

Ultraschall-Preformmontage zur Herstellung von CFK-Luftfahrtstrukturen

Vom Fachbereich für Maschinenbau und Verfahrenstechnik
der Universität Kaiserslautern
zur Verleihung des akademischen Grades

Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)

genehmigte Dissertation

von Herrn

Frank Michael Weiland

aus Heidelberg

Tag der mündlichen Prüfung: 22. Juni 2012
Vorsitzender: Prof. Dr.-Ing. Dietmar Eifler
Referent: Prof. Dr.-Ing. Peter Mitschang
Koreferent: Prof. Dr.-Ing. Thomas Gries

Danksagung

Diese Arbeit entstand während meiner Zeit als Doktorand in der Abteilung „Production Technologies and Projects“ der Eurocopter Deutschland GmbH und am Institut für Verbundwerkstoffe der TU Kaiserslautern.

Für die wissenschaftliche Begleitung dieser Arbeit und die konstruktiven Anregungen danke ich Herrn Professor Dr.-Ing. Peter Mitschang. Ich danke Herrn Professor Dr.-Ing. Dietmar Eifler für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes und Herrn Professor Dr.-Ing. Thomas Gries für die Zweitbegutachtung.

Herrn Dr.-Ing. Christian Weimer bin ich zu großem Dank verpflichtet dafür, dass er mit großem Vertrauensvorschuss diese Arbeit möglich gemacht hat. Ich habe sehr viel in dieser Zeit gelernt und dem messe ich höchsten Wert bei.

Es war eine Freude zu sehen, wie sich Kollegen bei Eurocopter für die Thematik begeistern ließen und mich mit großem Eigenantrieb unterstützt haben. Hierfür möchte ich insbesondere Herrn Dipl.-Ing. Stefan Gubernatis, Herrn Dr.-Ing. Uwe Beier und Herrn Jakob Meixner meinen Dank aussprechen.

Während meiner Präsenzphasen am IVW wurde ich auf eine sehr kollegiale Art integriert und auch als Externer hervorragend unterstützt. Insbesondere Herrn Dr.-Ing. Gunnar Rieber möchte ich an dieser Stelle für seine Unterstützung und „Gastfreundschaft“ danken.

meinen Eltern

Kurzfassung

Die Preformmontage ist ein zentrales Element moderner Prozessketten zur effizienten Herstellung von CFK-Komponenten integraler Bauweise. Ihre technologische Darstellung mittels der Ultraschall-Schweißtechnologie erschließt neue Potentiale für die binderbasierte Preform-Prozesskette bezüglich der Reduzierung von Prozesszeit und Energieverbrauch, der Steigerung des Automatisierungsgrades und der Verarbeitung komplexer Geometrien unter Einsatz von Hochtemperatur-Bindersystemen. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde die Ultraschall-Schweißtechnologie zur Montage bebinderter Preforms auf Basis grundlegender Untersuchungen entwickelt und anlagentechnisch umgesetzt. Studien der Wirkmechanismen des Prozesses zur Wärmeerzeugung und Laminatkompaktierung wurden durchgeführt. Die Gewichtung und Interaktion der Prozessparameter wurde mittels statistisch geplanter Versuche ermittelt und die mechanischen Eigenschaften verschweißter Lamine wurden gemessen. Das aufgrund von Randeffekten stark ausgebildete Temperaturprofil im Preformlaminat wurde messtechnisch erfasst und rechnerisch modelliert. Die Studien bildeten die Grundlage zur Umsetzung eines robotergestützten, parameterüberwachten Ultraschall-Endeffektors.

Abstract

The assembly of preforms is considered key element within modern preforming process chains for the manufacture of integral components made of carbon fibre reinforced plastics (“CFRP”). With the use of the ultrasonic welding technology for the assembly process new potentials can be released for binder based preforming approaches. During such operation ultrasound is induced into the preform under pressure within few seconds, heat is generated to melt the binder polymer and while the binder cools down under pressure, an adhesive bond is created.

As state of the art for preform assembly methods thermal based operations (convection oven) have been considered as well as textile based methods (sewing). Objectives have been quantified to achieve substantial benefits in comparison to these assembly routes: Reduction of process time, energy consumption and invest costs.

Specific welding seam requirements have been defined as well as methods to measure the according quantities. The required peel strength has been determined with 0.4 N/cm. The peel strength has been measured with dedicated specimen on a test bench. The maximum allowed fiber undulation in the welding seam has been quantified with 15 ° (local deviation from fiber nominal orientation) while an optical measurement method could be applied for its detection.

For the conduction of process studies, a dedicated test bench was equipped with an ultrasonic welding unit. This computer controlled test bench was designed to enable both continuous and spot welds with full parameter control, measurement of all relevant process factors and maximum reproducibility of the welding operations. The basic investigations have been conducted with a carbon fiber Non Crimp Fabric (“NCF”, 254 g/m²) and a Co-Polyamide binder veil.

The mechanism of heat generation within the preform could be identified as mechanical friction of the fibers under insonification, which makes the process independent from the binder polymer type (unlike ultrasonic welding of plastics without reinforcement).

The process’ degree of efficiency has been determined with 30.5 %. This is the fraction of the electrical power consumed by the ultrasonic generator that actually is converted into thermal energy within the preform. Most of the energy saving potential of

the ultrasonic technology however lies in the fact that heat is only generated where needed: In the welding zone under the ultrasonic horn. Virtually no heating of tooling, air or surrounding preform takes place.

An ultrasonic frequency of 30 kHz has been identified as suitable; welding units of higher frequencies cannot deliver the required amplitude, lower frequency systems inherit disadvantageous large dimensions.

The welding pressure, amplitude and weld speed (respectively weld time for spot welds) are the main process parameters. Their influence has been studied and a parameter optimisation for a ten layered, bindered NCF has been conducted. A pressure of 0.68 MPa, an amplitude of 17 μm and a weld speed of 2.2 m/min has been identified as optimal for efficient insonification and acceptable distortions of the fiber architecture. The amplitude has the most significant influence on the weld result.

It has been observed, that during pressurized insonification, additional compaction in the preform laminate takes place. The degree of compaction increases with a decreased number of filaments carrying the acoustic load. After the end of the welding process a fiber volume content (FVC) of around 55 % has been measured in the welding seam of bindered NCF. With the welded preform samples, infiltration and cure has been conducted using the Resin Transfer Moulding technology (RTM) as well as the Vacuum Assisted Resin Infusion process (VARI). The VARI laminates with a FVC of around 52 % showed residual imprints of the weld process. These could not be observed in the RTM laminate with its FVC of 55 %.

The interlaminar shear strength ("ILSS") has been measured for samples with different welding configurations. Each configuration has been attributed a possible defect induced by the welding operation. These defects were fiber squeeze out, damage of fiber sizing and fiber undulation. No reduction of the ILSS has been detected; neither for NCF nor for the woven fabric based laminate.

Measurement of the temperature development over the thickness of a preform laminate revealed a temperature profile which is strongly influenced by the thermal flux into the ultrasonic horn and the tool ("skin effect"). The temperature profile has been modelled based on the principle of the semi-infinite bodies. The system consisting of horn, laminate and tool has been divided in two sub systems. For each sub system the temperature profile has been calculated based on welding and material parame-

ters. The profiles have been merged to the complete profile and compared to the measurements. An average accordance of 15,6 % has been observed.

Based on the results of the process studies a robot based welding head has been designed and integrated into a robot cell. A parameter based quality assurance has been integrated into the control system. As a demonstrator a frame-beam element has been chosen, which represents a typical section of a composite framework. The demonstrator has been manufactured in a fully automated routine.

With the manufacture of a representative element the potential of the technology could be confirmed and all objectives could be reached.

Inhalt

Nomenklatur.....	VII
Formelzeichen	VIII
1 Einleitung.....	1
2 Zielsetzung und Aufbau der Arbeit.....	3
3 Stand der Technik	5
3.1 Prepreg-Technologie	5
3.2 Preform-Infiltrations-Verfahren.....	6
3.3 Fügeverfahren in der Preform-Prozesskette	13
3.4 Ultraschallschweißen	21
3.5 Zusammenfassung	29
4 Anlagentechnik.....	30
4.1 Schwingsystem.....	30
4.2 Versuchsstand.....	31
5 Voruntersuchungen	36
5.1 Berechneter maximaler Faservolumengehalt.....	36
5.2 Abhängigkeit des Faservolumengehalts vom Kompaktierdruck	38
5.3 Idealer Energieeintrag.....	39
5.4 Bestimmung des effektiven Wirkungsgrades	41
6 Material und Methodik.....	44
6.1 Halbzeuge	44
6.2 Anforderungen an die Schweißnaht.....	45
6.3 Messung der Nahtkenngößen.....	48
6.4 Parameterstudien	53
6.5 Interlaminare Scherfestigkeit geschweißter Laminate	55
7 Ergebnisse der Prozessstudien	58
7.1 Energieumwandlung	58

7.2	Nahtkompaktierung.....	59
7.3	Temperaturentwicklung im Preformlaminat.....	64
7.4	Ergebnis der Parameterstudie.....	65
7.5	Interlaminare Scherfestigkeit.....	70
7.6	Zusammenfassung und Diskussion.....	71
8	Wärmeflussmodell.....	73
8.1	Motivation.....	73
8.2	Berechnungsschritte.....	73
8.3	Validierung.....	78
8.4	Beurteilung und Anwendung.....	81
9	Endeffektor.....	82
9.1	Spezifikation.....	82
9.2	Konstruktive Ausführung.....	83
9.3	Validierungselement.....	85
10	Zielerreichung und Diskussion.....	87
10.1	Zielerreichung.....	87
10.2	Zur Gültigkeit der Ergebnisse.....	88
10.3	Anlagentechnisches Weiterentwicklungspotential.....	90
10.4	Weitere Einsatzpotentiale.....	92
11	Zusammenfassung.....	94
	Literatur.....	96
	Anhang.....	105
	Betreute Abschlussarbeiten.....	112
	Lebenslauf.....	113

Nomenklatur

CAD	Computer Aided Design
CFK	Carbonfaserverstärkter Kunststoff
CNC	Computerized Numerical Control
DoE	Design of Experiments (statistische Versuchsplanung)
ECD	Eurocopter Deutschland GmbH
ECS	Eurocopter Standard
ECS6090	Eurocopter Standard für ein Carbon-Biaxial-Gelege
FVG	Faservolumengehalt
FVK	Faserverstärkter Kunststoff
GFK	Glasfaserverstärkter Kunststoff
GUI	Graphical User Interface
G0926	Handelsbezeichnung eines Carbonfaser-Gewebes der Firma HEXCEL
HS	Harness Satin (Webart)
ILSS	Interlaminar Shear Strength („interlaminare Scherfestigkeit“)
LVE	Laminatvolumeneinheit
LCM	Liquid Composite Moulding
NCF	Non Crimp Fabric („Gelege“)
PEEK	Polyetheretherketon
PES	Polyethersulfon
PMS	Preform-Messsystem
RTM	Resin Transfer Molding
SP	Sub Preform (Zwischenprodukt zur infiltrationsbereiten „Final- Preform“)
SPS	Speicherprogrammierbare Steuerung
TR	Tailored Reinforcement (ebener, mehrlagiger Zuschnitt)
UD	unidirectional/unidirektional
US	Ultraschall
VARI	Vacuum Assisted Resin Infusion
μCT	Mikro-Computertomograf

Formelzeichen

A	Amplitude
a_{\max}	maximale Beschleunigung des Greifers beim Preform-Handlingvorgang
b_L	Wärmeeindringfähigkeit des Laminats
b_S	Wärmeeindringfähigkeit der Sonotrode
b_{LVE}	Breite der Laminatvolumeneinheit (= Breite der Schweißfläche)
c	Schallgeschwindigkeit
$c_{p,B}$	spezifische Wärmekapazität des Binders
$c_{p,F}$	spezifische Wärmekapazität der Faser
$c_{p,Luft}$	spezifische Wärmekapazität der Luft
$c_{p,LVE}$	spezifische Wärmekapazität der Laminatvolumeneinheit
E'	Speichermodul
E''	Verlustmodul
E_{LVE}	Energieeintrag in die Laminatvolumeneinheit, „ideal“ (ohne Verluste)
E_{th}	thermische Energie zum Erwärmen der Laminatvolumeneinheit LVE
E_{t12}	vom Schwingsystem zwischen t_1 und t_2 umgesetzte Energie
F_0	Fourierzahl
F_G	Greiferkraft
$F_{S,m}$	Mindestschälkraft beim Handling der T-Beam-Preform
F_S	Geforderte Schälfestigkeit der Schweißnaht
G_{Pf}	Gewichtskraft einer Preform
h_{LVE}	Höhe der Laminatvolumeneinheit (= Preformdicke unter der Schweißfläche)
L	Länge einer Preform
l_{LVE}	Länge der Laminatvolumeneinheit (= Länge der Schweißfläche)
LVE	Laminatvolumeneinheit (Volumen unter der Schweißfläche)
$m_{A,N}$	Flächengewicht des Nähfadens im Gelege
$m_{A,NCF}$	Flächengewicht des Geleges
$m_{B,LVE}$	Bindermasse im Laminatvolumenelement
$m_{F,LVE}$	Fasermasse im Laminatvolumenelement

$m_{\text{Luft,LVE}}$	Luft in der Laminatvolumeneinheit
m_{LVE}	Masse der Laminatvolumeneinheit
m_{TPF}	Masse der T-Beam Preform
p	Druck
P_{US}	Schallleistung
P_{USG}	Momentanleistung des Ultraschallgenerators
t_{H}	Heizzeit
T_{K}	Kontakttemperatur
$T_{\text{K,SL}}$	Kontakttemperatur zwischen Sonotrode und Laminat
t_{k}	Kontaktzeit
t_{s}	Schweißzeit
$T_{\text{L,max}}$	Laminatmaximaltemperatur
T_{∞}	Umgebungstemperatur
$\tan \delta$	Verlusttangens
V_{LVE}	Volumen der Laminatvolumeneinheit
\dot{Q}_{ml}	mittlere Wärmeerzeugung durch akustische Reibung
v	Vorschubgeschwindigkeit beim kontinuierlichen Schweißvorgang
z	Laminattiefe
ϵ_0	Dehnrage, amplitudenabhängig
η_{A}	Ähnlichkeitsvariable
η_{USS}	Wirkungsgrad des Ultraschall-Schweißprozesses
θ	Biot-Zahl
λ	Wellenlänge der Schwingung
λ_{z}	Wärmeleitfähigkeit der Preform in z-Richtung
ρ_{Luft}	Dichte von Luft bei Raumtemperatur
$m_{\text{A,N}}$	Flächengewicht des Nähfadens im Gelege
$m_{\text{A,NCF}}$	Flächengewicht des Geleges
$\varphi_{\text{A.KGP}}$	Anteil der Fläche bester Kreisgitterpackung an der Querschnittsfläche eines Rovings
φ_{KE}	Flächenanteil von auf einer Linie aufgereihten Kreisen
φ_{KGP}	Flächenanteil von Kreisen in bester Gitterpackung in der Ebene ohne Randeefekte

φ_R	Faservolumengehalt eines Rovings (ohne Nähfaden)
$\varphi_{V, F}$	Volumenanteil des Nähfadens am Gelege
φ_{\max}	maximal möglicher Faservolumengehalt des Geleges
ω	Kreisfrequenz der Schwingung

1 Einleitung

Der stetig steigende Bedarf an Hochleistungs-Leichtbaustrukturen in der Luftfahrt ist hauptsächlich dem Anstieg des Reise- und Transportaufkommens bei gleichzeitig erhöhter Sensitivität bezüglich der dabei verbrauchten fossilen Energieträger geschuldet. Im Hubschrauberbau kommt dem Leichtbau eine nochmals gesteigerte Bedeutung zu, was auf die speziellen, hoch anspruchsvollen Einsatzprofile und dem prinzipbedingt hohen Energiebedarfs des senkrecht startenden Drehflüglers zurückzuführen ist.

Carbonfaserverstärkter Kunststoff (CFK) gilt als Werkstoff höchsten Leichtbaupotentials, was auf die hohe Steifigkeit und Festigkeit der Faser bei vergleichbar geringer Dichte des Verbunds zurückzuführen ist. Entsprechend ist der Einsatz von CFK in der Luftfahrt seit den 1960er Jahren kontinuierlich gestiegen, wofür auch der Anteil am Strukturgewicht moderner Passagierflugzeuge (Airbus A350 und Boeing 787) von ca. 50 % spricht; Strukturen moderner Hubschrauber weisen gar einen Anteil von über 80 % auf (Abbildung 1.1).

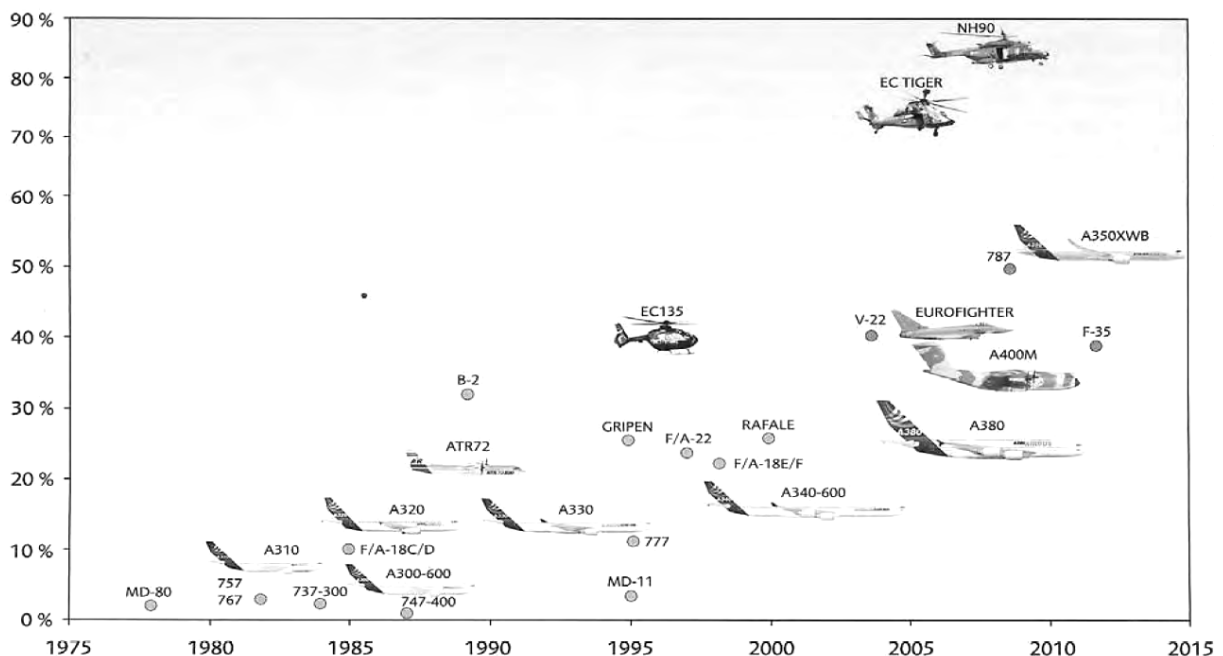


Abbildung 1.1 Entwicklung des Anteils von CFK am Strukturgewicht in der Luftfahrt [1]

Hieraus ergeben sich Anforderungen an Effizienz und Automatisierbarkeit in der CFK-Produktion. Neben der seit den 1960er Jahren eingesetzte Duroplast-Prepreg-

Technologie bieten neuartigen Fertigungstechnologien, insbesondere die Preform-Infiltrations-Routinen, spezifische Vorteile. Neben der Reduzierung von Material- und Lagerkosten eröffnen sich neue Möglichkeiten zur Automatisierung von wertschöpfungsreichen Elementen der Prozesskette. Prinzip der Preforming-Routinen ist der Aufbau eines trockenen Faservorformlings (Preform) mit anschließender Harzinfiltration. Diese Preform besteht in der Regel aus mehreren Preformkomponenten (Sub Preforms), welche zumeist unter Zuhilfenahme eines polymeren Hilfsstoffes gefügt werden (Binderaktivierung). Diese Fügeprozesse können bis dato nur unter Inkaufnahme von entweder dem Zeit- und Energieverbrauch einer Erwärmung der gesamten Preform oder den geometrischen Limitierungen eines 3D-Nähprozesses umgesetzt werden. Mit der Applikation der Ultraschall-Schweißtechnik zum Fügen von verbinderten Preforms hingegen wird eine automatisierte, energie- und zeiteffiziente Möglichkeit zum lokalen Fügen von Preforms geschaffen. Die unter Druck in das Preformlaminat eingeleitete akustische Energie ermöglicht die Aufschmelzung des Polymers in wenigen Sekunden, wobei weitgehend kommerziell verfügbare Anlagentechnik eingesetzt werden kann. Die kompakte und schlanke Gestaltung der Komponenten garantiert eine sehr gute Zugänglichkeit zur Montage von Verstärkungsstrukturen.

Erst mit der flexiblen, hocheffizienten und automatisierten Montage von Preforms und der damit einhergehenden Darstellung integraler Strukturen auf Preformebene kann das Einsparpotential der Preformtechnologie voll erschlossen werden.

2 Zielsetzung und Aufbau der Arbeit

Die Ziele dieser Arbeit sind die Definition, Entwicklung und Umsetzung eines Prozesskettenelements zur Preformmontage bei der Fertigung integraler Faserverbundstrukturen. Technologische Basis ist die Ultraschall-Schweißtechnologie.

Als Stand der Technik sind sowohl die rein textile Konfektion (Nähtechnik) zu sehen, als auch die binderbasierte Preformmontage unter Applikation von vakuumunterstützten, thermischen Verfahren wie dem Umluftofen. Sowohl der Nähtechnik als auch der Binderaktivierung mittels Umluftofen sind spezifische Vor- und Nachteile zuordenbar. Ziel ist es, jeweilige Vorteile mittels der Ultraschall-Technologie zu vereinen oder zu übertreffen. Im Folgenden wird dieses Ziel auf Einzelmerkmale heruntergebrochen, wobei für jedes Merkmal als Referenz zum Ultraschallschweißen die jeweils vorteilhaftere bzw. vergleichbare Technologie gewählt wurde.

Es wird erwartet, dass

- der *Zeitbedarf* für die Erzeugung einer Preform-Montagenahnt geringer ist, als bei der Erzeugung einer textilen Konfektionsnaht,
- der *Energiebedarf* zur binderbasierten Fügung weniger als 20 % gegenüber der Referenztechnologie (Ofen) beträgt,
- die möglichen *Verarbeitungstemperaturen* im Hinblick auf die Integration hochschmelzender Thermoplaste auf 350 °C gehoben werden können (wirtschaftlicher Betrieb eines Umluftofens bis ca. 200 °C),
- keine Einbringung von *Hilfsstoffen* in das Bauteil notwendig ist,
- keine negativen Auswirkungen auf die mechanischen Eigenschaften des Verbunds (insbesondere der interlaminaren Scherfestigkeit) messbar sind,
- Limitierungen der verarbeitbaren *Bauteilgröße* (zweiseitiger Zugang Nähtechnik bzw. Ofengröße) aufgehoben werden können,
- das *Investitionsvolumen* für einen Ultraschall-Schweißkopf maximal 70 % dessen eines Nähkopfes beträgt.

Aus dieser Zielsetzung wurde die Struktur der Arbeit abgeleitet (Abbildung 2.1).

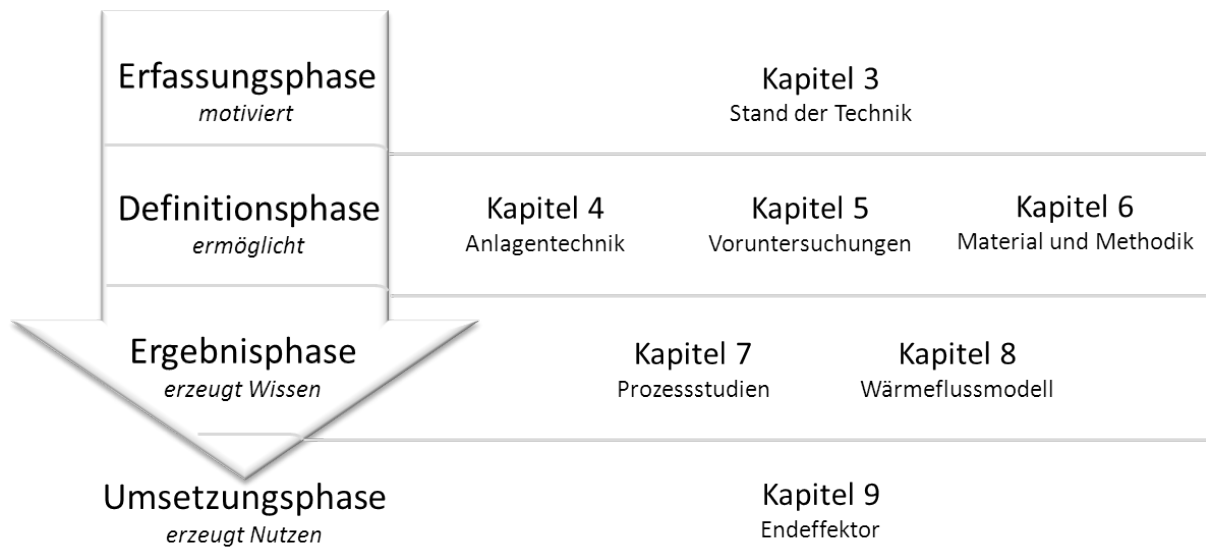


Abbildung 2.1: Struktur der Arbeit

Mit der Erfassung des Standes der Technik wird der Handlungsbedarf begründet. Des Weiteren werden Problemfelder bei der Applikation der Ultraschall-Technik zum Preformschweißen abgeschätzt.

Dies ermöglicht die Definition der Anlagentechnik zur Durchführung der Studien sowie der dabei verwendeten Materialien und Methoden. Hierzu werden Voruntersuchungen getätigt.

Mit der Durchführung, Auswertung und Interpretation der Prozessstudien wird die Wissensgrundlage zur Entwicklung und Umsetzung des robotergestützten Endeffektors geschaffen. Parallel hierzu wird ein Wärmeflussmodell aufgestellt und validiert, welches eine Abschätzung der notwendigen Anlagenparameter zum Betrieb des Endeffektors ermöglicht.

Mit der Konstruktion, Umsetzung und Inbetriebnahme des Endeffektors können die Zielgrößen verifiziert und die Technologie dem Einsatz zur Verfügung gestellt werden.

3 Stand der Technik

In diesem Kapitel wird einleitend auf die Prepreg-Technologie als das etablierte Verfahren zur Herstellung von Hochleistungs-FVK-Bauteilen eingegangen. Im Anschluss werden in größerer Ausführlichkeit die Preform-Technologien erläutert, die mit der Prepreg-Technologie konkurrieren, wobei jeweils spezifische Vorteile herausgestellt werden. Innerhalb der Preform-Technologien wird speziell die sequentielle Prozesskette beleuchtet und hierbei insbesondere das Kettenelement „Preform-Montage“ in verschiedenen technologischen Darstellungen. Verfahren zur Herstellung von Kurzfaserverbundbauteilen werden aufgrund ihrer geringen Relevanz für den Luftfahrtsektor ebenso ausgeblendet wie Verfahren zur Verarbeitung von Halbzeugen mit thermoplastischer Matrix.

Im letzten Teil dieses Kapitels werden historische und technische Grundlagen der Ultraschall-Schweißtechnik sowie ihre Anwendung in der FVK-Fertigung erläutert.

3.1 Prepreg-Technologie

Grundlegendes Prinzip der Prepreg-Technologie ist die manuelle Verarbeitung von mit Matrixmaterial getränkten, flächigen Faserhalbzeugen („Prepregs“). Diese Technologie, in den 1960er Jahren von der Fa. Boeing, Seattle, entwickelt, ist bis heute dominierend bei der Fertigung von Bauteilen aus faserverstärktem Kunststoff für Anwendungen in der Luft- und Raumfahrt [2]. Schätzungen aus dem Jahr 2008 gehen davon aus, dass im Luftfahrtbereich die Herstellung von Faserverbundstrukturen zu 80 bis 90 % mittels der Prepreg-Autoklav-Technologie erfolgt [3].

Prepregs können aus Geweben, Gelegen oder unidirektionalen Faserstrukturen bestehen, als Matrixwerkstoffe können sowohl duroplastische Systeme mit Härter als auch thermoplastische Systeme dienen. Im Rahmen dieser Arbeit werden ausschließlich duroplastische Systeme und die entsprechenden Prozessketten betrachtet.

Duroplastisches Prepreg wird bahnförmig auf Rollen geliefert und muss gekühlt gelagert werden, um eine vorzeitige Reaktion von Harz und Härter zu verhindern. Bei Raumtemperatur nimmt Prepreg einen klebrigen Zustand ein („Tack“). Dieser Zu-

stand ist gewünscht und durch Zusatzstoffe gesteuert; er ermöglicht die Erzeugung mehrlageriger Schichten auf Umformwerkzeugen komplexer Geometrie.

Die Prepregmatte wird abgerollt und es werden Konturzuschnitte erzeugt. Die Zuschnitte werden sukzessive auf bzw. in ein Formwerkzeug drapiert, wobei der Laminataufbau erzeugt wird. Um eine ausreichend genaue Abbildung der dreidimensionalen Geometrie zu erreichen und insbesondere, um der Lunkerbildung vorzubeugen, wird das Laminat in Stufen zwischenkompaktiert. Hierzu wird ein Vakuumaufbau (aus Folie oder Membran) erzeugt und evakuiert. Die Aushärtung des Laminats erfolgt üblicherweise bei Überdruck im Autoklaven oder auch in Heizpressen. Die Konsolidierung garantiert Lunkerfreiheit und hohe Faservolumenanteile. Aktuelle Entwicklungen konzentrieren sich auch auf neue Prepregsysteme zur Aushärtung ohne Autoklaven („Out-of-Autoclave-Prepregs“).

Neben der erreichbaren hohen Bauteilqualität sind für den Prepreg-Prozess hohe Anlagen-, Energie- und Halbzeugkosten sowie sein geringer Automatisierungsanteil bei der Verarbeitung von Flächenhalbzeugen charakteristisch [4]. Dies gilt insbesondere im Vergleich zu den im Folgenden erläuterten Preform-Infiltrations-Verfahren.

3.2 Preform-Infiltrations-Verfahren

Im Gegensatz zur Prepreg-Technologie basieren die Preform-Infiltrations-Verfahren auf der Verarbeitung trockener Faserhalbzeuge („Preforming“), anschließender Infiltration und Aushärtung von niederviskosen Duromermatrixsystemen. Die Harzinfiltration kann in einer geschlossenen (evtl. evakuierten) Kavität unter Überdruck (RTM-Verfahren [5]) oder auf einem einseitigen Formwerkzeug mit Vakuumaufbau (Vakuuminfusionsverfahren [6]) erfolgen.

Unter dem Begriff Preforming versteht man die Herstellung eines trockenen Vorformlings aus Faserhalbzeug und einem etwaigen Hilfsstoff (Binder). Prinzipiell wird zwischen den direkten Preform-Verfahren und den sequentiellen Preformverfahren unterschieden (Tabelle 3-1).

Tabelle 3-1: Preformverfahren: Überblick (nach [7])

Direktes Preforming		Sequentielles Preforming	
Herstellung der Preform direkt aus den Verstärkungsfasern in einem Arbeitsschritt		Herstellung der Preform aus mindestens zwei Arbeitsschritten	
Standard	Textilprozesse	Binder-technologie	Textiltechnologie
- Faserspritzen	- Flechten 2D & 3D - Weben 3D - Stricken - Fiber Placement Methoden	- Binder-umformtechnik - Tapelegen - Fiber Patch Preforming	- Nähen 2D & 3D

Die Preform-Technologie eignet sich zur Realisierung gesteigerter wirtschaftlicher sowie technologischer Anforderungen und bietet im Vergleich zur Prepreg-Routine folgende Potentiale [8]:

- Höhere Produktivität durch geringere Nebenzeiten, eine schnelle Faserablage und Prozessautomatisierung
- Erhöhte Freiheitsgrade bei der Realisierung der Faserarchitektur und Leichtbauweise durch Faserorientierung in der dritten Raumrichtung sowie geeignete Fügetechnologien
- Geringe Auswirkungen auf die Umwelt durch energiearme, trockene Lager- und Verarbeitungsprozesse bei Raumtemperatur

Die wesentlichen Unterschiede innerhalb der Preformverfahren werden im Folgenden durch nähere Beleuchtung der direkten und sequentiellen Ansätze erläutert.

3.2.1 Direkte Preformverfahren

Direkten Preformverfahren liegt die Applikation des Faserhalbzeuges auf einem endkonturgleichen Formwerkzeug ohne Zwischenschritte zugrunde. Für Hochleistungs-Faserverbundwerkstoffe sind insbesondere die 3D-Textilprozesse relevant, da sie die Verarbeitung von Endlosfasern ermöglichen. Hierbei können sowohl „klassische“ Technologien wie 3D-Weben und Flechten zum Einsatz kommen, als auch das Dry-Fiber-Placement-Verfahren.

Beim 3D-Weben wird, im Gegensatz zum konventionellen Weben, eine bidirektionale Fachbildung realisiert, was eine Erzeugung von Profilen (T-Profil, Rundprofil etc.) ermöglicht. Wie beim 2D-Weben können nur bidirektionale Faserorientierungen erzeugt werden. Jedoch ist die Integration von Fäden in z-Richtung möglich, was den Delaminationswiderstand des Laminats signifikant erhöhen kann [9], **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden..**

Beim (Um-) Flechten werden Rovings von einem kreisförmigen Portal („Radialflechter“) zum Kreismittelpunkt auf ein robotergeführtes Positivwerkzeug geleitet, wobei eine regelmäßige Verschlingung der Rovings stattfindet und ein konsolidierter, endkonturnaher Lagenaufbau erzeugt wird [10]. Neben dem hohen Automatisierungsgrad und der relativ hohen Produktivität und Reproduzierbarkeit weisen geflochtene Bauteile auch eine gesteigerte Impactbeständigkeit auf [12].

Beim Dry-Fiber-Placement werden bebinderte Rovings mittels einer robotergestützten Funktionseinheit direkt auf das Formwerkzeug abgelegt, wobei durch den Funktionskopf sowohl Wärme zum Aufschmelzen des Binders, als auch Druck zum Fixieren und Konsolidieren des Rovings bereitgestellt werden. Der Wärmeeintrag kann sowohl durch Laser als auch Heißgas gewährleistet werden; der Druck wird üblicherweise durch eine Andrückrolle appliziert. Es können sowohl einzelne Rovings („single tow“), als auch mehrere Rovings („multi tow“) gleichzeitig abgelegt werden. Signifikanter Vorteil dieser Technologie ist die Erhöhung der Freiheitsgrade bei der Erzeugung der Faserarchitektur und damit eine Umsetzung von lastgerechtem Bauteildesign. Diesem Vorteil steht die begrenzte Ablagegeschwindigkeit (kg Fasermaterial pro Zeiteinheit), insbesondere bei größerer Bauteilkomplexität, gegenüber. Umstehend ist ein Fiber-Placement-Endeffektor abgebildet.



Abbildung 3.1: Dry-Fiber-Placement-Prozess [13]

3.2.2 Sequentielle Preformverfahren

Innerhalb der sequentiellen Prozesskette werden textile Flächenhalbzeuge (mit oder ohne Binder) von Rollen verarbeitet. Im Gegensatz zu den direkten Preformverfahren werden beim sequentiellen Preforming mehrere Prozessschritte zur Herstellung einer Gesamtpreform benötigt. Die Prozessschritte sind in Abbildung 3.2 benannt.

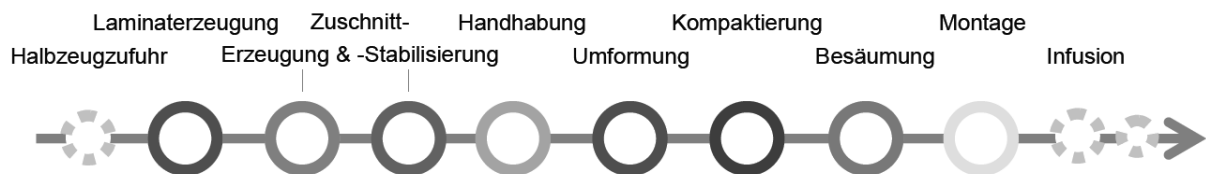


Abbildung 3.2: Prozessschritte sequentielles Preformverfahren

Im Folgenden wird auf die Prozessschritte und ihre technologische Darstellung eingegangen.

Laminataufbau

Zur Erzeugung des Laminataufbaus, also dem verzugfreien Abrollen und Schichten von Einzellagen, kann ein Rollenlagersystem verwendet werden, das mit synchronisierten Elektromotoren und einem angetriebenen Förderband arbeitet.

