

Technische Universität München
Lehrstuhl für Carbon Composites

Verfahren zur Integration von Folien in den RTM-Prozess (resin transfer molding) für endlosfaserverstärkte Schalteile

Dipl.-Ing. Daniel Philipp Erik Häffelin

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Maschinenwesen der Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktor-Ingenieurs

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Prof. Dr. Rudolf Neu

Prüfer der Dissertation:

1. Prof. Dr.-Ing. Klaus Drechsler
2. Prof. Dr.-Ing. Volker Altstädt

Die Dissertation wurde am 25.07.2016 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät für Maschinenwesen am 03.04.2017 angenommen.

Technische Universität München
Fakultät für Maschinenwesen
Lehrstuhl für Carbon Composites
Boltzmannstraße 15
D-85748 Garching bei München

Tel.: +49 (0) 89 / 289 – 15092

Fax.: +49 (0) 89 / 289 – 15097

Email: info@lcc.mw.tum.de

Web: www.lcc.mw.tum.de

Danksagung

Ich bedanke mich beim Lehrstuhl für Carbon Composites der Technischen Universität München, vertreten durch Prof. Dr.-Ing. Klaus Drechsler und allen Mitarbeitern für die großzügige Bereitstellung eines kreativen und modernen Arbeitsumfeldes und breiter Ideenakzeptanz.

Weiterhin danke ich Prof. Dr.-Ing. Volker Altstädt für die Übernahme der Zweitkorrektur und allen konstruktiven Ergänzungen, die zum Gelingen der Arbeit beigetragen haben.

Ich danke Dipl.-Ing. Paul Bockelmann, Dr. mont. Elisabeth Ladstätter, Dr.-Ing. Mathias Hartmann, Dr. Roland Hinterhölzl, Dipl.-Ing. Philipp Bruckbauer, M.SC. Alexane Margossion, Dr.-Ing. Wolfgang Raffelt und Dipl.-Ing. Swen Zaremba für die jahrelange technische, zeitliche und moralische Unterstützung bis über die Korrekturphase der Arbeit hinaus.

Dieser Arbeit liegt eine dreijährige Forschungsphase zugrunde. Ich bedanke mich beim Ministerium für Bildung und Forschung für die flexible und unbürokratische Förderung dieses Projektvorhabens im Rahmen der Ausschreibung: „Forschung für die Produktion von morgen“ (Verbundprojekt „InFo“, Förderkennzeichen 02PJ2061).

Ich bedanke mich bei den Industriepartnern

- KraussMaffei Technologies GmbH (Krauss-Maffei-Straße 2, 80997 München)
- Dieffenbacher GmbH & Co. KG (Heilbronnerstrasse 20, 75031 Eppingen)
- Roding Automobile GmbH (Weiherhausstr. 2, 93426 Roding)
- Voith Composites GmbH & Co. KG (Daimlerstraße 27, 85748 Garching bei München)
- Senoplast Klepsch & Co. GmbH (Wilhelm-Klepsch-Str. 1, A-5721 Piesendorf)
- Henkel AG & Co. KGaA (Henkelstraße 67, D-50489 Düsseldorf)

für Ihren Projektbeitrag, das entgegengebrachte Vertrauen sowie die ergebnisoffene Diskussionsbereitschaft während der technologischen Ausgestal-

tung und ihrer weitsichtigen Vorausplanung bei der Projektinitiierung. Ich bedanke mich bei allen Mitwirkenden Studenten für ihr großes Engagement und ihrem zielstrebigem Umsetzen.

Zusammenfassung

Faserverbundwerkstoffe zeigen ein Leichtbaupotential auf, das die Transportindustrie wirtschaftlich nutzen möchte. Kosten- und Produktionshürden begrenzen jedoch ihren gegenwärtigen Masseneinsatz. Homogene, gasdichte und duktile Werkstoffhalbzeuge, wie thermoplastische Folien weisen eine vergleichsweise hohe Massentauglichkeit auf und werden in zahlreichen Industriesegmente zur Handhabung von Gütern ohne feste Oberfläche oder zur Oberflächenveredelung eingesetzt. Vorliegende Arbeit verfolgt den Grundgedanken, das Leichtbaupotential von Faserverbundwerkstoffen mit der Massentauglichkeit thermoplastischer Folien zu kombinieren, um die Potentiale der Materialklasse für zusätzliche Anwendungen zugänglich zu machen.

Der gewählte Lösungsansatz basiert auf der gemeinsamen Drapierung des Fasermaterials mit der Folienformung im Injektionsgesenk. In einer frühen Phase der Produktion umhüllt die Folie das trockene Fasermaterial. Beides bildet somit ein ebenes Zwischenprodukt. Dieses wird umgeformt, zwischen die Folien wird eine duroplastische Matrix injiziert und die Folie in deren Härtingsprozess dauerhaft angebunden. Die Folie verbleibt auf der Außenseite des Bauteils und führt in funktionalisierter Form zum gesteigerten Gebrauchswert.

In experimentellen Untersuchungen werden notwendige Einzellösungen wie gemeinsame Matrixverarbeitung, Folienformung, Faserdrapierung, Folienanhaftung und das daraus resultierende Leichtbaupotential erarbeitet. Diese Einzellösungen werden zur Prozesskette verknüpft. Diese Prozesskette wird an einem automobilen Exterieurbauteil umgesetzt, ein Demonstrator gefertigt und seine Oberflächeneigenschaften untersucht. Eine Betrachtung der gesteigerten Gebrauchsfertigkeit hinsichtlich einer Oberflächenveredelung derart gefertigter Schalenteile findet auf Basis der entwickelten Gesamtprozesskette statt.

Abstract

Carbon fiber reinforced composites offer lightweight potential the transportation industry aims to exploit. Cost- and manufacturing restrictions limit its current use for high volume production. Homogeneous, gastight and ductile wrought materials, like thermoplastic films are suitable for mass-production, widely used in various industrial applications, e.g. handling products without a rigid surface or to increase their appearance. The thesis's guiding idea is based on the fusion of the fibers lightweight potential with the production qualities of the thermoplastic films to access the material potential for additional applications.

The selected approach aims for a combined draping of fibrous material with the forming step of films in one tool. Thermoplastic films envelope a flat stack of dry fiber materials in an air tight manner and is stabilized during transportation by evacuating the encased space. Film and fiber material is three-dimensionally re-shaped and a reactive polymer system is injected into the film package, saturating the fiber material. During cure, adhesion between film and matrix builds up. The functionalized film is permanently bond to the part, increasing its usability.

The process design is derived from a bionic inspired layout strategy, in which current trends in process development are reflected. Design requirements, concerning film adhesion, matrix processing, film forming and lightweight potential are investigated. They lead to a single production step, according to the layout.

The resulting process chain is characterized by a surface material, that satisfies multiple process-functionalities, when integrated in an early stage of production. Based on automotive body panels, described process chain is realized. Experiments, focusing on forming and surface quality, were carried out and confirm the design.

Inhaltsangabe

1. Einführung	1
2. Grundlagen und Stand der Technik	7
2.1. RTM-Prozesskette.....	7
2.1.1. Fertigung des Fasereinlegers (Preform)	9
2.1.2. Faserdrapierung	10
2.1.3. Faserfixierung	15
2.1.4. Handhabung.....	16
2.1.5. Zusammenführung Matrix & Faser	17
2.1.6. Werkzeug.....	20
2.2. Oberflächenveredelung	22
2.3. Thermoplastische Folien.....	24
3. Verwendete Geräte und Verfahren	28
3.1. Verfahren der Entwicklung.....	28
3.1.1. VDI 2221	28
3.1.2. 9-Felder-Methode	29
3.2. Thermisch / Mechanisch Messung	30
3.2.1. Dynamische Differenz-Thermoanalyse (DSC)	30
3.2.2. Dynamisch mechanische Analyse (DMA).....	31
3.2.3. Zugprüfung	32
3.2.4. Biegeprüfung	33
3.2.5. Schälwiderstand.....	34
3.3. Konfokales Mikroskop	35
3.4. Chemische Untersuchung	38
3.5. Rechnergestützte Verfahren.....	40
3.5.1. Statistik	40
3.5.2. Kinematische Drapier-Simulation	41
3.5.3. Numerische Modellierung thermischer Effekte	42
4. Prozessauslegung	44
4.1. Zielplanung	44
4.2. Konzeption.....	46
4.2.1. Zusammenführung Thermoplast- und Faserverbundverarbeitung	47

4.2.2.	Randbedingung der Konzeption	49
4.2.3.	Zusammenfassung Konzeption.....	57
4.3.	Prozessbeschreibung.....	58
4.3.1.	Diaphragma-Formung.....	63
4.3.2.	Doppel-Diaphragma-Formung	64
4.3.3.	Press-Formung.....	65
4.4.	Zusammenfassung zur Prozessauslegung.....	66
5.	Untersuchungen der Prozesskette	68
5.1.	Voruntersuchungen zur Anlagenentwicklung	68
5.1.1.	Numerische Modellierung thermischer Spannung/ Faserabzeichnung	69
5.1.2.	Voruntersuchung zur Matrix	83
5.1.3.	Voruntersuchung Folienhaftung	89
5.1.4.	Voruntersuchung: Effekte der Folienaufheizung	102
5.1.5.	Voruntersuchung mechanischer Eigenschaften.....	107
5.1.6.	Zusammenfassung der Voruntersuchungen	112
5.2.	Aufbau Versuchsanlage	113
5.2.1.	Bauteilgeometrie, Werkzeugauslegung.....	113
5.2.2.	Werkzeugaufbau	116
5.2.3.	Heizstrahler.....	120
5.3.	Umformung.....	122
5.3.1.	Teillösung zur Mechanik der Umformung.....	124
5.3.2.	Teillösung Thermodynamik der Umformung	135
5.3.3.	Überlagerung der Teillösungen	140
5.4.	Einflüsse auf die Bauteiloberfläche	141
5.4.1.	Versuchsaufbau / Faktoren / Faktorstufen.....	142
5.4.2.	Beobachtung	146
5.4.3.	Diskussion.....	146
5.4.4.	Vergleich Messung – numerisches Modell	157
5.4.5.	Oberflächeneffekte außer Faserabzeichnung	159
5.4.6.	Zusammenfassung Oberflächeneffekte	161
5.4.7.	Kosten / Nutzen	163
6.	Zusammenfassung und Ausblick	168
6.1.	Zusammenfassung.....	168
6.2.	Ausblick	171

