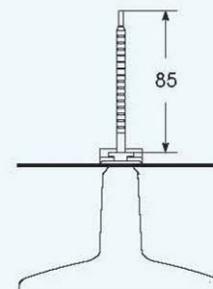
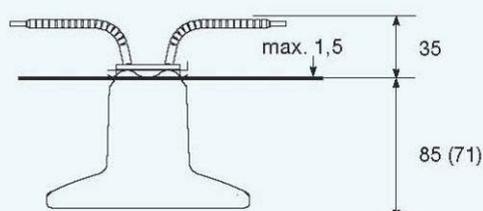
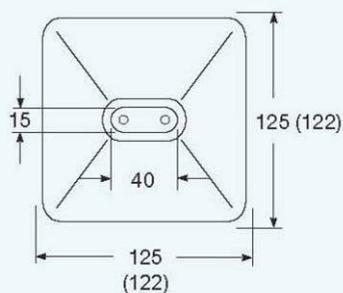
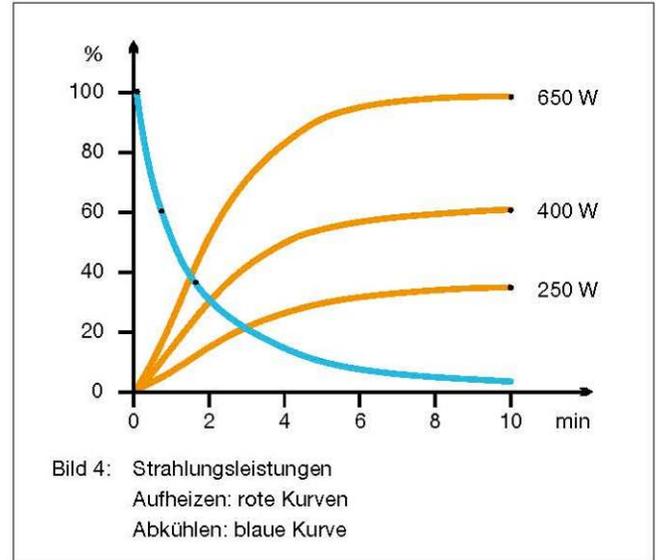
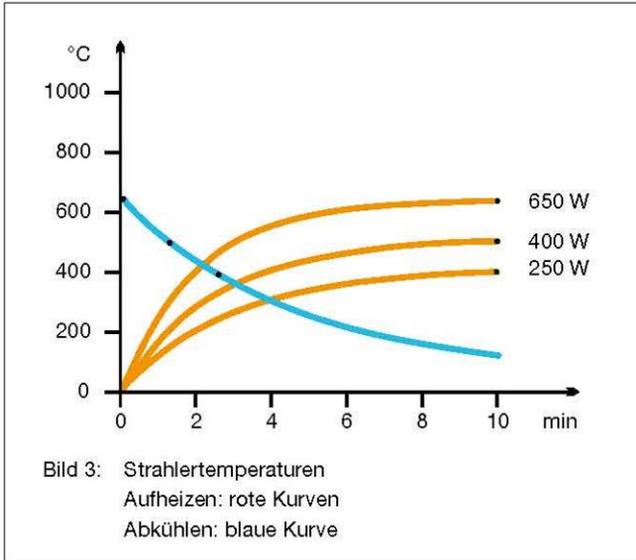


Bild 2: Einbaumaße und Strahlerabmessungen () in mm



Typ, Gewicht, Leistung	HLF	270 g	250	400	650	W
Flächenleistung			16,0	25,6	41,6	kW/m ²
Typische Betriebstemperatur			420	510	630	°C
Maximal zulässige Temperatur			700	700	700	°C
Wellenlängenbereich			2 - 10			µm

<p>Standardausführung</p> <p>Betriebsspannung 230 V Keramik-Hohl-guss Weiße Glasur Anschlussenden 85 mm Elstein Normsockel Befestigungsgarnitur</p>	<p>Thermoelementstrahler</p> <p>Bezeichnung T-HLF Integriertes Thermoelement Typ K (NiCr-Ni) TE-Anschlussenden 100 mm</p>	<p>Varianten</p> <p>Sonderleistungen Sonderspannungen Verlängerte Anschlussenden Anschlussenden mit Ringkabel-schuhen</p>
--	--	--

Die Leistung ist regelbar mittels Thermoelementstrahlern in Verbindung mit Temperaturreglern TRD 1, Thyristorschalt-einheiten TSE und weiterem Zubehör.

Für den jeweiligen Anwendungsfall sind die nationalen Sicherheitsvorschriften zu beachten, wie zum Beispiel die IEC- oder EN-Norm 60519-1, Sicherheit in Elektrowärmeanlagen.

Unsere Montageanleitungen, Betriebs- und Sicherheitshinweise sind zu beachten.