Zuschnitterzeugung und -stabilisierung

Zur Absicherung der Kanten der zweidimensionalen, mehrlagigen Zuschnitte („Tailored Reinforcements, TR“) und Preforms gegen Ausfransen und zur Fixierung der Einzellagen zueinander kann die 2D-Nähtechnologie eingesetzt werden. Je nach eingestellter Fadenspannung bleiben die Einzellagen in begrenztem Maße zueinander verschiebbar, womit die Drapierfähigkeit des TRs gewährleistet ist [14]. Die zweidimensionale Geometrie der Zuschnitte kann über eine CNC-gesteuerte Cutteranlage (optimalerweise Ultraschallschneiden) erzeugt werden. Bis zu dieser Station kann das TR linear durchgefördert werden, nach dem Schneidvorgang ist in der Regel eine Aufnahme der TRs mit einem flexiblen, robotergestützten Greifsystem notwendig.

Handhabung und Drapierung

Die drei wichtigsten Prinzipien zum Greifen (Stapeln und Positionieren) von Preforms sind das vakuumunterstützte Greifen, die Gefriergreiftechnik und die Verwendung von Nadelgreifern. Das Vakuumgreifprinzip ist hierbei als der Ansatz mit dem höchsten Potential zu bewerten. Zum einen ist der Einfluss auf die Preform bezüglich mechanisch induzierten Fehlern bzw. Fremdstoffeintrag relativ gering, zum anderen lässt sich eine entsprechend gestaltete Funktionseinheit gut mit Drapier- und Kompaktier-Funktionalitäten kombinieren. Hierzu sei beispielhaft ein Endeffektor aufgeführt, der auf seiner zylindrischen, flexiblen Außenfläche, die mit Saug- und Heizelementen besetzt ist, TRs aufnehmen und auf Formwerkzeuge drapieren kann, wobei zeitgleich der Binder aktiviert wird (Abbildung 3.3).

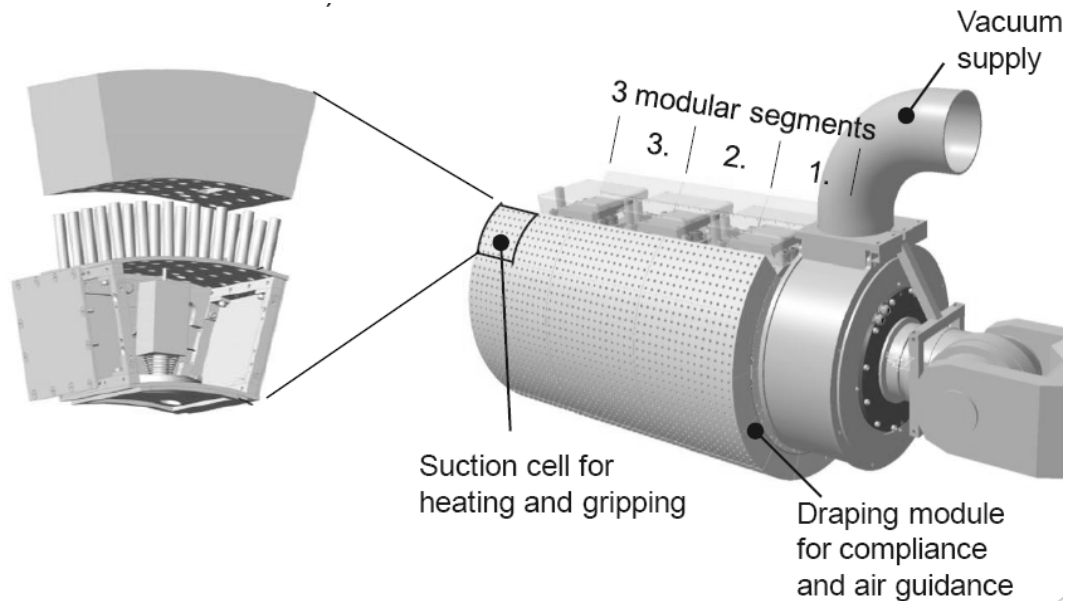


Abbildung 3.3: Endeffektor zum kombinierten Greifen, Drapieren und Kompaktieren von Preforms [15]

Industrialisierte Vorgänge beinhalten manuelle Arbeitsschritte beim Handling und Drapieren, ggf. unter Zuhilfenahme von robotergeführten Endeffektoren zum Aufnehmen und positionsgenauen Ablegen („Pick & Place“) von Preforms. Die Kompaktierung der drapierten Preform wird in der Regel durch Applikation von Vakuum mithilfe von Hauben, Membranen oder Folien dargestellt.

Endmaßbeschnitt

Während der Drapierung vollziehen sich im Preformlaminat komplexe Verzugsvorgänge, die u.a. von der Halbzeugart und der Drapierreihenfolge abhängig sind. Das Ergebnis einer Drapierung bezüglich des geometrischen Endmaßes lässt sich nur mit einer Restunsicherheit vorhersagen, wobei die Vorhersagbarkeit mit der Reproduzierbarkeit des Drapiervorgangs steigt [16]. Aus diesem Grund ist ein Endmaßbeschnitt der Preform notwendig; dieser kann automatisiert mittels Ultraschall-Schneidtechnologie und entsprechender Robotik dargestellt werden (s. a. folgendes Kapitel „Konturgenauigkeit“) [17].

Sowohl dem direkten als auch dem sequentiellen Preforming-Ansatz liegen prinzipiell dieselben Anforderungen zugrunde, die im Folgenden erläutert sind.

3.2.3 Anforderungen an eine Preform

Die wesentlichen Anforderungen an eine Preform beziehen sich auf die zu erzeugenden Bauteileigenschaften durch die Faserorientierung oder auf die Kompatibilität der Preform mit den nachgelagerten Prozessschritten (Transport, Infiltration, Aushärtung). Die Anforderungen müssen durch das Halbzeug und/oder die eingesetzten Preformtechnologien erfüllt werden.

Konturgenauigkeit („net-shape“)

Die Genauigkeit, mit der die Preform bereits Geometrie und Dicke des Bauteils abbildet, ist für die auf die Preformschritte folgenden Prozesselemente von großer Bedeutung. Abweichungen von der Endkontur können sich sowohl auf Radien und Winkel (z.B. „spring-back“-Effekte), als auch auf den Kompaktiergrad (also Faservolumengehalt) beziehen. Besitzt die Preform Untermaß, besteht die Gefahr von lokalem Vorschießen der Harzkanäle („Racetracking“), was zu unvollständiger Imprägnierung, von Lunkerbildung bis hin zu trockenen Bereichen in der Preform, führen kann. Übermaß hingegen kann zu Problemen bei der Abdichtung des Werkzeugs, überhöhten Werkzeugschließkräften (RTM-Verfahren) und Faserondulationen führen [18].

Stabilität für Handlingvorgänge

Um Handhabungsvorgänge zu ermöglichen, beispielsweise ein Einlegen in das Injektionswerkzeug, ist eine Eigenstabilität der Preform notwendig. Zur Erzeugung dieser Eigenstabilität können die bereits erwähnten textilen oder binderbasierten Verfahren angewandt werden. Letztendlich gewährleisten beide Verfahren zum einen den Kompaktiergrad der Preform, zum anderen ihre Strukturintegrität. Die Belastungen auf die Preform können sowohl Schäl- als auch Schubkräfte sein [19].

Faserorientierung

Die Ausführung von Preforming-Schritten bedeutet zwangsweise das Einwirken auf die Faserarchitektur. Allgemeingültige Aussagen zur Auswirkung der Prozessschritte auf die Mechanik des Bauteils können nur schwer getroffen werden. Prinzipiell unterscheidbar sind Auswirkungen in der Halbzeugebene („in-plane“) oder in Dickenrichtung des Laminats („out-of-plane“). Grenzwerte für

Abweichungen von der nominalen Faserausrichtung müssen individuell definiert werden.

Permeabilität

Das Tränkungsverhalten der Preform ist entscheidend für die Parameter des Infiltrationsprozesses bzw. für die Bauteilqualität. Eine hohe Permeabilität ermöglicht eine Senkung des Injektionsdruckes und damit der Anforderungen an das Werkzeug bzw. eine Verkürzung der Injektionszeit. Für Vakuuminfusionsverfahren mit entsprechend niedrigerem Differenzdruck kommt dieser Größe eine gesteigerte Bedeutung zu. Neben dem Faservolumengehalt und der Faserorientierung haben die Preformstabilisierungsmethoden durch ihren Eintrag von Bindern oder Nähfäden in den Laminataufbau einen großen Einfluss auf die Permeabilität [20].

Diese Anforderungen gelten auch für das Prozesselement „Preformfügen“ im Speziellen, dessen Darstellung im folgenden Kapitel 3.3 erläutert wird.

3.3 Fügeverfahren in der Preform-Prozesskette

An die in Kapitel 3.2.1 bzw. 3.2.2 beschriebenen Prozessschritte zur Erstellung der Sub-Preform schließt sich die Montage einzelner Sub-Preforms zur Final-Preform an. Die Final-Preform stellt eine komplexe Preformbaugruppe dar. Sie ist das letzte Zwischenprodukt vor der Harzinfiltration. Bei ihrer Herstellung kommt dem Preformmontageverfahren eine zentrale Rolle zu:

Die Montage zur komplexen Final-Preform ermöglicht die Realisierung integraler Bauweisen und damit die Infiltration einer gesamten Baugruppe in einem Schritt („one-shot-infusion“). Damit kann zum einen eine Kostenersparnis durch den Wegfall von Infusionsschritten erzielt werden (Bereitstellen der Harzsysteme, Rüsten von Infusionsanlagen, Einsatz des Heizsystems etc.). Zum anderen entfallen damit nachgelagerte Prozessschritte zum Fügen der ausgehärteten Komponenten, die sowohl aufwendig sind, als auch, im Falle einer Nietfügung, zu einer Schwächung der Struktur führen.

Des Weiteren bietet sich der Preformfügeschritt als Eingang von funktionalen Bindern in die Prozesskette an. Unter funktionalen Bindern werden in diesem Kontext Thermoplasten in Vlies- oder Folienform verstanden, welche zu einer lokalen Zähig-

keitssteigerung des Laminats führen; eingesetzte Polymere sind Polyethersulfon (PES), Polyetherketon (PEK) und Polyetherimid (PEI), da ihr Eintrag keine Reduktion von Glasübergangstemperatur und E-Modul des Epoxid bewirkt [21]. Diese Materialien weisen Erweichungstemperaturen von über 200 °C aus, wodurch eine wirtschaftliche Integration lediglich bei gezielter Einbringung in Verbindung mit einer effizienten thermischen Füge-technologie im Preformprozess möglich ist.

Die Preformmontage wird entsprechend unterschiedlich innerhalb der Binderroutine und der reinen Textilroutine dargestellt, wie in den folgenden Abschnitten erläutert wird.

3.3.1 Binderbasierte Preformmontage

Die binderbasierte Preformmontage basiert auf dem Adhäsionseffekt, den ein Polymer zwischen zwei Feststoffen bewirkt, wenn es aus der Schmelze in den festen Zustand übergeht. Das Erwärmen des Polymers über seine Erweichungstemperatur mit anschließender Abkühlung wird als Binderaktivierung bezeichnet. Bei der Preformmontage geschieht dies unter Druck auf die zu fügenden Preformelemente. Als Binderpolymer kommen sowohl Thermoplaste als auch Duromere in Frage. Thermoplastische Binder können als Vlies, Folie, Pulver oder (Co-)Garn vorliegen; mögliche Polymere sind PPS, PES, PEEK, PA, PI. Duromere liegen prinzipiell nur als Pulver oder Granulat vor; neben Epoxiden kommen Vinylester oder Phenolharze in Frage [17], [22].

Der Einsatz von Sprühbindern in Luftfahrt-Fertigungsprozessen ist kritisch zu betrachten. Beim Binderauftrag muss eine gleichmäßige Verteilung (auch auf einer dreidimensionalen Struktur) gewährleistet werden. Ebenso muss der Auftrag durch den Einsatz von Lösungsmitteln unter arbeitssicherheitstechnischen Aspekten bewertet werden.

Thermoplaste eignen sich aufgrund der weitgehenden Reversibilität von thermischen Vorgängen und den vielfältigen Halbzeugformen (insbesondere als Vlies) sehr gut als Binder. Darüber hinaus kann der Einsatz von thermoplastischen Bindern, wie bereits erwähnt, zu einer signifikanten Steigerung des Energieabsorptionsvermögens des Werkstoffes führen, was dem Bauteil eine erhöhte Zähigkeit und Impactbeständigkeit verleiht [23], [24]. Der eingebrachte Thermoplast muss allerdings bezüglich

seines Ausschwemmverhaltens während der Infusion, seiner Löslichkeit im Matrixpolymer und seiner Feuchtigkeitsaufnahme charakterisiert werden.

Epoxidbasierte Binder besitzen den Vorteil der Löslichkeit im Infusionsharz und einer entsprechend unkritischen bis nicht vorhandenen Einflussnahme auf die mechanischen Eigenschaften des Bauteils. Innerhalb des Preforming-Prozesses zeigen sich Nachteile gegenüber thermoplastischen Bindern: Epoxidbasierte Binder können nicht flexibel und anwendungsspezifisch in den Lagenaufbau eingebracht werden, da sie nur als Pulver oder Granulat verarbeitbar sind (ihre Glasübergangstemperatur liegt über der Raumtemperatur). In diesen Zustandsformen muss der Binder thermisch an das Faserhalbzeug fixiert werden, ein Prozessschritt, der nur unter unverhältnismäßigem Aufwand in den Preformprozess integrierbar wäre. Aus diesem Grund bietet es sich hier an, die Binderapplikation in die Halbzeugfertigung zu integrieren.

Die folgende Tabelle gibt eine Übersicht über einige Bindersysteme, die für den Einsatz in Luftfahrtfertigungsprozessen prinzipiell geeignet wären bzw. eingesetzt werden.

Tabelle 3-2: Übersicht Bindersysteme

Polymer	Halbzeugform	Aktivierungs- temperatur	Hersteller	Handelsname
Copolyamid	Vlies (6 und 12 g/m ²)	85 bis 120 °C	SPUNFAB, Ltd.	PA1541
Polyamid	Vlies (3 g/m ²)	150 °C	HEXCEL	V800E
Polyamid	Vlies	135 °C	TENAX	TA1990c
Epoxid	Pulver	105 ± 15 °C	HEXCEL	E01
Epoxid	Pulver	100 °C	HEXION/ MOMENTIVE	Epikote 05311
Epoxid/PES	Pulver	105 ± 15 °C	CYTEC	Cycom 7720
Epoxid/PES	In Halbzeug integrierte Binderrovings	155 ± 5 °C	CYTEC	Priform

Im Gegensatz zur Binderaktivierung mit dem Ziel der Preformstabilisierung, bei der die gesamte Preform kompaktiert und eine flächige Adhäsion zwischen den Lagen erzeugt wird, muss der Binder bei der Preformmontage nur lokal aktiviert werden. Zur lokalen Einleitung von thermischer Energie relativ geringer und präzise steuerbarer Menge kommen mehrere Schweißtechnologien in Frage, die im Folgenden kurz beschrieben und beurteilt werden.

Beim *Heizelementschweißen* werden die Fügepartner zur Erwärmung mit einem elektrisch beheizten Element in Kontakt gebracht, um dann zum Fügen unter Abkühlung direkt miteinander verpresst zu werden.

Um eine kapazitive Widerstandsschweißung handelt es sich beim *Hochfrequenzschweißverfahren*, das die Dipole der Kunststoffe einem hochfrequenten elektromagnetischen Wechselfeld aussetzt, in Schwingung versetzt und das Polymer dadurch erwärmt.

Beim *Induktionsschweißen* für Kunststoffe mit elektrisch leitenden Komponenten werden die Fügepartner ebenfalls einem elektromagnetischen Wechselfeld ausgesetzt; allerdings erwärmen sich die elektrisch leitenden Komponenten des Verbundwerkstoffes durch die Widerstandsverluste der induzierten Wirbelströme.

Ein quasi-punktuellem Wärmeeintrag kann beim *Laserschweißen* erzielt werden, wobei ein stark fokussierter Laser in der Fügestelle absorbiert wird und eine Erwärmung des Werkstoffes bewirkt.

Das *Ultraschallschweißverfahren* basiert auf Reibungswärme, die durch den Eintrag von mechanischen Schwingungen entsteht. Es kann sich hierbei um äußere Reibung zwischen den Fügepartnern handeln; ebenso tritt jedoch innere Reibung in zwischenmolekularen Grenzflächen auf. Welche Art der Reibung dominiert, wird insbesondere durch die Werkstoffbeschaffenheit determiniert.

Folgende Tabelle gibt eine Gegenüberstellung dieser Technologien zur binderbasierten Preform-Montage mit dem Ultraschallschweißen inklusive einer stichwortartigen Bewertung. Technologien zur „globalen“ Aktivierung und Kompaktierung des gesamten Bauteils, wie z.B. Umluft- und Mikrowellenöfen, werden in diese Betrachtung prinzipbedingt nicht miteinbezogen.

Tabelle 3-3: Übersicht möglicher Schweißtechnologien für die Preformmontage

	Pro	Contra
Heizelement-schweißen [25]	<ul style="list-style-type: none"> - prinzipiell alle Materialsysteme verschweißbar - automatisierbar - kein Hilfsstoffeinsatz - sehr hoher Freiheitsgrad bezüglich Bauteil-Geometrie 	<ul style="list-style-type: none"> - lange Taktzeiten (Heizzeit) - geringe Energieeffizienz - hoher Temperaturgradient im Preformlaminat aufgrund schlechter Wärmeleitfähigkeit von C-Faserhalbzeugen in Dickenrichtung - relativ hoher Werkzeugaufwand
Hochfrequenz-schweißen [25]	<ul style="list-style-type: none"> - gezielte Wärmeerzeugung im Polymer, hohe Energieeffizienz - geringe Taktzeit - hohe Bauteilqualität - automatisierbar 	<ul style="list-style-type: none"> - nur polare Kunststoffe schweißbar
Induktionsschweißen [26]	<ul style="list-style-type: none"> - geringe Taktzeit - sehr gute Bauteilqualität - automatisierbar - hohe Energieeffizienz 	<ul style="list-style-type: none"> - inhomogenes Temperaturfeld - kein Glasfaser-Preforms schweißbar - keine unidirektionalen Lamine schweißbar - starke Einschränkung beim Formwerkzeugmaterial
Laserschweißen [27]	<ul style="list-style-type: none"> - hohe Prozessgeschwindigkeit 	<ul style="list-style-type: none"> - hoher Invest - Wärmeeintrag schwer zu steuern (Absorption an der Oberfläche) - Wärmeeintrag stark punktuell - kritisch bezüglich Arbeitssicherheit - Kompaktiereinheit muss nachgeführt werden
Ultraschallschweißen [28]	<ul style="list-style-type: none"> - geringer Invest - hohe Flexibilität bez. Materialsystemen - robuste Technologie - Qualität absicherbar - automatisierbar - sehr energieeffizient - geringe Taktzeit 	<ul style="list-style-type: none"> - Faserondulationsgefahr beim Verschweißen nicht aktivierter Preforms - begrenzte Effektorwirkfläche

Diese Verfahren beruhen per Definition auf dem Einsatz eines polymeren Hilfsstoffes in der Preformprozesskette.

Im Folgenden werden diese Verfahren einer kategorischen Bewertung unterworfen.

	Verarbeitbares Materialspektrum	Maximaltemperaturen	Automatisierbarkeit	Hilfsstoffeinsatz	Eignung für komplexe Geometrien	Bauteilqualität	Taktzeit	Energieeffizienz	Investkosten	Betriebskosten	Reifegrad
Heizelement-schweißen	++	o	++	++	+	+	-	-	+	-	++
Hochfrequenz-schweißen	--	+	+	++	o	+	+	+	-	+	++
Induktions-schweißen	-	+	+	++	+	++	+	++	o	++	+
Laser-schweißen	o	++	++	++	-	-	++	o	--	-	+
Ultraschall-schweißen	+	++	++	++	+	o	++	++	++	++	++

Abbildung 3.4: Eignung der Schweißverfahren zur Preformmontage

3.3.2 Textiltechnisch basierte Preformmontage

Alternativ zum binderbasierten Ansatz ist der Einsatz von textiler Konfektionstechnik (insbesondere Nähtechnologie) zur Montage von Preformelementen möglich. Umfassende Forschungs- und Entwicklungsarbeiten mündeten in eine industrielle Umsetzung dieser Technologie für zweidimensionale Montageschritte bei der Preformerstellung, beispielsweise für die Druckkalotte der AIRBUS A380 oder den Floor Cover des EUROCOPTER NH90 [29]. Hier wird die Technologie zur Applikation eines modifizierten Doppelsteppstiches in einem Portalsystem eingesetzt (Abbildung 3.5 links).

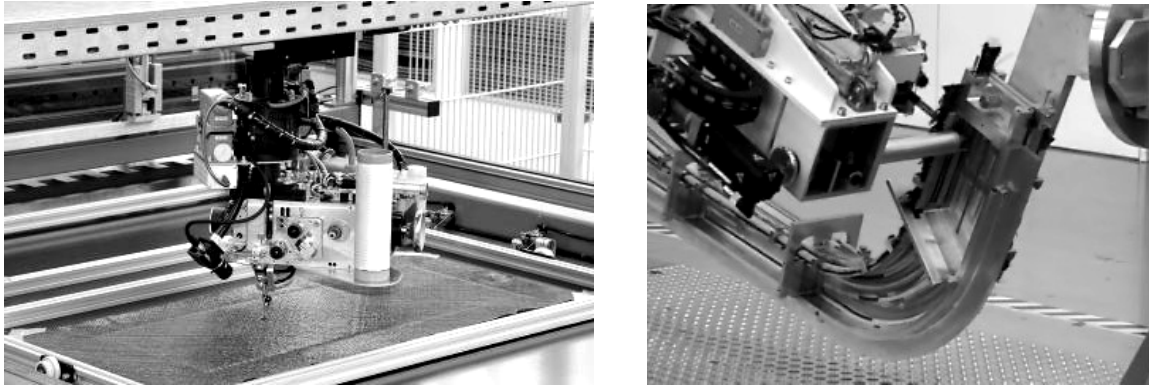


Abbildung 3.5: Nähtechnik zur Preformmontage bei ECD (links: 2D-Nähen im Portal, rechts: 3D-Nähen in der Roboterzelle)

Prinzipbedingt ergeben sich folgende wesentliche Aspekte der 3D-Nähtechnologie zur Preformmontage:

- Es wird kein Binder in die Preform eingebracht, somit findet keine Modifikation der Harzmorphologie statt.
- Insbesondere durch die Wahl geeigneter Nähparameter kann eine Verbesserung der „out-of-plane“-Eigenschaften erzielt werden (interlaminare Bruchzähigkeit, Schlagfestigkeit) [30], [31], [32].
- Durch geeignete Wahl der Nähparameter (Nähmuster, Fadenspannung) kann sowohl eine quasi-flächige Kompaktierung erzielt, als auch die Umformfähigkeit der Preform erhalten werden [14].
- Inserts zur Lasteinleitung können in den Preformaufbau integriert werden, womit eine kosteneffiziente Fertigung bei gleichzeitig hoher mechanischer Performance des Bauteils realisiert werden kann [33].
- Einschnürungen beim Preform-Nähvorgang können zu Ondulationen und Harznestern im Verbundwerkstoff führen [34], [35].
- Bei Anwendung der Nähtechnik zur dreidimensionalen Montage in einer Roboterzelle ergibt sich durch den beidseitigen Zugang zum Bauteil eine „Zangenkonstruktion“ des Endeffektors (s. Abbildung 3.5 rechts). Damit ist sowohl die Verwendung konventioneller Formwerkzeuge, als auch eine Bearbeitung in großer Bauteiltiefe (größer als Freiarmlänge) nicht möglich.

- Einseitennähtechniken für erhöhte Zugänglichkeit sind ebenfalls in hohem technischen Reifegrad verfügbar [36].
- Die Technologie ist mechanisch aufwändig, Robustheit und kommerzielle Verfügbarkeit müssen als eingeschränkt bezeichnet werden.

Es ergibt sich ein Anwendungsprofil mit Vor- und Nachteilen. Die Entscheidung zum Einsatz der Technologie muss anwendungsspezifisch erfolgen.

3.4 Ultraschallschweißen

Das Ultraschallschweißen gilt als hocheffizienter und robuster Prozess zum Verbinden thermoplastischer, metallischer oder artfremder Werkstoffpaarungen [37].

Der Prozess wurde 1960 von der Firma SONOBOND ULTRASONICS patentiert und in einer Anlage zum Fügen metallischer Werkstoffe umgesetzt. 1965 wurde in den USA ein Patent zum Verschweißen von Thermoplasten erteilt. Noch in den 1960er Jahren begann die industrielle Anwendung der Technologie in der Fahrzeug- und Spielzeugindustrie.

Bis zum heutigen Tag sind weitere Anwendungsfelder hinzugekommen. Dies sind schwerpunktmäßig die:

- Autoindustrie (z.B. Luftverteiler, Filter, Ventile)
- Unterhaltungs- und Kommunikationselektronikindustrie (z.B. Mobiltelefone, Hi-Fi, Spielekonsolen)
- Medizintechnik (z.B. Blut- und Gasfilter, Gesichtsmasken)
- Verpackungsindustrie (z.B. Zahnpastaverpackung, Getränkeverpackungen)
- Spielzeugindustrie [38]

Obwohl die Technologie große industrielle Verbreitung findet, finden sich in der Literatur im Detail widersprüchliche Aussagen zu den Wirkmechanismen der Energieumwandlung im Schweißwerkstoff. Dies ist auf die schwierige Vermessbarkeit des Prozesses und das Auftreten unterschiedlicher Mechanismen zurückzuführen [39].

3.4.1 Wirkprinzip

Beim Ultraschallschweißen wird unter Druck eine hochfrequente Schwingung in das Bauteil eingeleitet und durch Reibeffekte in Wärme umgewandelt, wobei der Schweißwerkstoff in der Fügezone über seine Erweichungstemperatur erwärmt wird. Nach dem Ende der Beschallung kühlt der Schweißwerkstoff ab, erstarrt und erzeugt eine stoffschlüssige Verbindung.

Die Schwingungen liegen in der Regel in einem Frequenzbereich zwischen 20 und 70 kHz; es werden Wirkamplituden bis zu 120 µm erzeugt, Schweißzeiten liegen üblicherweise zwischen wenigen Zehntel- bis ca. fünf Sekunden.

Ultraschallschweißen metallischer Werkstoffe ist aufgrund der begrenzten Leistung beschränkt auf relativ dünne Bleche oder Drähte aus bspw. Aluminium oder Kupfer [37].

Beim Ultraschallschweißen von Thermoplasten wird je nach Abstand der Fügeebene zur Schalleinleitungsebene zwischen Nahfeld- und Fernfeldschweißen unterschieden. Beim Fernfeldschweißen wandert der Schall mehr oder weniger verlustfrei durch das Bauteil bis zur Fügeebene, wo er in Wärme umgewandelt wird. Dieser Vorgang wird durch die Gestaltung des Bauteils mit Asperitäten zur Druckerhöhung in der Fügeebene beeinflusst.

Die Konversion der akustischen Energie in Wärme geschieht durch zwei Mechanismen: Der makromechanischen, „äußeren“ Reibung und der intermolekularen Grenzflächenreibung. Nach neuesten Erkenntnissen werden die Fügepartner bis zur Glasübergangstemperatur aufgrund äußerer Reibung erwärmt, darüber dominiert die Energieumwandlung durch die intermolekulare Grenzflächenreibung [39].

Entsprechend ist viskoses Verhalten Voraussetzung für einen effizienten Schweißvorgang, da es jene innere Reibung ermöglicht. Dies bedeutet prinzipiell, dass die Schweißbarkeit von Thermoplasten mit steigendem Kristallinitätsgrad sinkt, da aufgrund der Gitterstruktur der kristallinen Bereiche Energie aufgenommen und wieder abgegeben werden kann (elastisches Verhalten), ohne dass die Konversion in Wärme stattfindet [40]. Das Fernfeldschweißen eröffnet hier einen Zielkonflikt bei der Werkstoffauswahl, da Schall möglichst verlustfrei durch das Bauteil zur Fügestelle transportiert werden muss, an der Fügestelle jedoch mit „maximalem Verlust“ in

Wärme umgewandelt werden soll. Signifikante Kenngröße hierbei ist der Verlustfaktor $\tan \delta$, wobei δ als Verlustwinkel bezeichnet wird. Der Verlustfaktor wird aus dem Quotienten des Verlustmoduls E'' zum Speichermodul E' gebildet:

$$\tan \delta = \frac{E''}{E'} \quad (3.1)$$

Der Verlustfaktor von Metallen beträgt ungefähr 0,001, bei Polymeren ergeben sich Werte zwischen 0,001 und 0,5. Dies spiegelt die ausgeprägte Fähigkeit von Polymeren wider, akustische Energie in Wärme umzuwandeln. Dieser Vorgang folgt folgender Formel.

$$\dot{Q} = \frac{\omega \cdot E'' \cdot \varepsilon_0^2}{2}, \quad (3.2)$$

wobei Q die dissipierte Energie ist, ω die (Kreis-) Frequenz der Schwingung und ε_0 die Dehnrate (Funktion der Amplitude). Diese Vorgänge wurden in mehreren Arbeiten durch Maxwell'sche Feder-Dämpfer-Modelle dargestellt, berechnet sowie mit Finite-Elemente-Methoden simuliert [28], [39], [40], [41], [42], [43].

3.4.2 Komponenten und Umsetzungsvarianten

Die wesentlichen Komponenten einer Ultraschall-Schweißanlage sind Generator, Konverter, Amplitudentransformator („Booster“), Sonotrode und Amboss.

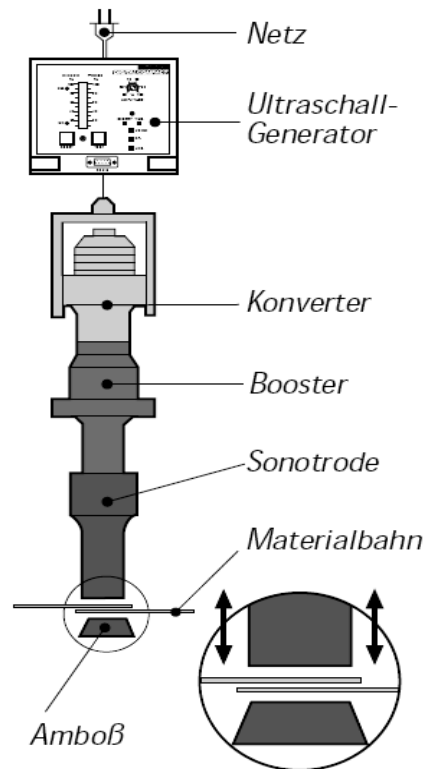


Abbildung 3.6: Ultraschall-Schweißanlage [44]

Der Generator erzeugt aus der Netzspannung eine hochfrequente Wechselspannung (entsprechend der Schwingfrequenz) zwischen 10 und 75 kHz, wobei mit steigender Frequenz die Größe der darstellbaren Amplituden sinkt. Allerdings sind Frequenzen oberhalb des menschlichen Hörbereichs zumeist aus Gründen der Arbeitssicherheit gewünscht. Somit operieren die meisten Ultraschall-Schweißanlagen zwischen 20 und 40 kHz. Ein Schwingsystem wird auf eine Frequenz ausgelegt (Resonanzfrequenz). Somit ist die Frequenz kein freier Prozessparameter, sondern muss vor Beschaffung der Anlagentechnik fest spezifiziert werden.

Über speicherprogrammierbare Steuerungen (SPS) können Energie, Leistung, Zeit und Amplitude der Schweißung kontrolliert und geregelt werden.

Die Wechselspannung wird über ein abgeschirmtes Kabel zum Konverter geleitet und dort mittels des piezoelektrischen (alternativ: magnetorestriktiven) Effekts in eine

mechanische Schwingung umgewandelt, wobei Wirkungsgrade bis 90 % erreicht werden. Die Konverterlänge muss der halben Wellenlänge der Schwingung entsprechen, womit die Anzahl der Piezo-Kristalle limitiert ist. Somit erklärt sich, warum mit steigender Frequenz die darstellbare Konverter-Ausgangsamplitude sinkt.

Über den Amplitudentransformator („Booster“) wird die Amplitude in einem definierten Verhältnis vergrößert (in Einzelfällen verkleinert) und in die Sonotrode eingekoppelt. Zudem befindet sich am Schwingungsknoten des Boosters ein Einspannring für die Schwingeinheit zur Aufnahme im Gehäuse. Die Sonotrode leitet schließlich den Schall in das Werkstück ein, wobei die Amplitude in der Regel nochmals vergrößert wird. Die Amplitudenvergrößerungen werden über ein entsprechendes Verhältnis der Koppelflächen realisiert. Sonotrodenwerkstoffe sind Titan, Stahl oder Aluminium; letztendlich ist bei der Werkstoffauswahl zwischen Standzeit und Kosten abzuwägen. Sonotrodenformen sind in einem weiten Bereich frei wählbar, auch rautierte oder halbkugelförmige Sonotrodenwirkflächen sind möglich. Die Sonotrode muss dermaßen gestaltet werden, dass die Schweißfläche gleichmäßig Schall abstrahlt und innere Spannungen keine Überdehnung des Werkstoffs hervorrufen. Die Sonotrodengeometrie wird innerhalb des Entwicklungsprozesses mittels FEM simuliert und konstruktive Maßnahmen wie Schlitze oder Einschnürungen der Sonotrodengeometrie werden vorgenommen. Abbildung 3.9 zeigt zwei Sonotrodenformen, wobei bei der geschlitzten Sonotrode während des Schwingvorgangs keine Krümmung der Wirkfläche eintritt.

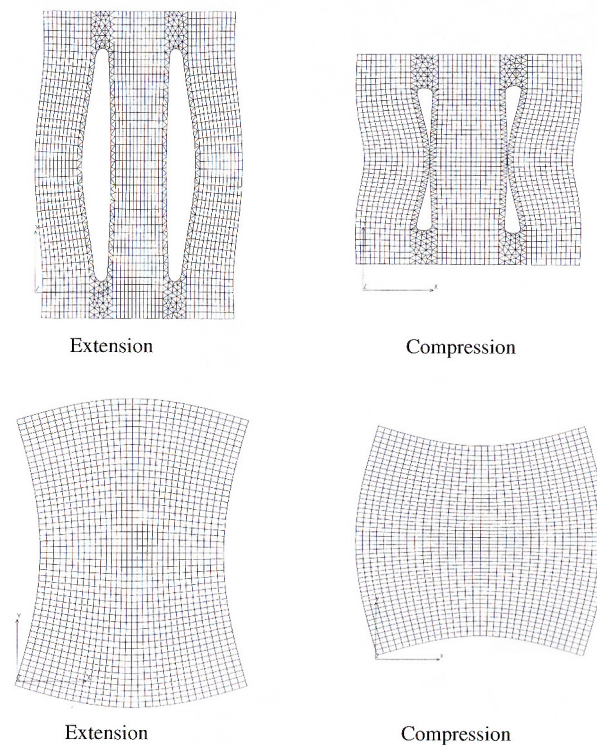


Abbildung 3.7: Sonotrodendeformation bei Schwingung (oben: Schlitzgeometrie, unten: massive Geometrie), [28]

Die Sonotrode besitzt grundsätzlich eine Länge gleich der halben Wellenlänge der Schwingung, womit in der Wirkfläche eine Schalleinleitung mit maximaler Amplitude (Schwingungsbauch) erreicht wird.

Der Amboss bildet den Schweißuntergrund auf der Gegenseite des Werkstückes. Er ist dermaßen zu gestalten, dass eine Parallelität zur Sonotrodenwirkfläche gegeben ist und gegebenenfalls der Schall durch Oberflächenasperitäten konzentriert werden kann. Darüber hinaus ist er aus möglichst steifem Material zu fertigen, um ein Mitschwingen zu vermeiden.

Im Folgenden werden die ersten Ansätze und Umsetzungen der Ultraschall-Schweißtechnologie zur Fertigung von Faserverbundbauteilen erläutert.

3.4.3 Ultraschallschweißen in der FKV-Fertigung

Die Ultraschall-Schweißtechnologie wurde bereits sowohl zum Fügen von Bauteilen mit thermoplastischer Matrix als auch beim Prepreg-Tapelegeprozess im Faserverbundsektor untersucht und eingesetzt.

In einer Kooperation von Foster-Miller (USA) mit dem Massachusetts Institute of Technology (MIT) wurde in den 1990er Jahren die Technologie für das automatisierte Legen duroplastischer Tapes adaptiert. Im Jahr 2002 wurde ein entsprechendes Patent erteilt [45]. Hierbei war das Ziel, durch die Schalleinleitung am Ablegepunkt im kontinuierlichen Prozess Wärme und Druck mit dem Ziel der „in-situ“-Konsolidierung“ zu erzeugen. Letztendlich können damit nachgelagerte Laminat-Kompaktierprozesse eingespart werden. ATK (USA) griff die Technologie für Wickelprozesse mit duroplastischen Tapes auf und setzt sie bis dato für Serienanwendungen ein [46].