A. Anhang	173
a. Betreute studentische Arbeiten	173
b. Anhang	175
B. Literaturverzeichnis	190

Nomenklatur

Formelzeichen	Einheit	Kurzbezeichnung
α	[1]	Aushärtegrad, Verhältnis freigewordener Reaktionsenthalpie zur Gesamtenthalpie des Harzsystems
$\dot{\alpha}$	$\frac{1}{s}$	Reaktionsrate, Änderungsrate des Aushärtegrades
K	m^2	Permeabilität
η	$\frac{Ns}{m^2}$	Viskosität
α_T	$\frac{1}{K}$	Thermischer Ausdehnungskoeffizient
ρ	$\frac{kg}{m^3}$	Dichte
E	$\frac{N}{m^2}$	Modul
G	$\frac{N}{m^2}$	Schubmodul
p	$\frac{N}{m^2}$	Druck
T	K	Temperatur

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Bezeichnung
2D	zweidimensional
ABS	Acrylnitril-Butadiene-Styrol-Copolymer
ASA	Acrylnitril-Styrol-Acrylester-Copolymer
BIW	Body In White, engl. Begriff für Fahrzeugrohkarosserie vor Oberflächenveredelung
CTE	engl. coefficient of thermal expansion, Ausdruck: Wärmeausdehnungskoeffizient
LCM	eng. liquid composite molding, deutsch: Form der Faserverarbeitung auf Basis von Flüssigkeitsinfusions- oder Flüssigkeitsinjektionsverfahren
PAN	Polyacrylnitril
PMMA	Polymethylmetacrylat
PUR	Polyurethan
QI	quasiisotrop
REM	Raster-Elektronen-Mikroskop
RTM	Engl. Akronym: resin transfer molding, (deutsch: Harz-Transfer-Prozess, Harzfront verläuft entlang des Bauteils)
DU	Unidirektional
VARTM	engl. Akronym: Vacuum Assisted RTM
ZfP	Zerstörungsfreie Prüftechnik

1. Einführung

Die automatisierte Fertigung von Schalteilen auf Basis einer Faserverbundtechnologie für den automobilen Leichtbau ist das Thema der vorliegenden Arbeit. Sie gliedert sich dabei (Abb. 1) in einem ersten Teil in Einleitung, Stand der Technik und verwendeter Geräte und Verfahren. In zwei darauffolgenden Kapiteln wird das verwendete Lösungskonzept dargestellt und seine Umsetzung mit Eigenschaften beschrieben. Diese beiden Kapitel sind eng miteinander verknüpft, da Kenntnisse der Prozessauslegung aus Voruntersuchungen stammen und Untersuchungen auf Basis der Auslegung vorgenommen werden. Die Ergebnisse und Interaktionen werden anschließend im letzten Kapitel zusammengefasst und diskutiert.

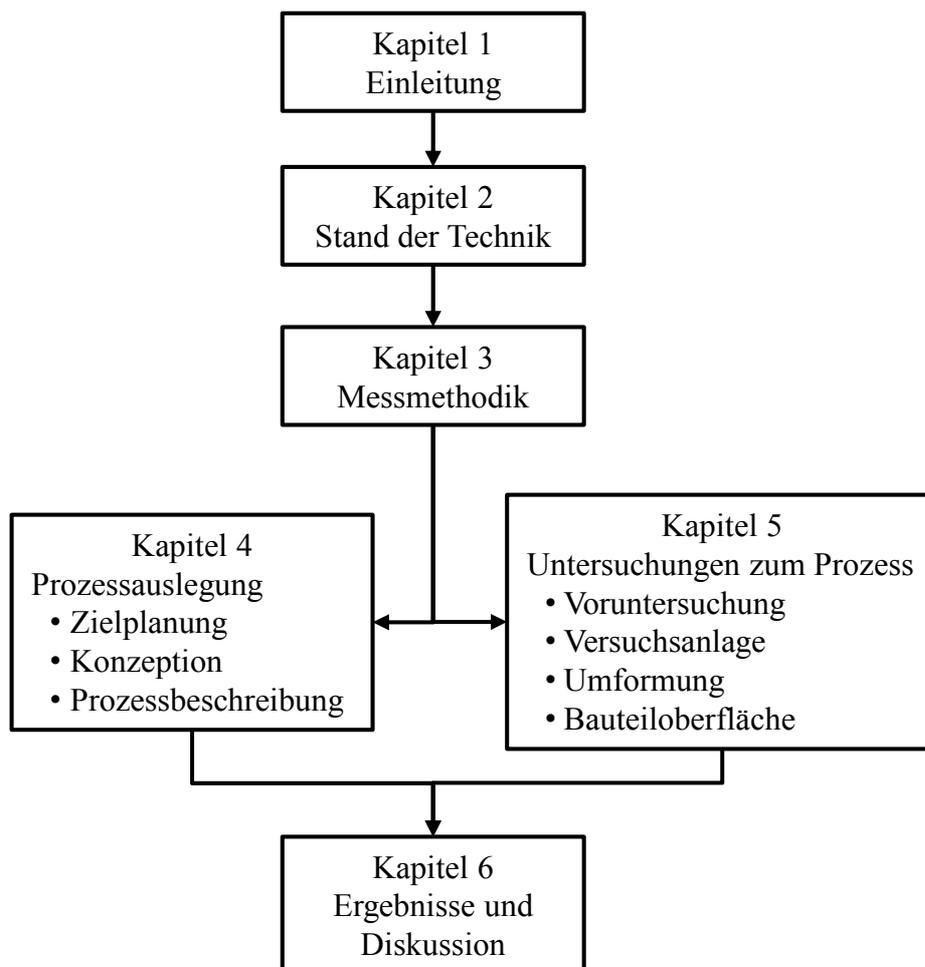


Abb. 1: Gliederung der Arbeit

Thema der Arbeit

Steigende Anforderungen an Nachhaltigkeit und Effizienz von Fahrzeugen sind Treiber des Leichtbaus in der Automobilindustrie. Neue Materialien mit hohem Leichtbaupotential werden auf ihre Fähigkeit hin untersucht, bestehende Lösungen zu ersetzen. Zu diesen neuen Materialien zählen Faserverbundwerkstoffe auf Basis von Kohlefasern. Sie weisen eine hohe spezifische Steifigkeit und Festigkeit auf, die das Material gegenüber anderen Werkstoffen auszeichnet. Gleichzeitig wird das Material von einer langen Prozesskette begleitet – die sich mit den Oberflächenanforderungen verlängert. Thermoplastische Folien weisen eine hohe Oberflächenqualität auf und sind in großen Mengen herstell- und verarbeitbar.

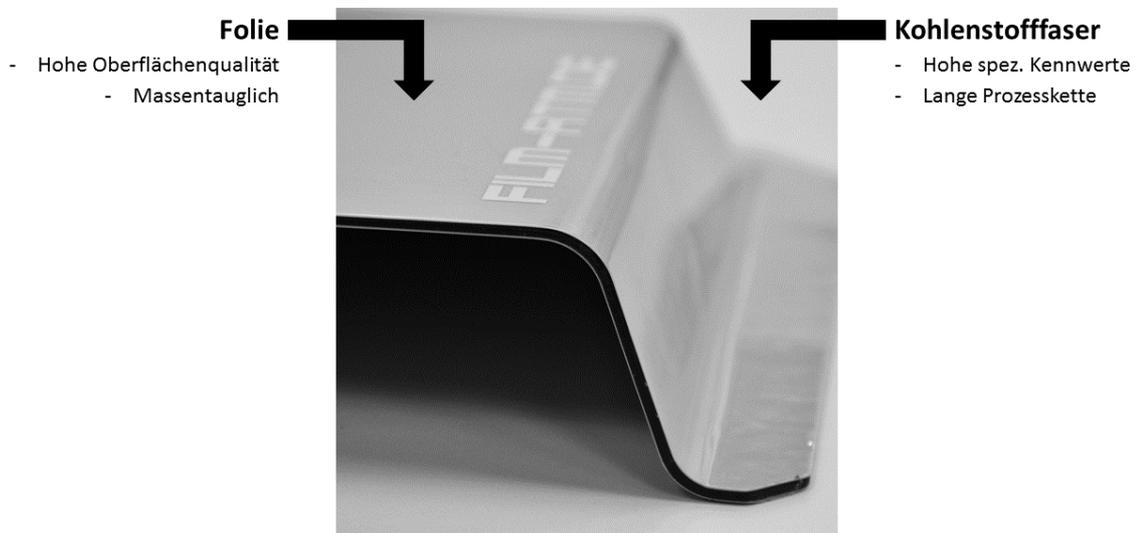


Abb. 2: Ziel der Arbeit

Ziel der Arbeit ist es, das Leichtbaupotential der Kohlenstofffaser mit der Oberflächenqualität der Folie so zu kombinieren, dass die Massentauglichkeit der Folie die bisherige Verarbeitungskette der Endlosfaser kürzt (Abb. 2).

Ausgangssituation

Die Kostenstruktur von Stahl und seine Verfügbarkeit bilden in Kombination mit kostengünstiger fossiler Energie das Mobilitätskonzept des zwanzigsten Jahrhunderts. Jedoch ist die Energieform, also wie dem Fahrzeug Energie zugeführt wird, im Wandel begriffen und mit ihr der Fahrzeugbau [1]. Individuelle Mobilität wird dabei überwiegend von Automobilen be-

reitgestellt, deren vorherrschendes Konstruktionsmittel Stahl ist. Die Verbreiterung/ Diversifizierung der Energiebasis [2] im Verkehr steht im Vordergrund, was bedeutet, dass alternativ zu Diesel- und Ottokraftstoffen vermehrt Energieträger wie Erdgas, Wasserstoff oder elektrische Batterien zum Einsatz kommen (Abb. 3). Eine Auffächerung in unterschiedliche Energieträger führt dabei zur Entwicklung unterschiedlicher Antriebssysteme. Mehrgewicht infolge veränderter Antriebsstränge (Hybridantrieb ~100-150kg; rein elektrische ~250kg [3]) oder Mehrgewicht durch effizienzsteigernde Technologie (Bsp. Start-Stop-Automatik, Rekuperationssysteme, etc. ~50kg [3]) müssen anteilig oder vollständig kompensiert werden, um deren Wirkung im Fahrzeugesamtsystem tragbar zu machen. Eine Gewichtszunahme des Antriebssystems (Bsp. Antriebsbatterie) erfordert die Anpassung im Fahrwerk und der Motorleistung. Um die Auswirkungen einer Gewichtsspirale zu vermeiden, ist eine Massenkompensation an anderer Stelle durch vermehrten Leichtbau erforderlich [3].

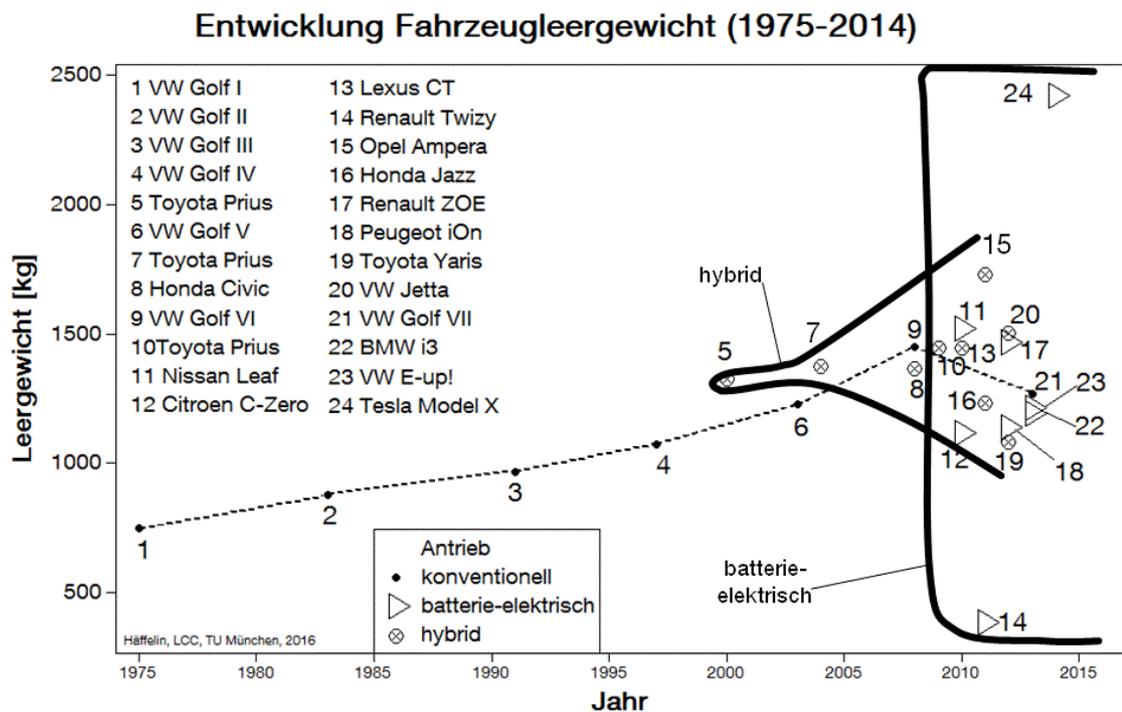


Abb. 3: Entwicklung des Fahrzeugleergewichts (1975-2015)

Leichtbauwerkstoffe im Vergleich

Fahrzeuge bestehen aus einer Zusammenstellung verschiedener Materialien, deren Auswahl eine Abwägung aus Funktionserfüllung, Verfügbarkeit, Herstellbarkeit, Wirtschaftlichkeit und weiteren Aspekten zu Grunde liegt. Aluminium, Magnesium, faserverstärkte Polymere sowie ihre Kombinationsmöglichkeiten auf System-, Bauteil- und Materialebenen erweitern den Leichtbaubegriff im Fahrzeugbau.

Ein günstiges (hohes) Verhältnis aus Leichtbaupotential zu Mehrkosten (Tab. 1) zeigt dabei an, ob bei gleichem Gewicht günstiger oder bei gleichen Kosten leichter gebaut werden kann.

Der Angabe aus Tab. 1 zu Kohlenstofffaserverbundwerkstoffen ist zu entnehmen, dass die wirtschaftlichen Randbedingungen der Verbundwerkstoffe für die Großserie zu verbessern sind.

Tab. 1: Verhältnis Gewichtseinsparung / Kosten geschlüsselt nach Materialien*)

Material	Bauteilgewicht [%]	Kostenfaktor [%]	Leichtbaupotential / Mehrkosten **)
Stahl	100	100	-
Hochfester Stahl	75-95	120-150	0,1-1,25
Aluminium	50-60	150-250	0,27-1
CFK QI	43-48	600-800	0,074-0,114
CFK UD	25	700-900	0,028-0,036

*) Daten zu Bauteilgewicht und Kostenfaktor aus [4]

***) $(100\% - \text{Bauteilgewicht}[\%]) / (\text{Kostenfaktor} - 100\%)$

Eine Ursache für die gegenwärtige Kostenstruktur findet sich in der Länge der Prozesskette [3]; [5]. Die Vorgänge der Verarbeitung sind aufwendig und bestehen aus einer Aneinanderreihung von Lege-, Schneid-, Form-, Fixierungs- und Tränkungsprozessen. Die schnellere und wirtschaftlichere Abfolge dieser Schritte wird angestrebt. Werden Verbundwerkstoffe im Sichtbereich von Fahrzeugen verwendet, ergibt sich eine zusätzliche Produktionshürde durch verbundspezifische Oberflächeneigenschaften.

Anisotrope Verbundeigenschaften in Dickenrichtung der Schalenteile wirken sich negativ auf die Oberfläche aus (Abb. 4). Die Faserbündel werden nebeneinander positioniert und bilden dazwischen Reinharzgebiete. Diese Reinharzgebiete schrumpfen während der Verarbeitung thermisch wie

chemisch stärker als die faserreichen Gebiete und formen dadurch Einfallstellen an der Oberfläche

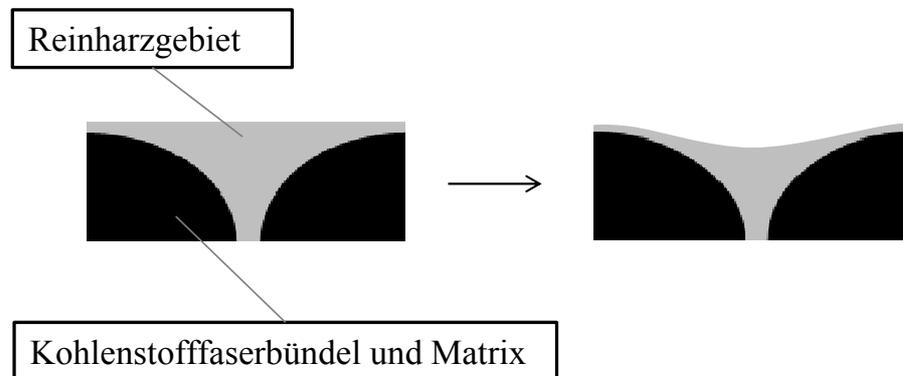


Abb. 4: Auswirkungen der Faseranisotropie auf die Bauteiloberfläche

. Die Faserarchitektur zeichnet sich ab; die dabei gebildeten Einfallstellen sind im Rahmen einer Oberflächenveredelung zu kompensieren. Die daraus resultierenden Aufwendungen, wie beispielsweise der mehrmaligen Lackierung mit Zwischenschliffen, sind hoch und für eine wirtschaftliche Umsetzung im Automobilbau um 50%-90% zu senken [6].

Lösungsansatz der vorliegenden Arbeit

- Reduzierung der Anzahl an Prozessschritten der Verarbeitungskette
- Verbesserung der Oberflächeneigenschaften

durch die Integration thermoplastischer Folien in die Herstellung [7], [8], [9].

Folien sind massentauglich und weisen mechanische Eigenschaften auf, die sich zum Transport und zur Formung von Werkstoffen funktionalisieren lassen. So übernehmen sie in Haushalt und Industrie Aufgaben der Lagerung und des Transportes von flüssigen oder viskosen Produkten, schützen vor Feuchtigkeit und Verschmutzung. Diesbezügliche Vorzüge thermoplastischer Folien sollen auf die Verarbeitungseigenschaften von flächigen und textilen Verstärkungsfasern Anwendung finden, die selbst keine gasdichte und geschlossene Oberfläche bilden. Gleichzeitig besitzen Folien eine Eigensteifigkeit und somit einen Widerstand gegen Deformation. Dieser Widerstand soll der lokalen Ausformung von Reinharzgebieten zu Einfallstellen entgegenwirken und einen kaschierenden Effekt auf die Faserabzeichnung entfalten.

Diese Arbeit beschäftigt sich somit im Allgemeinen mit der Handhabung, Formgebung und Verarbeitung von trockenen Kohlenstofffasern zu Schalentteilen der Automobilindustrie und im Speziellen mit der Kaschierung der Faserabzeichnung an der Verbundoberfläche mittels geformter und dauerhaft angebundener thermoplastischer Folien. Die Arbeit ist in zwei Teilbereiche eingeteilt: Im ersten Teilbereich wird eine Prozesskette erarbeitet, die die Handhabung des Fasermaterials durchgängig mit Folien ermöglicht; im zweiten werden die Einflüsse der Folie auf die Faserabzeichnung untersucht. Übergeordnetes Ziel ist der Zusammenschluss aus Masentauglichkeit und Oberflächenqualität des Folienmaterials mit dem Leichtbaupotential von Kohlenstofffaserverbundwerkstoffen.

2. Grundlagen und Stand der Technik

Der Stand der Technik beschreibt die Technologien, auf denen die vorliegende Arbeit ansetzt. Der verfolgte Ansatz zur gemeinsamen Verarbeitung von Folien mit trockenen Fasern und anschließender Konsolidierung ist der Prozesstechnik zuzuordnen. Allgemein werden hier für die duroplastische Verbundverarbeitung zwei Technologien unterschieden:

- Prepreg-Technologie: Ebene und teilgehärtete Zwischenprodukte aus Matrix und Faser werden in Schichten in Bauteilgeometrie gebracht und anschließend gehärtet
- Liquid-Composite-Molding-Technologie (LCM): Trockene Fasern werden in Bauteilgeometrie gebracht und in diesem Zustand mit der Matrix zusammengeführt

Als Ausgangspunkt der Faserverbundverarbeitung für die Fahrzeugindustrie eignen sich Verfahren mit hohem Automatisierungsgrad, hohem Mas sendurchsatz, geringer Aufwendung an Hilfsstoffen und kurzer Zykluszeit. LCM-Technologien (liquid composite molding) werden daher näher betrachtet. Das als RTM (resin transfer molding) bekannte Verfahren ist Teil der LCM-Technologie und bildet die technologische Basis.

2.1. RTM-Prozesskette

Der Konsolidierungsprozess ist ein Teilschritt bei der Herstellung des Faserverbundwerkstoffes und beschreibt die Zusammenführung von Matrix und Faser zum Rohbauteil. Das RTM-Verfahren bezeichnet einen Konsolidierungsschritt, in dem ein flüssiges Polymer unter Druck die poröse Faserstruktur durchdringt und anschließend im Werkzeug härtet.

Es zeichnet sich durch die Verwendung beidseitig fester Formhälften (Abb. 5) aus und ist in der Literatur [10], [11], [12], [13] umfassend beschrieben.

Flüssigkeiten bewegen sich unter Einwirkung von Druckgradienten. Somit muss während der Tränkungsphase eine Druckdifferenz zwischen Start- und Endpunkt des Matrixflusses vorherrschen. Je nach technischer Ausgestaltung wird der Einlassbereich der Matrix zur Faser flächig (Spalt-RTM), punkt- oder linienförmig gewählt.