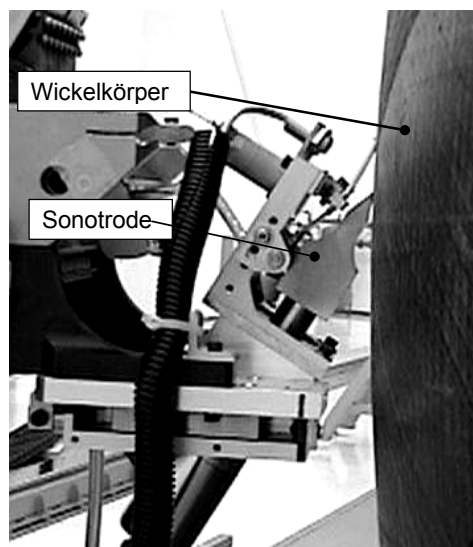


Abbildung 3.8: Ultraschallgestützter Prepreg-Wickelprozess, Fa. ATK (USA) [47]
Airbus España SL (Getafe, Spanien) besitzt eine Versuchsanlage nach diesem Vorbild und zielt auf eine Anwendung im Tapelegen und Wickeln ab [47].

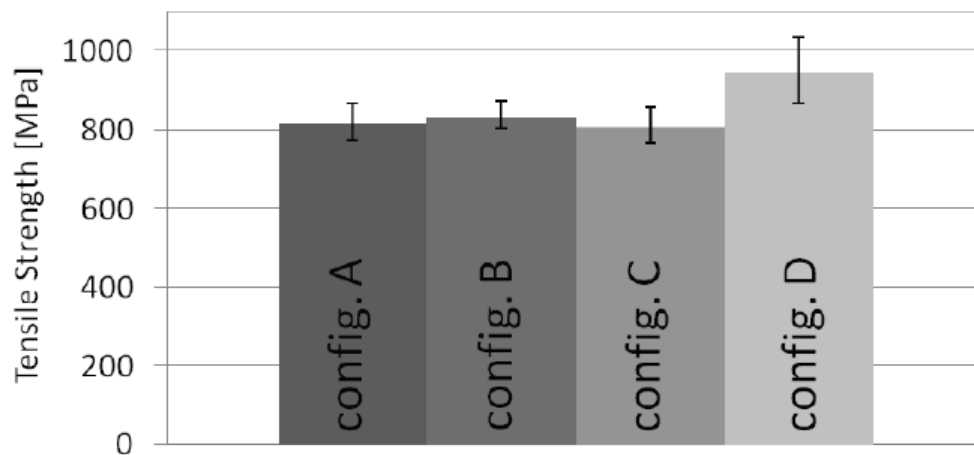
EADS Innovation Works France (Nantes, Frankreich) nutzt die Technologie zum kontinuierlichen Fügen von thermoplastischen FVK mit hochschmelzenden Matrices. Hierbei werden Asperitäten in die Fügezone eingebracht, die als „Energierichtungsgeber“ dienen, im Nachlauf zur Sonotrode werden die Komponenten durch Rollen kompaktiert [48].

Dieser technologische Ansatz wird auch von Airbus und dem niederländischen Thermoplast-Cluster im Projekt TAPAS (Thermoplastic Affordable Primary Aircraft Structures, Laufzeit bis Ende 2011) verfolgt [48]

Fokker (Niederlande) entwickelt eine Anlage zum Anschmelzen und Kompaktieren von unidirektionalen Tapes mit thermoplastischer Matrix im automatisierten Legeprozess [50].

3.4.4 Ultraschall-Preformschweißen

Ringwald et al. haben 2009 eine Studie zur lokalen Binderaktivierung von Preforms mittels Ultraschall durchgeführt [51]. Das Preformlaminat wurde hierbei unter einem Vakuumaufbau kompaktiert und punktförmig verschweißt. Die Preform bestand aus Carbonfaser-NCF und Copolyamid-Bindervlies. Die Laminare wurden mittels RTM und VARI-Infusion bei 120 °C infiltriert (Harzsystem RTM6®) und ausgehärtet (90 min, 180 °C). Aus den Laminaten wurden Testkörper zur Ermittlung der Zugfestigkeit nach der Norm AITM1-0007 gewonnen. Die Ergebnisse der Zugprüfung sind als Auszug aus der Quelle in Abbildung 3.9 gegeben.



„Configuration A“	„Configuration B“	„Configuration C“	„Configuration D“
kein Binder	Binder mit Aktivierung im Umluftofen	Linienförmige Binderaktivierung ohne Vakuumsack	Quasi-flächige Binderaktivierung unter Vakuumsack

Laminataufbau	Schweißparameter
Carbonfaser-Biaxialgelege (540 g/m ²) [0/90] _{2S}	20 kHz, Stempelschweißung (80 x 15 mm), 0,2 MPa, t = 2 s

Abbildung 3.9: Zugfestigkeiten von Laminaten auf Basis ultraschallgeschweißter Preforms [51]

Der Grund für die erhöhten Zugfestigkeitswerte der Proben „Configuration D“ wurde nicht näher untersucht.

3.5 Zusammenfassung

Die Prepreg-Technologie ist das am weitesten verbreitete Verfahren zur Herstellung von Hochleistungs-FVK; neben hoher Bauteilperformance sind auch hohe Materialkosten und geringes Automatisierungspotential charakteristisch. Die Preformtechnologie kann diesen Nachteilen begegnen. Automatisierung unter Gewährleistung der geforderten Bauteilqualität ist insbesondere vor dem Hintergrund eines für Hub-schrauber spezifischen Bauteilspektrums (und der geringen Stückzahlen) allerdings komplex und investitionsintensiv.

Die Ultraschall-Schweißtechnik ist ein in mehreren Branchen etabliertes Fügeverfahren, das sich durch Energieeffizienz und Robustheit auszeichnet. Im Luftfahrtbereich hat es bisher nur vereinzelt (Duroplast-Tapelegen, Thermoplast-Fügen) Anwendung gefunden, bzw. es befindet sich im Entwicklungsstadium.

4 Anlagentechnik

4.1 Schwingsystem

Die im Rahmen dieser Arbeit eingesetzte Schweißanlage wurde ausgewählt auf Basis einer Spezifikation, die sich an Fertigungsgegebenheiten einer Composite-Flugzeugtür orientiert. Zu einem frühen Zeitpunkt wurde die Entscheidung für ein *Punktschweißsystem mit Einlaufsonotrode* getroffen. Die Bauteilzugänglichkeit eines rotativen Systems ist prinzipbedingt inakzeptabel, da die Sonotrode senkrecht zur Achse des Schwingsystems abstrahlt (Abbildung 4.1).

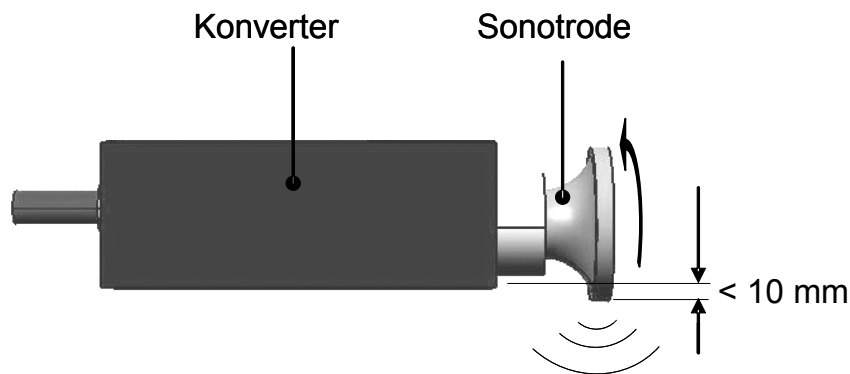


Abbildung 4.1: Schematischer Aufbau des rotativen Systems

Schweißamplituden um $20 \mu\text{m}$ wurden als geeignet zur Verschweißung von Preforms identifiziert. Größere Amplituden führen zu einer übermäßigen Störung der Faserarchitektur bis hin zu Faserschädigungen, geringere Amplituden setzen den Leistungseintrag und die Eindringtiefe in das Preformlaminat herab.

Mit dieser Erkenntnis wurde die *Schwingfrequenz* gleichsam mit 30 kHz determiniert; 40-kHz-Systeme (oder höher) erreichen in der Regel dieses Amplitudenlevel nicht. 20-kHz-Systemen ist ein größerer Bauraum und der bei gleicher Amplitude frequenzbedingt geringere Leistungseintrag zu Eigen.

Für kontinuierliche Schweißungen mit gleitender *Sonotrode* sind aufgeraute Schweißflächen ausgeschlossen. Zur Verminderung von abrasivem Verschleiß der Sonotrode wurde Titan als Werkstoff gewählt.

Vor dem Hintergrund von Überwachung und Regelung des Schweißvorgangs wurde ein *Generator* mit analogen und digitalen Schnittstellen für sämtliche Parameter ge-

wählt. Er leistet maximal 1500 W und wird mit einem *Konverter* kombiniert, der eine maximale Ausgangsamplitude von 7,5 μm erzeugt. Durch einen *Booster* mit Übersetzung 1 : 1,5 wird eine maximale Amplitude von 11,25 μm an die Sonotrode übergeben. Die Sonotrode wiederum vergrößert die Amplitude auf 26 μm . Es wurde eine spezielle Sonotrodengeometrie realisiert, welche einen Materialeinlauf (Abrundung) vorsieht (s. Tabelle 4-1, rechts). Um trotz dieser Asymmetrie eine gleichförmige Schallabstrahlung sicherzustellen, wurden runde Einkerbungen beim Design der Sonotrode vorgesehen (Radius 5 bzw. 10 mm, s. Tabelle 4-1).

Tabelle 4-1: Definition des Schwingsystems mit Abbildung der Sonotrode

Bezeichnung	Eigenschaften	
Generator BRANSON Digital Compact 315	Erzeugte Wechselspannungsfrequenz: 30 kHz, Maximalleistung 1,5 kW	
Konverter BRANSON CR 30 (Piezostack)	Ausgangsamplitude 6,5 bis 7,5 μm	
Booster BRANSON solid mount, Titan	Übersetzung 1 : 1,5	
Sonotrode BRANSON, Sonderform	mit Einlaufgeometrie, Übersetzung ca. 1 : 2,2	

4.2 Versuchsstand

Zur Durchführung der Schweißstudien und der Herstellung der Probekörper für mechanische Tests wurde ein Prozessversuchsstand mit dem Schwingsystem sowie Messtechnik aufgerüstet und mit einer LabView®-Steuerung versehen.

4.2.1 Merkmale und Aufbau

Das Schweißgut wird auf einem Trägerschlitten horizontal mit definierter Geschwindigkeit verfahren. Über der Schlittenbahn ist die Schwingeinheit angeordnet, die pneumatisch mit definiertem Druck abgesenkt werden kann. Durch die horizontale Relativbewegung des Schlittens zur Schwingeinheit kann eine kontinuierliche

Schweißung dargestellt werden. Der Versuchsstand wird über einen Labor-PC mit der Software LabView® gesteuert. Hierbei wird sowohl der zeitliche als auch der bedingte Versuchsablauf gewährleistet und Reproduzierbarkeit sichergestellt.

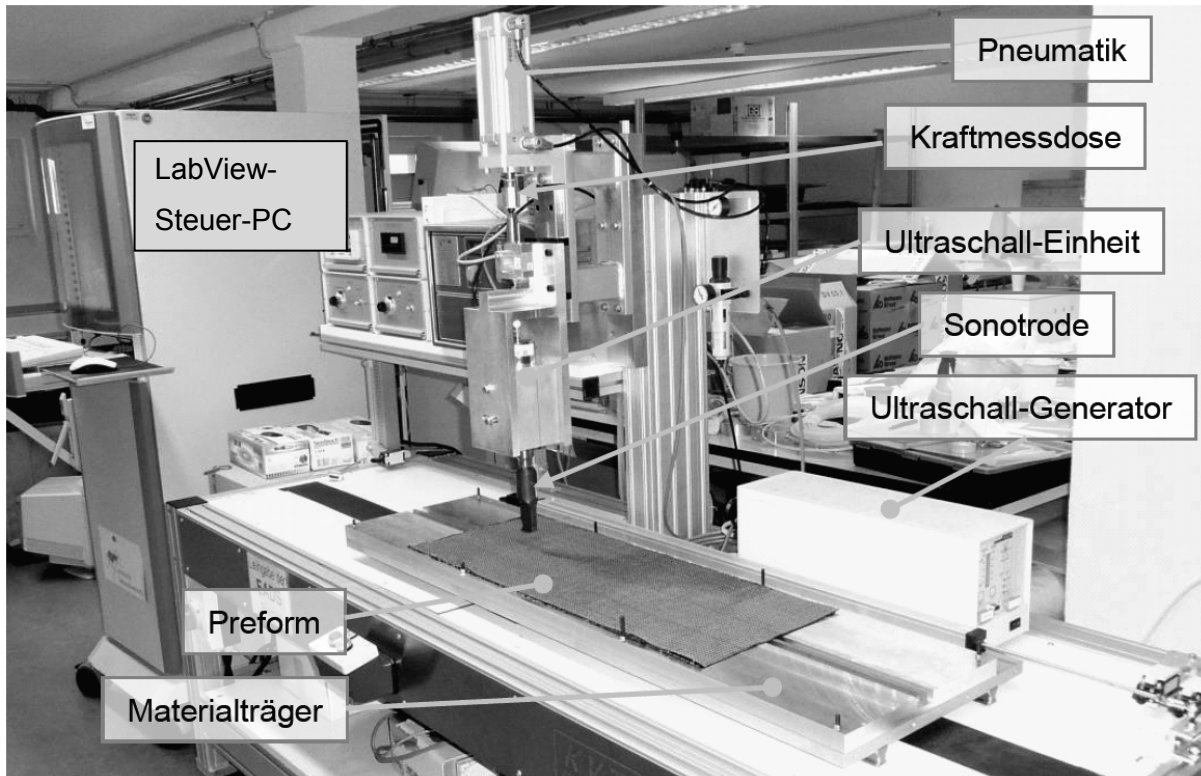
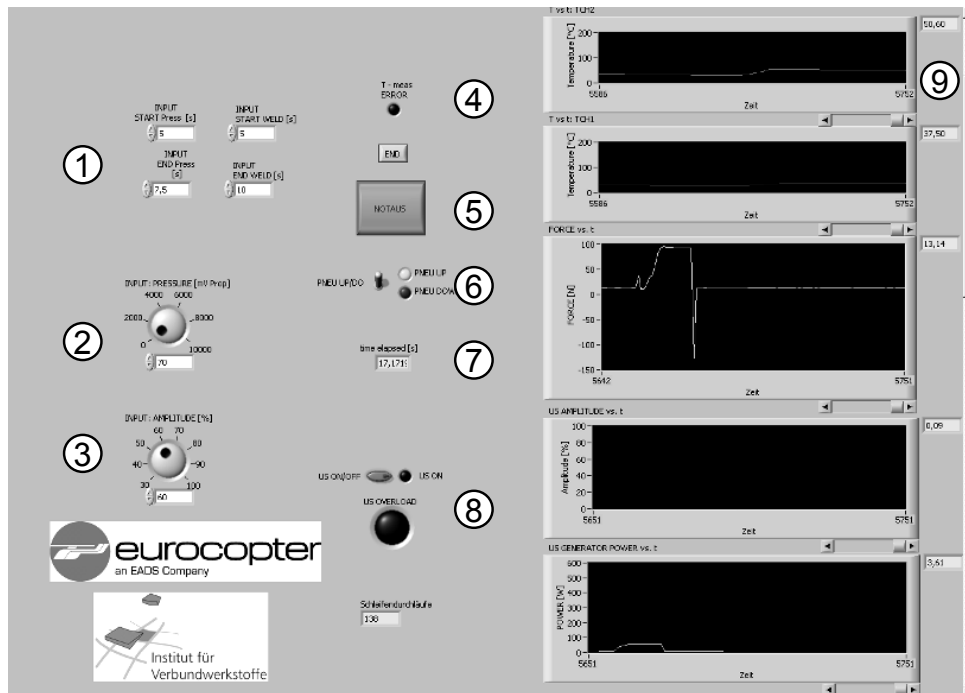


Abbildung 4.2: Versuchsstand zum Ultraschallschweißen (IVW Kaiserslautern)

4.2.2 Steuer- und Messtechnik

Mittels LabView® Version 9 wurden zwei Programme in zwei Versionen zur Steuerung des Versuchsstandes und zur Datenprotokollierung erstellt.

Eine Version diente der Steuerung des kontinuierlichen Prozesses, eine weitere Version zum Steuern der Punktschweißungen. Beide Programme haben eine Ablauffrequenz von 8 Hz. Abbildung 4.3 zeigt die Benutzeroberfläche („GUI“, graphical user interface) zur Steuerung einer Punktschweißung inklusive einer Benennung der Maskenfelder.



- 1 Eingabefelder Start und Endzeitpunkt von Druckapplikation und Schwingung
- 2 Eingabe Anpresskraft
- 3 Eingabe Amplitude
- 4 Warnleuchte Temperaturmessung
- 5 Notaus
- 6 „manuelle“ Absenkung der Schwingeinheit
- 7 Zeitanzeige
- 8 „manuell“ US an und US-Überlastwarnleuchte
- 9 Anzeigen von Temperaturkanälen, Kraft, Amplitude und Generatorleistung

Abbildung 4.3: GUI zur Steuerung einer Punktschweißung

Die wählbaren Schweißparameter und die Messgrößen des Versuchszustandes sind in folgenden Tabellen aufgeführt.

Tabelle 4-2: Steuerparameter US-Versuchsstand

Parameter	Einheit	Bereich	Genauigkeit
Vorschub	m/s	0 bis 0,21	$2 \cdot 10^{-3}$
Zylinderdruck	MPa	0,06 bis 0,5	$0,8 \cdot 10^{-3}$
Amplitude	% (von 26 μm)	20 bis 100	0,8
Nahtbeginn und -ende	m	0 bis 0,9	$1 \cdot 10^{-3}$
Zeitpunkt Schallbeginn und -ende	s	0 bis ∞	0,125

Tabelle 4-3: Messgrößen Versuchsstand

Größe	Einheit	Bereich	Genauigkeit
Temperatur (2 Kanäle)	$^{\circ}\text{C}$	0 $^{\circ}\text{C}$ bis 400 $^{\circ}\text{C}$	8 $^{\circ}\text{C}$
Amplitude	% (von 26 μm)	20 bis 100	n.a.
Generatorleistung	W	0 bis 1500	n.a.
Anpresskraft	N	0 bis 500	0,1 % von Nennwert
Zeit	s	-	Taktung durch LabView- Messkarte
Weg	mm	0 bis 1000	$2 \cdot 10^{-3}$

Die Temperatur in der Preform wurde durch Platzieren der Thermoelemente in der Preform unter der Sonotrode gemessen. Zur Darstellung der Messfunktionalitäten wurden Komponenten entsprechend Tabelle 4-4 eingesetzt.

Tabelle 4-4: Komponenten Versuchsstand

Komponente	Handelsname	Hersteller	Eigenschaften
Pneumatikzylinder	DNC-63-100-PPV	FESTO	Kolbendurchmesser 63 mm
Proportionalventil	VPPM-6L-L1	FESTO	
Kraftmessdose	1-S2/1KN	HBM	Druck- und Zugkraftmessung
Steuerungssoftware	LabView	National Instruments	Version 9.0, 2009
Elektromotor (Materialvorschub)	AKM 42	Kollmorgen	max. Leistung: 1100 W, max. Drehmoment: 11 Nm
Thermoelemente	2GGM0,2-K	E & S	NiCr-Ni, Typ K, Durchmesser: 0,8 mm
Fühlhebelmessgerät (Laminatkompaktiermessungen)	entsprechend DIN 2270 A	ULTRA	Auflösung 0,1 mm
Druckfolie (Gewährleistung Parallelität Sonotrode-Amboss)	PRESSUREX-micro	SPI Sensor Products Inc.	Dicke: 20 μm , Maximalbelastung: 1,5 kg/cm ²

5 Voruntersuchungen

5.1 Berechneter maximaler Faservolumengehalt

Der theoretisch maximal mögliche FVG des Carbon-biaxial-NCF „ECS6090“ wurde mit folgenden Parametern berechnet.

Tabelle 5-1: Parameter zur Berechnung des Faservolumengehalts

Bezeichnung	Größe
Faser (Datenblatt im Anhang)	HTS, 800 tex, 12 k
Faserdichte ρ_F [g/cm ³],	1,76
Faserdurchmesser [μm]	7
Flächengewicht ECS6090 m_{AF} [g/m ²]	250
Nähfadendichte ρ_N [g/cm ³], [52]	1,37
Flächengewicht Nähfaden ECS6090 m_{AN} [g/m ²]	4
Rovingbreite [mm]	5 (entspr. 715 Filamenten)
Rovinghöhe bei 90,69 % FVG [mm]	0,106 (entspr. 17 Filamenten)
Allgemein: Flächenanteil von Kreisen in bester Gitterpackung in der Ebene ohne Randeffekte φ_{KGP} , Abbildung 5.1, [%]	90,69
Allgemein: Anteil der Fläche bester Kreisgitterpackung an der Querschnittsfläche des Rovings $\varphi_{A,KGP}$	$\frac{16}{17}$
Flächenanteil von auf einer Linie aufgereihten Kreisen φ_{KE} , Abbildung 5.1, [%]	78,54

Die Berechnung basiert auf der Annahme, dass sich die Fasern runden Querschnitts bei maximalem FVG innerhalb des Rovings in optimaler Kreisgitterpackung anordnen (Abbildung 5.1, links). Am Rand des Rovings gilt die Anordnung von auf einer Linie aufgereihten Kreisen (Abbildung 5.1, rechts).

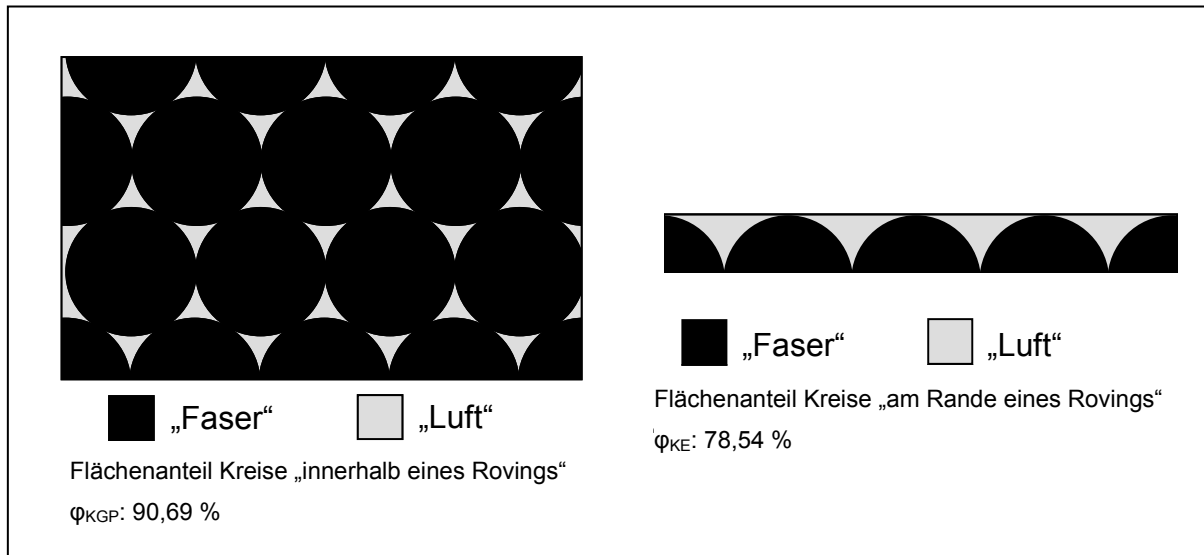


Abbildung 5.1: Flächenverhältnisse im Querschnitt eines Rovings (nach [53])

Der Faservolumengehalt eines Rovings ohne Nähfaden, φ_R , setzt sich damit zusammen aus dem Volumengehalt am Rand des Rovings (φ_{KE}) und dem Volumengehalt im Inneren des Rovings (φ_{KGP}).

$$\varphi_R = (1 - \varphi_{A,KGP}) \cdot \varphi_{KE} + \varphi_{A,KGP} \cdot \varphi_{KGP} = 89,98 \% \quad (5.1)$$

Verzahnungen zwischen Rovings (Nesting) werden aufgrund der unterschiedlichen Faserorientierungen ausgeschlossen.

Der Volumenanteil des Nähfadens am Halbzeug, $\varphi_{V,F}$, ist:

$$\varphi_{V,F} = \frac{m_{A,N}}{m_{A,NCF}} \cdot \frac{\rho_{NCF}}{\rho_N} = 2,02 \% \quad (5.2)$$

Der maximale Faservolumengehalt des Halbzeuges, φ_{max} , ist somit:

$$\varphi_{max} = 89,98 \% - (1 - 2,02 \%) = 87,91 \% \quad (5.3)$$

Dies bedeutet, dass ein Gelege oben genannten Typs aus Fasern kreisrunden Querschnitts bei einer idealen Kompaktierung, also einer packungsoptimalen Ablage der Fasern übereinander, einen Faservolumengehalt von 87,91 % besitzt.

5.2 Abhängigkeit des Faservolumengehalts vom Kompaktierdruck

Die Dichte einer Preform, ρ_{Pf} , erhöht sich mit dem Kompaktierdruckes p_K . Es wurde empirisch untersucht, ob es sich hierbei um einen linearen Zusammenhang handelt.

Zunächst wurde die Abhängigkeit des Faservolumengehalts vom Kompaktierdruck durch Kompaktieren eines Preformlaminats in einer Hydraulikpresse gemessen. Folgende Parameter kamen zum Einsatz:

Halbzeug	NCF „ECS6090“, Standardlaminat, (Tabelle 6-1)
Lagenaufbau	[0/90, +45/-45] ₃₀
Presse	Schenck Trebel RM 250 KN (Druckprüfmaschine)

Abbildung 5.2 zeigt die Abhängigkeit des Faservolumengehalts vom Kompaktierdruck.



Abbildung 5.2: Faservolumengehalt über Kompaktierdruck

Da US-Verschweißungen bei Kompaktierdrücken zwischen 3 und 8 bar (0,3 und 0,8 MPa) stattfinden, wurde die Abhängigkeit des Faservolumengehalts vom Druck als linear angenommen. Der theoretisch maximale Faservolumengehalt des Gelege-

aufbaus wurde mit 87,9 % berechnet (s. Kapitel 5.1), somit ist im betrachteten Bereich noch nicht mit einer Annäherung an einen Grenzwert zu rechnen.

Nun wurde die lineare Abhängigkeit der Preformdichte vom FVG rechnerisch nachgewiesen. Es ist der FVG φ linear abhängig von der Preformdicke d_{Pf} .

$$\varphi = \frac{V_F}{V_{Pf}} = \frac{m_{A,F}}{\rho_F \cdot d_{Pf}} = k_1 \cdot \frac{1}{d_{Pf}} \quad (5.4)$$

mit den Indizes Pf für Preform und F für Faser. Es hängt die Preformdichte ρ_{Pf} ebenfalls linear von der Preformdicke d_{Pf} ab:

$$\rho_{Pf} = \frac{m_{Pf}}{V_{Pf}} = \frac{m_F + m_L}{l_{Pf} \cdot b_{Pf} \cdot d_{Pf}} = \frac{m_{A,F} \cdot l_{Pf} \cdot b_{Pf} + \rho_L \cdot l_{Pf} \cdot b_{Pf} \cdot d_{Pf}}{l_{Pf} \cdot b_{Pf} \cdot d_{Pf}} =$$

$$\rho_L + \frac{m_{A,F}}{d_{Pf}} = k_2 + k_3 \cdot \frac{1}{d_{Pf}} \quad (5.5)$$

Somit ist die Preformdichte linear abhängig vom Faservolumengehalt.

Aus der in Abbildung 5.2 gezeigten quasi-linearen Abhängigkeit kann also auf die quasi-lineare Abhängigkeit der Preformdichte vom Kompaktierdruck im untersuchten Bereich zwischen 0,3 und 0,8 MPa geschlossen werden.

5.3 Idealer Energieeintrag

Idealer Energieeintrag bedeutet in diesem Kontext, dass die elektrische Energie, die aus dem Netz aufgenommen wird, vollständig in thermische Energie des Laminatvolumens unter der Schweißfläche umgesetzt wird. Dieser ideale Energieeintrag wird im Folgenden mit E_{LVE} bezeichnet. Die empirische Ermittlung des realen, verlustbehafteten Energieeintrags erfolgt im Folgekapitel.

Es wird die Laminatvolumeneinheit LVE definiert als der Teil der Preform, der sich unter der Sonotrodenschweißfläche befindet. Die LVE besitzt somit die Abmaße

- Länge l_{LVE} = Länge der Sonotrodenschweißfläche
- Breite b_{LVE} = Breite der Sonotrodenschweißfläche
- Höhe h_{LVE} = Dicke der Preform unter der Sonotrodenschweißfläche (Abbildung 5.3)

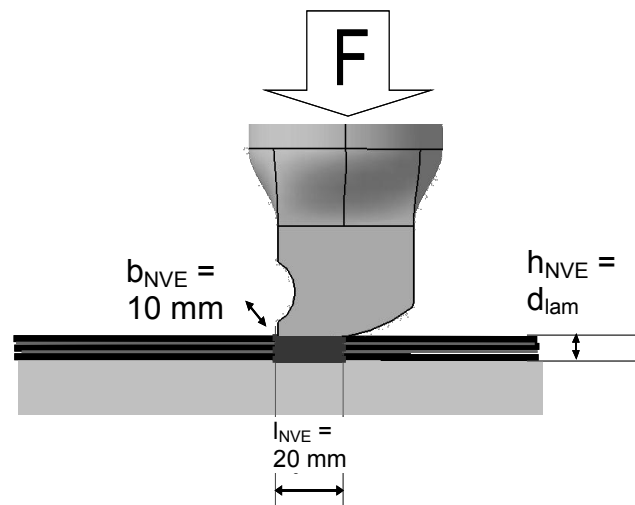


Abbildung 5.3: Laminatvolumeneinheit LVE

Das Generatorleistungssignal (P_{USG} , Ist-Wert) wurde während der Schweißung über der Zeit aufgezeichnet (s. blaue Linie im Beispiel, Abbildung 5.4).

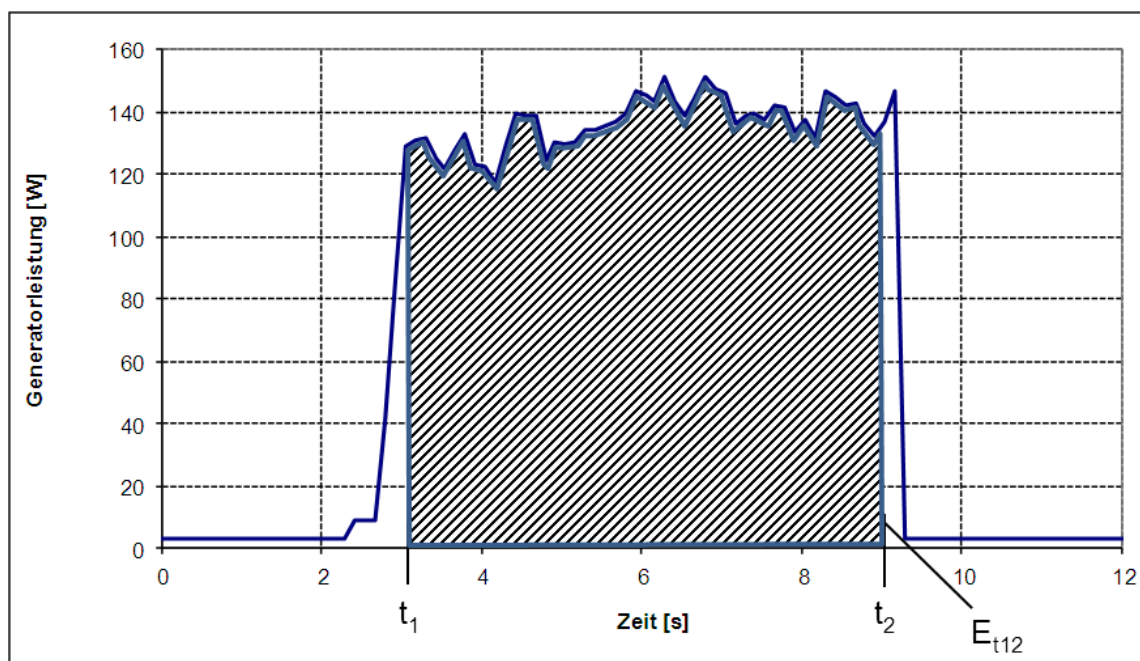


Abbildung 5.4: Generatorleistungssignal (gemessen)

Eine Berechnungsroutine wurde programmiert, welche durch Integration von P_{USG} die aufgenommene Energie zwischen zwei Zeitpunkten t_1 und t_2 , E_{t12} , ermittelt (Annäherung, schraffierte Fläche, Abbildung 5.4).

$$E_{t12} = \int_{t_1}^{t_2} P_{USG}(t) dt \quad (5.6)$$

Hierbei werden t_1 und t_2 automatisch gesetzt.

Für Punktschweißungen kann aus Formel 5.7 direkt der Energieeintrag in die Laminatvolumeneinheit LVE (Abbildung 5.3) berechnet werden:

$$E_{LVE,P} = E_{t12} \quad (5.7)$$

Mithilfe von Formel 5.8 kann schließlich für kontinuierliche Schweißungen im Zeitraum zwischen t_1 und t_2 der ideale Energieeintrag in die LVE der Länge l_{LVE} bei einer Vorschubgeschwindigkeit v berechnet werden.

$$E_{LVE,k} = \frac{E_{t12}}{t_2 - t_1} \cdot \frac{l_{LVE}}{v} \quad (5.8)$$

Dieser Energieeintrag wird in beiden Betriebsmodi demnach direkt aus dem Leistungssignal des Generators berechnet. Der Wirkungsgrad ist hierbei nicht berücksichtigt („ideal“).

5.4 Bestimmung des effektiven Wirkungsgrades

Der effektive Wirkungsgrad des Schweißprozesses wird in diesem Kontext definiert als

$$\eta_{USS} = \frac{E_{th}}{E_{LVE}}, \quad (5.9)$$

wobei E_{th} die notwendige thermische Energie zum Erwärmen der LVE ist und E_{LVE} die vom Generator aufgenommene Energie darstellt. E_{LVE} wird bestimmt wie im vorangegangenen Kapitel erläutert; im Folgenden wird die Bestimmung von E_{th} dargelegt.

Es gilt

$$P_{th} = P_{USG} - P_{SS} - \dot{Q}_{xy} - P_{USA} \quad (5.10)$$

Hierbei ist P_{th} die thermische Leistung zur Erwärmung des Laminats, P_{USG} die Ist-Leistung des Ultraschallgenerators, P_{SS} die Verlustleistung im Schwingssystem. \dot{Q}_{xy} sind die Wärmeverluste im Laminat in x- und y-Richtung. P_{USA} ist die Verlustleistung durch Restschwingungseintrag in den Amboss. Zur Ausbildung des Temperaturprofils im Laminat sind neben der thermischen Leistung P_{th} auch die Wärmeableitung in Sonotrode (\dot{Q}_S) und Amboss (\dot{Q}_A) relevant. Diese werden bei der Berechnung von η_{USS} jedoch nicht miteinbezogen. Die Wärmebilanz an der LVE stellt sich somit dar wie in Abbildung 5.5.