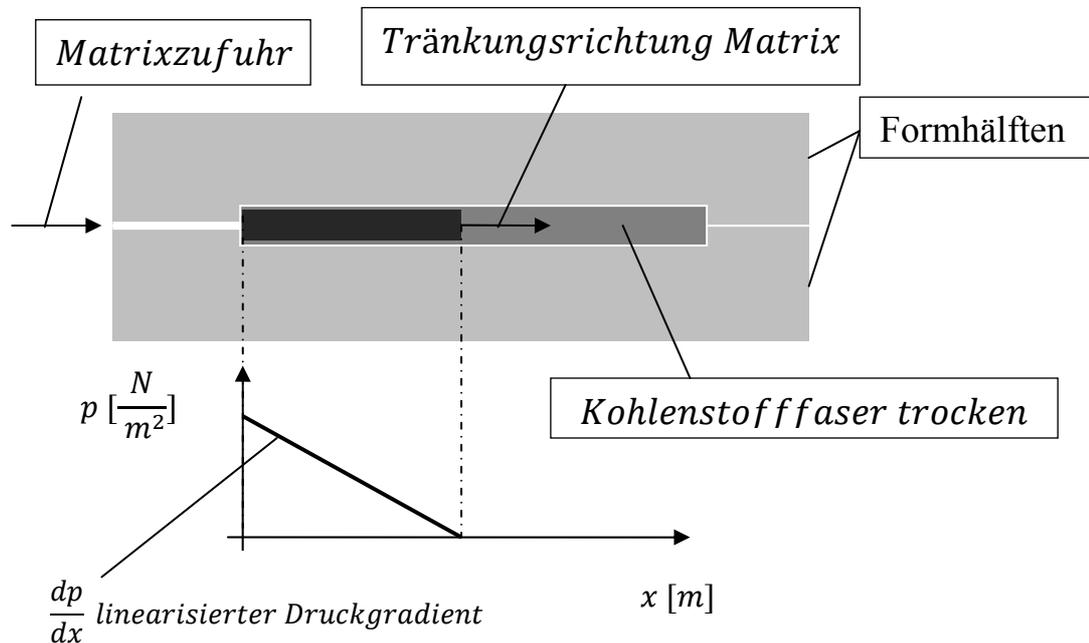


Abb. 5: Schematische Darstellung des RTM-Prozess

Beidseitig feste Formhälften ermöglichen einen hohen Druckgradienten [14] und damit die Injektion der Matrix in trockenes Faserhalbzeug mit Überdruck. Dies erhöht die Fließgeschwindigkeiten und reduziert die Zykluszeit. Eine weitere Untergliederung der Prozesskette (Abb. 6) kann in die Teilbereiche zur Herstellung der Fasereinleger und den Teilbereich zur Konsolidierung mit Nacharbeit erfolgen.

In der Automobilindustrie werden Faseranteile vorwiegend als vorgeformte und transportstabile Einlegeeinheiten zugeführt (Preforms). Reaktive und flüssige Matrix wird aus den Grundkomponenten gemischt, homogenisiert und anschließend von der Angusstelle durch das Fasermaterial bis zur Abgusstelle durch das Werkzeug transferiert.

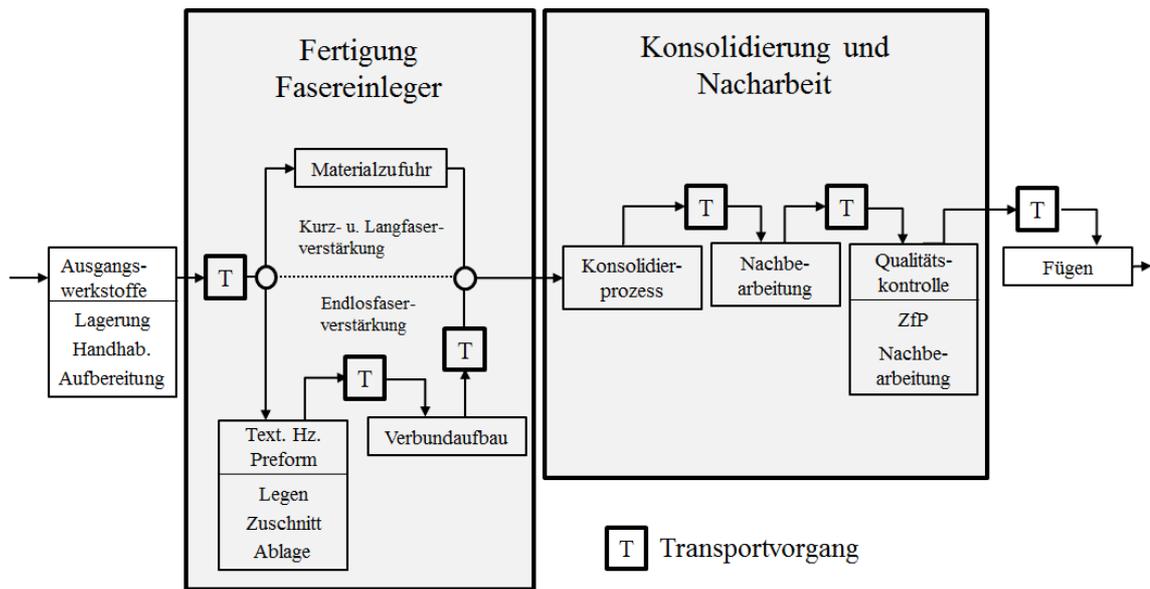


Abb. 6: Prozesskette Faserverbundverarbeitung nach [5]

In Abb. 6 sind die Einzelschritte des RTM-Prozesses dargestellt. Dieser wird von einer Reihe von Faktoren (Anhang Tab. 23) beeinflusst, die Auswirkung auf Bauteilqualität und Zykluszeit haben. Füllbarkeit bei kurzer Zykluszeit, geringe Ausschussquoten und sparsamer Ressourceneinsatz (Schließkraft/ Verschnitt) steht bei der Auswahl von Parameterkombinationen des RTM-Prozesses für automobiler Anwendungen im Vordergrund.

2.1.1. Fertigung des Fasereinlegers (Preform)

Fasereinleger entstammen der Notwendigkeit zur raschen Belegung der Injektionskavität. Sie stellen handhabbare Zwischenprodukte aus vorfixierten, orientierten Faserbündeln dar, die in Dimension und Geometrie den Endbauteilen nahe kommen und als Einheit dem Konsolidierungsprozess zugeführt werden können. Im Zusammenhang mit der Fertigung von dreidimensionalen Schalenteilen findet u.a. die Verwendung von ebenen Faserhalbzeugen, Fasergelegen und Fasergeweben Anwendung. Verfahren wie das Legen, Wickeln oder Flechten einzelner Faserbündel werden hier nicht weiter betrachtet.

Der Fertigungsablauf der Fasereinleger aus ebenen Halbzeugen kann in drei Teilschritte gegliedert werden. In einem ersten Teilschritt, der Drapierung, wird das Fasermaterial positioniert/ orientiert, in einem zweiten Schritt werden die Fasern untereinander zur verbesserten Transportstabilität

vorfiziert, um in einem dritten Schritt, der Handhabung, transportiert zu werden.

2.1.2. Faserdrapierung

Ausgehend von ebenen Faserhalbzeugen (Zusammenführung einer Mehrzahl an Faserbündeln zu einem ebenen textilen Zwischenprodukt), die als Stapel oder als einzelne Lagen zugeführt werden, besteht das Ziel der Drapierung darin, diese in eine endgeometrienaher Form zu überführen. Nachfolgend beschriebene Effekte im Fasermaterial sowie dem Stand der Technik zu entnehmende Mechanismen der Drapierung bilden den Ausgangspunkt der folienbasierten Formgebung des Faserhalbzeuges.

Faserscherung

Ein Effekt, der bei der dreidimensionalen Drapierung auftritt, ist die Faserscherung [15]. Bei der Verwendung von Biaxial-Gelegen (am Beispiel des Aufbaus nach Tab. 27) sind im ebenen Ausgangszustand die beiden Faserlagen in einem Winkel von 90° zueinander angeordnet. Somit bilden jeweils 2 parallele Faserstränge beider Richtungen über ihren Abstand zueinander ein rechtwinkliges Viereck. Unter der Annahme, dass die Kantenlänge des betrachteten Vierecks während der Drapierung (durch Ihre Vernähung) unverändert bleibt, deformiert sich das Viereck im Drapierungsvorgang einer doppelt gekrümmten Fläche zur Raute. Der Winkel zwischen den Faserbündeln der Lagen reduziert sich und nimmt in Abhängigkeit der Umformung einen Winkel unterhalb von 90° an. Es kommt zur Scherung. Durch die lokale Verknüpfung einzelner Punkte von Ober- und Unterseite des Geleges, beispielsweise an der Einstichstelle eines Nähfadens, sind Gelege in der Ausbildung der Deformation zur Raute begrenzt. Zwischen den Endpunkten der abnehmenden Diagonale befinden sich Fasern einer endlichen Ausdehnung. Der Abstand zwischen den Fasern reduziert sich und führt zu einem Anstieg der Kraft, die zur weiteren Scherung des Faserhalbzeuges notwendig ist. Testmethoden zur Erfassung des Faserverhaltens unter Schereinfluss umfassen u.a. den „*bias test*“ auf Basis einer einachsigen Zugbelastung eines zweiseitig eingespannten Faserstreifens und den „*picture frame test*“ auf Basis einer vierseitigen Fasereinspannung eines Fasermaterials unter diagonaler Zugbelastung [16]. Der Scherwiderstand des Fasermaterials ist von der Art der Vernähung abhängig [17], wie in Abb.

97 (Anhang) ersichtlich ist. Eine Vernähung mit kurzen Abständen zwischen den Einstichstellen und hoher Fadenspannung erhöht den Scherwiderstand [17].

Kann im Vorgang der Drapierung der Scherwiderstand des zugehörigen Faserwinkels nicht überwunden werden, wird die eingebrachte Umformenergie nicht vollständig in Scherwiderstand und Faserverschiebung abgebaut und es bilden sich Fehler, wie beispielsweise Falten, aus. Eine Reduzierung des Scherwiderstandes durch eine Vernähung mit geringerer Fadenspannung oder größerer Stichweite führt zwar zur besseren Drapierbarkeit des Fasermaterials, reduziert jedoch die Handhabbarkeit und Kontrolle über die Position einzelner Faserbündel. Bei zu großer Abstandswahl der Einstichstellen entstehen in Bereichen starker Umformung Abstände zwischen den Faserbündeln, die im nachfolgenden Tränkungsprozess zu Reinharzgebieten führen. In nachfolgenden Untersuchungen der Drapierwirkung mittels Folien ist eine generelle Drapierbarkeit des Fasermaterials durch die Abstimmung der Faser-Näharchitektur auf die zu untersuchende Geometrie hin sicherzustellen.

Faserreibung und Fasersteifigkeit

Neben der geometrisch bedingten Scherwinkelausbildung nehmen Reibungseffekte auf die Drapierung Einfluss [18]. Reibung entsteht beim Abgleiten der Fasern

- innerhalb des Halbzeuges,
- zwischen den Lagen bei der Drapierung eines Faserstapels und
- zwischen dem Fasermaterial und dem Werkzeug.

Die auftretende Reibungskraft für Faserbündel und ebene Halbzeuge ergibt sich in erster Näherung aus dem Produkt aus Reibungsbeiwert und Normalkraft [18], wobei rückfederungsbedingte Abweichungen vernachlässigt werden. Reibungsbeiwerte sind primär abhängig von der Material- und Oberflächenkombination.

Faserhalbzeuge weisen eine Eigensteifigkeit auf, die für die Handhabung der Einzellagen, nicht jedoch für die Umformung notwendig ist. Die Eigensteifigkeit des Materials kann durch seine Biegeeigenschaften beschrieben werden [18]. Während der Drapierung des Fasermaterials wird die Faser

lokal gebogen. Durch die endliche Dicke der Einzellage ergibt sich sowohl eine Schubdeformation im Faserbündel als auch in der Gelelage. Die Dicke des Faserbündels und der Gelelage ist vom Zustand ihrer Kompaktierung abhängig. Das zur Biegung des Fasermaterials notwendige Kraftniveau ist abhängig von Fasermaterial, Biegerichtung, Zustand der Kompaktierung und Art der Vernähung [19]. In experimentellen Untersuchungen zur Faserdrapierung durch Folie ist die Steigerung der Reibungskräfte durch Normalkrafteintrag sowie die Eigensteifigkeit der Faser zu berücksichtigen.

Drapierung

Die Formgebung textiler, ebener Faserhalbzeuge in dreidimensionaler Geometrie ist von einer Vielzahl an Einflussparametern bestimmt. Diese umschließen u.a.

- den Startpunkt erster Umformung
- räumliche und zeitliche Ausbildung formgebender Kräfte und
- Interaktion mit geometrisch bedingter Scherung
- Reibung innerhalb des Faserbündels, der Faserlagen und des Lagenstapels sowie zwischen Fasermaterial und Werkzeug und ihrer Biegesteifigkeit.

In dieser Aufzählung führen Änderungen der Faserwinkel zu Faserverschiebung/ Faserabgleiten, Aufweitung des Faserbündelabstandes, Faltenbildung und lokaler Änderung der Permeabilität. Der vollständige Wirkzusammenhang aus Effekten und deren makroskopischer Auswirkungen sind Gegenstand der Forschung.

Im Formungsschritt des Fasermaterials ist Deformationsarbeit zu leisten. Deformationsarbeit ist richtungsabhängig. Die Summe der Richtungen geleisteter Deformationsarbeit enthält die geometrische Information des späteren Fasereinlegers. Somit besteht die Aufgabe der Drapierung im Überwinden der Reibungs- und Steifigkeitswiderstände des Fasermaterials bei der geometrischen Formgebung durch Faserbewegung in einer gerichteten Deformationsarbeit.

Im Unterschied zu metallischen Materialien plastifizieren Fasermaterialien nicht. Weiterhin ist ihr Umformverhalten von einwirkenden Normalkräften

zwischen den Faserlagen abhängig, die über den Reibungsbeiwert das Kraftniveau der Faserreibung beeinflussen [18]. Ein reines Pressen von Faserlagen durch Schließen einer Kavität kann die Faserbewegung hemmen und die Umformbarkeit auf einfach gekrümmte Geometrien begrenzen.

Um den Kreuzungspunkt zweier Faserbündel zu verschieben, muss eine bewegungsparallele Kraft eingeleitet werden; um eine Winkeländerung/Scherung einzuleiten, ist ein resultierendes Moment notwendig. Vorzugsweise erfolgt die Einleitung mit einem geringen Anteil flächiger Normalkräfte, um hemmende Faserreibung zu reduzieren. Im betrachteten Ausgangszustand vor der Drapierung liegt das Fasermaterial eben vor und wird durch einen in diese Ebene eindringenden Körper umgeformt. Steuerungsmöglichkeiten zum gerichteten Ablauf der dadurch eingeleiteten Deformationsarbeit bestehen in der Art des Eindringens und in der Verteilung der Zugkräfte auf die Faserbündel. Somit kann der eindringende Körper zur lokalen wie zeitlichen Steuerung segmentiert werden (Abb. 7). Zugkräfte am biegeschlaffen Faserbündel werden durch Niederhaltersysteme aufgebracht, die in Kraftniveau, Schub und Angriffspunkt ebenfalls zeitlich variiert werden können. Dabei können Zugkräfte aktiv durch ansteuerbare Spannelemente oder passiv durch Reibungskräfte am Niederhalter aufgebracht werden. Für einfachere Bauteiltopografien kann der in die Faserebene eindringende Körper einteilig ausgeführt werden [20]. Eine zeitliche und räumliche Steuerungsmöglichkeit der Auslenkungsebene erfolgt hingegen durch Segmentierung des eindringenden Körpers [21]; [22] Abb. 7 und Abb. 8.

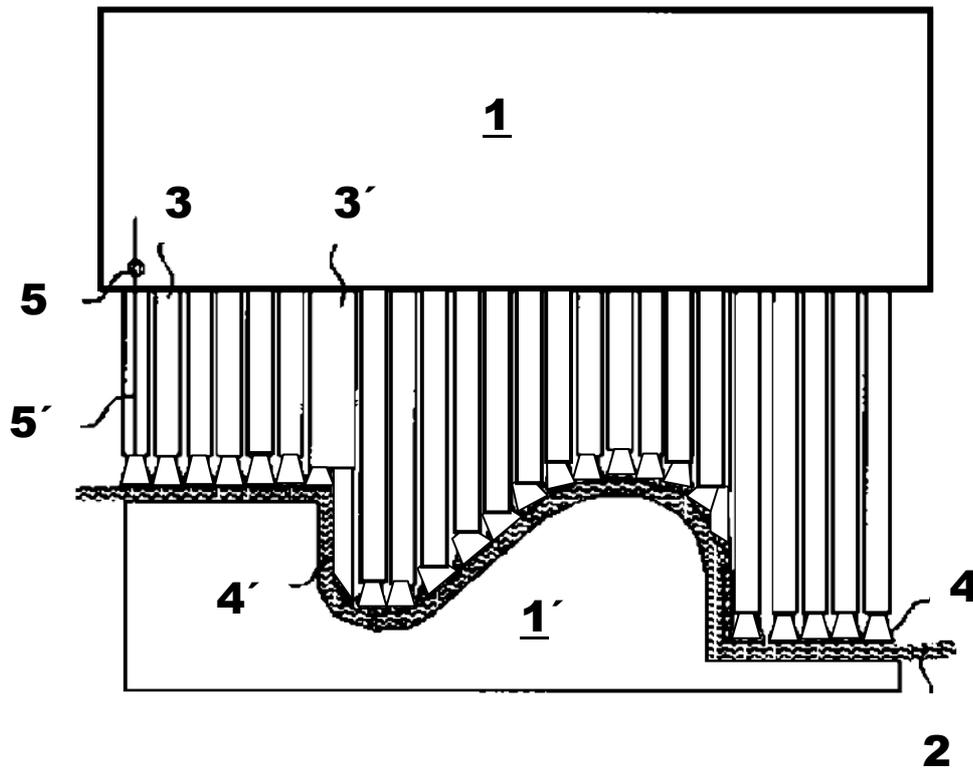


Abb. 7: Segmentierter Eindringkörper zur Faserdrapierung nach [21]; 1: Formhälften, 2: Fasermaterial, 3: verfahrbare Segmente, 4: Konturauflage, 5: Bewegungsrichtung

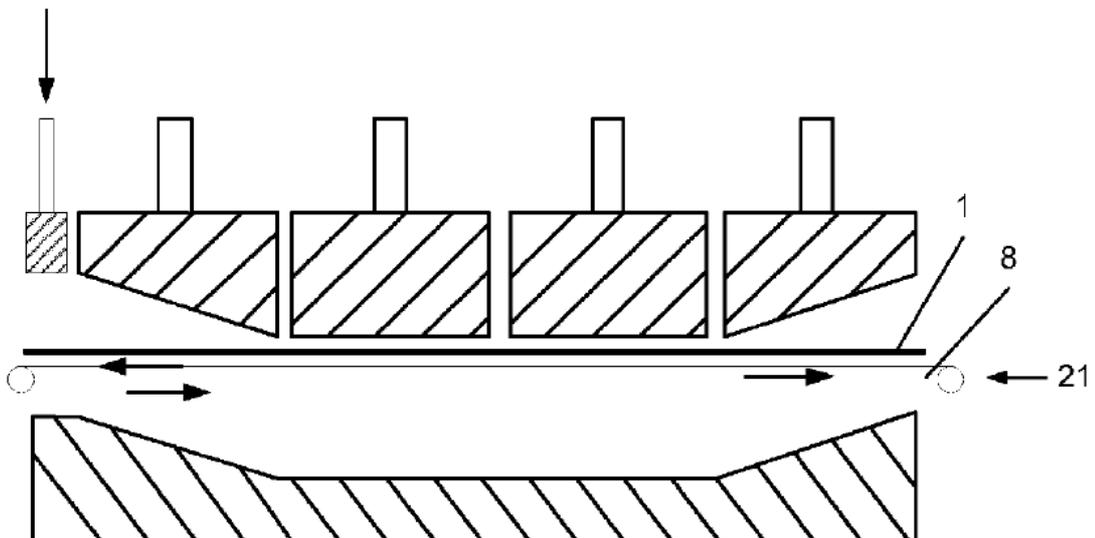


Abb. 8 Segmentierter Eindringkörper zur Faserdrapierung nach [22]; 1: ebenes Fasermaterial, 8: Transportvorrichtung, 21: Bewegungsrichtung der Transportvorrichtung

Eine weitere Form der Faserdrapierung ist unter der Einwirkung von Membranen (Abb. 9) möglich [23]. Eine elastische Membran wird in Kon-

takt mit dem zu drapierenden Fasermaterial gebracht. Druckdifferenz führt zur Deformation der Membran, wobei unter dieser Einwirkung die Werkzeugtopografie abgebildet wird. Dieses Verfahren kann mit einer oder zwei das Fasermaterial beidseitig umhüllenden Membran ausgeführt werden.