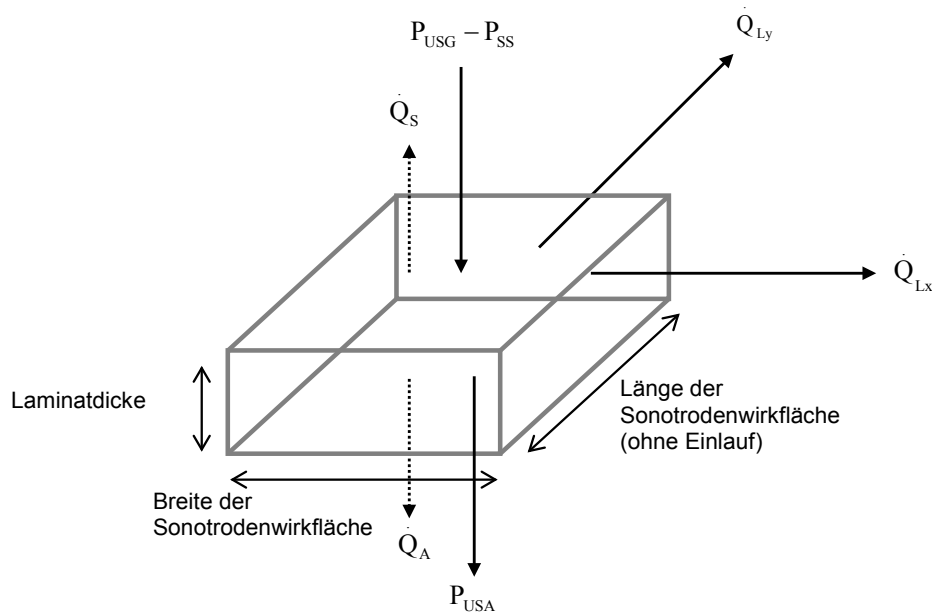


Abbildung 5.5: Energiebilanz an der Laminatvolumeneinheit LVE

P_{th} wird experimentell bestimmt. Hierzu wurde zunächst die Wärmekapazität der Laminatvolumeneinheit, $c_{p,LVE}$, für die einzelnen Materialsysteme berechnet. Diese wird aus der Masse der LVE und ihrer spezifischen Wärmekapazität $c_{p,LVE}$ bestimmt. $c_{p,LVE}$ wird berechnet aus den spezifischen Wärmekapazitäten von Fasern ($c_{p,F}$), Binder ($c_{p,B}$) und Luft ($c_{p,Luft}$) entsprechend ihrem Masseanteil (nach [54]).

$$c_{p,LVE} = \sum_0^i \varphi_{m,i} \cdot c_{p,i} = \frac{m_{F,LVE}}{m_{LVE}} c_{p,F} + \frac{m_{B,LVE}}{m_{LVE}} c_{p,B} + \frac{m_{Luft,LVE}}{m_{LVE}} c_{p,Luft} \quad (5.11)$$

Auf dieser Basis wurden Punktschweißungen unter Messung der Temperatur im Laminat und der Generatorleistung P_{USG} durchgeführt. Mithilfe von Formel 5.7 und 5.10 wurde der Wirkungsgrad mit der Masse der LVE, m_{LVE} berechnet:

$$\eta_{USS} = \frac{m_{LVE} \cdot c_{p,LVE} \cdot \Delta T}{\int_{t_1}^{t_2} P_{USG}(t) dt} \quad (5.12)$$

Aus fünf Schweißkonfigurationen wurde ein Wirkungsgrad von

$$\eta_{USS} = 0,305$$

bei einer Standardabweichung von 0,05 bestimmt. Das heißt, 30,5 % der Leistung, die der Generator aus dem Netz aufnimmt, werden zur Erwärmung der LVE genutzt.

6 Material und Methodik

Die Auswahl der Halbzeuge wurde auf Basis ihrer Relevanz für Eurocopter und der Möglichkeit zur Erzeugung allgemeingültiger Aussagen getroffen. Die Entwicklung von Anforderungen an die Schweißnaht und der Messtechnik zu ihrer quantitativen Überprüfung hatte zum Ziel, das Schweißergebnis beurteilbar zu machen. Für die Parameterstudien wurde eine Systematik auf Basis statistischer Methoden definiert, um mit angemessenem Aufwand belastbare und reproduzierbare Erkenntnisse über die Parametersensitivität und das Prozessfenster zu gewinnen.

6.1 Halbzeuge

Für die Studien wurde ein Carbonfaser-Biaxialgelege verwendet. Zwischen die Gelegelagen wurde ein thermoplastisches Bindervlies eingelegt (Tabelle 6-1).

Tabelle 6-1: Primär-Versuchsmaterial

Halbzeug	Handelsname/Standard	Eigenschaften
NCF Carbon-Biaxial-Gelege „ECS6090“	Eurocopter Standard ECS6090	HTS 12 k-Roving, Flächen- gewicht 254 g/m ² , Vernähung: Tricot-Loop, PES-Garn
Bindervlies „PA1541“	Hersteller: Spunfab; Handelsname: PA1541	Copolyamid-Vlies, 12 g/m ²

Als „Standardlaminat“ wird im Folgenden ein nicht kompakter Aufbau aus zehn Lagen NCF und neun Lagen Bindervlies in folgendem quasi-isotropen Aufbau bezeichnet: [+45°/-45°, 0°/90°, +45°/-45°, 0°/90°, +45°/-45°]_s.

Für einzelne Untersuchungen wurden zusätzlich folgende Materialien eingesetzt (s. Spalte „Verwendung“):

Tabelle 6-2: Weitere untersuchte Materialien

Faserhalbzeug	Handelsname/ Standard	Eigenschaften	Verwendung
Carbon-Gewebe, bebindert „G0926“	Hersteller: Hexcel; Handelsname: HexForce G0926 D 1304 E01	Webart: 5 HS, 6 k- Roving; Flächen- gewicht: 390 g/m ² (inkl. Binder), epo- xidbasierter Pul- verbinder, beidsei- tig bebindert	ILSS-Prüfung, Ermittlung Tem- peraturprofil
Carbon-Gewebe, ohne Binder „G939“	Hersteller: Hexcel; Handelsname: G939	Webart: 4 HS; 3 k- Roving, Flächen- gewicht: 220 g/m ²	Ermittlung Temperaturprofil
Carbon UD, unbebindert „ECS6082“	Eurocopter Stan- dard: ECS6082	12 k UD-Gewebe, Flächengewicht 325 g/m ²	Schälprüfung
Glasfaser-Gelege „S2NCF“	Hersteller: SAERTEX	Biaxial-Gelege, 66 tex S2-Glas, Flächengewicht: 300 g/m ²	Ermittlung Temperaturprofil

6.2 Anforderungen an die Schweißnaht

Als Basis zur Beurteilung der Schweißergebnisse wurden Anforderungen an die Schweißnaht bezüglich Ondulationen und Nahtfestigkeit definiert und Nahtkennwerte abgeleitet.

6.2.1 Maximal zulässige Faserondulation

Die maximal zulässige Faserondulation in der Schweißnaht wurde definiert auf Basis interner Fertigungsvorschriften. Hierin ist die maximal zulässige „Deformation der Faserstruktur“ festgelegt. Eine lokale Auslenkung von Fasern aus ihrem Sollverlauf ist bis zu einem Verhältnis $h/b = 10$ erlaubt. Die Größe „h“ beschreibt den lokalen Maximalabstand eines ausgelenkten Rovings von seiner Sollage, die Größe „b“ ist die Gesamtlänge des ondulierten Bereichs in Faserrichtung. Diese Größen sind in Abbildung 6.1 eingezeichnet für eine Ondulation, wie sie typischerweise durch einen kontinuierlichen Schweißvorgang hervorgerufen wird.

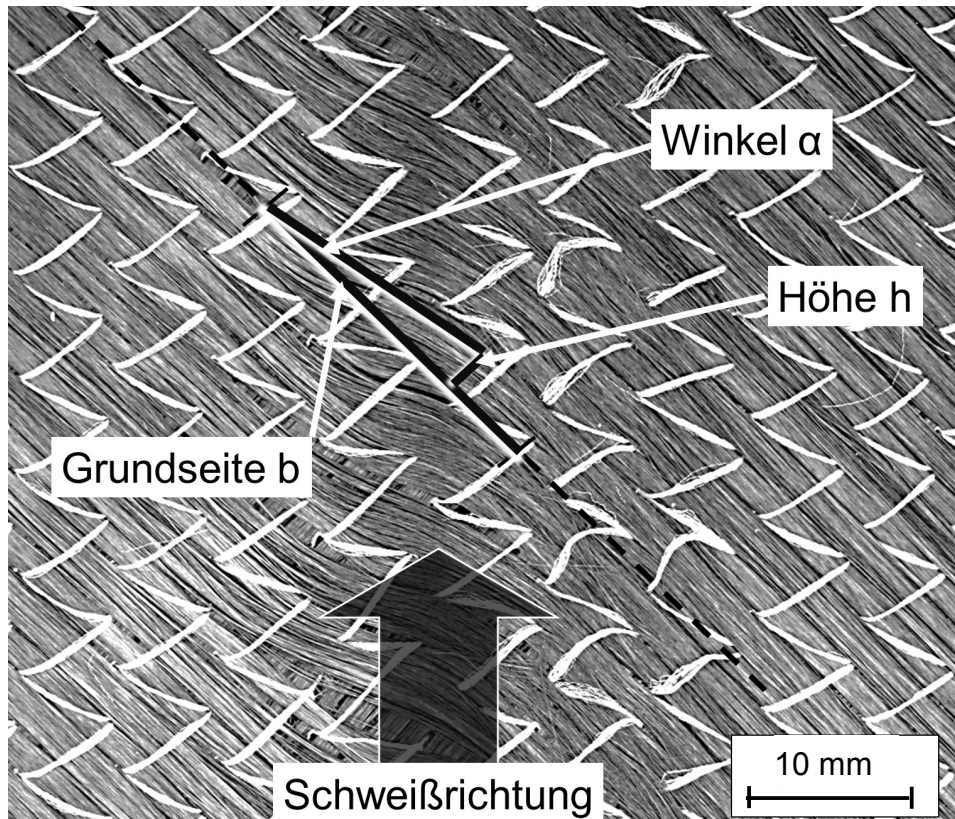


Abbildung 6.1: Darstellung der Messgrößen zur Bestimmung einer Ondulation

Aus dem geforderten Verhältnis von $h/b = 10$ ergibt sich ein erlaubter Ondulationswinkel von

$$\alpha = 15^\circ.$$

6.2.2 Erforderliche Nahtfestigkeit

Die geforderte Mindestfestigkeit der Schweißnaht wurde aus dem Belastungszustand bei einem Handlingvorgang für eine „T-Beam“-Preform abgeleitet. Diese T-Beam-Preform ist Teil der Konstruktion einer generischen CFK-Flugzeugtür [56] und stellt eine der größten Preforms der Flugzeugtür dar.

Bei dem Handlingvorgang liegt die Preform des T-Beams im Schweißwerkzeug und wird mit an den Gurtlagen angreifenden Greifern angehoben. Abbildung 6.2 zeigt schematisch den Schnitt A durch die Preform, wobei G die Gewichtskraft der Preform und F_G die Kraft des Greifers ist.

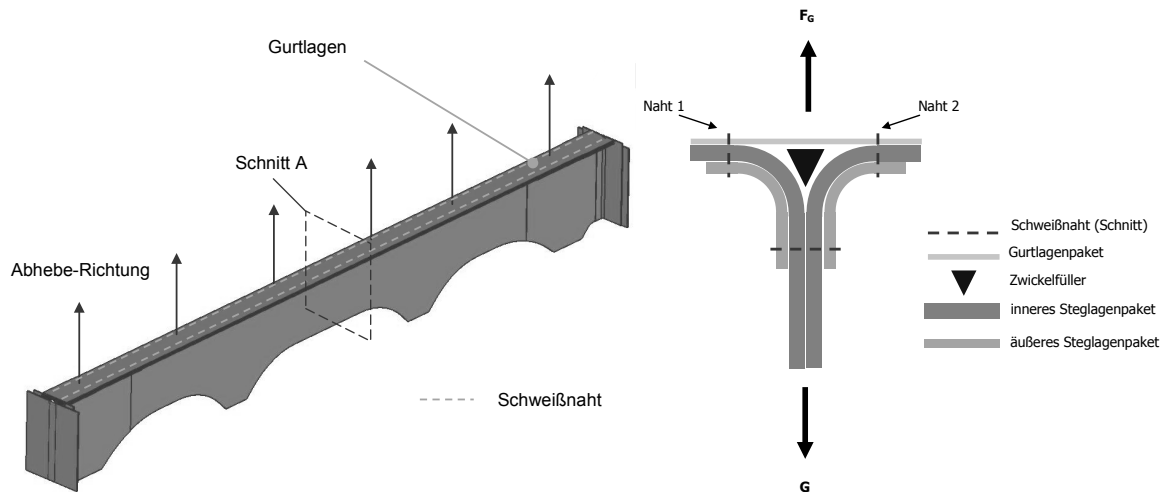


Abbildung 6.2: Freischnitt durch den T-Beam beim Handlingvorgang

Aus den Bauunterlagen des Beams wurde die Masse der Preform ermittelt mit $m_{TPf} = 1016 \text{ g}$. Die Länge der Preform beträgt $L_{Pf} = 1060 \text{ mm}$. Es wurde folgender Fall angenommen:

- Die Preform wird an der oben liegenden Gurtlage gegriffen, d.h. das gesamte Preformgewicht muss von der Verbindung zwischen den oberen beiden Lagen getragen werden.
- Beim Handlingvorgang kommt es zu einer Schrägstellung der Preform (Drehung um Längsachse), womit Naht 1 entlastet wird und Naht 2 das gesamte Gewicht tragen muss.
- Der Greifer beschleunigt mit $a_{\max} = 1 \text{ g}$

Mit genanntem Lastfall ergibt sich eine Mindestschälkraft auf die Naht von

$$F_{Sm} = \frac{m_{TPf} \cdot (g + a_{\max})}{L_{PF}} = 0,188 \frac{N}{cm}$$

Dieser Wert wurde mit einem Sicherheitsfaktor von $s_F = 2$ versehen und gerundet als Mindestanforderung an die Schälfestigkeit F_S der Schweißnaht definiert.

$$F_S = 0,4 \frac{N}{cm}$$

6.3 Messung der Nahtkenngrößen

Zur Messung der Nahtkenngrößen „Faserondulation“ und „Nahtfestigkeit“ wurden reproduzierbare Messverfahren definiert.

6.3.1 Faserondulation

Die Ondulationen in der Schweißnaht wurden mit Hilfe des Eurocopter Preform-Mess-Systems (PMS) bestimmt, wobei hochauflösende Grauwertaufnahmen der Preform erstellt und mit Hilfe von Algorithmen ausgewertet werden [55].

Es wird die Aufnahme durch ein Raster in Einzelfelder aufgeteilt. Für jedes Feld wird die Faserorientierung bestimmt. Auf Abbildung 6.3 ist eine analysierte Aufnahme zu sehen.

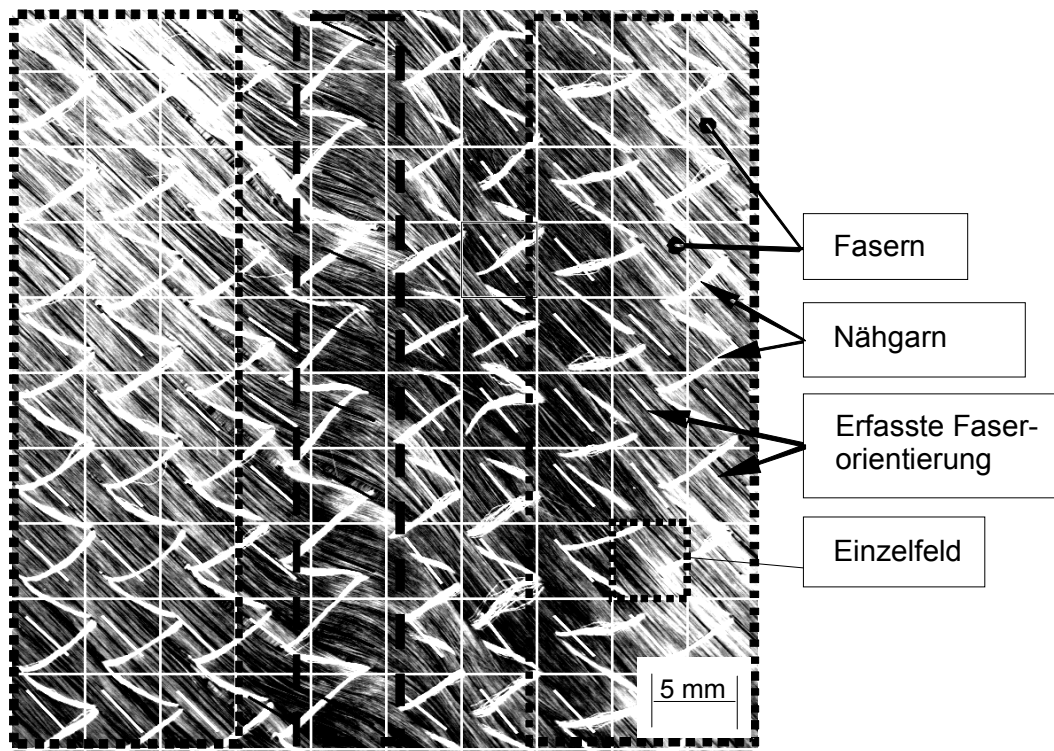


Abbildung 6.3: Nahaufnahme einer Ondulationsanalyse

Jedem Feld wurde zunächst eine Bewertung entsprechend der Differenz von Ist-Faserorientierung zu Sollorientierung zugeordnet:

- unkritisch (Abweichung $< 4^\circ$)
- leicht fehlerhaft (Abweichung zwischen 4° und 8°)
- schwer fehlerhaft, unakzeptabel (Abweichung $> 8^\circ$)

Es wurde vermutet, dass die oberliegende Lage mit Sonotrodenkontakt generell die meisten Ondulationen aufweist. Zur Verifikation dieser Vermutung wurden von einem verschweißten Standardlaminat (Tabelle 6-1) die oberen vier Lagen voneinander getrennt und nacheinander analysiert. Abbildung 6.4 zeigt die Anteile fehlerhafter Messfelder der Lagen 10 (Sonotrodenkontakt) bis 7.

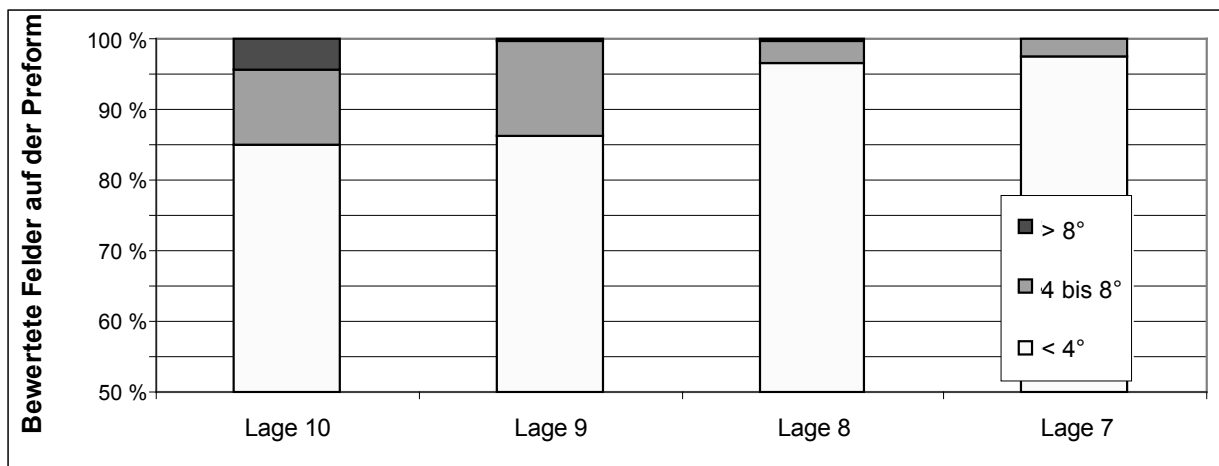


Abbildung 6.4: Anteil ondulierter Messfelder in den oberliegenden vier Laminatlagen

Wie aus Abbildung 6.4 zu entnehmen ist, nimmt der Anteil fehlerhafter Maskenfelder, also der Ondulationsgrad, mit steigender Laminattiefe ab. Entsprechend wurde die versuchsbegleitende Ondulationsanalyse auf die Laminatoberfläche als die am stärksten beschädigte Faserlage beschränkt.

Zur versuchsbegleitenden Ondulationsanalyse wurden von jeder Schweißnaht drei Aufnahmen generiert und analysiert. Jedes Bild wurde in drei Bereiche aufgeteilt, wobei im nahtfernen Bereich, der keine Ondulationen erfahren hat, durch Mittelung der Messwerte der Sollwert für die Faserorientierung bestimmt wurde. Im Nahtbereich wurde durch Mittelung der Messwerte die Faserausrichtung in der Naht und damit dann die Winkelabweichung bestimmt. Der Übergangsbereich wurde nicht ausgewertet. Die mittlere Standardabweichung des Verfahrens wurde mit 16 % bestimmt.

6.3.2 Schälfestigkeit der Naht

Die Anforderung an die Lastübertragung der Preform-Schweißnaht wurde auf den dominierenden Fall der Schälbelastung reduziert. Zur Ermittlung der Schälfestigkeit wurde ein 180°-Schälversuch in Anlehnung an ISO 11339 durchgeführt [57].

Um formstabile Schälprüflinge zu erhalten und damit ein eindeutiges Versagensverhalten zu gewährleisten, wurden unidirektionale Carbon-Bänder mit 25 mm Breite und einem Flächengewicht von 300 g/m² (Datenblatt im Anhang) in das Preform-Laminat eingelegt. Dies erfolgte in der unteren, sonotrodenfernen Lage, da diese Lage die geringste Maximaltemperatur beim Schweißprozess aufweist (s. Kap. 7.6), der Binder an dieser Stelle die geringste Adhäsion erzeugt und somit eine Prüfung am schwächsten Glied erfolgt.

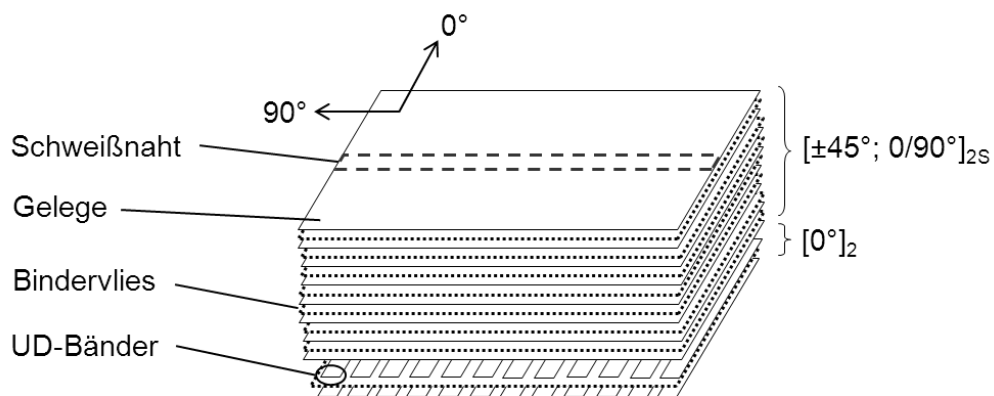


Abbildung 6.5: Laminataufbau zur Erzeugung von Peel-Test-Proben

Die Bänder wurden anschließend in einen Schälprüfstand eingespannt und einem 180°-Schältest unterzogen (Abbildung 6.6).

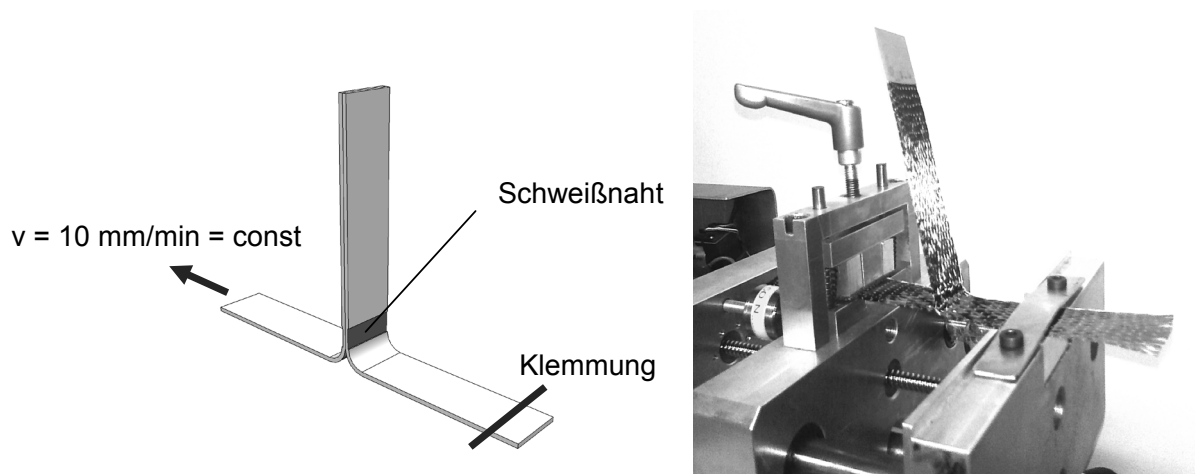


Abbildung 6.6: Preform-Schälprüfung (IVW Kaiserslautern)

Hierbei wurde der Kraft-Weg-Verlauf bei konstantem Vorschub von 10 mm/min bestimmt. Abbildung 6.7 zeigt einen typischen Kraftverlauf während einer Schälkraftmessung mit einer Phase des Kraftanstiegs zwischen Millimeter 10 und 20, wobei sich hier leichte Adhäsion durch den angeschmolzenen Binder außerhalb der Schweißnaht zeigt. Die Maximalkraft (Zielgröße der Messung) kann zumeist auf einem kleinen Plateau zwischen 2 und 8 mm Breite gemessen werden, bevor danach die Naht versagt und nur Restkräfte durch ausgezogene Wirkfäden sichtbar werden (zwischen Millimeter 30 und 40).

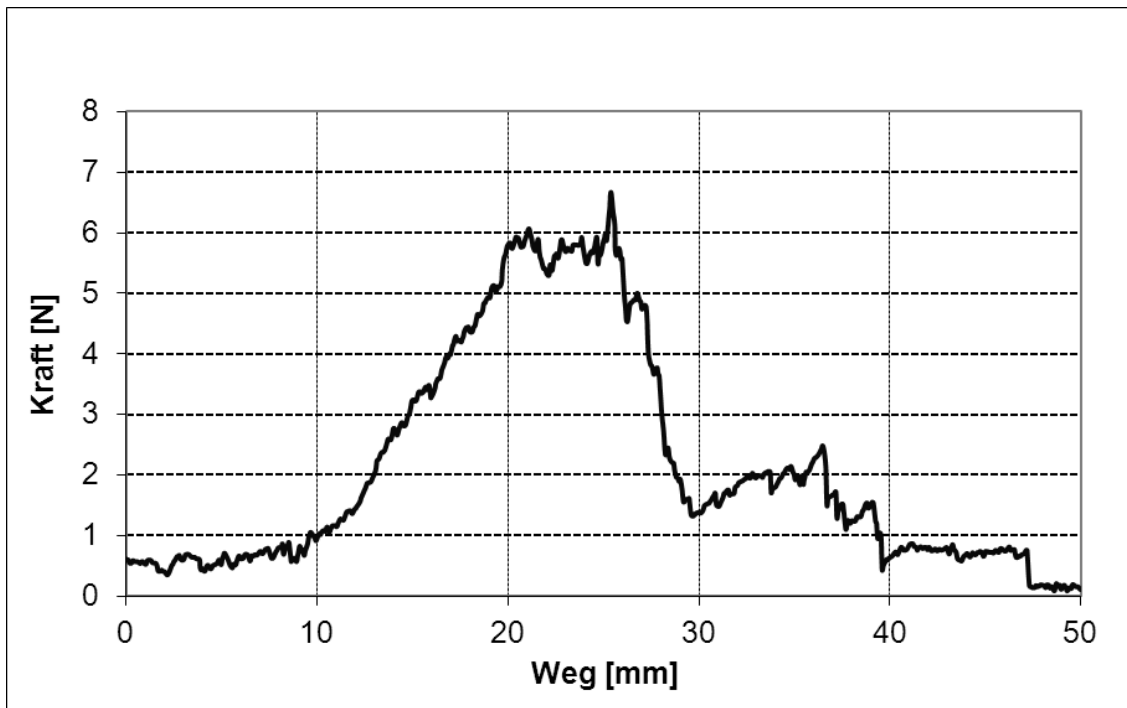


Abbildung 6.7: Messung des Kraft-Weg-Verlaufs einer Schälprobe

Von jedem Parametersatz wurden mindestens fünf Proben getestet. Die Messung der maximalen Schälkraft unterlag hierbei einer Standardabweichung von 9 %.

6.3.3 Kompaktierung in der Naht

Nach Bickerton et al. erzeugen Kompaktiervorgänge einen Spannungszustand im Faseraufbau, der wiederum eine Relaxation des Faserhalbzeuges nach Ende des Kompaktiervorgangs bewirkt [58]. Dieser Vorgang, der in seiner Ausprägung von Materialparametern und Kompaktiergeschwindigkeit abhängt, ist mit Hystereseverlusten behaftet. Mit zunehmender Anzahl an Kompaktiervorgängen erhöht sich der Kompaktier- und verringert sich der Relaxationsgrad; dies wird insbesondere auf „Fiber Nesting“ zurückgeführt, was letztendlich ein Ablegen der Fasern in einer Anordnung höherer Packungsdichte bedeutet [59].

Strong et al. zeigten anhand punktförmiger Verschweißungen von CF/PEEK-Laminaten ein „Auswandern“ der Fasern aus der Fügestelle („fiber walk out“), was zu einer Absenkung der Nahtfestigkeit führt [60]. Ein ähnlicher Effekt bei Fasern unidirektionaler Ausrichtung, die zwischen oszillierenden Platten in einem Newton'schen Fluid eingebettet waren, wurde auch von Roberts et al. beobachtet [61].

Wenngleich bei den hier vorliegenden Studien die Randbedingungen des Preformings gelten, ist ein Auftreten von „fiber nesting“ durch Mehrfachkompaktierung (Schwingung der Sonotrode) und „fiber walkout“ bei Schalleinleitung unter dem lokalen Druck der Sonotrode zu erwarten. Die Dicke des Preformlaminats unter der Sonotrode wurde während des Schweißvorgangs für unterschiedliche Laminatkonfigurationen untersucht. Hierfür wurde ein Fühlhebelmessgerät nach DIN 2270 A („Puppitaster“) an der Schwingeinheit angebracht und somit das „Nachrücken“ der Schwingeinheit bei sich reduzierender Laminatdicke gemessen.

Der Kompaktiergrad in der Schweißnaht nach Infusion und Aushärtung wurde mittels Schliffproben und Lichtmikroskopie ermittelt (Mikroskop: Leitz Aristomet).

6.4 Parameterstudien

Durch die Ermittlung des optimalen Parametersatzes für eine kontinuierliche Verschweißung des Standardlaminats soll zum einen die Leistungsfähigkeit der Technologie untersucht werden; zum anderen sollen Parametersätze für weitere Laminatkonfigurationen abgeleitet werden.

Die primären Prozessparameter beim Ultraschallschweißen sind der Schweißdruck der Sonotrode, die Schweißamplitude und die Vorschubgeschwindigkeit (respektive Schweißzeit bei Punktschweißungen) [28].

Studien zur Verschweißung von glasfaserverstärktem Polyamid von Liu et al. kamen zu dem Ergebnis, dass der Schweißdruck keinen signifikanten Einfluss auf die Nahtfestigkeit hat; lediglich muss ein Mindestwert überschritten werden, damit eine effiziente Schalleinleitung gewährleistet ist. Die Schweißzeit wurde als signifikanter Einflussfaktor auf die Nahtfestigkeit bewertet; der Energieeintrag stieg bei konstanter Schweißleistung fast linear mit der Schweißzeit. Amplitudenschwankungen wurden als größter Einflussfaktor identifiziert [62]. Dies erscheint plausibel angesichts der überproportionalen Abhängigkeit des Energieeintrags von der Amplitude.

Ähnliche Ergebnisse zur vernachlässigbaren Abhängigkeit der Schweißtemperatur vom Schweißdruck wurden bei der Verschweißung von faserverstärkten Epoxidharzprepregs ermittelt. Die Schweißzeit (respektive Vorschubgeschwindigkeit) wurde auch hier als wichtiger Einflussfaktor auf die Maximaltemperatur im Laminat identifiziert. Jedoch spielt die Wärmeabfuhr durch Werkzeug und Sonotrode mit steigender

Schweißzeit einen größeren Einfluss (Fouriers Gesetz, [63]); es wurde eine quasi-asymptotische Annäherung an eine Maximaltemperatur gemessen. Die Abhängigkeit der Laminattemperatur von der Schweißamplitude wurde empirisch als leicht überproportional identifiziert [47], [64].

Studien zur Verschweißung von carbonfaserverstärktem PEEK, die mittels statistischer Methoden durchgeführt wurden, ergaben, dass insbesondere die gleichzeitige Erhöhung des Schweißdruckes und der Amplitude eine Steigerung der Nahtfestigkeit bewirkt, wohingegen die Erhöhung der Amplitude alleine nur geringen Einfluss hat. Es wird vermutet, dass wiederum ein Mindestdruck zur effizienten Energieeinleitung gewährleistet sein muss. Die Unterschreitung dieses Mindestdruckes kann nicht durch eine Erhöhung der Amplitude kompensiert werden [60].

Zur Ermittlung der Parametersensitivität des kontinuierlichen Preform-Schweißprozesses und eines optimierten Parametersatzes für eine gegebene Laminatkonfiguration wurde ein Versuchsplan nach statistischen Methoden („Design of Experiments“) erstellt. Dieser Ansatz erlaubt den Umgang mit mehreren Prozessparametern und ihrer Interaktion. Somit können mehrere Parameter mit minimaler Versuchsanzahl optimal eingestellt werden [65]. Voraussetzung für die Anwendung statistischer Methoden ist die Kontrollierbarkeit und Reproduzierbarkeit der Parameter (Eingangsgrößen) und die Messbarkeit der Ausgangsgrößen. Dies wurde durch den Versuchsstand und die Messmethoden sichergestellt. Diese Größen sind in untenstehender Tabelle 6-3 dargestellt.

Tabelle 6-3: Ein- und Ausgangsparameter des Prozesses bei der statistischen Versuchsplanung

Eingangsgröße	Einheit	Typ
Amplitude	μm	beliebig wählbar zwischen 6 und 26 μm (entspr. 20 % und 100 %)
Anpresskraft	N	beliebig wählbar zwischen 60 und 400 N
Vorschubgeschwindigkeit	m/min	beliebig wählbar zwischen 0 und 10 m/min

Ausgangsgröße	Einheit	Typ
Ondulation	° Winkelabweichung	Forderung: < 15 (s. Kap. 6.2.1)
Nahtfestigkeit	Schälfestigkeit in N/cm	Forderung: > 0,4, (s. Kap. 6.2.2)
Prozessgeschwindigkeit	m/min	zu maximieren

Der Versuchsplan wurde mit Hilfe der Software MODDE® der Firma UMETRIX erstellt [66]. Er sieht drei Screening-Versuche zur Gewichtung der Faktoren vor und einen Response-Surface-Plan in zweidimensional orthogonalem Design, bestehend aus 26 Versuchen zur Ermittlung des Zusammenhangs zwischen den Eingangs- und Zielgrößen, sowie des optimierten Parametersatzes.

6.5 Interlaminare Scherfestigkeit geschweißter Lamine

Die interlaminare Scherfestigkeit (ILSS) gilt als charakteristische Kenngröße für das Maß der Anbindung von Fasern an die Matrix. Zudem treten bei ihrer Ermittlung Zugspannungen im Verbund auf, womit sich auch Faserondulationen und -risse in einer Reduktion des Festigkeitswertes niederschlagen. In Abbildung 6.8 ist der Versuchsaufbau schematisch abgebildet und der Probekörper beschrieben.

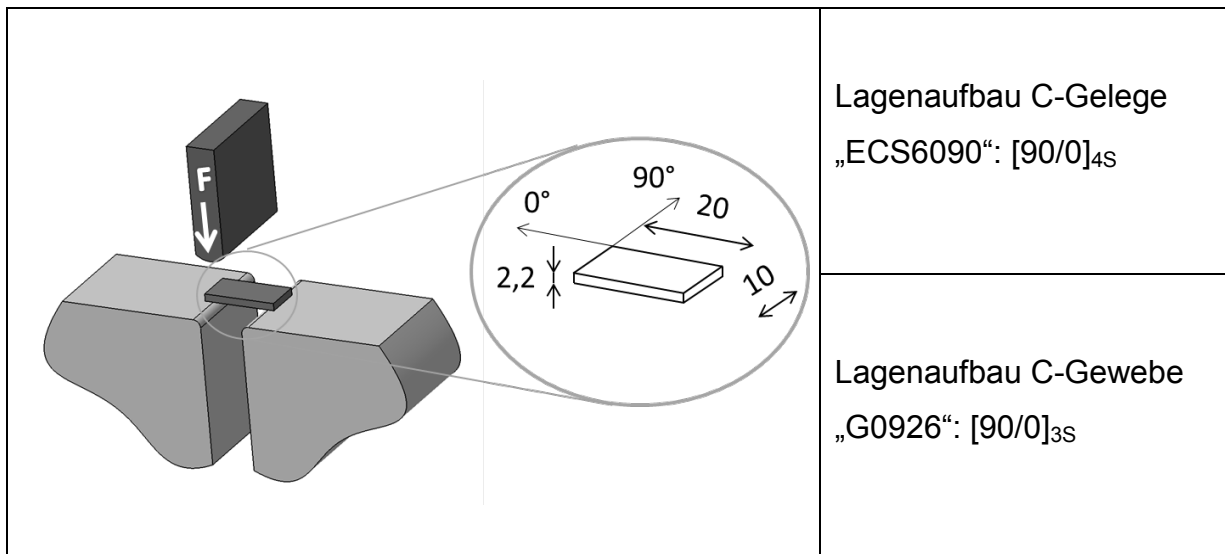


Abbildung 6.8: Schema ILSS-Test und Probengeometrie

Die ILSS wurde aus den beiden Materialsystemen nach DIN EN 2563 [67] mit Proben der Dicke $2,2 \pm 0,15$ mm bestimmt. Es wurden neben der unbeschallten Referenzprobe drei Probentypen getestet (Abbildung 6.9):

Probentyp „Q“:	Probentyp „L“:	Probentyp „S“:
kontinuierliche Schweißung quer zur Faserrichtung in der Symmetrieebene der Probe	kontinuierliche Schweißung längs der Faserrichtung in der Symmetrieebene der Probe	Stempelschweißung in der Symmetrieebene der Probe

Abbildung 6.9: Probentypen zur Ermittlung der interlaminaren Scherfestigkeit geschweißter Lamine

Die vier Probentypen bilden folgende Fälle ab:

- Probentyp „R“: Referenzprobe, keine Beschallung
- Probentyp „Q“: Kontinuierliche Verschweißung quer zur Faservorzugsrichtung: Hierbei erfolgt eine maximale Verdrängung der Fasern aus dem belasteten Bereich.