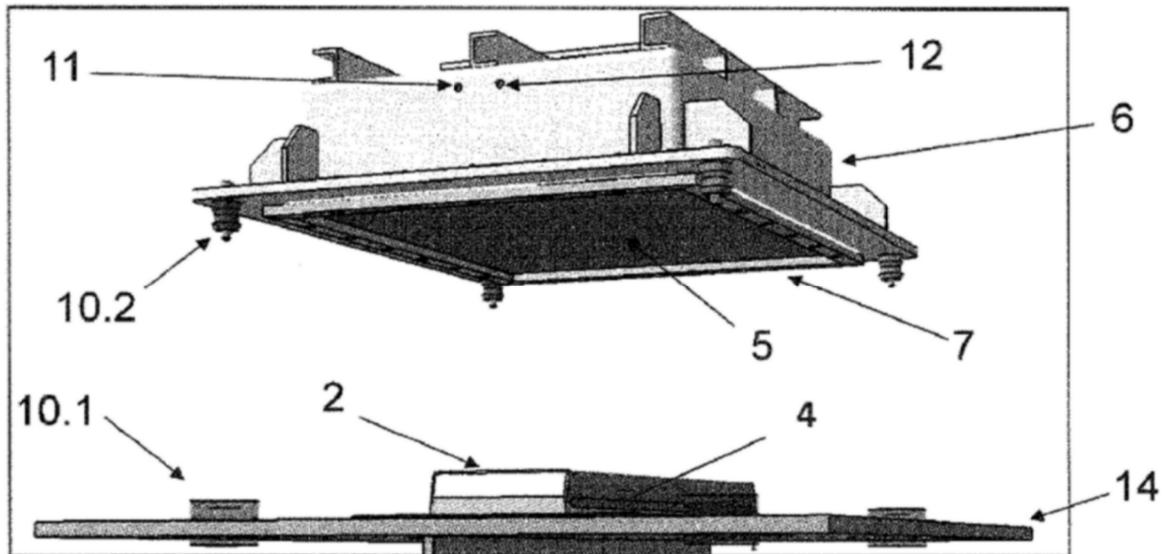


Abb. 9: Membrangestützte Faserdrapierung nach [23]; 2: Abzuformende Geometrie, 5: Membran vor Auslenkung eben, 6: Druckgefäß zur Einleitung einer Druckdifferenz zur Atmosphäre, 10: Positionierhilfen, 11 u. 12: Einleitungsbereich Über-/ Unterdruck.

Die Membran liegt im Ausgangszustand eben vor und wird im Abformungsprozess ausgelenkt. Dabei nimmt die Oberfläche der Membran mit ihrer Auslenkung zu und die Punktabstände auf der Membran steigen. Die Membran verlängert sich lokal auf Kosten ihrer Wandstärke. Durch das Zusammenwirken von Reibungskräften zwischen Fasermaterial und Membran mit dieser Längenänderung werden Zugkräfte auf das Fasermaterial zeitgleich mit der Auslenkung übertragen. Diese Form der Drapierung zeichnet sich durch eine Ähnlichkeit mit der angestrebten folienbasierten Drapierung aus, da sowohl Membran als auch plastifizierte thermoplastische Folie eine Längenänderung im Werkstoff unter Einwirkung einer pneumatischen Druckdifferenz ermöglichen.

2.1.3. Faserfixierung

Im Herstellungsprozess des Faservorformlings nimmt das Fasermaterial eine endkonturnahe Faserorientierung ein. Das Fasermaterial wird durch Kraft- und Formschluss in der Vorrichtung gehalten und davon kompaktiert. Wird dieser Formschluss entfernt, beispielsweise durch ein Öffnen der

Vorrichtung, können die Faserbündel ohne weitere Maßnahme erneut gegeneinander verschoben werden. Um eine Injektionspresse schnell belegen zu können, ist jedoch ein transportstabiles Zwischenprodukt notwendig, folglich sind die Fasern gegen ein erneutes Verschieben untereinander zu fixieren.

Die lokale Ausbildung von Adhäsionskräften zwischen einzelnen Fasern führt zur Übertragbarkeit von Normal- und Schubkräften zwischen den Lagen. Neben der mechanischen Heftung durch Formschluss (Nähen / Klammern) werden klebende Verfahren eingesetzt. Diese Kleber können im Schritt der Drapierung zwischen die Lagen aufgebracht werden, (beispielsweise Sprühkleber oder Klebenetze) oder werden bei der Herstellung des Gelege-Halbzeuges integriert.

Im Markt sind in das Faserhalbzeug integrierte Kleber/ Bindersysteme gängig. Das Bindersystem kann pulverförmig und flächig auf- oder als Faden bei der Gelege-Herstellung eingebracht werden. Halbzeug-integrierte Bindersysteme der Fahrzeugindustrie werden u.a. thermisch aktiviert. Die ebenen Faserhalbzeuge werden vor der Drapierung über den Schmelzbereich des Binders erhitzt und erstarren nach der Formgebung im Werkzeugkontakt. Sie bilden lokale Anbindungspunkte von geringem Eigenvolumen aus, um das Tränkungsverhalten oder mechanische Kennwerte nicht negativ zu beeinflussen. Bindersysteme können funktionalisiert werden, gehen im Tränkungsprozess in Matrixlösung über oder verbleiben als erstarrter Materialeinschluss.

2.1.4. Handhabung

Nach wie vor stellt das Greifen und positionierte Aufnehmen und Ablegen biegeschlaffer Halbzeuge für den industriellen Maßstab eine anspruchsvolle technische Aufgabe dar, allgemein und speziell bei späteren Sichtteilen[5]. Die aus diesem Prozess zur Fertigung der Fasereinleger stammenden trockenen Zwischenprodukte der RTM-Prozesskette reagieren empfindlich auf Umwelteinflüsse. Verschmutzungen zeichnen sich bei Sichtteilen ab und können nachträglich nicht korrigiert werden. Das Greifen zur automatisierten Positionierung birgt die Gefahr der Filamentschädigung und Faserverschiebung. Das Greifen von Lagenmaterial mit hoher Kraftübertragung ist Gegenstand der Forschung. Faserverschiebungen,

Verzug und Faltenwurf kann bei unachtsamem Umgang auftreten. Diese Anfälligkeit der Fasereinleger beeinflusst die Ausschussrate und erhöht die Komplexität eingesetzter Automatisierungssysteme.

Bekannte Greifersysteme können in drei Kategorien eingeteilt werden [5]:

- Halten durch Kraftschluss (Klemmen, Haftsaugen)
- Halten durch Stoffschluss (Adhäsionsgreifer, Gefriergreifer)
- Halten durch Formschluss (Nadelgreifer, Klettverschlussgreifer)

Diese Greifersysteme, als Bestandteil der Automatisierungstechnik, werden auf das Flächengewicht und die Geometrie des Fasermaterials abgestimmt.

Es ist Stand der Technik, diese Fasereinleger automatisiert oder manuell in das Injektionsgesenk der Presse einzulegen, die Presse zu schließen und nach einer möglichen Evakuierung der Kavität mit der Faserbenetzung zu beginnen. Nachdem das trockene Fasermaterial im Gesenk mit Harz benetzt wurde und dieses schließlich ausgehärtet ist, kann nach Öffnung des Werkzeuges ein Rohbauteil entnommen werden. Dieses ist mit Vakuumsauggreifern aufgrund der gasdichten Oberfläche automatisiert handhabbar.

2.1.5. Zusammenführung Matrix & Faser

Im Ausgangszustand vor der Injektion ist das Fasermaterial trocken und porös, nach der Injektion mit anschließender Härtung liegt ein fester Werkstoff vor. Die flüssige Matrix durchdringt unter Einfluss des Druckgradienten das trockene Fasermaterial im betrachteten RTM-Prozess.

Grundbegriffe des Konsolidierungsprozesses

- Das Maß der Durchlässigkeit des zu tränkenden Fasermaterials für die flüssige Matrix wird als Permeabilität bezeichnet.
 - Die Permeabilität ist maßgebend vom Fasereinleger (seinem Lagenaufbau, seiner Orientierung, dem Faserwerkstoff, der Vernähung und Oberflächenenergie) und seinem Zustand der Kompaktierung abhängig. Gesteigerte Permeabilität erhöht bei gleichbleibendem Druckgradienten die Fließgeschwindigkeit oder reduziert bei gleichbleibender Fließgeschwindigkeit den notwendigen Druckgradienten.

- Das Maß für die innere Reibung der Matrix wird als Viskosität bezeichnet.
 - Die Viskosität der Matrix wird maßgeblich durch ihre Zusammensetzung, dem Vernetzungszustand und der Temperatur bestimmt. Fortschreitende Vernetzung, also fortschreitende Ausbildung von Primärbindungen zwischen den Monomeren, führt zum Anstieg der Viskosität und begrenzt die Injektionszeit.
- Das Verhältnis aus Druckdifferenz zwischen Anguss und Abguss und der Fließlänge wird als Druckgradient bezeichnet.
 - Dieser wird auf die vom Harzsystem bereitgestellte Verarbeitungsdauer abgestimmt. Der Druck innerhalb des Aufbaus darf weder zum Abheben des Werkzeuges noch zur Undichtigkeit führen. Dafür bedarf es der Abstimmung des Werkzeugbaus und Schließenheit auf die zur Tränkung notwendigen Injektionsparameter.
- Das Verhältnis aus freigewordener Reaktionsenergie und Gesamtenthalpie des Harzsystems wird als Aushärtegrad bezeichnet.
 - Ein zunehmender Aushärtegrad der Matrix führt zum Anstieg der Viskosität, gefolgt vom Übergang der Matrix von flüssig zu fest über einen zeitabhängigen Modulanstieg bis hin zur vollständigen Aushärtung. Dieser Vorgang wird in der Harzkinetik beschrieben [24]. Maßgebende Einflussfaktoren sind das Matrixsystem, Zeit und Temperatur.

RTM-Prozess allgemein

Einflussfaktoren auf die Konsolidierungskapazität einer Prozesskette stellt die Bereitstellungsdauer des Fasereinlegers, dessen Transport und Injektionsprozess, Härtung bis zur Entformbarkeit und der Entformung selbst dar. Die Dauer der Injektion wird von Bauteilgröße, Viskosität, maximalem Injektionsdruck und Fließwiderstand (aus dem Zusammenspiel der Faserpermeabilität mit werkzeugseitiger Injektionsstrategie innerhalb der Kavität) beeinflusst. Die Reaktionsgeschwindigkeit der Vernetzung wird chemisch/thermisch derart ausgelegt, dass eine vollständige Füllung gewährleistet ist.