- Probentyp „L“: Kontinuierliche Verschweißung längs der Faservorzugsrichtung: Dies resultiert in der maximalen Schallpenetration einzelner Faserbündel. Die Gefahr der Schlichteschädigung ist bei diesem Szenario maximal.
- Probentyp „S“: Punktschweißung und elliptische Auslenkung der Fasern („Fischauge“)

Bei der Herstellung der Probekörper wurden das Preformlaminat getrennt und die Schweißungen in der Symmetrieebene durchgeführt. Vor der Infusion wurden die Laminathälften aufeinandergelegt, und zwar dermaßen, dass eine Überdeckung der Schweißstellen gegeben war. Somit wurde eine symmetrische doppelte „Schädigung“ erwirkt, was zur Eindeutigkeit der Ergebnisinterpretation beitragen sollte.

Die Infusion wurde im VARI-Verfahren (Harzsystem HEXCEL RTM6) mit folgenden Parametern durchgeführt:

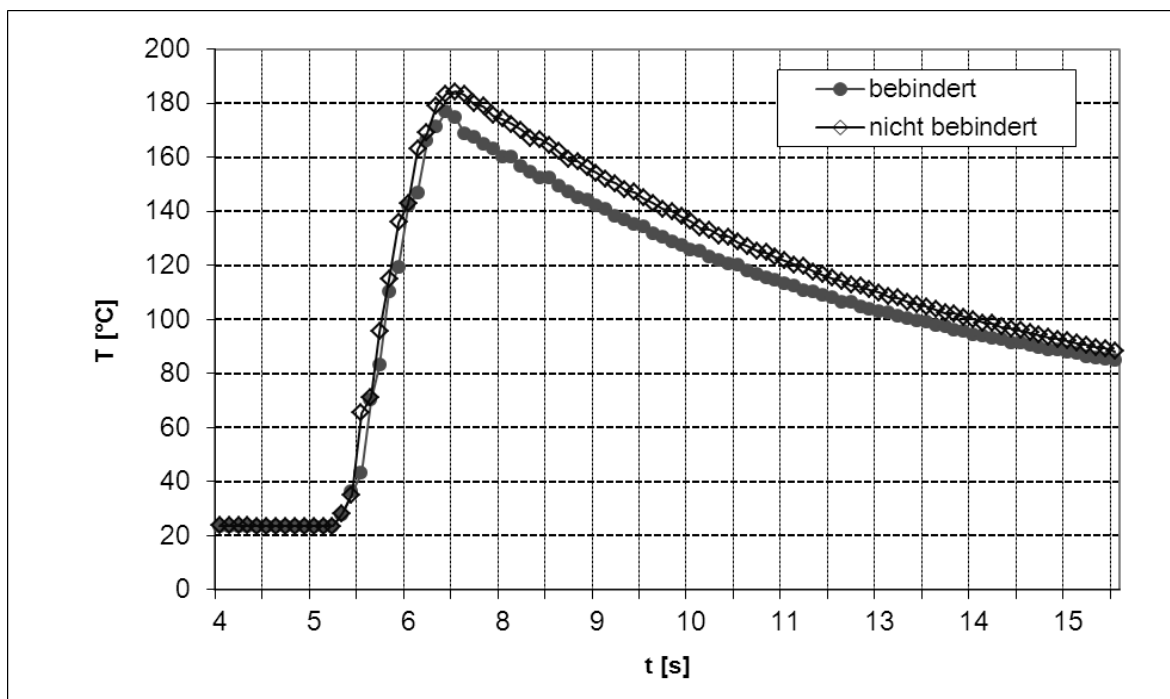
Tabelle 6-4: Infusions- und Härteparameter ILSS-Prüflinge

Lagenaufbau Gelege „ECS6090“	[0/90] _{4S}
Lagenaufbau Gewebe „G926“	[0/90] _{3S}
Schweißparameter	v = 2,2 m/s bzw. t = 2s; A = 16 µm; p = 0,6 MPa
Vakuuminfusion	VARI-Aufbau [69] auf Heizplatte mit Druckplatte
Absolutdruck bei Infusion	< 5 kPa
Prozesstemperaturen (VARI und RTM)	Harztemperatur bei Infusion: 80 °C; Preformtemperatur bei Infusion: 120 °C; Aushärtetemperatur: 180 °C; Aushärtezeit: 2 h

7 Ergebnisse der Prozessstudien

7.1 Energieumwandlung

Wie in Kapitel 3.4.1 erläutert, führen beim Ultraschall-Schweißen von Thermoplasten mehrere Mechanismen zur Konversion der akustischen in thermische Energie. Aufgrund des geringen Polymeranteils (rund 3 %) und des porösen Zustands einer Preform wurde vermutet, dass die Konversion beim Preformschweißen nur auf der äußeren Reibung der Fasern aneinander beruht und die Konversion im Thermoplasten durch innere Reibung aufgrund seiner relativ geringen Menge und Halbzeugform vernachlässigbar ist. Zur Verifikation dieser Hypothese wurden die Temperaturverläufe bei der Schweißung zweier zehnlageriger Laminat (Standardlaminat, Tabelle 6-1) mit und ohne Bindervlies verglichen. Die folgende Abbildung zeigt die Temperaturverläufe.



Laminataufbau:	Schweißung:
„Standardlaminat“: 10 Lagen Carbon-Gelege „ECS6090“ (evtl. gebündert mit 9 Lagen Bindervlies) „PA1541“, nicht vorkompaktiert	Punktschweißung, Parameter: t = 2,5 s, A = 70 %, p = 0,7 MPa

Abbildung 7.1: Vergleich der Aufheizvorgänge im gebünderten und ungebünderten Laminat

Es ergibt sich ein innerhalb der Messgenauigkeit identisches Aufheizverhalten. Die Maximaltemperatur (und entsprechend die Abkühlphase) des Preformlaminats ohne Binder lag auf geringfügig höherem Niveau als jene des mit Binder versehenen Preformlaminats. Dies wurde auf die höhere Wärmekapazität der Binder-Preform zurückgeführt. Da somit keine Umwandlungseffekte nachzuweisen waren, die auf der Viskoelastizität des Thermoplasten beruhen, kann die Hypothese als bestätigt angesehen werden. Der Prozess ist somit unabhängig von der morphologisch determinierten Eignung des Polymers für Ultraschall-Schweißvorgänge einsetzbar.

7.2 Nahtkompaktierung

Dieser Abschnitt beschreibt die Ergebnisse der Kompaktiermessungen während des Preformschweißprozesses und der Restkompaktierung im Laminat nach Infiltration und Aushärtung.

Kompaktierung während der Schweißung

Abbildung 7.2 zeigt den Dickenverlauf eines NCF-Standardlaminats (Tabelle 6-1) während einer Punktschweißung ($t = 2\text{ s}$, $A = 60\%$, $p = 0,6\text{ MPa}$) über die Prozessphasen.

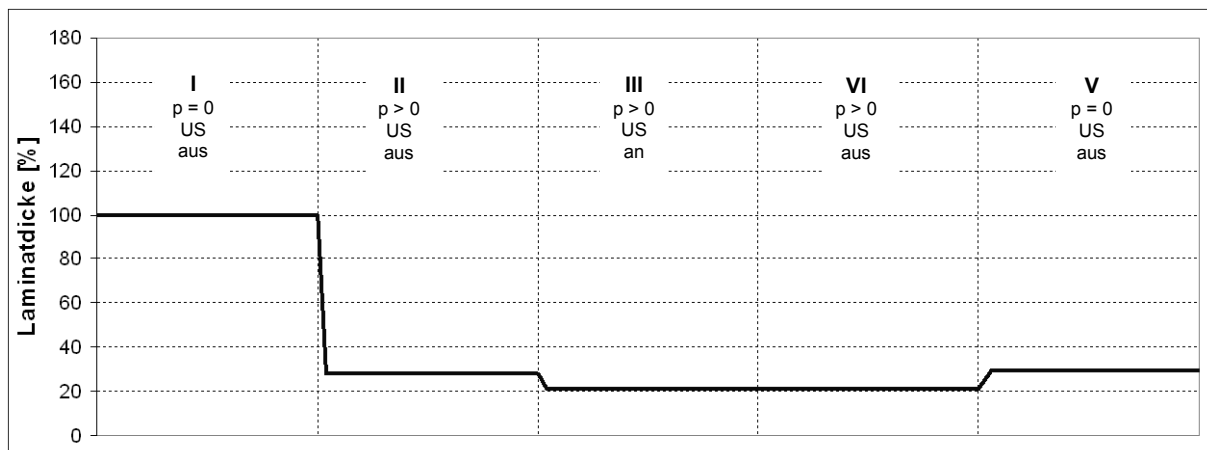


Abbildung 7.2: Veränderung der Dicke eines Standardlaminats während einer Punktschweißung

Ab dem Zeitpunkt der einsetzenden Schwingung (Übergang Phase II zu Phase III) reduzierte sich die Laminatdicke zusätzlich zur Komprimierung durch den Anpressdruck der Sonotrode um weitere 33 %. Dies wurde zum einen auf einen dynamischen Setzmechanismus zurückgeführt, der einsetzt, wenn die Filamente durch die

induzierte Schwingung in Bewegung geraten und sich in einer packungsdichteren Anordnung ablegen. Zum anderen wurde vermutet, dass sich einzelne Fasern im schwingenden Zustand aus der Schweißzone herausbewegen.

Hierauf aufbauend wurde die Abhängigkeit der Kompaktierung bei Schalleinleitung von der Laminatarchitektur untersucht. Es wurden Stempelschweißungen auf vier Konfigurationen appliziert. Die Laminat 2 und 3 bestanden aus rein unidirektionalen Schichten (UD-Band „ECS6082, Tabelle 6-2), wobei bei Laminat 2 die Faserorientierung parallel zum rechteckförmigen Sonotrodenabdruck und bei Laminat 3 senkrecht zum Sonotrodenabdruck ausgerichtet wurde. Bei Konfiguration 1 wurde ein quasiisotropes Laminat aus NCF unter einem Winkel von 45° zur Sonotrode verschweißt (8 Lagen „ECS6090“, Tabelle 6-1). Laminat 4 bestand aus Gewebe, wobei die Sonotrode parallel (respektive 90°) zur Faserorientierung stand. Die Ausrichtungen sind in über Diagramm schematisch (inkl. Sonotrodenabdruck) dargestellt.

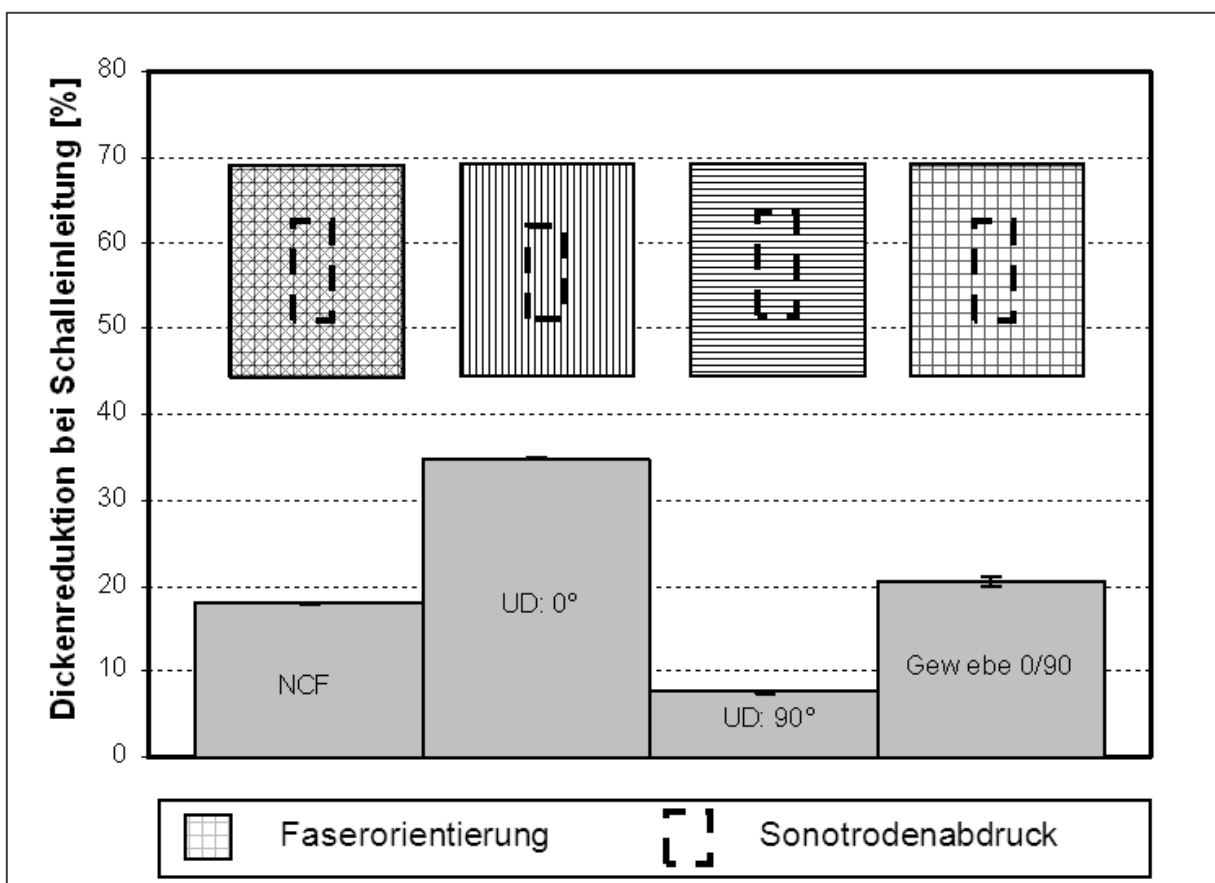


Abbildung 7.3: Dickenreduktion bei Schalleinleitung

Tabelle 7-1: Parameter der Schweißversuche bei der Ermittlung der Laminatdickenreduktion

Laminataufbauten			
NCF: Typ „ECS96090“ [+45°/-45°, 0°/90°] _{2S}	UD 0° :Typ „ECS6082“ [0°] ₈	UD 90°: Typ „ECS6082“ [90°] ₈	Gewebe: „G939“ [0/90] _{5S}
Schweißparameter: Punktschweißung, t = 2 s, A = 65 %, p = 0,6 MPa			

Die Kompaktierung durch bei Schalleinleitung betrug 18 % für die Konfiguration 1, 32 % für die Konfiguration 2, für das unidirektionale Laminat mit Ausrichtung senkrecht zur Sonotrode (Konfiguration 3) 8 % und für das Gewebe 20 %. Die Kompaktiereffekte des Ultraschall-Preformschweißens treten also umso stärker auf, je geringer die Anzahl der Filamente ist, die die Schallbelastung aufnehmen, oder, anders ausgedrückt: Es verstärkt sich der Kompaktiereffekt, je kürzer der Weg für auswandernde Fasern aus der Schweißzone ist. Dieser Weg ist minimal bei Anordnung der langen Kante der Sonotrode parallel zu den Fasern (Konfiguration 2). Konsequenzen aus dieser Messung für die Prozessgestaltung werden in Kapitel 10.2 erläutert.

In einer weiteren Versuchsreihe wurde die Restkompaktierung in der Naht nach der Harzinfusion und Aushärtung für das Standardlaminat untersucht.

7.2.1 Restkompaktierung nach Infusion und Aushärtung

Der Kompaktiergrad in der Ultraschall-Schweißnaht nach Infusion und Aushärtung wurde mittels Lichtmikroskopie ermittelt. Hierbei wurden das Vakuum-Infusionsverfahren und das RTM-Verfahren eingesetzt und miteinander verglichen. Abbildung 7.4 zeigt die Abmaße der Preforms und die Parameter der Schweißnähte.

Material	Carbon-Biaxial-Gelege „ECS6090“, Binder Typ „PA1541“	
Lagenaufbau	[+45/-45; 0/90] _{2S}	
Schweißparameter	$v = 2,2 \text{ m/s}$, $A = 16 \text{ }\mu\text{m}$, $p = 0,6 \text{ MPa}$	
Vakuuminfusion	VARI-Aufbau [69] auf Heizplatte, ohne Druckplatte	
RTM-Infusion	Kavitätshöhe 2,1 mm, Injektions- druck 0,6 MPa	
Prozesstemperaturen (VARI und RTM)	$T_{\text{Harz}} = 80 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_{\text{Kavität}} = 120 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_{\text{Aushärtung}} = 180 \text{ }^\circ\text{C}$	

Abbildung 7.4: Versuchsp Parameter der Untersuchungen der Restkompaktierungen im ausgehärteten Laminat (RTM und VARI)

Die Analyse der Schliiffbilder der VARI-Proben mittels Lichtmikroskopie ergab folgende gemittelte Laminatdicken und Faservolumenanteile:

- $2095 \pm 38 \text{ }\mu\text{m}$ in der Schweißnaht, dies entspricht einem Faservolumenanteil von rund 55 %
- $2210 \pm 43 \text{ }\mu\text{m}$ im unverschweißten Laminat, was einem Faservolumenanteil von rund 52 % entspricht

Hierbei wurden keine signifikanten Unterschiede zwischen den einzelnen Schweißnahtausrichtungen beobachtet. Dies wurde auf die Quasi-Isotropie des Laminats zurückgeführt (in jeder Schweißnaht liegen Faserorientierungen parallel, senkrecht und winklig zur Schweißrichtung vor).

Die lokal überhöhte Kompaktierung in der Schweißnaht ist gleichmäßig über die Laminatdicke verteilt, also in jeder Einzelage messbar. Demnach war kein Auswandern speziell sonotrodennaher Faserlagen feststellbar.

Abbildung 7.5 zeigt ein Schliffbild eines Schnittes durch eine Schweißnaht nach der Infusion mittels VARI-Verfahren; die Ausrichtung der Probe entspricht Position 1 in Abbildung 7.4.

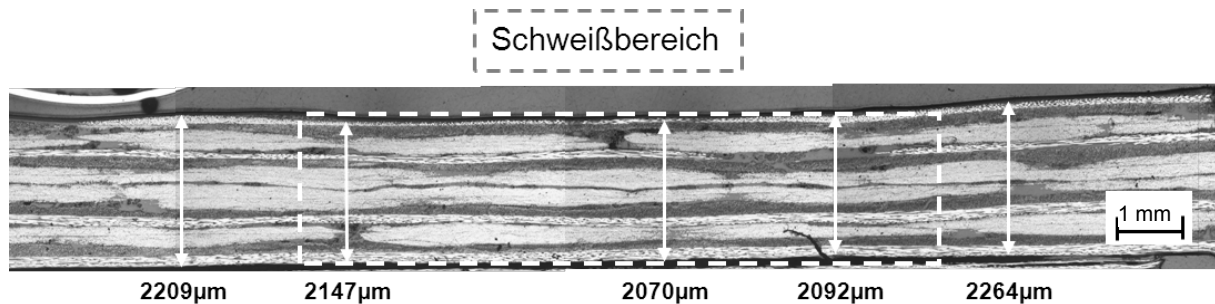


Abbildung 7.5: Schliffbild bei Schnitt quer durch eine Schweißnaht im ausgehärteten Laminat (VARI-Verfahren), Probe 1

Bei der Analyse der Schliffproben des RTM-Laminats konnte keine Restkompaktierung in den Schweißnähten festgestellt werden (s. Abbildung 7.6, Ausrichtung der Probe entspr. Position 4 in Abbildung 7.4.). Das gesamte Lagenpaket wurde durch die feste Kavitätshöhe auf 2,1 mm kompaktiert, was einem Faservolumengehalt von 54,6 % entspricht. Im gesamten Laminat wird also der Kompaktiergrad der Schweißnaht erzeugt.

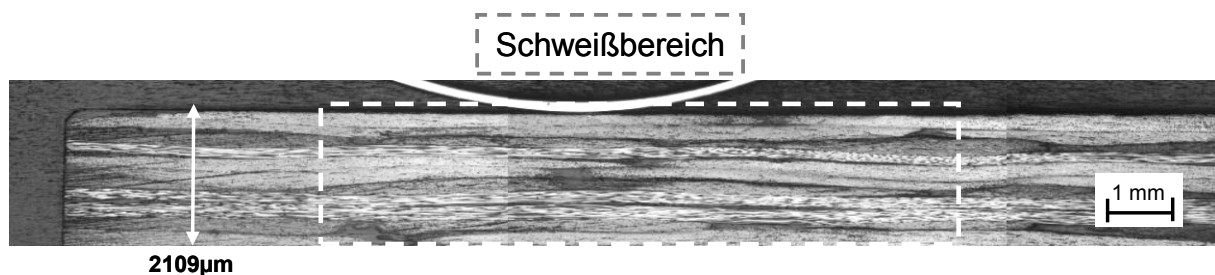


Abbildung 7.6: Schliffbild bei Schnitt durch eine Schweißnaht im ausgehärteten Laminat (RTM-Verfahren), Probe 4

Ergebnis dieser vergleichenden Untersuchungen war somit, dass durch den Ultraschall-Schweißprozess in der Naht ein Faservolumengehalt nach Infusion und Aushärtung von rund 55 % erzeugt wird. Wird dieser Faservolumengehalt (oder ein hö-

herer) während der Harzinfiltration und -aushärtung dargestellt (bspw. geschlossene Kavität im RTM-Verfahren oder Autoklavdrücke), ist nicht mit einem „Nahtabdruck“ im Laminat zu rechnen. Bei Faservolumengehalten unter 55 % nach Infusion ist mit einem Nahtabdruck, also einer lokal überhöhten Kompaktierung durch den Schweißprozess zu rechnen.

7.3 Temperaturentwicklung im Preformlaminat

Die Temperaturprofile, die bei der Verschweißung verschiedener Preform-Materialsysteme gemessen wurden, zeigten einen signifikanten Temperaturabfall in den jeweils äußeren, sonotrodennahen und ambossnahen Lagen („skin effect“). Die Temperaturdifferenz zwischen den kältesten (ambossnah) und den wärmsten (mittennahen) Zwischenlagen wurde durch die fünf Messungen mit 37 % bestimmt. Konsequenzen hieraus sind in Kapitel 8.1 erörtert. Die Temperaturentwicklung jeder einzelnen Zwischenlage über der Zeit ist in Abbildung 7.7 aufgetragen („Lxy“ entspricht hierbei der Binderlage zwischen den Gelegelagen „x“ und „y“).

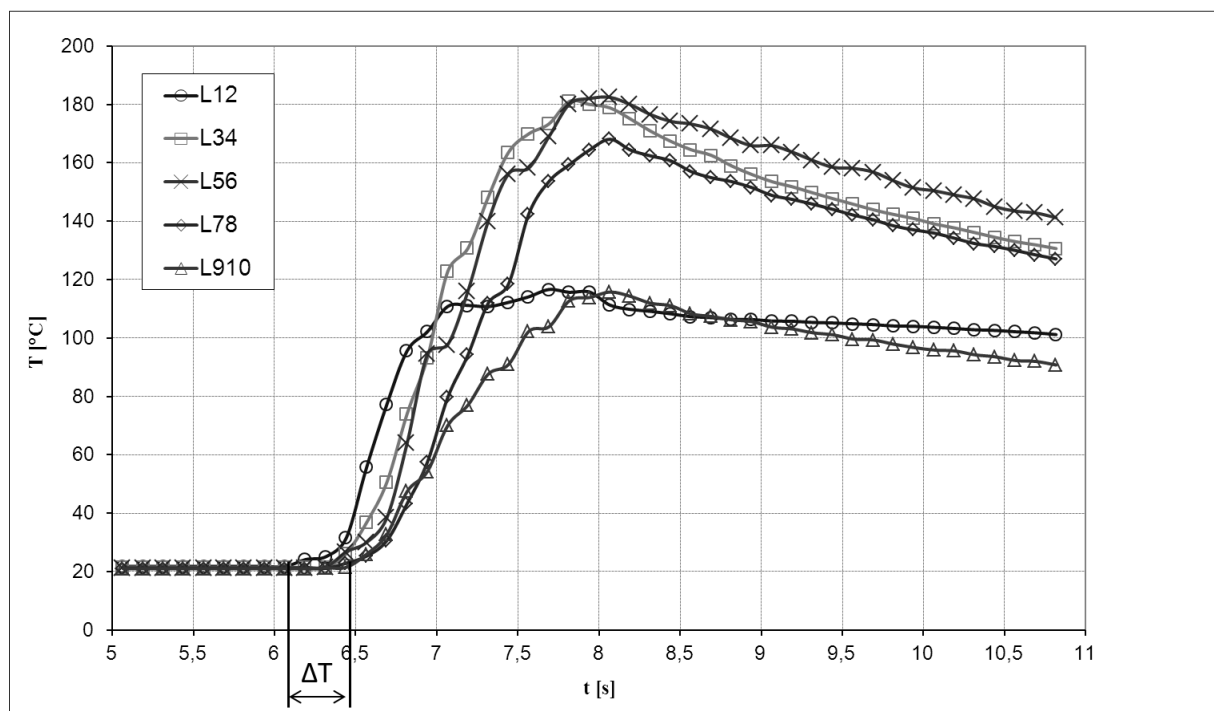


Abbildung 7.7: Temperaturentwicklung der Zwischenlagen im Standardlaminat

Die Erwärmung der unten liegenden Lagen tritt verzögert auf; im oben genannten Fall mit einer Verzögerung von $\Delta T = 0,35$ s. Die Schwingungen werden sukzessive nach erfolgter Kompaktierung der oben liegenden Lagen in die tieferen Lagen gelei-

tet und dort in Wärme umgewandelt. Diese Messung korreliert mit den Messungen des Kompaktiergrades unter der Sonotrode (s. Kap. 0). Hierbei wurde beobachtet, dass die Kompaktierung des Preformlaminats, also der Setzvorgang, ab Schalleinleitung wenige Zehntelsekunden in Anspruch nimmt. Diese „Setzzeit“ führt demnach zur verzögerten Erwärmung der sonotrodenfernen Lagen.

Beim Verschweißen bereits vorkompakterter Lamine (nach bspw. einer Vakuum-Binderaktivierung) kann entsprechend mit einer Steigerung der Vorschubgeschwindigkeit (bzw. Senkung der Schweißzeit) gerechnet werden, da die Setzzeit minimiert wird und der Schall unmittelbar in die sonotrodenfernen Lagen geleitet werden kann. Nicht zuletzt weil eine Echtzeit-Temperaturmessung im vorkompaktierten Laminat schwer darzustellen ist, konnte diese Hypothese im Rahmen dieser Arbeit nicht verifiziert werden.

7.4 Ergebnis der Parameterstudie

Im Rahmen der Parameterstudie wurde neben der Ermittlung eines optimierten Parametersatzes eine Gewichtung der einzelnen Parameter vorgenommen. Darüber hinaus wurde die Gültigkeit der Ultraschall-Leistungsgleichung für den Preformschweißprozess untersucht. Mit dem Ziel einer Online-Qualitätsüberwachung des Prozesses wurde eine Korrelation von messbaren Prozessparametern mit der Schweißnahtfestigkeit hergestellt.

7.4.1 Parametersensitivität

Der optimierte Parametersatz zum kontinuierlichen Verschweißen des unkompaktierten Standardlaminats (Tabelle 6-1) wurde durch Auswertung der Parameterstudien mithilfe statistischer Methoden ermittelt:

- Vorschubgeschwindigkeit $v_{opt} = 2,2$ m/min
- Amplitude $A_{opt} = 17$ μm (65 % von 26 μm)
- Anpressdruck $p_{opt} = 0,68$ MPa

Eine Erhöhung von Anpressdruck und insbesondere der Amplitude bewirkt eine Störung der Faserarchitektur über den gesetzten Grenzwert hinaus. Eine Erhöhung der Vorschubgeschwindigkeit führt zu einer nicht ausreichenden Nahtfestigkeit, da die Sonotrode die Schweißstelle überstreicht, bevor das Preformlaminat sich gesetzt hat

und der Schall in die unteren Lagen eingedrungen ist (s. vorangegangenes Kapitel). Unabhängig von der Faserondulation kann dieser Umstand auch nicht durch eine Erhöhung der Schweißleistung (Druck- oder Amplitudenerhöhung) kompensiert werden. Dies veranschaulicht die folgende schematische Abbildung, die bei der Auswertung der Parameterstudie gewonnen wurde. Es ist der überproportionale Abfall der Nahtfestigkeit bei steigender Vorschubgeschwindigkeit zu sehen. Eine Erhöhung der Anpresskraft hat bei gleichbleibender Amplitude keinen Einfluss auf die Nahtfestigkeit.

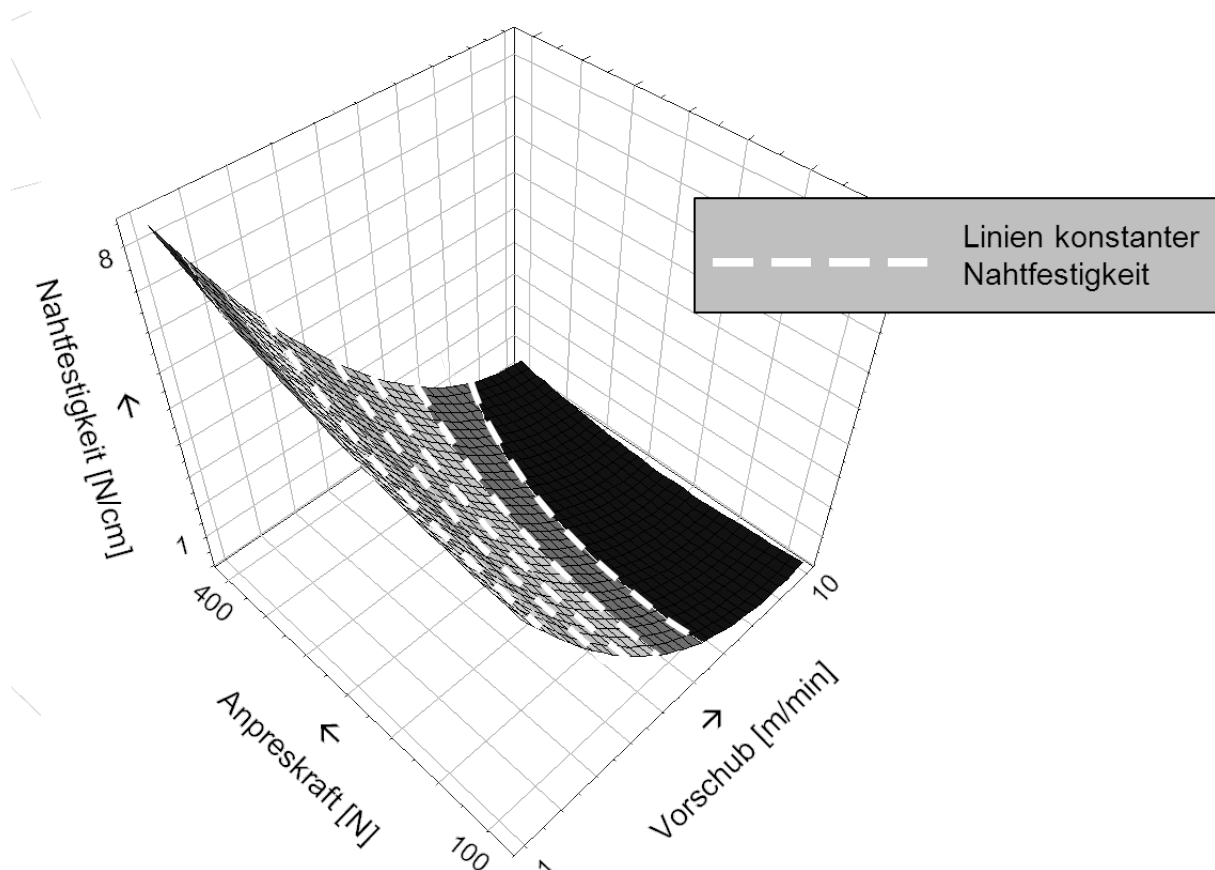


Abbildung 7.8: Nahtfestigkeit über Vorschub und Amplitude

Die zeitverzögerte Schalleinleitung in die sonotrodenfernen Lagen begrenzt somit die Vorschubgeschwindigkeit.

7.4.2 Partielle, qualitative Validierung der Leistungsgleichung

Mit dem Ziel, eine Korrelation zwischen den primären Prozessparametern (A und p) und der ins Laminat eingetragenen Energie aufzuzeigen, wurde zunächst die Abhän-

gigkeit der Generatorleistung P_{USG} von den freien Prozessparametern A und ρ untersucht.

Die Leistung, die ein System aufnimmt, um eine (Ultraschall-)Schwingung der Frequenz f , der Amplitude A in einem Werkstoff der Dichte ρ mit der Schallgeschwindigkeit c zu erzeugen, ist die Schalleistung P_{US} . Sie ist definiert als:

$$P_{US} = (2\pi f)^2 \cdot A^2 \cdot \rho \cdot c, \quad (7.1)$$

Die Frequenz f ist unveränderlich und die Schallgeschwindigkeit c wird als konstant vorausgesetzt. Wie in Kapitel 5.2 nachgewiesen wurde, besteht eine lineare Abhängigkeit der Preformdichte vom Anpressdruck.

Dementsprechend wurde ein linearer Anstieg der Generatorleistung mit dem Anpressdruck der Sonotrode erwartet. Diese Erwartung konnte bestätigt werden, wie in Abbildung 7.9 dargestellt. Es ist die gemessene Generatorleistung über den Anpressdruck bei konstanten Amplituden aufgetragen.

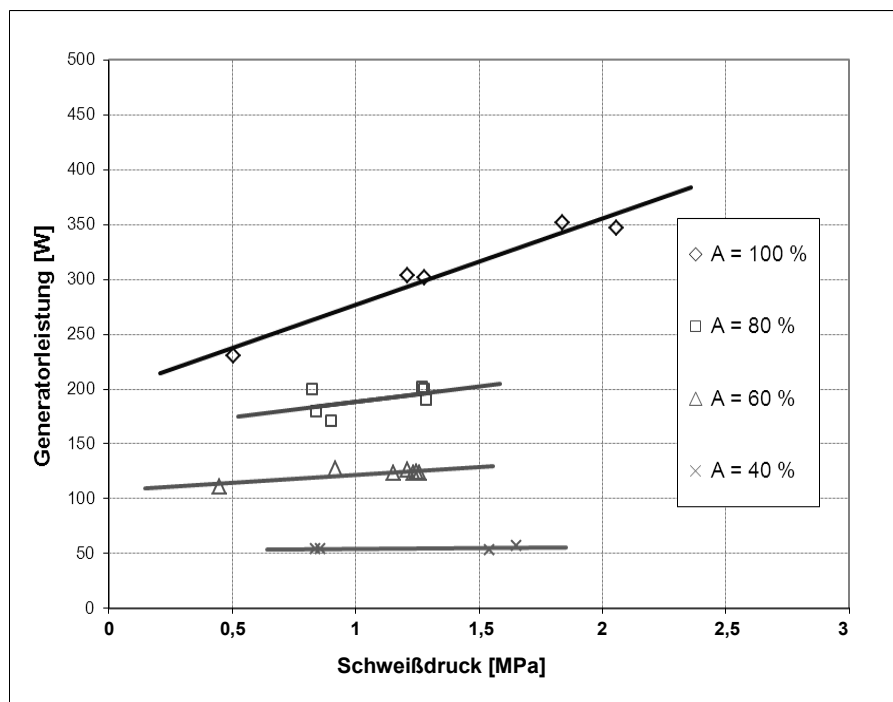


Abbildung 7.9: Generatorleistung über Schweißdruck

Entsprechend Formel 7.1 wurde ein parabelförmiger Anstieg der Leistung über der Amplitude erwartet und konnte ebenfalls mit Messungen bestätigt werden. Abbildung 7.10 zeigt Linien konstanten Anpressdruckes über der Amplitude.