In diesem Zusammenhang wirkt die Anguss- und Abgussstrategie über die zu bewältigenden Fließstrecken auf die Zykluszeit. Konzepte für

- Punkt- oder Linien-,
- Einzel- oder Mehrfach-,
- Einkammer- oder Mehrkammer-

An- und –Abgüsse sind bekannt, die unter Berücksichtigung von Lage, Anzahl und Dimension auf das Optimum an Fließlänge, Werkzeugkosten und Harzverlust abgestimmt werden. Für die reproduzierbare Fertigung hochwertiger Bauteile mit kurzen Zykluszeiten müssen diese Parameter (Tab. 23 im Anhang), also die des Werkzeuges, der Injektion und des Fasereinlegers, aufeinander abgestimmt werden. Varianten des RTM-Verfahrens sind bekannt und im Einsatz. So wird in der Variante des *Compression-RTM (C-RTM)* [25]; [26] bei unvollständig geschlossenen Werkzeughälften injiziert, um die Tränkungsfähigkeit des porösen Fasermaterials zu erhöhen. Daneben ist das *vakuumunterstützte RTM (VARTM)* bekannt, bei dem die Injektion in eine evakuierte Kavität der Werkzeughälften stattfindet [13]; [27].

Ist ein ausreichendes Verhältnis aus faserinterner Permeabilität und ungewollter Permeabilität durch Bypass-Strömungen vorhanden, wird also die Matrixströmung ausreichend in das Fasermaterial eingetragen und nicht daran vorbei, stellt die Injektionsgeschwindigkeit einen dominanten Faktor auf die Porenbildung dar [28]; [29]. Poren an der Bauteiloberfläche erschweren u.a. die Nachbearbeitung der Oberfläche und sind daher zu vermeiden. Im Modell zur Tränkung des Fasermaterials [29] wird der Matrixfluss in jenen in den Faserbündeln und jenem dazwischen unterschieden. In einer porenreduzierten Injektion bilden beide Fließgeschwindigkeiten eine parallele Fließfront aus [30]. Dies reduziert die optimale Fließgeschwindigkeit auf eine Punktauslegung der Füllung, die unter Einbezug von Permeabilitätsabweichungen und unter Geometrieinfluss, die in der Praxis schwierig umzusetzen ist.

Um den Bedürfnissen nach Produktionsraten und Kosten der Automobilindustrie entgegen zu kommen, werden Faserbündel hoher Titer-Zahl eingesetzt. Weiterhin kommen Harzsysteme mit kurzer Verarbeitungszeit zum Einsatz [31]. Ein Lösungsansatz für gegenläufige Anforderungen nach kurzen Produktionszeiten und porenreduzierten Injektionen wird nach [31] in

einer Spülphase am Ende der Injektion unter hohem Matrixdruck aufgezeigt. Eine Kompression der vorhandenen Gaseinschlüsse ermöglicht dabei deren Mobilisierung und damit ein Ausschwämmen in Matrixbereiche außerhalb des späteren Bauteils. Diese Form der Porenreduktion ist durch die Integration einer Reinharzkavität am Ende der Fließfront und außerhalb des Bauteilbereiches möglich und entspricht bei schnellen Tränkungsprozessen dem Stand der Technik.

Da die zugeführten Anteile aus Faser und Matrix vorab aufbereitet und entstandene Rohbauteile nachbearbeitet werden müssen, wird dieses grundsätzliche Konsolidierungsprinzip des RTM-Verfahrens von einer Prozesskette umschlossen.

2.1.6. Werkzeug

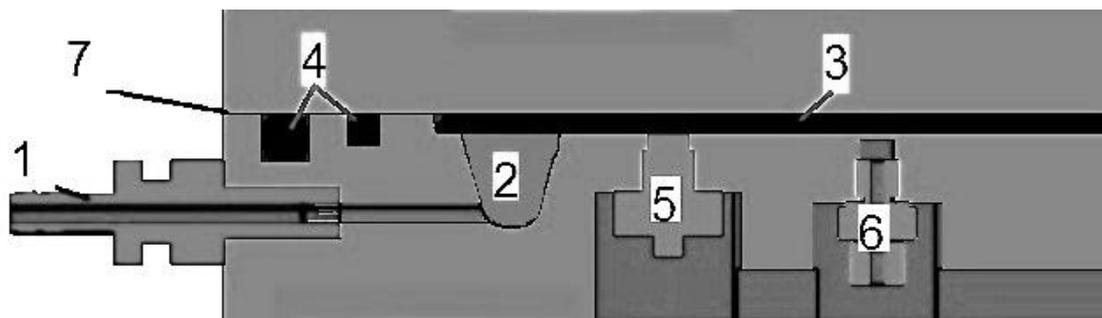


Abb. 10: Randaufbau eines RTM-Werkzeuges; 1: Matrixeinlass, 2: Angussverteiler, 3: Fasermaterial, 4: Dichtung, 5: Drucksensor, 6: Temperatursensor, 7: Trennebene

RTM-Werkzeuge weisen zwei feste Schalen auf, zwischen die das zu tränkende Fasermaterial positioniert wird. Im Beispielaufbau nach Abb. 10 tritt das Reaktionsgemisch durch den Einlass an Stelle 1 in den Angussverteiler an Stelle 2 und anschließend in den Faseraufbau an Stelle 3. Um einen Austritt aus der Trennebene an Stelle 7 zu verhindern, wird diese mit Dichtungen im Randbereich an Stelle 4 versehen. Sensoren für Druck und Temperatur an den Stellen 5 und 6 ermöglichen die Prozessüberwachung.

Anguss

Die Verwendung eines selbstreinigenden Injektionskopfes am Angusspunkt (entgegen der Prinzip-Darstellung nach Abb. 10) entspricht für höhere Stückzahlen dem Stand der Technik. Die Reaktionsmasse trifft vom Angusspunkt direkt oder über einen Angussverteiler auf das Fasermaterial. Eine Weitung der Querschnittsfläche des Reaktionsflusses reduziert die

Fließgeschwindigkeit vor dem initialen Faserkontakt und reduziert das Risiko von strömungsbedingten Faserschädigungen.

Fließkontrolle

Faserverbundwerkstoffe ermöglichen eine integrale Bauweise. Komplexe Fasereinleger mit lokal variierender Permeabilität und/ oder aus mehreren separaten Vorformlingen aufgebaut führen zur inhomogenen und richtungsabhängigen Verteilung des Fließwiderstandes. Diese Inhomogenität wird u.a. durch Fertigungstoleranzen der Faserzuschnitte, von Spaltbildungen zwischen Faser und Werkzeug sowie durch Spaltbildung innerhalb des Werkzeuges weiter ergänzt [32]. Zahlreiche Ansätze zur werkzeugseitigen Einflussnahme auf die Ausbildung der Fließfront sind bekannt. Sie umfassen u.a. die zeitlich abgestimmte Zufuhr der Reaktionsmasse an mehreren Punkten [33], die Echtzeitbestimmung der Permeabilität im Injektionsvorgang und Anpassung der Injektionsparameter [34] oder auch die lokale Anpassung der Matrixviskosität unter Nutzung ihrer Temperaturabhängigkeit [35].

Das für die robuste Prozessierung nach dem RTM-Verfahren notwendige Verhältnis aus By-Pass- (Matrixströmung am Fasermaterial vorbei) und faserinterner Permeabilität [32] kann durch den Einsatz lokaler, werkzeugseitiger Verpressungen des Fasermaterials begünstigt werden. Unter By-Pass-Permeabilität werden dabei ungewollte lokale Steigerungen der Permeabilität durch Positionierungsfehler, Zuschnittsabweichungen, Faserschädigungen durch Transport und ähnlichem verstanden, die bei der Verarbeitung des Fasereinlegers entstehen können. Bei den Verpressungen werden Faserlagen an jenen Stellen zusätzlich kompaktiert, an denen die Fließgeschwindigkeit reduziert werden soll. Dies geschieht vorwiegend im Randbereich des Faserzuschnittes.

Fertigungsbedingte Bereiche wie die der Faserverpressung zur Fließkontrolle, Greiferbereiche, Überstände der Drapierung oder Abgusskavitäten zur Porenreduktion werden vom Bauteil entfernt. Es schließt sich die Nacharbeit des Bauteils an. Diese Nacharbeit umfasst die Gestaltung der Bauteilkontur und der Oberfläche.

2.2. Oberflächenveredelung

Die Oberflächeneigenschaften von Faserverbundwerkstoffen hinsichtlich ihrer Optik (Glanz, Welligkeit und Tiefeneffekt) sowie ihrer Kratz- und UV-Beständigkeit erfüllen im reinen Substrat aus Faser und Matrix unmittelbar nach Entformung aus dem Werkzeug ohne weitere Maßnahmen nicht die Anforderungen von Schalteilen des automobilen Exterieurs.

Aus diesem Grund wird eine gesonderte Materialschicht aufgebracht, die in sich wieder aus Schichten aufgebaut sein kann. Das Beschichten von Bauteilen beschreibt das Aufbringen einer an der Oberfläche haftenden Schicht aus formlosem Stoff auf ein Werkstück, wobei unter „formlos“ der Zustand unmittelbar vor Kontakt des Beschichtungsstoffes auf das Substrat verstanden wird [36]. Beschichten als eine Hauptgruppe der Fertigungsverfahren wird nach [36] weiter unterteilt in das Beschichten aus dem ionisierten, dampfförmigen, flüssigen, plastischen, breiigen und pulverförmigen Zustand sowie dem Beschichten durch Schweißen und Löten. Im Zusammenhang mit Faserverbundwerkstoffen werden vorrangig organische Beschichtungsstoffe eingesetzt. Die Breite der Verarbeitungsverfahren von Faserverbundwerkstoffen ermöglicht eine Vielzahl an Verfahren zur Realisierung einer organischen Oberflächenschicht, die in ihrem Umfang nicht alle vollständig dargestellt werden. Hauptformen können unterschieden werden im Auftrag vor und nach der Entformung des Bauteiles sowie der Beschichtung aus dem flüssigen und dem festen Zustand.

Nach Entformung und aus dem flüssigen Zustand

Das Lackieren von Oberflächen beschreibt das Auftragen einer organischen Schicht, die im Laufe des Verfahrens eine flüssige Phase erreicht und zu dessen Abschluss eine harte Oberfläche bildet. Unter dem Begriff des Lackierens werden weitere Verfahren, wie das Pulversprühen und Bedrucken, eingebunden. Hierbei spielt die Geometrie des Bauteils gegenüber seiner Oberflächenstruktur eine untergeordnete Rolle. Durch das Durchlaufen einer flüssigen, formlosen Phase kann nahezu jede Geometrie lackiert, jedoch Oberflächenstrukturen, insbesondere langwellige, nur schlecht überdeckt werden [37]. Somit hat sich das Lackieren bei der Anwendung mit Faserverbundbauteilen dann als kosten- und energieintensiv herausgestellt, wenn hohe optische Anforderungen gestellt sind. Aus diesem Grund werden

Maßnahmen ergriffen, die Oberfläche der Endbauteile zu glätten. Teil dieses Maßnahmenkataloges sind mehrfache Lackiervorgänge mit Zwischenhärten und Schleifen, die Verwendung von Decklagen hoher Textilqualität, der Einsatz schrumpfoptimierten Harzes und das Auflegen homogener Zusatzvliese auf das zu infiltrierende Faserhalbzeug [14]. Diese Schritte führen gegenwärtig zum Anwachsen der Prozesskette. Beim Lackieren müssen zum Teil umweltbelastende Hilfsstoffe aufgewendet werden und der Energieverbrauch steigt durch mehrmaliges Lackieren mit Zwischenhärten [38]. In der Automobilindustrie ist der flüssige Auftrag organischer Schichten fester Bestandteil bisheriger Fertigungsabläufe. Dieser Ansatz führt gegenwärtig mit der Anisotropie des Werkstoffes in Dickenrichtung und der mangelnden Ausgleichsfähigkeit von flüssigen Beschichtungsverfahren für langwellige Unebenheiten [37] des Werkstoffes auf mehrstufige Lackierverfahren mit Zwischenschliff [39].