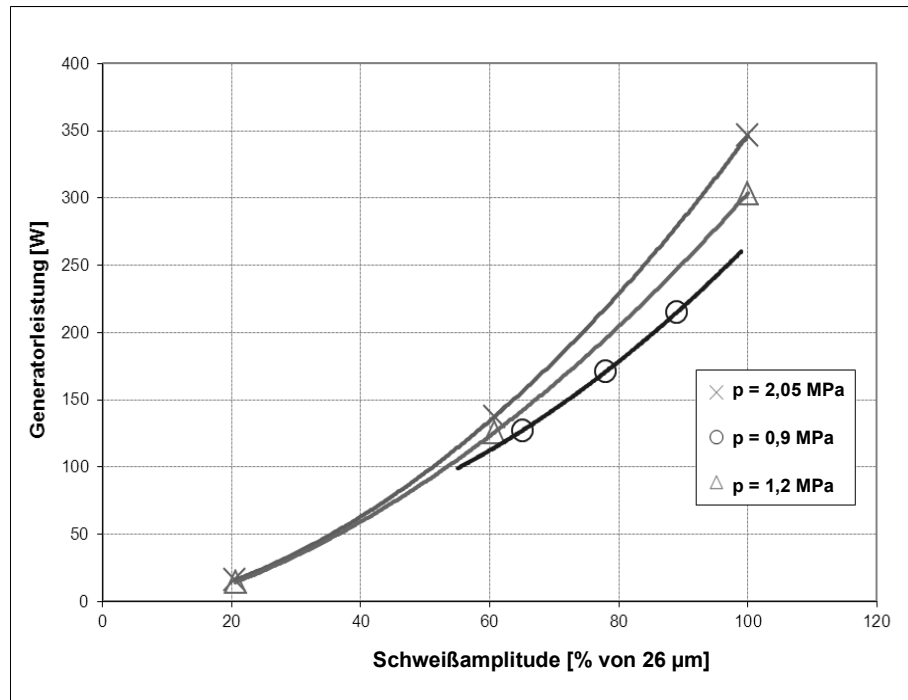


Abbildung 7.10: Generatorleistung über Amplitude

Die Generatorleistung ist also eine Funktion von Anpressdruck und Amplitudenquadrat.

7.4.3 Korrelation von Energieeintrag und Nahtfestigkeit

Mithilfe der Ergebnisse aus Kapitel 5.4 (Formeln 5.9 und 5.14) und Kapitel 6.3.2 wurde eine Korrelation zwischen dem realen (= verlustbehafteten) Energieeintrag und der Schälffestigkeit der Schweißnaht hergestellt. Hierzu wurde die Schälffestigkeit der Proben über dem volumetrischen Energieeintrag aufgetragen (Abbildung 7.11).

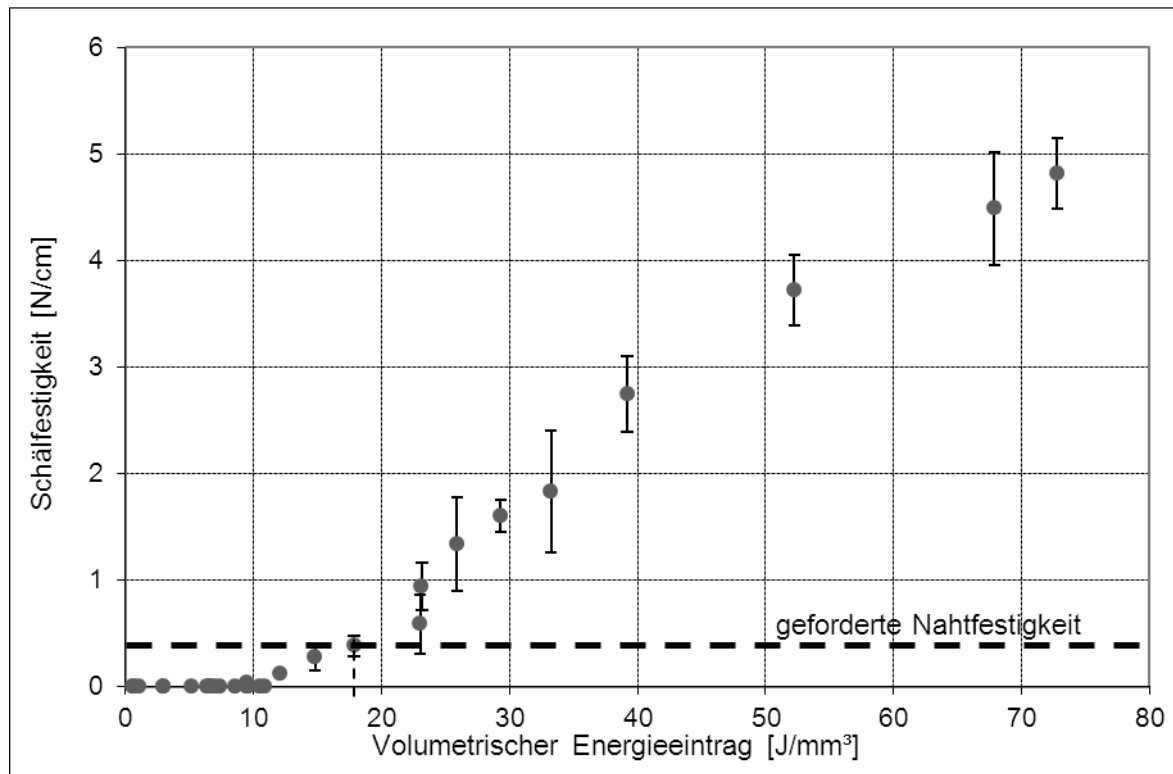


Abbildung 7.11: Schälfestigkeit über volumetrischem Energieeintrag

Die Messwerte wurden innerhalb der Parameterstudien generiert, wobei die Schweißparameter in einem großen Bereich variiert wurden (vgl. Kap 6.4).

Während ein realer Energieeintrag von unter 11 J/mm^3 keine ausreichende Aufschmelzung aller Binderlagen bewirkt, wird schon ab einem Wert von etwa 18 J/mm^3 eine ausreichende Adhäsion im Sinne der Anforderung erzeugt. Die geforderte Schälfestigkeit wurde in Kapitel 6.2.2 mit $0,4 \text{ N/cm}$ bestimmt. Die Nahtfestigkeit lässt sich darüber hinaus durch Erhöhung des Energieeintrags um ca. das 15-fache des geforderten Wertes steigern, was im Falle der vorliegenden Konfiguration allerdings zu starken Schädigungen der Faserarchitektur und zur Degradierung von Nähfäden führen würde.

Mit der Echtzeitermittlung des volumetrischen Energieeintrags über die Messung von Generatorleistung und Vorschubgeschwindigkeit wurde somit eine Möglichkeit aufgezeigt, die Nahtfestigkeit abzusichern. Hierzu ist das Generatorleistungssignal beim Schweißvorgang entweder zu überwachen oder kann sogar als Regelgröße verwendet werden. Zusammen mit einer optischen Auswertung möglicher Ondulationen in der Schweißnaht und entsprechender Protokollierung ist somit ein Qualitätssiche-

rungsverfahren für den Prozess darstellbar. Dieser Ansatz wurde bei der Umsetzung des Endeffektors aufgegriffen und umgesetzt (Kapitel 9).

7.5 Interlaminare Scherfestigkeit

Bei der Auswertung der mechanischen Versuche nach Kapitel 6.5 konnte kein Einfluss des Schweißprozesses auf die interlaminare Scherfestigkeit festgestellt werden. Alle Werte lagen innerhalb der Toleranzen des Referenzprozesses (Abbildung 7.12).

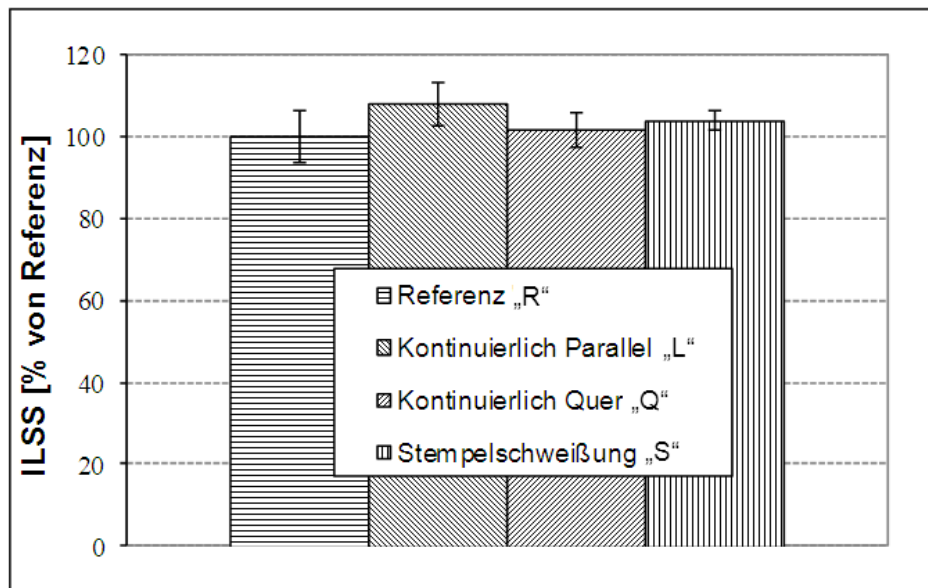


Abbildung 7.12: Interlaminare Scherfestigkeiten von Laminaten aus ultraschallgeschweißten Preforms

Um eventuelle Schäden an der Schichte der Fasern festzustellen, wurden zudem beschallte Fasern im Rasterelektronenmikroskop untersucht. Hierbei wurde, um einen Schädigungseffekt zu provozieren, bis zu 5 Sekunden bei hoher Amplitude (80 %) beschallt. Es konnte keine Schädigung der Faseroberfläche festgestellt werden (Abbildung 7.13).

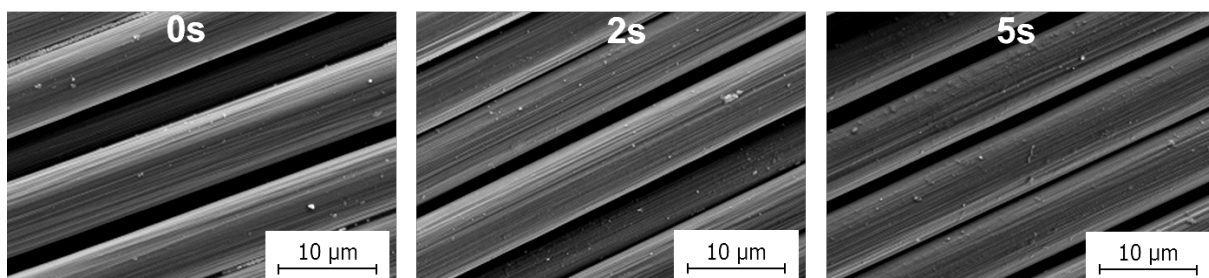


Abbildung 7.13: REM-Aufnahmen von Fasern nach Beschallungsdauer (7500-fache Vergrößerung)

7.6 Zusammenfassung und Diskussion

Es wurde kein Unterschied im Aufheizverhalten von bebinderten und unbinderten Preforms gemessen. Daraus wird gefolgert, dass der Mechanismus der Energieumwandlung auf äußerer Reibung der Fasern beruht und somit keine Abhängigkeit des Prozesses von der morphologischen Beschaffenheit des Binderpolymers besteht. Dies eröffnet dem Prozess maximale Freiheitsgrade bezüglich des verarbeitbaren Materialspektrums – auch im Hinblick auf die zukünftige Integration funktionaler Hilfsstoffe auf Preformebene bspw. zur lokalen Zähmodifikation des Harzes.

In der Schweißnaht wurde eine Abhängigkeit des Kompaktiergrades von der Ausrichtung der Sonotrode zur Faserorientierung gemessen. Hierbei kann generell gesagt werden, dass der Kompaktiergrad steigt mit sinkender Anzahl an Fasern, welche die Schallbelastung aufnehmen. Während Infusion und Aushärtung relaxiert das lokal kompaktierte (Standard-)Laminat auf etwa 55 % FVG. Wird dieser Wert während des Infusions- und Aushärteprozesses auch im umliegenden Laminat erreicht bzw. überschritten, ist mit keinem lokalen Resteindruck in der Schweißnaht zu rechnen. Die Messung der Temperaturentwicklung in den einzelnen Zwischenlagen ergab eine Ausbreitung der Erwärmung von der Schalleinleitungsfläche durch die Laminatdicke. Sonotrodenferne Lagen heizen entsprechend zeitverzögert auf. Dies determiniert die minimal notwendige Schweißzeit bzw. die maximal mögliche Vorschubgeschwindigkeit.

Ein bebindertes Preformlaminat aus NCF mit einem Flächengewicht von 2500 g/m² kann mit einer Schweißgeschwindigkeit von 2,2 m/min bei einer Amplitude von 17 µm und einem Schweißdruck von 0,68 MPa verschweißt werden. Für geringere Flächengewichte ist insbesondere die Amplitude zu erniedrigen, für höhere Flächengewichte ist die Vorschubgeschwindigkeit zu verringern. Da die verzögerte Schalleinleitung auf einem Setzmechanismus im Preformlaminat beruht, ist zu erwarten, dass sich bereits vorkompaktierte Lamine mit höherer Geschwindigkeit verschweißen lassen.

Die sich aus grundlegenden Zusammenhängen ergebende lineare bzw. überproportionale Abhängigkeit der Schalleistung von Schalldruck respektive -amplitude konnte empirisch validiert werden. Es wurde eine Abhängigkeit der Nahtfestigkeit von der volumetrisch eingeleiteten Energiemenge festgestellt. Diese Energiemenge kann aus

dem Generatorleistungssignal in situ bestimmt werden. Somit wurde ein Weg aufgezeigt, die Schweißnahtfestigkeit mittels Parameterüberwachung abzusichern. Für das Standardlaminat ist ein volumenbezogener Energieeintrag von 16 J/mm^3 notwendig, um eine ausreichende Nahtfestigkeit im Sinne der Anforderung zu erreichen. Messungen der interlaminaren Scherfestigkeit von Laminaten nach unterschiedlichen Schweißvorgängen lieferten keinen Hinweis auf einen negativen Einfluss des Schweißprozesses. Ebenso legte die rasterelektronische Analyse von beschallten Fasern keine Schädigungen offen. Dies wird als wichtiger Indikator für eine Unversehrtheit der Faserschichte trotz der mechanischen Reibung gewertet.

8 Wärmeflussmodell

8.1 Motivation

Ziel der Entwicklung eines einfachen Wärmeflussmodells war die Prädiktion insbesondere der Maximaltemperaturen im Laminat bzw. in den Randlagen bei gegebenen (und ggf. zu modifizierenden) Schweiß- und Werkzeugparametern. Hintergrund war die mögliche Abschätzung, ob kritische Temperaturen im Laminatinneren überschritten werden, die zur Aufschmelzung der Wirkfäden oder zur Schlichteschädigung führen können. Ebenso muss die zum Aufschmelzen des Binders benötigte Temperatur in allen relevanten Zwischenlagen sichergestellt werden (siehe auch Untersuchungen zum Temperaturprofil in Kapitel 7.3)

8.2 Berechnungsschritte

8.2.1 Stoffwerte

Es ist m_{LVE} die Masse der Laminatvolumeneinheit LVE (Definition der LVE siehe Abbildung 5.3, S. 40). Die Masse der LVE wird aus den Massen von Faser $m_{F,LVE}$, Binder $m_{B,LVE}$ und Luft $m_{L,LVE}$ bemessen, wobei die Luftmasse aus dem Faservolumenanteil der Preform φ errechnet wurde).

$$m_{LVE} = m_{F,LVE} + m_{B,LVE} + (1-\varphi) \cdot V_{LVE} \cdot \rho_{Luft} \quad (8.1)$$

Entsprechend dem Faservolumenanteil wurde die Dichte des Laminats unter Druckbeaufschlagung durch die Sonotrode, ρ_{LVE} , errechnet.

Die spezifische Wärmekapazität der LVE, $c_{p,LVE}$, wird anhand des Verhältnisses der Einzelmassen der m_{LVE} und ihrer spezifischen Wärmekapazitäten berechnet.

$$c_{p,LVE} = \frac{m_{F,LVE}}{m_{LVE}} c_{p,F} + \frac{m_{B,LVE}}{m_{LVE}} c_{p,B} + \frac{m_{Luft,LVE}}{m_{LVE}} c_{p,Luft} \quad (8.2)$$

Die Wärmeleitfähigkeit des Preformlaminats in z-Richtung, λ_z , wurde einer Studie zur effektiven Wärmeleitung von trockenen Faserhalbzeugen von Yamashita et al. entnommen [70]. Hierin wurden Wärmeleitfähigkeiten von Fasern unterschiedlicher Grundstoffe (Aramid, Glas, Carbon) und deren Gewebe modelliert und gemessen.

Bei dem in [70] untersuchten Carbonfasergewebe handelte es sich um eine Leinwandbindung aus Rovings der Faser TORAY T-300. Es wurde ein Wert von

$$\lambda_z = 0,074 \frac{W}{m \cdot K}$$

gemessen. Dieser wurde im Rahmen dieser Arbeit verwendet.

8.2.2 Phasenweise Berechnung

Der Heizprozess wurde in zwei Abschnitte unterteilt: Aufheizphase und Randkühlphase. Während der Aufheizphase erwärmt sich das Laminat gleichmäßig und homogen, es entsteht ein Temperatursprung zwischen Sonotrode und Laminat (bzw. Laminat und Amboss). Das Temperaturprofil bildet sich erst in der Randkühlphase aus (Abbildung 8.1)

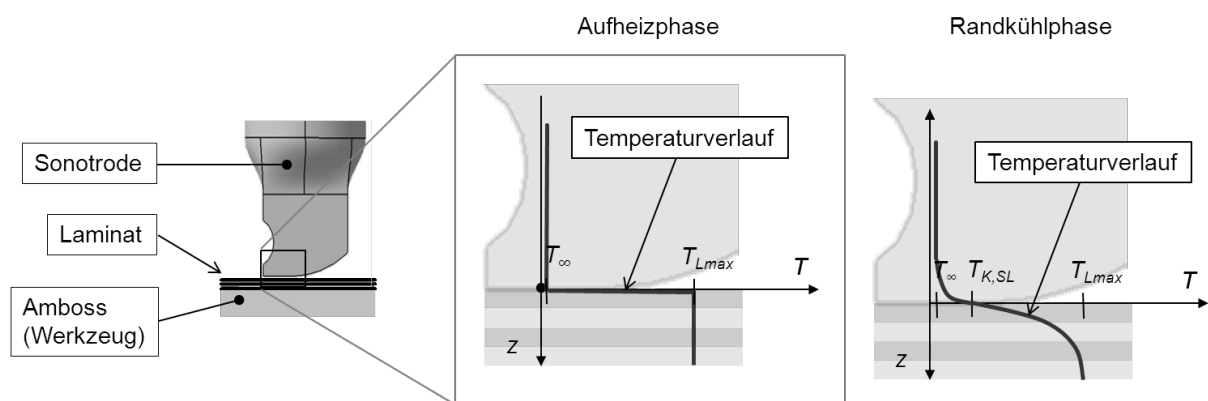


Abbildung 8.1: Phasen der Modellberechnung (Skizze)

1. Phase: Aufheizphase

Die Laminate volumeneinheit LVE wird während der Aufheizphase als adiabat mit innerer Wärmequelle betrachtet. Während dieser Phase wird in der gesamten LVE die Laminate maximaltemperatur T_{Lmax} erreicht.

Die Energie zum Aufheizen einer Masse m mit der spezifischen Wärmekapazität c_p um die Temperatur ΔT , E_{th} , ist definiert als

$$E_{th} = m \cdot c_p \cdot \Delta T \quad (8.3)$$

E_{th} entspricht der Energiezufuhr durch die wirkungsgradbehaftete Generatorleistung in der Zeit t_H .

Sie wird entsprechend folgender Formel berechnet:

$$E_{th} = t_H \cdot P_{USG} \cdot \eta_{USS}, \quad (8.4)$$

wobei der Wirkungsgrad $\eta_{USS} = 0,305$ ist (s. Kap. 5.4).

Die Laminatvolumeneinheit LVE heizt demnach von Raumtemperatur T_∞ in der Heizzeit t_H bei der Generatorleistung P_{USG} auf die Laminatmaximaltemperatur T_{Lmax} entsprechend folgender Formel auf:

$$t_H \cdot P_{USG} \cdot \eta_{USS} = m_{LVE} \cdot c_{p,LVE} \cdot (T_{Lmax} - T_\infty) \quad (8.5)$$

Aufgelöst nach T_{Lmax} ergibt sich folgende Formel:

$$T_{Lmax} = T_\infty + \frac{t_H \cdot P_{USG} \cdot \eta_{USS}}{m_{LVE} \cdot c_{p,LVE}} \quad (8.6)$$

2. Phase: Wärmeaustausch mit Sonotrode und Amboss

Der Wärmeaustausch des Laminats in z-Richtung mit Sonotrode und Amboss wird berechnet, indem das Laminat theoretisch in Dickenmitte ($z = d_L/2$) getrennt wird und zwei Systeme gesondert betrachtet werden („System S“: Sonotrode und obere Hälfte des Laminats; „System A“: Untere Hälfte des Laminats und Amboss, s. Abbildung 8.2).

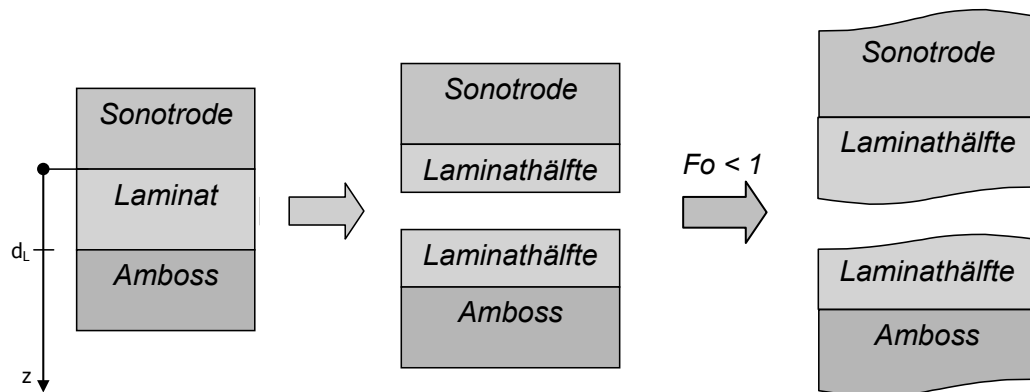


Abbildung 8.2: Aufteilung der LVE in zwei Systeme

Jedes System besteht also aus zwei Körpern, welche als halbusendlich angesehen werden können. Damit diese Vereinfachung zulässig ist, muss gewährleistet sein, dass sich das Temperaturprofil jeweils unbeeinflusst in z -Richtung ausbilden kann, ausgehend von $z = 0$ (System S) bzw. $z = d$ (System A). Die formale Bedingung ist eine Fourier-Zahl kleiner 1 [71]. Die Fourier-Zahl wird nach folgender Formel berechnet [72]:

$$Fo = \frac{\lambda_z \cdot t_K}{\rho \cdot c_p \cdot l^2} \quad (8.7)$$

λ_z ist hierbei die Wärmeleitfähigkeit der Preform (8.2.1), ρ und c_p sind Dichte und spezifische Wärmekapazität, t_K die Kontaktzeit (s. folgende Formel 8.8) und l die halbe Laminatdicke (gemessen). Für das Standardlaminat (Tabelle 6-1) ergibt sich $Fo = 0,154$, womit die oben genannte Bedingung erfüllt ist.

Es kann somit von jeweils zwei halbusendlichen Körpern ausgegangen werden (System S: Sonotrode-Laminat, System A: Laminat-Amboss). Damit setzt sich das Temperaturprofil aus unabhängig voneinander zu betrachtenden „Halbprofilen“ zusammen; deren Ermittlung wird im Folgenden erläutert.

Halbprofil Sonotrode-Laminat

Das erwärmte Laminat (Temperatur T_{Lmax}) wird mit der Sonotrode (Temperatur T_∞) in Kontakt gebracht. Die Kontaktzeit t_k beträgt ein Fünftel der Schweißzeit t_S .

$$t_K = 0,2 \cdot t_S \quad (8.8)$$

Zunächst wird die Kontakttemperatur T_K berechnet. Diese ist unabhängig von der Kontaktzeit t_K und stellt sich unmittelbar nach Kontakt der beiden Körper ein. T_K wird nach folgender Formel berechnet in Anlehnung an [72] (Index „L“ für Laminat und „S“ für Sonotrode):

$$T_{K,SL} = T_S \frac{b_S}{b_S + b_L} + T_{L\max} \frac{b_L}{b_S + b_L} \quad (8.9)$$

Die Wärmeeindringfähigkeit b ist hierbei definiert als

$$b = \sqrt{\lambda_z \rho c} \quad (8.10)$$

mit der Wärmeleitfähigkeit λ_z , der Dichte ρ und der Schallgeschwindigkeit c .

Das Temperaturprofil der beiden halburendlichen Körper lässt sich dann mithilfe der Gauss'schen Fehlerfunktion („Error function“ *erf*) bzw. der Biot-Zahl θ berechnen [73].

Es gilt:

$$\theta(\eta_A) = \text{erf}(\eta_A) \quad (8.11)$$

wobei die Ähnlichkeitsvariable η_A definiert ist als:

$$\eta_A = \frac{z}{2\sqrt{\lambda_z \cdot t_K}} \quad (8.12)$$

mit der Laminattiefe z ($z = 0$ in der Kontaktfläche) und der Wärmeleitfähigkeit λ_z .

θ ist ein Quotient aus den relevanten Temperaturdifferenzen [73].

$$\theta(z) = \frac{T(z) - T_{K,SL}}{T_\infty - T_{K,SL}} \quad (8.13)$$

$T(z)$ ist hierbei die gesuchte Temperatur in einer Laminattiefe z . Sie ist abhängig von der Kontaktzeit t_K .

Auflösen nach $T(z)$ ergibt:

$$T(z) = \operatorname{erf}\left(\frac{z}{2\sqrt{\lambda_z t_K}}\right) \cdot (T_{L_{\max}} - T_{K,SL}) + T_{K,SL} \quad (8.14)$$

Durch Erzeugung von Stützpunkten mithilfe dieser Formel ergibt sich der Temperaturverlauf in Abhängigkeit von der Laminatdicke z mit einer Gültigkeit von $0 \leq z \leq d_L/2$.

Die Berechnung des Halbprofils Laminat-Amboss erfolgt analog.

Im folgenden Kapitel ist der Abgleich von vier gemessenen Temperaturprofilen mit berechneten Profilen beschrieben.

8.3 Validierung

Die Validierung des Modells erfolgte anhand der Vermessung von vier Schweißkonfigurationen entsprechend Abbildung 8.3. Es handelt sich hierbei um das „Standardlaminat“, bestehend aus 10 Lagen des Carbon-NCF mit Polyamidvlies, derselben Materialpaarung mit 16 Lagen, einem Glas-biaxial-NCF aus 11 Lagen mit dem Vlies und einem Carbon-Gewebe. Die Materialien sind in Kapitel 6.1 benannt und beschrieben.





Halbzeug (Darstellung im Diagramm)	Laminataufbau	Stoffgrößen	Schweißparameter
ECS6090 & PA1541 Symbol: 	10 Lagen, symmetrisch	$m_{LVE} = 0,4256 \text{ g}$ $\rho = 1,33 \text{ g*cm}^{-1}$ $c_p = 0,78$ $\lambda_L = 0,1 \text{ W*m}^{-1}\text{*K}^{-1}$	$t_s = 1,5$ $A = 60 \%$ $F = 113 \text{ N}$
ECS6090 & PA1541 Symbol: 	16 Lagen, symmetrisch	$m_{LVE} = 0,681 \text{ g}$ $\rho = 1,33 \text{ g*cm}^{-1}$ $c_p = 0,78$ $\lambda_L = 0,1 \text{ W*m}^{-1}\text{*K}^{-1}$	$t_s = 2,5 \text{ s}$ $A = 75 \%$ $F = 163 \text{ N}$ $\rightarrow P = 252 \text{ W}$
SBiAx & PA1541 Symbol: 	11 Lagen, symmetrisch	$m_{LVE} = 0,524 \text{ g}$ $\rho = 1,47 \text{ g*cm}^{-1}$ $c_p = 0,66$ $\lambda_L = 0,06 \text{ W * m}^{-1}\text{*K}^{-1}$	$t_s = 2,5 \text{ s}$ $A = 60 \%$ $F = 120 \text{ N}$ $\rightarrow P = 143 \text{ W t}$
G939 & PA1541 Symbol: 	10 Lagen, symmetrisch	$m_{LVE} = 0,369 \text{ g}$ $\rho_C = 1,25 \text{ g*cm}^{-1}$ $c_p = 0,78$ $\lambda_L = 0,1 \text{ W * m}^{-1}\text{*K}^{-1}$	$t_s = 2,5 \text{ s}$ $A = 60 \%$ $F = 107 \text{ N}$ $\rightarrow P = 105 \text{ W}$

Abbildung 8.3: Vermessene Laminatkonfigurationen zur Validierung des Wärmeflussmodells

Die vermessenen Temperaturprofile wurden mit den nach Kapitel 8.2 berechneten Profilen verglichen. Im Folgenden sind die Profile für jede Schweißkonfiguration gegenübergestellt.

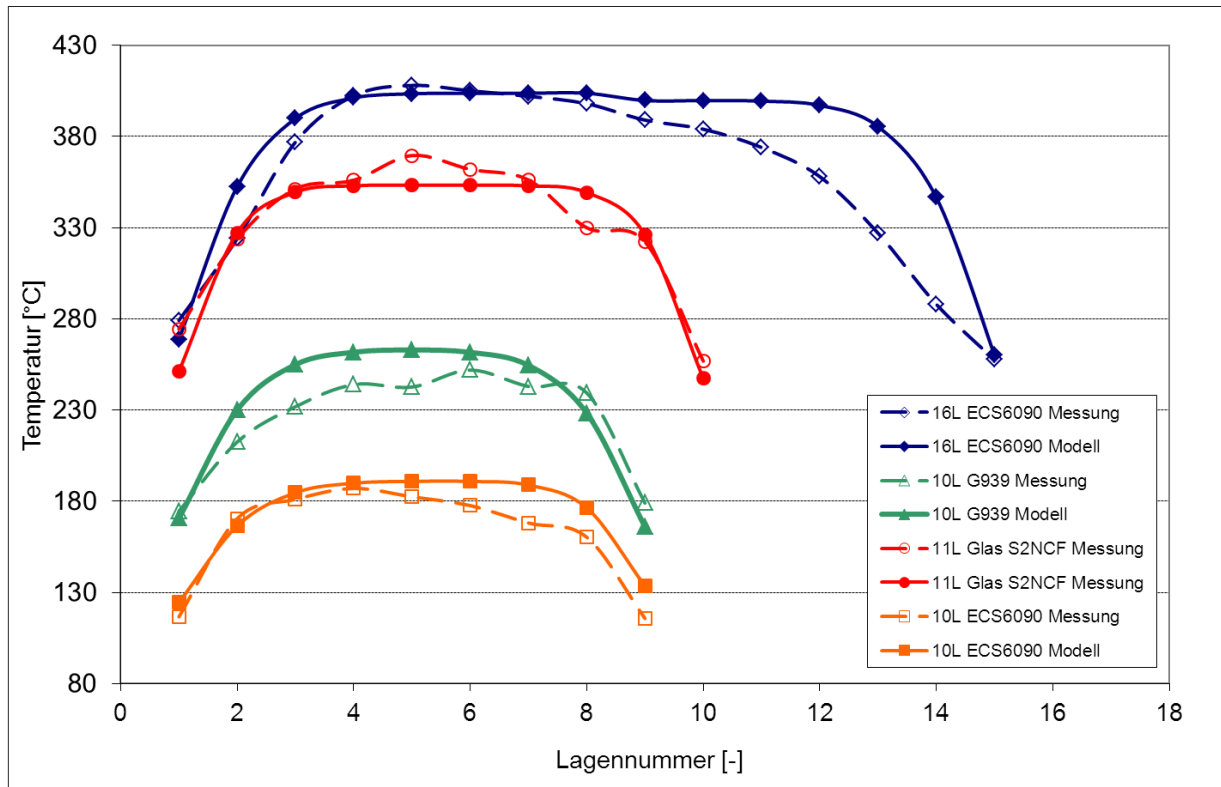


Abbildung 8.4: Vergleich gemessener und modellierter Temperaturprofile

Die Temperaturprofile wurden durch Messungen in jeder Zwischenlage erstellt (s. 4.2.2); an den entsprechenden Punkten wurden die Stützpunkte des modellierten Profils errechnet. Ein Vergleich zwischen je zwei Stützpunkten (modelliert und gemessen in der selben Zwischenlage) ergab eine durchschnittliche Abweichung von 15,6 °C. Beim Vergleich der Randlagenstützpunkte, welche für eine Abschätzung des Skin-Effekts relevant sind, ergab sich eine durchschnittliche Abweichung von 15,8 °C. Die Stützpunkte der Messung im Innern des Laminats, wo kein Einfluss des Skin-Effekts messbar war und die Laminatmaximaltemperatur vorliegt, wichen im Mittel um 12,5 °C vom Modell ab.

8.4 Beurteilung und Anwendung

Die Genauigkeit des Modells ist vor anwendungsnahem Hintergrund zu beurteilen.

Bei einer Binderaktivierung im Preformmontageprozess handelt es sich nicht um einen strukturellen Fügevorgang. Der thermische Prozess der Binderaktivierung ist nicht zuletzt deshalb weitaus unkritischer bezüglich Prozessparametern und Polymerzustand, als der Aushärteprozess eines duroplastischen Systems oder die strukturelle Fügung thermoplastischer Komponenten. Entsprechend sind die erlaubten Prozessfenster größer. Für einen thermoplastischen Binder wie das verwendete Copolyamid ist eine Erwärmung über den Erweichungspunkt von 92 °C notwendig, thermisch bedingte Schädigungen sind nicht unter 150 °C zu erwarten.

Für den duroplastischen Binder der verwendeten Halbzeug „G0926“ und „G1157“ der Firma HEXCEL ist ein Temperaturfenster von 30 °C vorgeschrieben (105 ± 15 °C).

Für eine „Offline“-Bestimmung der Schweißparameter kann die Genauigkeit des Modells somit als ausreichend bezeichnet werden. Die Nutzung des Modells kann Parameterversuche bzw. Versuchsiterationen ersparen. Im Zuge einer bauteilbezogenen Qualifizierung sollte das Temperaturprofil jedoch messtechnisch validiert werden.

9 Endeffektor

Im folgenden Kapitel ist die Anwendung der gewonnenen Erkenntnisse bei der Umsetzung einer robotergestützten Schweißeinheit und der Fertigung eines Demonstrators beschrieben. Die Prozesse zur Konstruktion, Integration und Validierung des Endeffektors werden jedoch nicht in Ausführlichkeit beschrieben, da es sich hierbei nicht um den Fokus dieser Arbeit handelt.

9.1 Spezifikation

Die Spezifikation des Endeffektors basiert auf einem Fertigungsszenario für eine generische Flugzeug-Passagiertür sowie spezifischer Aspekte aus dem Preforming-Prozess für einen Helikopter-Spant. Die Anforderungen lassen sich prinzipiell in vier Bereiche einteilen [74]:

- Verarbeitbare Materialien und Lagenaufbauten
- Bearbeitbare Bauteilgeometrien und Zugänglichkeitsanforderungen
- Gewährleistung eines stabilen, reproduzierbaren und protokollierten Schweißablaufs mit Überwachung der qualitätsrelevanten Parameter
- Anforderungen zur Wirtschaftlichkeit des Anlagenbetriebes

Zur Detaildefinition der Funktionalitäten des Endeffektors wurden beide Schweißmodi (kontinuierlich und Stempelschweißung) in Petri-Diagrammen dargestellt [75]. (Abbildung 9.1).

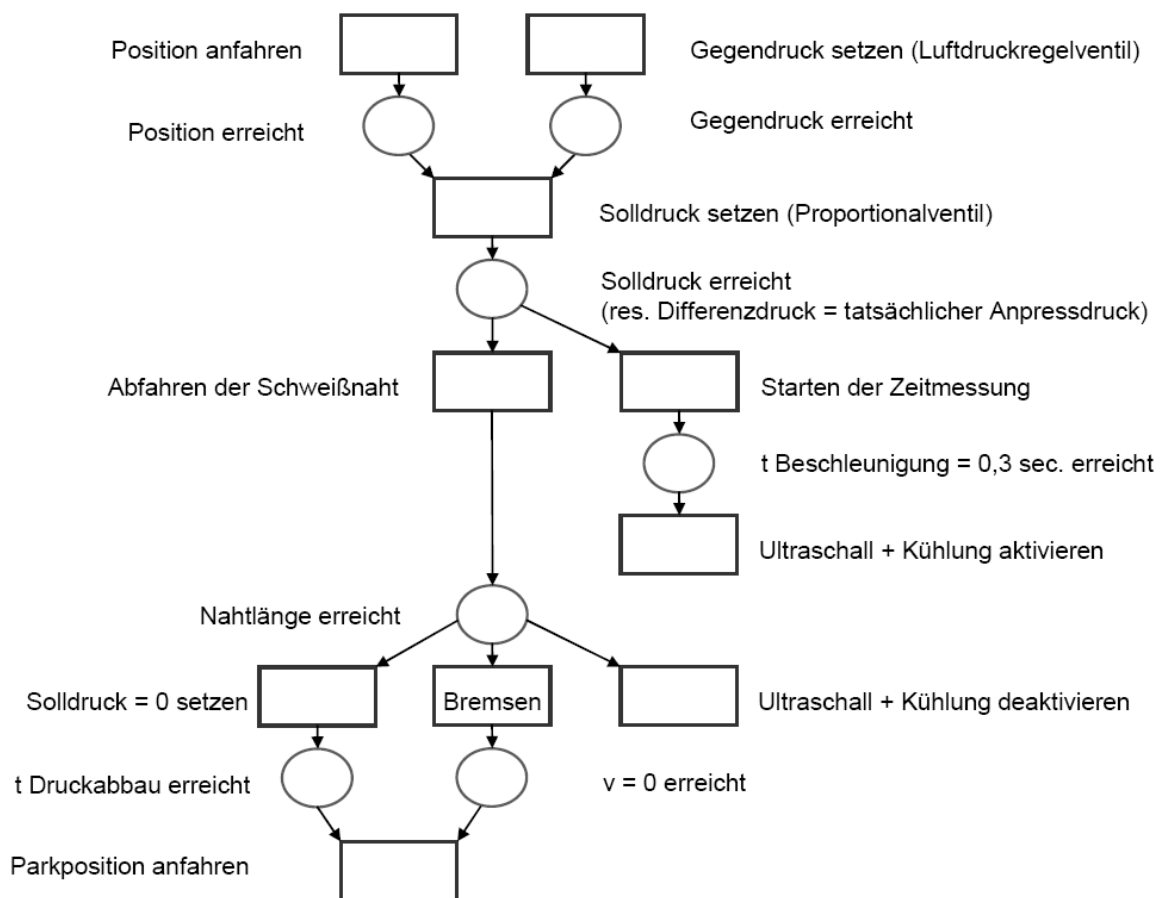


Abbildung 9.1: Petri-Diagramm kontinuierliche Schweißung

Die einzelnen Funktionen und die Gewährleistung der Funktionssequenz konnten somit extrahiert werden und fanden entsprechend Eingang in das Lastenheft.

Auf dieser Basis wurde ein systematischer Konstruktionsprozess durchgeführt.

9.2 Konstruktive Ausführung

Es wurden Funktionskonzepte erstellt, bewertet und Komponenten ausgewählt. Das Design wurde überschlägig berechnet und optimiert. Es wurde ein QS-Konzept entwickelt, das eine Parameterüberwachung im Roboterprogramm einschließt. Nach einem finalen Design Review und der Fertigungsphase wurde der Endeffektor montiert, abgenommen und in Validierungsbetrieb genommen. Die Schwingereinheit aus dem Versuchsstand konnte übernommen werden.

Abbildung 9.2 zeigt das CAD-Modell des Endeffektors ohne Verkabelung.

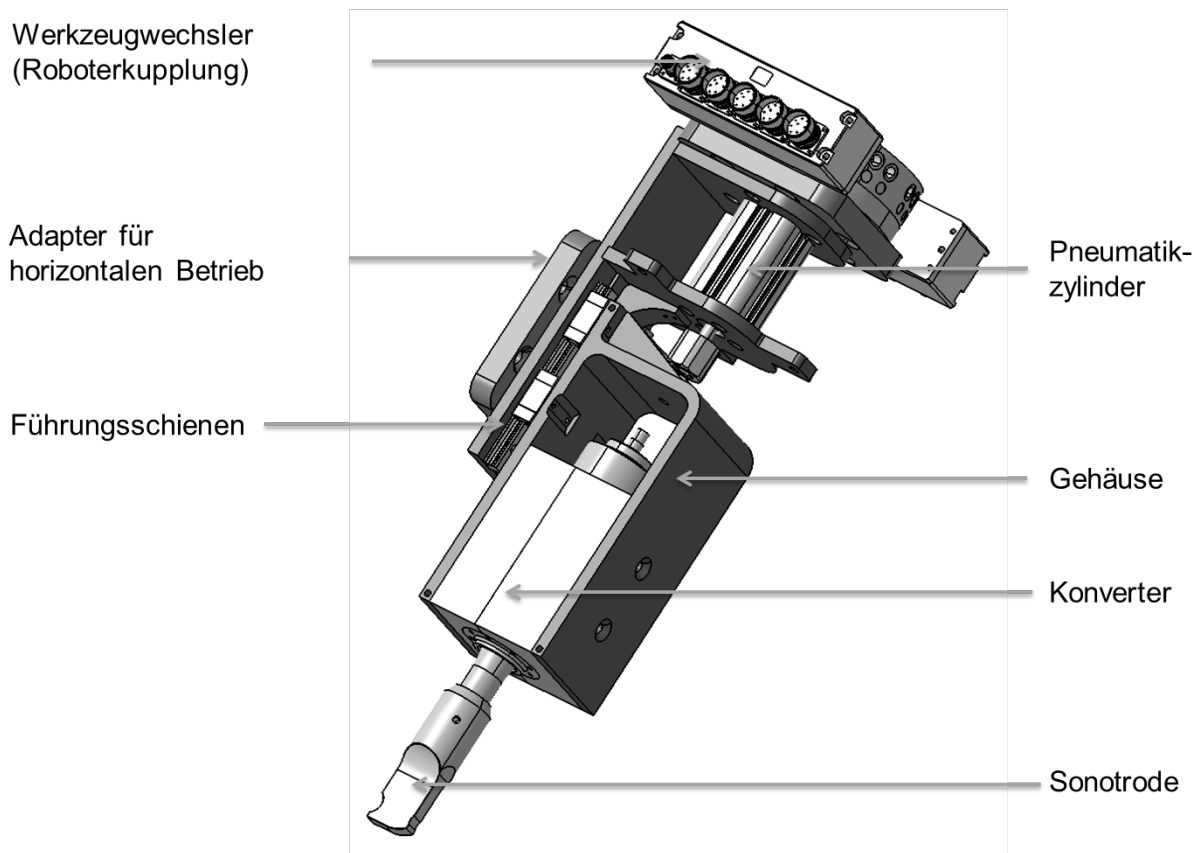


Abbildung 9.2: CAD-Modell Ultraschall-Endeffektor

Wie auf dem Petri-Diagramm (Abbildung 9.1) ersichtlich ist, wird die Schwingeinheit mit pneumatischem Druck beaufschlagt. Die pneumatischen Elemente sind Teil des Endeffektors. Der doppelt wirkende Kompaktzylinder mit Drucküberwachung gewährleistet einen konstanten Schweißdruck, auch wenn beispielsweise das Eigengewicht des Endeffektors bei geringem Schweißdruck abgestützt werden muss. Eine Druckapplikation über den Verfahrensweg des Roboters bzw. seiner Momentenregelung konnte nicht die erforderliche Genauigkeit gewährleisten.

Die Profilschienenführung ermöglicht einen spielfreien, axialen Verfahrensweg der Schwingeinheit. Stützelemente minimieren Biegewege der Konstruktion bei Maximalbelastung. Zwei Adapterplatten ermöglichen eine Anbindung der Schwingeinheit unter zwei Winkeln (0° und 90°) an den Roboter. Damit werden Schweißungen bei eingeschränkter Zugänglichkeit ermöglicht. Insbesondere jedoch können horizontale und vertikale Schweißungen auch bei Portalsystemen ohne Endeffektorschwenkachse realisiert werden.

Mittels eines automatischen Werkzeugwechselsystems können alle Signal- und Materialströme dargestellt werden; somit ist ein vollautomatischer Kopfwechsel möglich.

In die Robotersteuerung wurde eine Überwachung des Generatorleistungssignals integriert, wobei Ober- und Untergrenzen spezifisch definiert werden können; ebenso die dadurch ausgelöste Aktion (Stopp des Schweißvorgangs, Alarmmeldung, Eintrag in das Schweißprotokoll).

Eine schematische Abbildung der Integration des Endeffektors in die Roboterzelle ist im Anhang zu finden.

9.3 Validierungselement

Die Funktionsfähigkeit des Endeffektors wurde an einer Validierungsstruktur dargestellt. Es handelt sich hierbei um ein Frame-Beam-Element, das aus einer Passagiertürstruktur abgeleitet wurde (Abbildung 9.3).

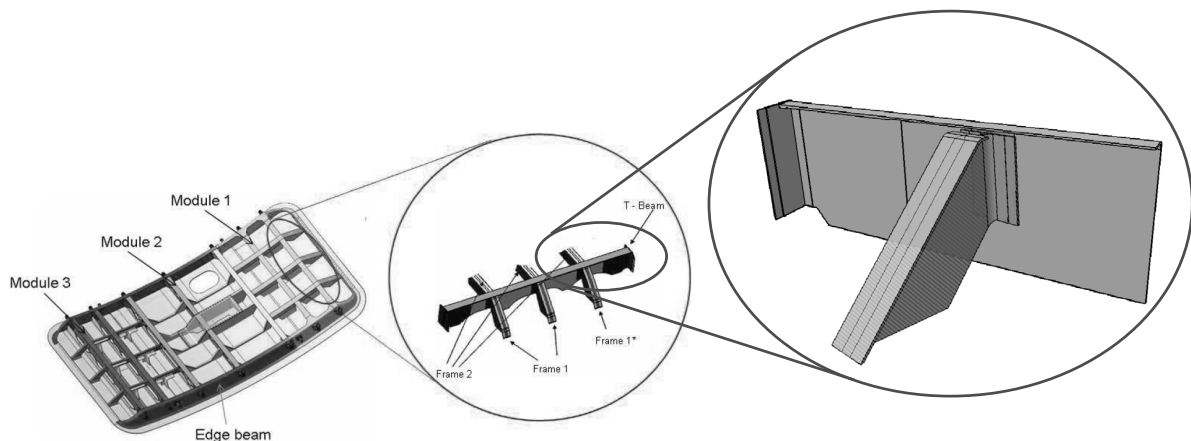


Abbildung 9.3: Ableitung der Validierungsstruktur

Das verwendete Material war ein Biaxial-Carbon-Gelege bzw. UD-Band und thermoplastisches Bindervlies („ECS6090“, „ECS6082“, „PA1541“; Tabelle 6-1 und Tabelle 6-2). Innerhalb des Prozesses werden vier Sub-Preforms verschweißt (Abbildung 9.4).

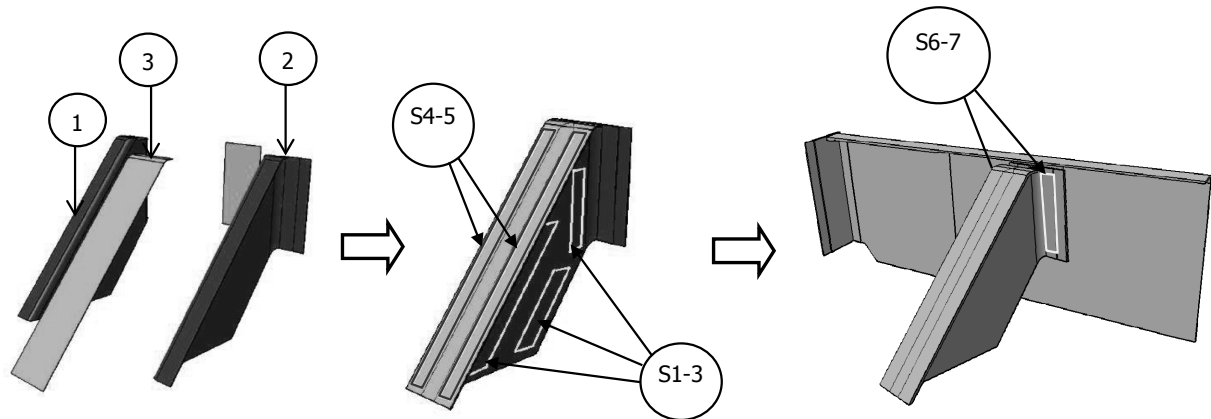


Abbildung 9.4: Elemente der Validierungsstruktur

Zunächst werden die Dreiecksframe-Hälften 1 und 2 mittels der Schweißnähte S1, S2 und S3 gefügt. Anschließend wird der unidirektionale Gurt 3 mittels der Nähte S4 und S5 und auf den Dreiecksframe geschweißt. Schließlich wird diese Preform-Baugruppe an das Beam-Element mit den Nähten S6 und S7 montiert. Mit einem eigens entwickelten Werkzeug konnte der Montageprozess vollautomatisch dargestellt werden, wobei eine Prozesszeit von 1 : 55 min erreicht wurde. Die montierte Preformbaugruppe ist in Abbildung 9.5 dargestellt.

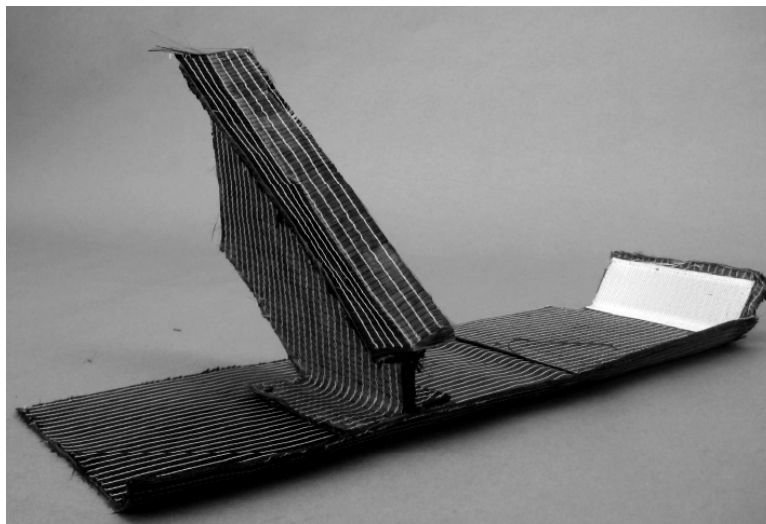


Abbildung 9.5: Montierte Validierungsstruktur

10 Zielerreichung und Diskussion

10.1 Zielerreichung

Mit der Fertigung einer repräsentativen Preform konnte die Leistungsfähigkeit der Technologie beurteilt werden. Im Folgenden wird den funktionalen und wirtschaftlichen Einzelaspekten entsprechend der Zielsetzung ein Erfüllungsgrad zugeordnet.

Die maximale Vorschubgeschwindigkeit beim Erzeugen einer Preform-Schweißnaht wurde für ein 10-lagiges Preformlaminat (260 g/m² pro Lage) mit 2,2 m/min ermittelt. Gegenüber der Maximalgeschwindigkeit eines 3D-Nähkopfes bei dieser Lagenstärke von etwa 1,2 m/min kann somit eine Beschleunigung um ca. 45 % erzielt werden. Beide Technologien benötigen keine Anlauf- oder Rüstzeit.

Der Energiebedarf zum Verschweißen zweier beiderter Preforms durch drei Linienschweißungen einer Länge von je 150 mm (s. Dreiecksframes des Validierungselement) beträgt ca. 28 Wh. Hierbei entfallen etwa 97 % auf den Roboter, der auch beim Betrieb des Nähkopfes im Einsatz wäre; der Unterschied im Energieverbrauch wäre also marginal. Eine konventionelle Aktivierung mittels Umluftofen (auf Aluminiumwerkzeugen) bei einer Beladung des Ofens mit 10 Preformpaaren würde etwa 500 Wh pro Preformpaar verbrauchen. Es wird durch die US-Technologie somit das Effizienzniveau der Nähtechnologie in der Binderprozesskette dargestellt. Dies beträgt ungefähr 5 % des Verbrauches vom Umluftofen.

Im Rahmen der Prozessstudien konnten Temperaturen von bis zu 400 °C im Preformlaminat gemessen werden (s. Validierung des Wärmeflussmodells). Die Verarbeitung hochschmelzender Thermoplasten als funktionale Binder mittels der US-Technologie ist somit prinzipiell möglich.

Beim Ultraschall-Preformschweißen sind keine Hilfsstoffe notwendig.

Es konnte keine Herabsetzung der interlaminaren Scherfestigkeit von Laminat, das aus verschweißten Preforms hergestellt wurde, nachgewiesen werden.

Limitierungen der verarbeitbaren Bauteilgröße oder –geometrie existieren beim Ultraschallschweißen nicht. Da es sich - im Gegensatz zum Nähen - um eine Technologie zur einseitigen Bearbeitung handelt, können Schweißpunkte an fast beliebiger Stelle auf der Komponente gesetzt werden. Auch die Abmaße der Komponenten

müssen nur von entsprechend flexiblen Robotersystemen bearbeitbar sein; eine Maximalgröße, wie sie durch in der Realität vorhandenen Öfen gegeben ist, existiert für die US-Technologie nicht.

Durch den weitgehenden Rückgriff auf Serienkomponenten und Frästeile kann ein Ultraschall-Endeffektor relativ kostengünstig hergestellt werden. Das Investitionsvolumen liegt deutlich unterhalb dessen, das für einen 3D-Nähkopf aufgebracht werden muss. Dieser besteht aus aufwändiger (Fein-)Mechanik, die nur teilweise von Großserie-Nähmaschinen entnommen werden kann.

Die Ziele konnten somit erreicht werden.

Es ist jedoch zu beachten, dass die Ultraschall-Technologie die genannten alternativen Technologien nicht vollständig ersetzen kann.

Die flächige Binderaktivierung ist elementarer Bestandteil bei der Umformung und Kompaktierung von Preforms; sie erzeugt endkonturnahe Preformelemente hoher Qualität. Bei der Preformerstellung der binderbasierten Prozesskette sind somit der Umluftofen und andere Technologien zur flächigen Preformbeheizung (Infrarotfeld, eigenbeheizte Werkzeuge) nach wie vor unerlässlich.

Die Nähtechnologie erzeugt eine Naht in einer Preform ohne Binder. Sollte aus Gründen der Verträglichkeit von Harz und Binder eine binderfreie Preform gefordert sein, stellt sie die Technologie der Wahl dar. Des Weiteren behalten genähte Strukturen noch eine Restflexibilität, die sogar durch die Nähfadenspannung einstellbar ist. Somit können bspw. nach dem Vernähen noch Drapierschnitte durchgeführt werden.

Generell lässt sich sagen, dass mit der Ultraschall-Schweißtechnologie zwar neue Freiheits- und Effizienzgrade erschlossen werden können, die bewährten Technologien allerdings nicht ihre Daseinsberechtigung verlieren.

10.2 Zur Gültigkeit der Ergebnisse

Die Untersuchungen der Prozessstudien wurden weitestgehend mit einem Materialsystem durchgeführt. Die gewonnenen Ergebnisse wurden grundsätzlich mit anderen Materialsystemen validiert, wobei keine signifikanten Abweichungen festgestellt wurden. Für folgende Parameter sind Abweichungen zu den in Kapitel 7 aufgeführten Ergebnissen zu erwarten:

- Webart des Faserhalbzeugs

Je stärker die Haltekräfte zwischen den Rovings durch die Webung, desto geringer sind die zu erwartenden Ondulationen bei Stempelschweißungen im Halbzeug; Gewebe eignet sich demnach prinzipiell besser für Stempelschweißungen als Gelege. Gewebte Halbzeuge weisen allerdings eine stärker ausgebildete Topologie auf, was den Widerstand gegenüber der gleitenden Sonotrode beim kontinuierlichen Prozess erhöht. Hierbei sind also größere Ondulationen zu erwarten. Diese Beobachtungen wurden innerhalb der Prozessstudien bestätigt.

- Klemmung des Faserhalbzeugs

Die Klemmung des Faserhalbzeuges hat großen Einfluss auf die Schweißnahtqualität bezüglich Faserondulationen. Entscheidend für die Wirkungskraft einer Klemmung ist, dass jene Rovings, die in Berührung mit der Sonotrode stehen, geklemmt werden. Somit könnte eine Verschweißung eines unidirektionalen Bandes mit zwei linienförmigen Klemmungen dargestellt werden. Die Klemmwirkung steigt mit einer Aufrauung des Klemmwerkzeuges bzw. einer klebrigen Beschichtung. Eine Steigerung des Klemmdruckes verringert prinzipiell Ondulationen. Es wurde jedoch eine Obergrenze für den Klemmdruck identifiziert, deren Überschreitung keine zusätzliche Verringerung der Ondulationen bewirkt.

- Vorkompaktierung und Voraktivierung der Preforms

Die Verschweißung aktivierter und kompaktierter Preforms ist prinzipiell unproblematischer, da die Rovings durch das Binderpolymer am Auswandern bei Schalleintrag gehindert werden. Dieser Effekt ist bei NCF geringer, da die obere Faserlage nicht durch den Binder fixiert ist, der sich zwischen den multiaxialen Gelegelagen befindet.

- Sonotrodengeometrie

Die in diesem Projekt entwickelte Sonotrodengeometrie hat sich als sehr gut geeignet erwiesen; insbesondere zur Darstellung des kontinuierlichen aber auch des punktuellen Schweißmodus'. Bei einer Ausrichtung auf nur einen Schweißmodus wären Modifikationen denkbar. Eine Sonotrode mit kreisförmiger Schweißfläche würde eine verbesserte Flächennutzung bei Punktschweißungen bedeuten, womit die Zugänglichkeit an die Schweißstelle und die Spannungszustände

bei mechanischer Belastung der Schweißnaht optimiert werden könnten. Jedoch bestünde nicht die Möglichkeit, beim Verschweißen unidirektionaler Bänder die Schweißfläche zu orientieren. Mit der Orientierung kann die Schallbelastung auf eine größere Anzahl von Filamenten verteilt und mögliche Schädigungen minimiert werden.

Bei einer Vergrößerung der Schweißfläche ist eine entsprechende Erhöhung der Schweißkraft vorzusehen, um den Flächendruck konstant zu halten. Hierbei wird der anlagentechnische Aufwand entsprechend erhöht.

In jedem Falle ist eine Kantenverrundung an der Schweißfläche der Sonotrode vorzusehen, um Faserschädigung durch Abklemmen zu vermeiden.

- **Werkzeugmaterial**

Die Eigenschaften des Preformwerkzeuges haben Einfluss auf die Effizienz der Schweißung. Mit sinkender Werkzeugsteifigkeit sinkt die Effizienz, da das Werkzeug mitschwingt und entsprechend weniger Schwingungsenergie in der Preform umgesetzt werden kann. Hierbei ist sowohl die Härte des Werkzeugmaterials selbst, als auch eine ausreichende Dimensionierung der Werkzeugkonstruktion gegen Biegeschwingungen von Bedeutung.

10.3 Anlagentechnisches Weiterentwicklungspotential

10.3.1 Niederhalter

Grundsätzlich muss das Faserhalbzeug um den Schweißbereich geklemmt werden, um Ondulationen zu unterdrücken. Diese Klemmfunktion kann durch das Preformwerkzeug erfüllt werden, was entsprechende Komponenten wie Klemmschablonen erfordert (s. Abbildung 10.1, es sind Beginn (1 und 2) und Ende (3 und 4) der Schweißungen bezeichnet).

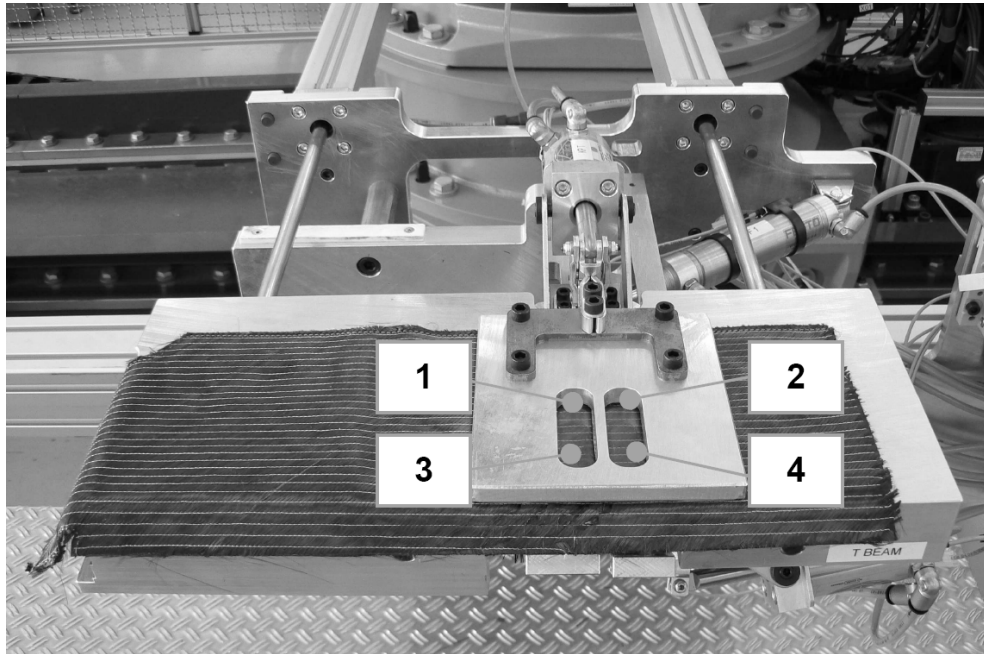


Abbildung 10.1: In Preformwerkzeug integrierte Klemmschablone mit Schweißnuten

Alternativ kann die Klemmung durch ein integriertes Modul erzeugt werden, das einen Teil des Endeffektors darstellt. Somit kann der werkzeugseitige Aufwand minimiert werden und weitestgehend konventionelle Werkzeuge ohne Aufrüstung für den Schweißprozess verwendet werden. Ein solches Klemmmodul kann für eine Punktschweißung durch eine einfache Konstruktion dargestellt werden, wobei der Klemmring der Sonotrode vorgeschaltet ist und bei Anfahren der Sonotrode auf die Schweißstelle durch die Federvorspannung angepresst wird.

Durch eine Gestaltung des Niederhalters aus Walzen und „Ketten“ ist eine Umsetzung dieses Prinzips auch für kontinuierliche Prozesse denkbar.

10.3.2 Niederhalter-Greifmodul „Pick & Weld“

Aufbauend auf das zuvor beschriebene Klemmmodul ist ein „Pick & Weld“-Modul denkbar, das zusätzlich zur Klemmfunktion eine Greiffunktion erfüllt. Somit können Preformelemente geringer Abmaße („Patches“) vom Endeffektor aufgenommen und in einem Schritt auf der Zielposition angeschweißt werden. Die Anwendung wäre hierbei die Erzeugung lokaler Aufdopplungen (Verstärkungen oder „Opferlagen“ zur späteren Erzeugung von Fügeflächen am ausgehärteten Bauteil). In Abbildung 10.2 ist eine mögliche Konstruktion abgebildet.

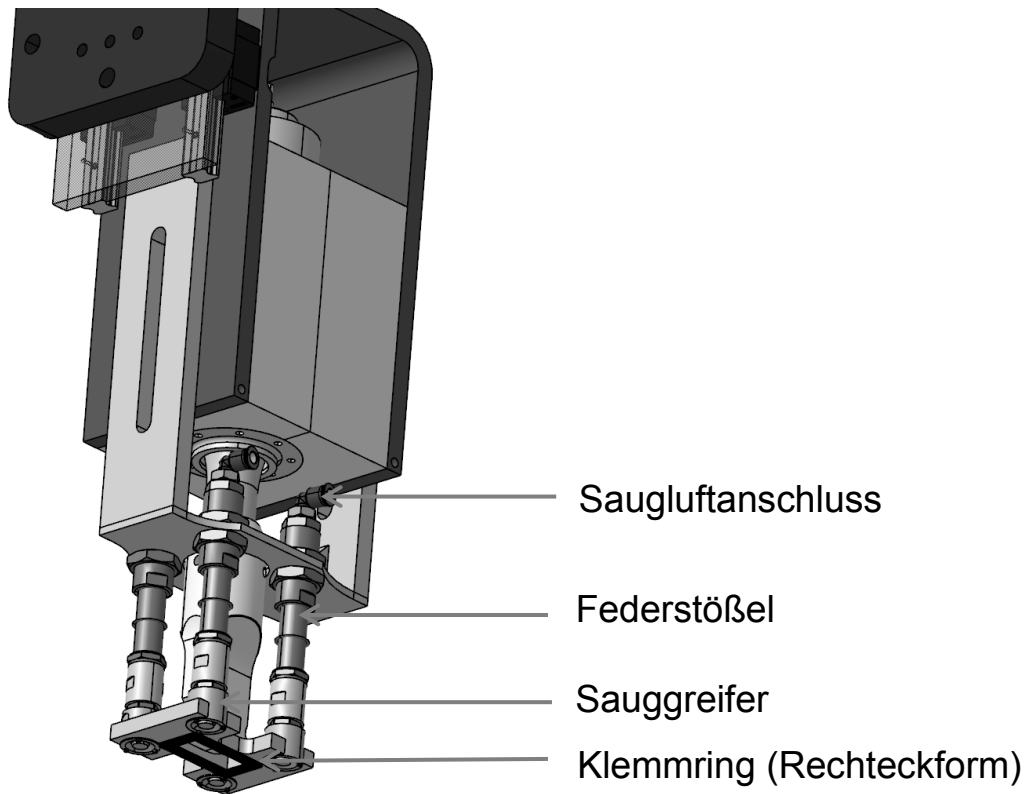


Abbildung 10.2: Pick & Weld-Modul für den Ultraschall-Endeffektor

10.4 Weitere Einsatzpotentiale

10.4.1 Integration hochschmelzender Thermoplaste

Duroplastische Infusionsharze weisen im Allgemeinen eine hohe Sprödigkeit im ausgehärteten Zustand auf, was zu einer verminderten Schadenstoleranz des Bauteils führt. Eine Modifikation der Harzmorphologie mit dem Ziel der Zähigkeitssteigerung kann durch Hinzufügen von thermoplastischen Komponenten dargestellt werden. Werden diese Modifikatoren bereits dem Reinharz vor der Infiltration beigefügt, erhöht sich die Viskosität des Harzes und die Eignung für den Infusionsprozess sinkt. Darüber hinaus kann es zu Ausfilterungsvorgängen der thermoplastischen Komponenten während der Imprägnierung des Faserhalbzeuges kommen, wodurch die gleichmäßige Verteilung der Modifikatoren im Bauteil nicht mehr gegeben ist.

Aus diesen Gründen wird der prozesstechnische Ansatz untersucht, die Modifikatoren bereits in die Preform einzubringen. Dies kann bereits bei der Halbzeugherstellung erfolgen, beispielsweise durch das Einnähen eines Vlieses in ein Multiaxialgele-

ge. Soll jedoch die Zähmodifizierung nur in kritischen Bereichen erfolgen, muss der Thermoplast lokal während des Preformprozesses eingebracht werden. Um ihn in oder auf der Preform zu fixieren, ist ein effizientes Fügeverfahren notwendig. Hierbei müssen Temperaturen von über 200 °C erzeugt werden, da die infrage kommenden Thermoplaste erhöhte Erweichungspunkte aufweisen. Hierzu bietet sich die Ultraschallschweißtechnologie an.

Entsprechende Studien wurden mit verschiedenen Thermoplast-Halbzeugformen durchgeführt und mit positiven Ergebnissen abgeschlossen. Es wurden thermoplastische Vliese, Folien und Garne prozesseffizient thermisch fixiert und zähigkeitssteigernde Effekte mittels Kennwertermittlung nachgewiesen [78], [79].

10.4.2 Dry Fiber Placement

Beim Dry Fiber Placement werden mittels eines Roboterendeffektors bebinderte Rovings geführt, erwärmt, kontinuierlich abgelegt und konsolidiert. Somit kann in einem Schritt eine endkonturnahe Preform erzeugt werden. Hierbei werden Ablegegeschwindigkeiten von bis zu 1 m/s realisiert [77]. Um bei dieser Fördergeschwindigkeit entsprechend schnelle Aufheizungen zu realisieren, werden Heißgasdüsen oder Laser eingesetzt. Heißgasdüsen haben den Nachteil, dass der Wärmeeintrag, insbesondere bei Variation der Vorschubgeschwindigkeit, nur bedingt kontrollierbar und je nach verwendetem Gas mit Wassereintrag in den Roving verbunden ist. Laser sind als kritisch bezüglich der Arbeitssicherheit, der Anlagenkosten und der Komponentenabmaße zu bewerten. Die Ultraschall-Schweißtechnologie könnte auch hier eine Alternative zu den benannten technologischen Lösungen darstellen. Es ist ein ähnliches Anlagenlayout wie beim ultraschallgestützten Tape Placement denkbar (siehe Kapitel 3.4.3).

11 Zusammenfassung

Ultraschallschweißen wurde auf seine Einsatzmöglichkeiten als Preform-Montagetechnologie in der binderbasierten Prozesskette hin untersucht und anlagentechnisch umgesetzt. Sowohl Punkt- als auch kontinuierliche Schweißungen können mit einem System dargestellt werden, wobei Prozessgeschwindigkeiten von ca. 4 s für Punktschweißungen und 2,2 m/min für kontinuierliche Schweißungen erreicht werden und Preformlamine von bis zu einem Flächengewicht 4000 g/m² verschweißt werden können. Die Schweißparameter wurden in Prozessstudien auf einem eigens umgesetzten Versuchsstand ermittelt, wobei statistische Methoden angewandt wurden. Als wichtigster Prozessparameter sowohl bezüglich einzubringender Energie als auch verursachter Störungen der Faserarchitektur wurde die Schweißamplitude identifiziert. In einem Bereich um 17 µm wurden die besten Ergebnisse erzielt. Der Schweißdruck spielt eine untergeordnete Rolle; lediglich muss ein Mindestwert von ca. 6 MPa gewährleistet sein, um eine effektive Schalleinleitung zu ermöglichen. Der effektive Wirkungsgrad des Prozesses als Verhältnis der vom Netz aufgenommenen Energie zu der in der Schweißstelle ungesetzten Wärme wurde mit 30,5 % ermittelt. Es wurde ein Verfahren zur Absicherung des Prozesses mittels Überwachung der Generatorleistung entwickelt. Es basiert auf Studien, die den indirekten Zusammenhang der Generatorleistung mit der Schweißnahtfestigkeit belegen. Äußere Filamentreibung wurde als Mechanismus zur Wärmeerzeugung identifiziert. Untersuchungen zur Ausbildung des Temperaturprofils in der Preform zeigten einen signifikanten Wärmeabfluss in Sonotrode und Werkzeug („Skin effect“) und damit einhergehende Temperaturdifferenzen im Laminat von bis zu 60 %. Die Wärmeentwicklung im Preformlaminat wurde mit einem einfachen Wärmeflussmodell dargestellt, wobei ein Abgleich mit gemessenen Werten eine Abweichung von maximal 16 % ergab. Mit diesem Modell können die Temperaturprofile im Preformlaminat mit entsprechender Genauigkeit vorhergesagt werden. Im Rahmen von mechanischen Tests konnte kein Einfluss des Preformschweißprozesses auf die interlamina-re Scherfestigkeit der Probekörper festgestellt werden. In der Schweißnaht wurden Faservolumenanteile zwischen 54 und 58 % gemessen, eine erhöhte Restkompaktierung in der Naht nach Infusion und Aushärtung konnte lediglich bei einer Vaku-

uminfusion mit einseitigem Werkzeug festgestellt werden, bei der prozessbedingt im umliegenden Laminat geringere Faservolumengehalte erzielt wurden.

Im Rahmen einer ersten Validierungsstudie mit einem Schweiß-Endeffektor in einer Roboterzelle konnte ein vollautomatischer Montageprozess von vier Preformelementen aus einer Verstärkungsstruktur mittels sieben Schweißnähten in 1 : 55 min dargestellt werden.

Literatur

- [1] N.N.: Anteil der Faserverbundwerkstoffe an der Strukturmasse. Planet Aerospace, H. 3, 2007, S. 80
- [2] Sommer, M.; Neitzel, M.: Imprägnierte Halbzeuge. In: Neitzel, M.; Mitschang, P. (Hrsg.): Handbuch Verbundwerkstoffe: Werkstoffe, Verarbeitung, Anwendung. München [u.a.]: Hanser, 2004, S. 105-147
- [3] Reinhart, G., Strasser, G., Scharrer, G.: Automatisierte Fertigung von Faserverbundbauteilen – Automatisierung zentraler Prozessschritte bei der Verarbeitung trockener CFK-Textilien. Wt-online - Ausgabe 9-2008, H. 9, S. 711-716, URL: http://www.werkstattstechnik.de/wt/article.php?data%5Barticle_id%5D=44063
- [4] Ehrenstein, G. W.: Faserverbundkunststoffe – Werkstoffe – Verarbeitung – Eigenschaften. 2. Aufl. - München [u.a.]: Hanser, 2006
- [5] Potter, K.: Resin Transfer Molding. London: Chapman & Hall, 1997
- [6] Weyrauch, F. et al.: Harzinjektionsverfahren. In: Neitzel, M.; Mitschang, P. (Hrsg.): Handbuch Verbundwerkstoffe: Werkstoffe, Verarbeitung, Anwendung. München [u.a.]: Hanser, 2004, S. 271-287
- [7] Weimer, C.; Mitschang, P.: Preformverfahren. In: Neitzel, M.; Mitschang, P. (Hrsg.): Handbuch Verbundwerkstoffe: Werkstoffe, Verarbeitung, Anwendung. München [u.a.]: Hanser, 2004, S. 73-85
- [8] Weimer, C., Göttinger, M.: Dry Fibre Placement Technology – Advancing the Preform Process Chain for Aerospace Applications. In: SAMPE EUROPE 1st Symposium on Automation on Composite Technology: June 9th – 10th, 2010, Neue Messe München. Riehen: SAMPE Europe Conference Management, 2010, S. 97-106
- [9] Mohamed, M - H.; Zhang, Z.-h.: Method of forming variable cross-sectional shaped three-dimensional fabrics. US-Patent US 5085252. Veröffentlichung: 4.2.1992

-
- [10] Naik, N.K.; Sekher, Y. C.; Meduri S.: "Damage in woven-fabric composites subjected to low-velocity impact". In: Composites Science and Technology 60 (2000), H. 5, pp. 731-744
- [11] Brandt, J. et al.: New approaches in textile and impregnation technologies for the cost effective manufacturing of cfrp aerospace components. Proceedings ICAS-Congress 2002; Toronto, Canada, 8th to 13th September; proceedings. Toronto 2002. URL: http://www.icas.org/icas_archive_cd1998-2010/icas2002/PAPERS/634.PDF
- [12] Tang, G. et al.: Dynamic damage and fracture mechanism of three-dimensional braided carbon fiber/epoxy resin composites. Materials & Design 22 (2001), H. 1, S. 21-25
- [13] Homepage CTC GmbH (Hrsg.): www-ctc-gmbh.com (Stand August 2011)
- [14] Weimer, C.; Preller, T.; Mitschang, P.; Drechsler, K.: Approach to net-shape preforming using textile technologies. Part I: Edges. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 31 (2000), H. 11, S. 1261-1268
- [15] Reinhart, G., Zäh, M. (Hrsg.): Handhabungstechnik - Der Schlüssel für eine automatisierte Herstellung von Composite-Bauteilen; Seminar Handhabungstechnik 2010; Augsburg, 8.7.2010. München: Utz 2010
- [16] Gubernatis, S., Dumont, F., Weimer, C.: Forming simulation validation for non-woven reinforcements; In: Proceedings fo the 10th international Conference on Textile Composites TEXCOMP 10, Oktober 26 – 28, 2010, Lille, France. Lancaster, Pa.: DEStech Pub., 2010, S. 373 - 380
- [17] Beier, U.: High Performance fibre-reinforced composites prepared by a novel preform manufacturing routine. Universität Bayreuth Lehrstuhl für Polymere Werkstoffe, 2010; Technisch wissenschaftlicher Bericht, 2010
- [18] Buntain, M.J., Bickerton, S.: Prediction of Tooling Forces in Liquid Composite Moulding Processes. SAMPE Journal, Vol. 39 (2003), H. 1, S. 8-15

-
- [19] Asareh, M. et al.: Investigation of preform manufacturing techniques using novel binder coated carbon fibre tows. In: Proceedings ECCM13, 13th European Conference on Composite Materials; 2. – 5. Juni 2008, Stockholm, Schweden. Stockholm, 2008.
- [20] Rieber, G.: Einfluss von textilen Parametern auf die Permeabilität von Multifilamentgeweben für Faserverbundkunststoffe. Kaiserslautern: Institut für Verbundwerkstoffe, 2011, Dissertation, 2011
- [21] Yang, J.: Modifications of epoxy resins with functional hyperbranched poly(arylene ester)s. Blacksburg, VA, Virginia Polytechnic Institute and State University, Dissertation 1998
- [22] Kruckenberg, T.: Resin transfer moulding for aerospace structures. London: Kluwer Academic Publishers, 1998
- [23] Tsotsis, T. K.: Interlayer Toughening of Composite Materials, Polymer Composites 30 (2009), S. 70-86
- [24] Hillermeier, R. W., Seferis, J. C.: Interlayer Toughening of Resin Transfer Molding Composites, Composites Part A 32 (2001), H. 5, S. 721-729
- [25] Fahrenwaldt H. J.: Kunststoffschweißen. In: Fahrenwaldt, H. J. (Hrsg.): Praxiswissen Schweißtechnik: Werkstoffe, Prozesse, Fertigung. 2. Aufl., Wiesbaden: Friedr. Vieweg & Sohn Verlag/GWV Fachverlage GmbH, 2006
- [26] Ströhlein, T.: Induktives Preformen. In: Wissenschaftstag DLR Braunschweig. 11.10.2007
- [27] Jones, I. A.; Wise, R. J.: Novel Joining methods applicable to textiles and smart garments. Wearable Futures Conference, Newport, Wales, 14-16.9.2005
- [28] Grewell, D. A.; Benatar, A.; Park, J. B. (Eds.): Plastics and Composites Welding Handbook. München; Wien: Hanser, 2003
- [29] Wellhausen, C.: Herstellung von Faserverbundbauteilen durch die Kombination von Prepreg und Infusion am Beispiel einer Hubschrauber-Tankabdeckung. In: Proceedings Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress 2008, Darmstadt, 23. bis 25.9.2008. Bonn: DGLR, 2008

-
- [30] Kang T. J.; Lee, S. H.: Effect of stitching on the mechanical and impact properties of woven laminate composite. In: Journal of Composite Materials 28 (1994), S. 1574-1587
- [31] Iwahori, Y., Ishikawa, T., Watanabe, N., Ito, A.: Experimental Evaluation for Interlaminar Fracture Toughness of Stitched CFRP Laminates. In: Proceedings SAMPE Fall Technical Conference (37th ISTC), 31.10.-3.11.2005, Seattle, WA. Covina, Cal.: Society for the Advancements of Material and Process Engineering, 2005
- [32] Hosur, M.V. et al.: Performance of stitched/unstitched woven carbon/epoxy composites under high velocity impact loading. In: Composite Structures 64 (2004), H. 3-4, S. 455-466
- [33] Weimer, C.: Preform-engineering: Applied sewing technologies to incorporate part and process functions into dry textile reinforcements. In: Composites Science and Technology 63(2003), H. 14, S. 2089-2098
- [34] Ogale, A., Weimer, C., Mitschang, P.: Selection of sewing threads for preform manufacturing. In: Advanced Composite Letters, Vol. 13 (2004), H. 4, S. 199-208
- [35] Ogale, A., Mitschang, P.: Tailoring of Textile Preforms for Fibre-reinforced Polymer Composites. In: Journal of Industrial Textiles 34 (2004), H. 2, S. 77-96
- [36] Gries, Th., Laourine, E.: Weiterentwicklung der einseitigen Nähtechnik. In: Technische Textilien 44 (2001), S. 308 - 310
- [37] Balle, F., Wagner, G., Eifler, D.: Ultrasonic Spot Welding of Aluminum Sheet/Carbon Fiber Reinforced Polymer Joints. In: Mat.-wiss. u. Werkstofftech. 38 (2007) H.11, S. 934-938
- [38] The Welding Institute Ltd.: Ultrasonic Welding Technique, URL: <http://www.twi.co.uk/content/pjkultrason.html>, 2009
- [39] Zhang, Z. et al.: Study on Heating Process of Ultrasonic Welding for Thermoplastics, In: Journal of Thermoplastic Composite Materials 23 (2012), H. 5, S. 647-664

-
- [40] BRANSON Ultrasonic Corporation: PW1-Polymers: Characteristics and Compatibility for Ultrasonic Assembly. Technical Information, verfügbar online: www.branson-plasticsjoin.com (Zugriff: 5.3.2010)
- [41] Doumanidis, C.; Gao, Y.: Mechanical Modelling of Ultrasonic Welding, *Welding Journal* (2004), H. 4, S.140-146
- [42] Roylance, M. et al.: Modelling of Ultrasonic Processing, *Journal of Applied Polymer Science* 93 (2004), H. 4, S. 1609–1615
- [43] Justo, J. et al.: Modelling of ultrasonic tape lamination, 14th European Conference of Composite Materials, Budapest, Hungary 7th – 10th June, 2010
- [44] Branson: Nonwoven- und Textilindustrie: Flexible Kunststoffverbindungen. Dietzenbach: Branson Ultraschall, 2002, URL: <http://www.branson.nl/downloads/textild.pdf>
- [45] Leemon, V. et al.: Ultrasonic Method of fabricating a thermosetting matrix fiber reinforced composite structure and the product thereof. Patent US 6,432,236 B1. Veröffentlichung: 13.08. 2002
- [46] NetVomposites (Ed.): Ultrasonic Tape Lamination Technology Wins NASA Award for Foster-Miller. Publication Date: 9.09.2004 URL: <http://www.netcomposites.com/newsitem.asp?id=2385>, Zugriff: 11.Juli 2012
- [47] Seebacher, S.: Contributions to the investigation on in situ ultrasonic tape lamination of composite thermoset Prepregs. Master Thesis, Private Fachhochschule Göttingen, Februar 2008
- [48] Soccard, E.: Ultrasonic Assembly Method. Patent US 2008/0210360 A1: Veröffentlichungsdatum: 1.3.2011
- [49] TAPAS: The Thermoplastic Affordable Primary Aircraft Structure consortium. URL: <http://www.tapasproject.nl/> Zugriff: 05.08.2012
- [50] Fokker Aerospace Group: Company presentation. URL: <http://www.nevat.nl/Nieuwsitems/1013%20-%2012%20juni%20->

- [%2025%20juni%202010/~-/media/2009/Presentatie%20Fokker.ashx](#),
(Zugriff: 16.08.2012)
- [51] Ringwald, H., Drechsler, K.: Ultrasonic Binder activation for carbon fiber preform manufacture. In: Eraht, M.A. (Ed.): SEICO 09; SAMPE Europe 30th international jubilee conference and forum; March 23 – 25th 2009, Paris. Riehen: 2009, S. 438-445
- [52] Kern GmbH (Hrsg.): Polyethersulfon (PES). Großmaischeid: Kern GmbH, Technische Kunststoffteile, URL: <http://www.kerngmbh.de/cgi-bin/riweta.cgi?lng=1&nr=2441> (Zugriff: 16.8.2012)
- [53] Greiner, R. et al.: Arbeitsbericht der Arbeitsgruppe Kugelpackungen und Wurstkatastrophe. Universität Würzburg, Mathematische Institute. Projekttag 2001. 03.-06.07.2001, URL: <http://www.mathematik.uni-wuerzburg.de/~greiner/Download/MathSpiel/PT2001-kugel-abr.pdf>
- [54] Hering, E. et al.: Physik für Ingenieure. 10. Aufl. Berlin; Heidelberg: Springer, 2007
- [55] Weimer C. et al.: Prozessbegleitende Schadensanalyse (PROSA) - Ein wesentlicher Baustein für die kosteneffiziente Fertigung und Analyse von CFK-Strukturen. DGLR-Jahrbuch 2006, Band III, DGLR Deutsche Gesellschaft für Luft- und Raumfahrt – Lilienthal-Oberth e.V. (Bonn, 2007)
- [56] Eurocopter GmbH (Hrsg.):
www.eurocopter.com/site/en/ref/Development_518-1061.html, Zugriff: 22.1.2012
- [57] DIN EN ISO 11339:2010: T-Schälprüfung für geklebte Verbindungen aus flexiblen Fügeteilen. Berlin: Beuth, 2010
- [58] Bickerton S. et al.: The viscoelastic compression behaviour of liquid composite molding preforms. Composite Part A 34, (2003), H. 5, S. 431-444
- [59] Cheng, J.J., et al.: A Thermomechanical Constitutive Model for Fibrous Reinforcements. In: 17th International Conference on Composite Mate-

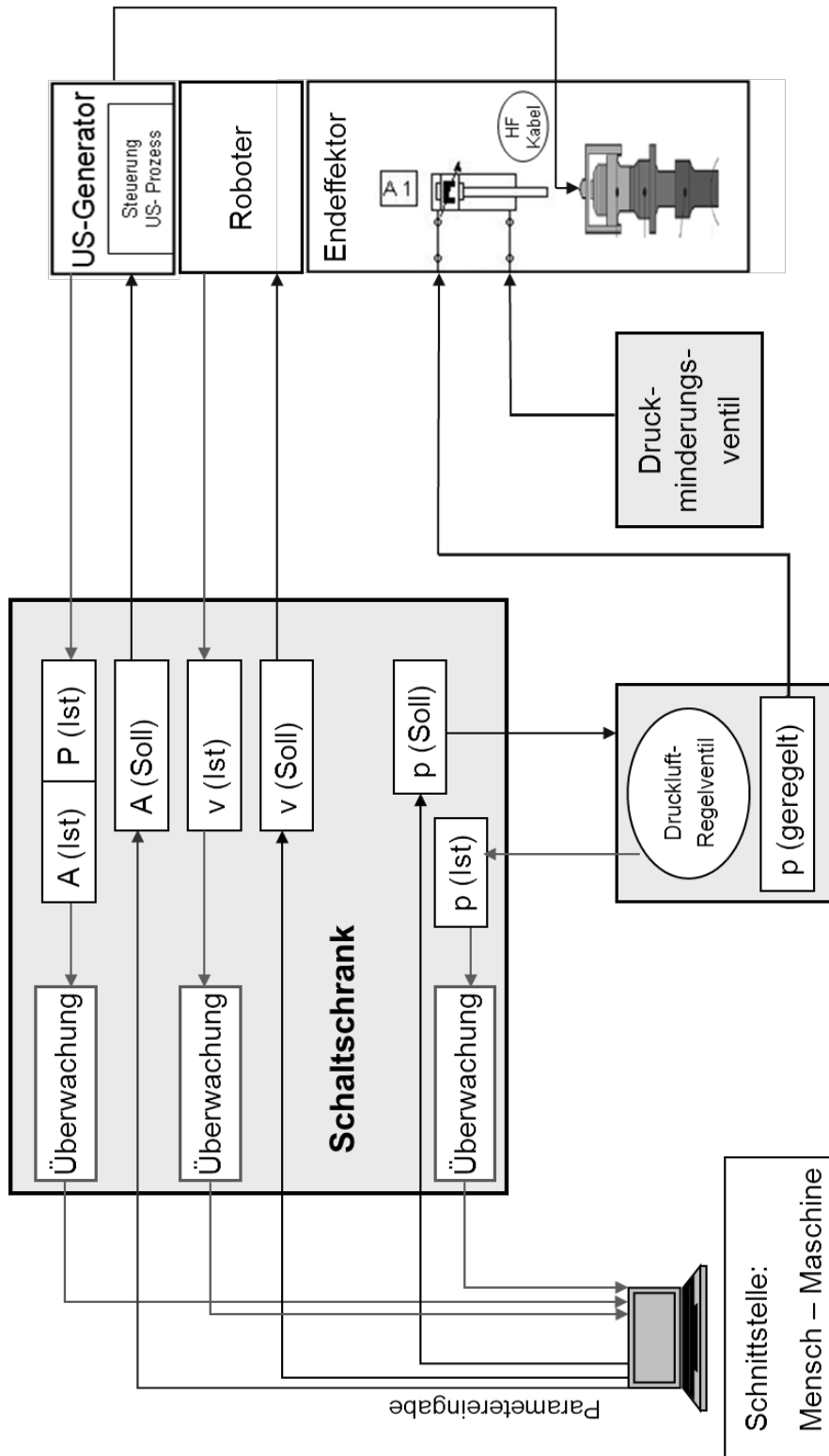
- rials; 27th – 31st July 2009, Edinburgh, UK. London: IOM Communications, 2009, URL: <http://www.iccm-central.org/Proceedings/ICCM17proceedings/Themes/Manufacturing/FLOW%20PROCESS%20IN%20COMP%20MATS/C2.10%20Cheng.pdf>
- [60] Strong, A. B.: Variables interactions in ultrasonic welding of thermoplastic composites. SAMPE Quarterly 21 (1990), H. 2, S. 36-41
- [61] Roberts, R. W.; Jones, R. S.: Fiber walk-out during small-amplitude oscillatory shear of continuous-fibre composites. Composites Science and Technology 58 (1998), H. 6, S. 855-869
- [62] Liu, S.-J.; Chang, I-Ta: Optimizing the Weld Strength of Ultrasonically Welded Nylon Composites. Journal of Composite Materials 36 (2002), H. 5, S. 611-624
- [63] Tipler, P. A.; Mosca, G.: Physik für Wissenschaftler und Ingenieure. 6. Aufl. – Heidelberg: Spektrum, 2009
- [64] Player, J. et al.: UTL Consolidation and out-of-autoclave curing of thick composite structures. In: Revolutionary Materials: Technology and Economics / 32nd International SAMPE Technical Conference, Boston Park Plaza Hotel, Boston, Massachusetts, November 5 – 9, 2000. Convina, Calif. SAMPE 2000, URL:
<http://web.mit.edu/roylance/www/sampe00.pdf>
- [65] Cesarone, J.: Taguchi or DOE? IIE Solutions Issue, November 2001. URL: http://engineeringsolutions.homestead.com/taguchi_article1.html
- [66] UMETRIX AB: MODDE User Guide and Tutorial. Verfügbar online, URL: http://www.umetrics.com/Content/Document%20Library/Files/UserGuides-Tutorials/MODDE_8_UG_Tutorial.pdf (Zugriff: 5.8.2012)
- [67] DIN EN 2563:1997: Kohlenstoffaserverstärkte Kunststoffe: Bestimmung der scheinbaren interlaminaren Scherfestigkeit. Berlin: Beuth, 1997

-
- [68] Airbus S.A.S: Airbus Industries Test Method: AITM 1-0008: Fibre Reinforced Plastics Determination of Plain, Open Hole and Filled Hole Compression Strength. Blagnac Cedex, 2010
- [69] Hinz, B.: Der VARI-Prozess (vacuum assisted resin infusion) für großflächige Luftfahrtbauteile. In: 6. Nationales Symposium SAMPE Deutschland, Stuttgart, 16.-17.03.2000, Stuttgart 2000
- [70] Yamashita, Y. et al.: Effective Thermal Conductivity of Plain Weave Fabric and its Composite Material Made from High Strength Fibers. Journal of Textile Engineering 54 (2008), H. 4, S.111-119
- [71] Herwig, H.: Wärmeübertragung A-Z: systematische und ausführliche Erläuterungen wichtiger Größen und Konzepte. Berlin [u.a.]: Springer, 2000
- [72] VDI-Gesellschaft Verfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen (Hrsg.): VDI-Wärmeatlas. 10. Aufl. Berlin-Heidelberg: Springer, 2006
- [73] Polifke, W., Kopitz, J.: Wärmeübertragung: Grundlagen, analytische und numerische Methoden. 2. Aufl. – München [u.a.]: Pearson Studium, 2009
- [74] Schweiger, M.: Konzeption und Definition zur Integration eines Ultraschall-Schweißkopfes in die Preform-Prozesskette. Rosenheim, Hochschule Diplomarbeit, 2010
- [75] Baumgarten, B.: Petri-Netze - Grundlagen und Anwendungen. 2. Aufl. – Heidelberg: Spektrum, Akademischer Verlag, 1996
- [76] Regner, S.: Entwicklung eines Fertigungskonzeptes zur Herstellung von Faservorformlingen für Luftfahrtbauteile auf Basis der Ultraschall-Schweißtechnologie. München, Techn. Univ., Diplomarbeit, 2010
- [77] Coriolis Composites S.A.S. (Hrsg.): Coriolis Composites: Proven Technologies for advanced processes. Quéven: Coriolis Composites, URL: <http://www.coriolis-composites.com/>, (Zugriff: 08/2011)

- [78] Schieler, O.: Ultraschallschweißen als Preform-Integrationsmethode für die Thermoplast-Zähmodifikation von CF/EP-Verbunden. Kaiserslautern, Institut für Verbundwerkstoffe, Diplomarbeit, 2011
- [79] Bruckbauer, P.: Integration der Zähmodifikation in die automatisierte Prozesskette von Faservorformlingen für CFK-Luftfahrtstrukturbauteile. München, Techn. Univ., Diplomarbeit, 2011
- [80] Hufenbach, W. (Hrsg.): Textile Verbundbauweisen und Fertigungstechnologien für Leichtbaustrukturen des Maschinen- und Fahrzeugbaus. Dresden: SDV – Die Medien AG, 2007

Anhang

A1: Einbindungsschema des Endeffektors in die Roboterzelle



Anhang A2: Datenblatt Carbonfaser „Toho Tenax HTS/HTA“


TEIJIN

 Delivery programme and characteristics for
 Tenax® HTA / HTS filament yarn

Brand name		Tenax®	Tenax®	Tenax®	Tenax®	Tenax®
Production site		J	J / E	J / E	E	E
Fiber family & tensile properties		HTA40	HTA40	HTA40	HTS40	HTS40
Sizing properties		H15 / F15	E13	E13	F13	F13
Number of filaments		1K	3K	6K	12K	24K
Nominal linear density ¹⁾	[tex]	67	200	400	800	1600
Twist	[t/m]	15S	0/15Z	0/10Z	0/10Z	0/5Z
Running length per kg	[m/kg]	15000	5000	2500	1250	625
Package weight, net	[kg]	0,5	1/2	2/4	2/4/6	2/4/6/8

1) without sizing

Characteristics (typical values)		HTA	HTS
Filament diameter	[µm]	7	7
Density	[g/cm ³]	1,76	1,77
Tensile strength	[MPa]	3950	4300
Tensile modulus	[GPa]	238	240
Elongation at break	[%]	1,7	1,8
Specific heat capacity	[J/kgK]	710	710
Thermal conductivity	[W/mK]	17	17
Coefficient of thermal expansion	[10 ⁻⁶ /K]	-0,1	-0,1
Specific electrical resistance	[Ω cm]	1,6 x 10 ⁻³	1,6 x 10 ⁻³

Sizing properties for fiber family HTA / HTS

HTA and HTS are the classic Tenax® high performance carbon fiber yarn types. These high tenacity (HT) fibers provide excellent mechanical laminate properties.

- E13 = Type with ca. 1,3 % sizing based on epoxy resin
- F13 = Type with ca. 1,0 % sizing based on polyurethane
- F15 = Type with ca. 2,5 % sizing based on polyurethane
- H15 = Type with ca. 2,5 % sizing based on epoxy resin

Please contact our sales team any time for choosing the right type. The stated numbers are typical values. For design purposes please request fiber specification.

Please note the application (aerospace or industry & sports) on your order.

The export or transfer of carbon fibers can be subject to authorization, depending on end-use and final destination.

Anhang A3: Auszüge aus der Produktinformation zum Carbon-Biaxial-Gelege „Eurocopter Standard ECS 6090“

1	2	3	4	5	6	7	8
	Standard-designation	Material designation see §6.2	Binding / knotting structure ³⁾	Fibre	Sewing thread	Avivage	sizing

1	ECS6090-3105	[C,125,-45°//C,125,+45°][PES,4,L][X] ²⁾	Franse ¹⁾	HTS 800tex f12000 t0	PES 48 dtex SC	tbd.	5631
2	ECS6090-3106	[C,125,+45°//C,125,-45°][PES,4,L][X] ²⁾	Franse ¹⁾	HTS 800tex f12000 t0	PES 48 dtex SC	tbd.	5631
3	ECS6090-3107	[C,125,-45°//C,125,+45°][PES,6,L][X] ²⁾	Tricot-Loop	HTS 800tex f12000 t0	PES 48 dtex SC	tbd.	5631
4	ECS6090-3108	[C,125,+45°//C,125,-45°][PES,6,L][X] ²⁾	Tricot-Loop	HTS 800tex f12000 t0	PES 48 dtex SC	tbd.	5631

5	ECS6090-3109	[C,125,+60°//C,125,-60°][PES,4,L][X] ²⁾	Tricot	HTS 800tex f12000 t0	PES 48 dtex SC	tbd.	5631
6	ECS6090-3110	[C,125,-60°//C,125,+60°][PES,4,L][X] ²⁾	Tricot	HTS 800tex f12000 t0	PES 48 dtex SC	tbd.	5631

7	ECS6090-3111	[C,125,90°//C,126,0°][PES,6,L][X] ²⁾	Tricot-Loop	HTS 800tex f12000 t0	PES 48 dtex SC	tbd.	5631
---	--------------	---	-------------	----------------------	----------------	------	------

- 1) warp (English translation for Franse) is mentioned on English written data sheets
- 2) [X] is the identification of the multi-axial multi-ply fabric by manufacturer. [X] is given in the relevant ECS-L annex.

1	2	3	4	5	6	7	8
	Standard-designation	Fibre volume content standardised ²⁾	Cured Ply Thickness standardised ³⁾	Tensile Modulus multilayer	Tensile strength multilayer	ILSS	Bending test
Unit		%	mm	GPa	MPa	MPa	MPa
Reference document				EN 2561	EN 2561	EN2563	EN14125

Type of test ¹⁾				Q	Q	Q, A	Q, A
Quantity of specimen per test range				10 ⁴⁾	10 ⁴⁾	10 ⁷⁾	10 ⁷⁾
Test specimen				S-K-1.3 ⁵⁾	S-K-1.3 ⁵⁾	⁸⁾	S-K-4.1 ⁵⁾
1	ECS6090-3105	60	0,25 ± 0,04	68 ± 8 ⁶⁾	600 ⁶⁾	tbd.	tbd.
2	ECS6090-3106	60	0,25 ± 0,04	68 ± 8 ⁶⁾	600 ⁶⁾	tbd.	tbd.
3	ECS6090-3107	55	0,27 ± 0,02	68 ± 8 ⁶⁾	600 ⁶⁾	tbd.	tbd.
4	ECS6090-3108	55	0,27 ± 0,02	68 ± 8 ⁶⁾	600 ⁶⁾	tbd.	tbd.

5	ECS6090-3109	55	0,27 ± 0,02	68 ± 8 ⁶⁾	600 ⁶⁾	tbd.	tbd.
6	ECS6090-3110	55	0,27 ± 0,02	68 ± 8 ⁶⁾	600 ⁶⁾	tbd.	tbd.

7	ECS6090-3111	55	0,27 ± 0,02	68 ± 8 ⁶⁾	600 ⁶⁾	tbd.	tbd.
---	--------------	----	-------------	----------------------	-------------------	------	------

- 1) Q = Qualification test
A = Acceptance test
- 2) Standardised fibre volume content (FVC) for column 4, 5, 6, theoretically evaluated
- 3) Effective FVC and ply thickness are conditional to process-parameters, theoretically evaluated
- 4) In each fibre direction

Anhang A4: Datenblatt Carbon-UD-Band „SGL SIGRATEX KDU 1002“

TECHNISCHES DATENBLATT

SIGRATEX KDU 1002/2,5

Gewebeart:	Carbonband unidirektional
Gewicht:	320 g/m²
Banddicke:	0,37 mm
Bindung:	Leinwand (Glashilfskettfaden und Polyesterhalteschuß)
Faserart:	Carbon - 6 K – 400 tex
Fadenzahl:	16
Rollenlänge:	250 m
Breite:	2,5 cm

Anhang A5: Datenblatt „SAERTEX S2-Glasfaser-Biaxial-Gelege“



SAERTEX® GmbH & Co. KG

Brochterbecker Damm 52
 D-48369 Saerbeck
 phone: ++49/2574/902-0
 fax: ++49/2574/902-209
 e-mail: info@saertex.com

ABNAHMEPRÜFZEUGNIS

(EN 10204-3.1-b)

KUNDE: Eurocopter Deutschland GmbH
 SAERTEX-ARTIKEL-NR.: V100519-00300-01270-000000
 0
 ARTIKEL-BEZEICHNUNG: BIDIAGONAL-S2-GLAS-GELEGE
 DISPOSITIONS-NR.: 11620/01
 LIEFERSCHEIN-NR.: 484736
 SAERTEX-AUFTRAGSBESTÄTIGUNGS-NR.: 382079
 KUNDEN-ARTIKEL-NR.: 0
 KUNDEN-BESTELL-NR.: Muster
 LIEFERMENGE: 50,00 lm
 BREITE: 1270 mm

ARTIKELAUFBAU

KONSTRUKTION	FLÄCHENGEWICHT [g/m ²]	TOLERANZ [+/-%]	MATERIAL
+45°	150	5	66tex agy S2-Glas
-45°	150	5	66tex agy S2-Glas
Nähfaden	12	5	PES

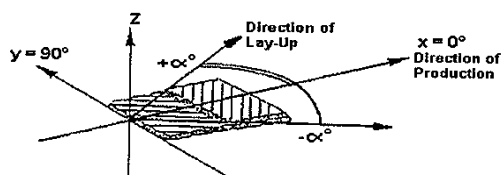
Stabilisierung in 0° (S2-Glas 66tex) und 90° (S2-Glas 66tex)

NÄHBINDUNG: Franse

GESAMTFLÄCHENGEWICHT: 316 g/m²

NÄHFEINHEIT: 10

GESAMTTOLERANZ: 5,0 %




Fiber-Orientation according EN13473

PRÜFERGEBNISSE

PRÜFMERKMAL	MINDESTWERT	MAXIMALWERT	MITTELWERT
FLÄCHENGEWICHT [g/m ²]	300	332	316

Anhang A6: Datenblatt Carbon-Gewebe „HEXCEL G939“



HexForce® G0939 D 1260 TCT

TISSU CARBONE HR / HS CARBON FABRIC

Fiche Technique / Product Data

Renfort Textile pour Composites Haute Performance

Textile Reinforcement for High Performance Composite

DEFINITION / DESCRIPTION

Edition 02/2012 / Issue 02/2012

Type de fils <i>Type of yarns</i>	Chaîne / Warp : HTA 5131 3K Trame / Weft : HTA 5131 3K
Masse nominale/ <i>Nominal weight</i>	220 g/m ² 6,49 oz/sqy ²
Armure <i>Weave style</i>	SATIN 4 4H SATIN
Poudrage <i>Powdering</i>	
Traitement <i>Finish</i>	
Largeur standard <i>Standard width</i>	1260 mm 50 in

CARACTERISTIQUES / CHARACTERISTICS

Contexture nominale <i>Nominal construction</i>	Chaîne / Warp : 5,4 fils-yarns/cm Trame / Weft : 5,4 coups-picks/cm
Répartition en masse <i>Weight distribution</i>	Chaîne / Warp : 50 % Trame / Weft : 50 %
Epaisseur / <i>Thickness (*)</i>	mm

PROPRIETE MECANIQUE SUR STRATIFIE* / MECHANICAL PROPERTIES ON LAMINATE*

Mise en oeuvre (60 min à 120°C, vide 0,85 bar, pression 3 bars) / Cure cycle (60 min at 120°C, vacuum 0,85 bar, pressure 3 bars)

	Traction chaîne <i>Warp tensile</i>	Flexion chaîne <i>Warp flexural</i>	C.I.L. chaîne <i>Warp I.L.S.S.</i>
Contrainte / <i>Streght (Mpa)</i>			
Module / <i>Modulus (Gpa)</i>			
Normes / <i>Standards</i>			

**Nota: Les valeurs moyennes ci-dessus sont obtenues sur la base d'un stratifié epoxy de 0.22 mm avec 60 % de fibres en volume.

*NB : The above average values are obtained with epoxy laminate of 0.22 mm at 60 % of fibres in volume.

IMPORTANT

Les renseignements contenus dans la présente fiche produit sont fondés sur nos connaissances actuelles et sur les résultats d'essais effectués avec un constant souci d'objectivité. Ils doivent être adaptés à chaque cas particulier. Les performances du produit après utilisation étant liées aux conditions particulières de mise en oeuvre, elles ne sauraient engager notre responsabilité.


All information is believed to be accurate but is given without acceptance of liability. Users should make their own assessment of the suitability of any product for the purpose required. All sales are made subject to our standard terms of sales which include limitations on liability and other important terms.



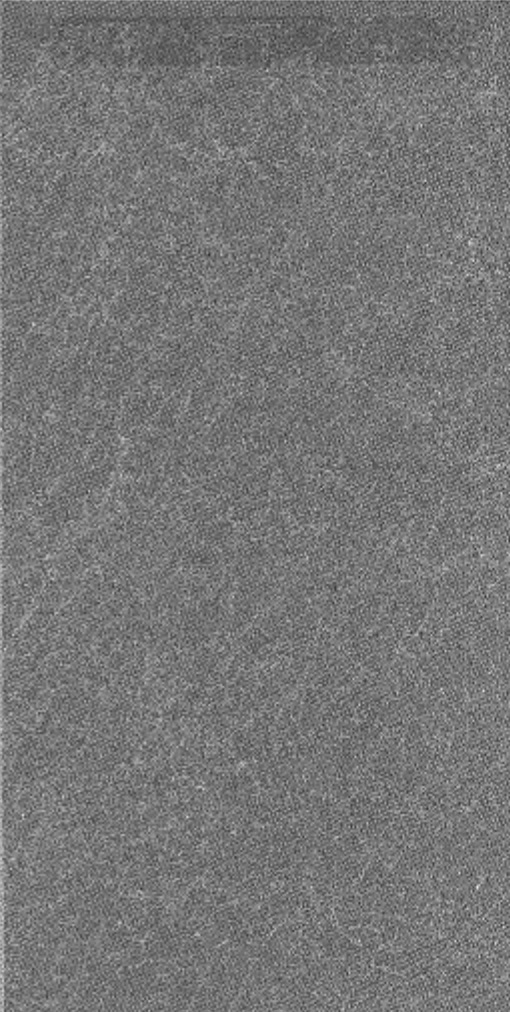
For European sales office telephone numbers
and a full address list please go to:
<http://www.hexcel.com/contact/salesoffices>

© Copyright © Hexcel

Anhang A7: Datenblatt Bindervlies „PA1541“



PA 1541



Technisches Datenblatt


Rohstoff	: Copolyamid
Schmelzbereich °C	: 87 - 100
Empfohlene Temperatur in der Klebefuge °C	: 110 - 130
Wärmebeständigkeit °C	: 95
Weichmacherbeständigkeit	: bedingt
Reinigungsbeständigkeit	: ja
Waschbeständigkeit °C	: 60
Dampfaktivierbar	: ja
Hochfrequenzschweißbar	: ja

PA 1541 ist ein Copolyamid-Klebevlies aus 100% Klebopolymer. Es sind keine Gleitmittel oder andere Additive beigemischt. Dieses Produkt wird bei tieferen Temperaturen aktiviert und hat hervorragende Benetzungseigenschaften auf Textilien, Schäumen, Leder und bewährt sich bestens bei Anwendungen, bei denen eine tiefe Aktivierungstemperatur des Klebers nötig ist. PA 1541 zeigt auch gute Waschbeständigkeit, gute chemische Reinigungsbeständigkeit und ist Hochfrequenz aktivierbar.

Der o.g. Artikel benötigt ca. 48 Stunden nach der Laminierung um seine endgültige Trennfähigkeit zu erreichen. Waschtests und Reinigung sollten entsprechend nach 48 Stunden erfolgen.

Die o.g. Daten sind als Richtwerte anzusehen und wurden durch laborinterne Tests ermittelt, und es überträgt sich die Verpflichtung Prüfungen im eigenen Hause durchzuführen.

09/2007 FS



Service und Vertrieb durch:

Hänzel Verbundtechnik GmbH

Grünwaldweg 11 • 55349 Gerolshausen

Telefon 0 22 71 / 94 01 • Fax 0 22 71 / 45 01 03

Betreute Abschlussarbeiten

Liste der betreuten Abschlussarbeiten mit Bezug zur Promotionsarbeit:

1. Schloder, Veit: „Entwicklung eines Fertigungsprozesses für CFK- Luftfahrtstrukturbauteile auf Basis textiler Preformtechnologie und Ultraschallaktivierung“, Diplomarbeit, Hochschule Rosenheim, Februar 2010
2. Schieler, Oliver: „Ultraschallschweißen als Preform-Integrationsmethode für die Thermoplast-Zähmodifikation von CF/EP-Verbunden“, Diplomarbeit, Universität Kaiserslautern, Dezember 2010
3. Sommer, Benjamin: „Konstruktion und Umsetzung eines Ultraschallfunktionsskopfes zur Verschweißung von Carbonfaser-Vorformlingen für Luftfahrt-Strukturbauteile“, Diplomarbeit, Hochschule Rosenheim, April 2011
4. Bruckbauer, Philipp: „Integration der Zähmodifikation in die auto-matisierte Prozesskette von Faservorformlingen für CFK-Luftfahrtstrukturbauteile“, Masterarbeit, Technische Universität München, August 2011
5. Heller, Klaus: „Erweiterung des Einsatzspektrums eines Ultraschall-Endeffektors zur automatisierten Herstellung von Faserverbundbauteilen“, Bachelorarbeit, Technische Universität München, Oktober 2011