Vor Entformung und aus dem flüssigen Zustand

Zwei Verfahren werden unterschieden: Das Lackieren der Werkzeugkavität und die Lackinjektion. Im ersten Verfahren - dem Lackieren der Werkzeugkavität - wird das Werkzeug mit einer organischen Schicht versehen, das Fasermaterial aufgebracht und anschließend konsolidiert. Nach der Entformung des Bauteils haftet die ehemals auf der Werkzeugoberfläche eingebrachte organische Schicht am Substrat und bildet einen maßgeblichen Teil der Oberfläche [40]; [41].

Im Ansatz der Lackinjektion wird zunächst das Substrat durch Tränkung von Faserverstärkung durch eine Matrix in einer Kavität erzeugt. Nach geeigneter Vernetzungszeit wird die Kavität um einen Spalt geöffnet und zur Erzeugung der Oberfläche eine organische Schicht flüssig in den erstellten Spalt injiziert [42], [43]

Vor Entformung und aus dem plastischen Zustand

Das Folieren der Werkzeuginnenseite, beispielsweise durch den Einsatz von Einlegefolien in die Kavität, stellt eine organische Beschichtung dar, deren Beschichtungswerkstoffe im formlosen Zustand nicht flüssig, sondern plastisch sind. Die zum Einlegeteil vorgeformte Folie wird im Vorgang des Ablegens des Faseranteils und vor dem Schließen der Kavität dem

Prozess zugeführt und im Tränkungsverfahren des Fasermaterials angebunden [44].

Nach Entformung und aus dem plastischen Zustand

Darunter wird u.a. das nachträgliche Folieren der Werkstückoberfläche nach dem Entformen verstanden. Dieses Vorgehen zeichnet sich durch nachträgliches Anpassen der Foliengeometrie an die Topografie des bestehenden Bauteils aus. So werden thermoplastische Folien meist durch Heißluft beim Auftragen formbar gemacht. Der Vorteil der Folienauftragung bei der Anwendung mit Faserverbundwerkstoffen außerhalb der beheizten Werkzeugkavität findet sich in der Überbrückung leichter Oberflächenunebenheiten, die sich zum Zeitpunkt der Zusammenführung von geeigneter Folie und Substrat bei Raumtemperatur ausgebildet haben und daher spannungsfrei überdeckt werden können. Automatisierte Aufbringungsverfahren verwenden dabei u.a. zusätzliche Membranen oder beaufschlagten die zu applizierende Folie direkt mit einer Druckdifferenz [45].

2.3. Thermoplastische Folien

Thermoplastische Folien sind dünne organische Halbzeuge in Schichtform, die in sich selbst wieder aus unterschiedlichen Einzelschichten aufgebaut sein können. Die Schichtdicke, die eine Folie namentlich von einer Platte/Platine unterscheidet ist fließend. Nachfolgend werden mit Folien Schichtstärken unter 1mm verbunden, deren Eigenschaften eine Lagerbarkeit auf Rollen, membranartige Handhabung und geringe Biegespannung umfasst.

Unterschiedliche Verfahren zur Fertigung thermoplastischer Folien sind bekannt und im Einsatz. Dabei wird flüssiges Polymer unter Druck durch eine schlitzzartige Werkzeugöffnung gepresst; anschließend setzt eine chemische oder thermische Härtung des Materials ein. Bei der Folienfertigung aus thermoplastischem Granulat wird dieses durch eine Schlitzdüse extrudiert, um durch Walzen oder Luftdruck gereckt zu werden (Abb. 11). Die Verfahrensformen unterscheiden sich in herstellbarer Folienstärke, eingebragter Fertigungsspannung und Anzahl möglicher Schichtaufbauten. Das jeweilige Verfahren ist somit auf die Anforderungen an die herzustellende Folie abzustimmen und zu wählen.

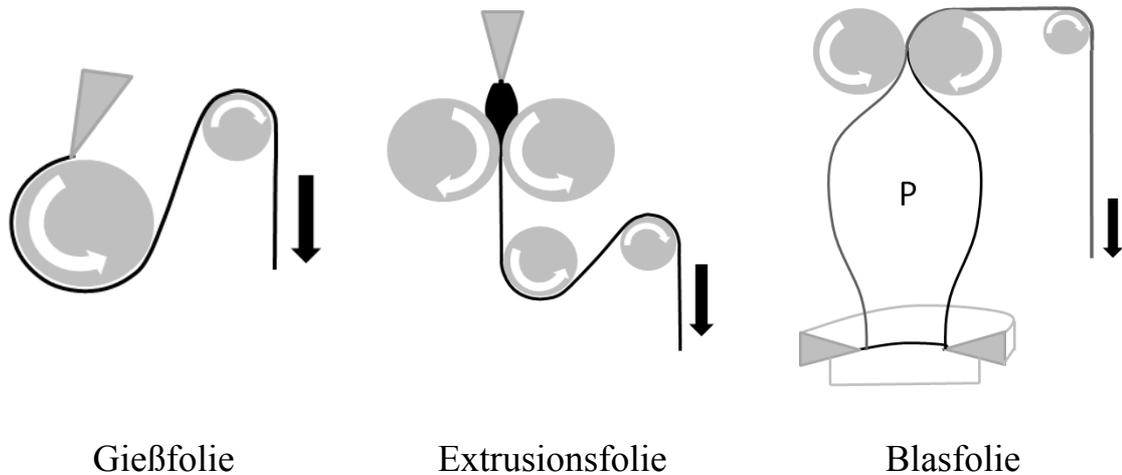


Abb. 11: Herstellverfahren von Folien

Extrusionsfolien werden nachfolgend weiter betrachtet, da sie eine mehrschichtige Folienfertigung im Bereich zwischen 0,15-1mm ermöglichen.

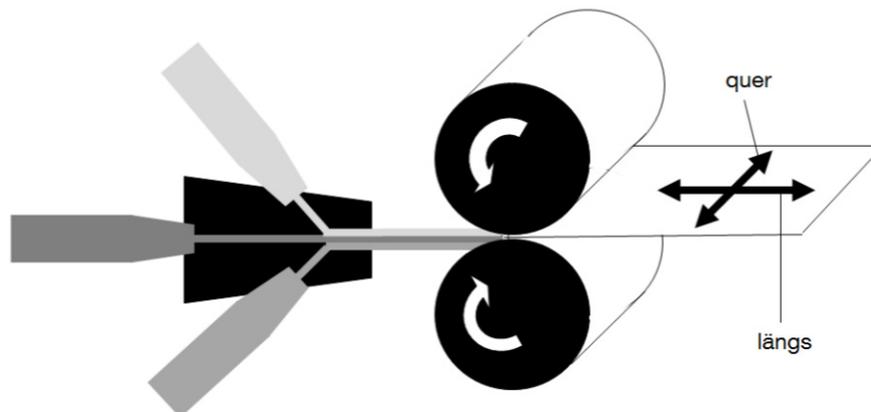


Abb. 12: Prinzip der der Folienfertigung durch Co-Extrusion; Richtung „längs“ ist parallel zur Fertigungsrichtung

Dies erfolgt durch den Einsatz mehrerer Extruder, die der Schlitzdüse eine Mehrzahl an Schmelzen zuführen und einer Walzenanordnung als Pressmasse zuführen. Abb. 12 zeigt die Darstellung des Prinzips. Die erhitzte Masse wird unter Einwirkung von Normalkräften zur Folienebene zwischen Walzen geführt, eine Änderung der Wandstärke findet statt. Durch die Einwirkung von richtungsabhängiger Spannung zur plastischen Deformation der Masse im Abkühlungsprozess der Folie wird bei weiterer Abkühlung dieser richtungsabhängige Spannungszustand der Verarbeitung im Material konserviert. Die Folie weist eine Anisotropie auf. Materialkenn-

werte sind richtungsabhängig. Eine Reduktion dieser Anisotropie wird angestrebt, da sich die eingefrorenen Spannungszustände in der weiteren Verarbeitung, beispielsweise in der Aufheizung bei nachfolgender Warmformung der Folie, negativ durch Verzug und Faltenwurf auswirken.

Materialauswahl

Thermoplastische Werkstoffe werden im automobilen Karosseriebau verbreiteter [46]. Hohe Oberflächengüte, große Gestaltungsfreiheit und ein geringes Gewicht sprechen für den Einsatz von lackierten Anbauteilen des thermoplastischen Spritzgusses. Hierfür eingesetzte Thermoplaste umfassen überwiegend Polyamid und Acrylnitril-Butadien-Styrol (ABS) sowie deren Mischungsformen [46]. Erfüllen diese Materialien jedoch nicht die Anforderungen für eine gemeinsame Lackierung mit der umgebenden Karosserie (On-Line-Lackierung), so müssen diese in separaten Linien (Off-Line-Lackierung) oberflächenveredelt und anschließend montiert werden. Ursache ist die thermische Beständigkeit der eingesetzten Materialien und deren Längenausdehnung. Damit verbunden ergeben sich neben logistischen Herausforderungen solche der exakten Farbwiedergabe.

Erfüllen Thermoplaste neben optischen Anforderungen jene für Exterieurbauteile (Witterungsbeständigkeit, Medienbeständigkeit, Kratzfestigkeit und Temperaturbeständigkeit), so können diese auf Grund der inhärenten Korrosionsbeständigkeit auch ohne weitere Nasslackierung eingesetzt werden.

Folienwerkstoffe, die auf die Substitution einer Nasslackierung abzielen, entstammen dem Interieur und basieren auf einer Schichtung aus Acrylnitril-Butadien-Styrol (ABS), Acrylester-Styrol-Acrylnitril (ASA), Polycarbonat (PC) und Polymethylmethacrylat (PMMA) [46].

Sie können rückseitig hinterspritzt werden und bilden ohne/ mit geringer Nacharbeit die Endoberfläche ab. Diesen Werkstoffen ist eine amorphe Struktur und die sich dadurch bedingte optische Transparenz im Sichtspektrum gemein.

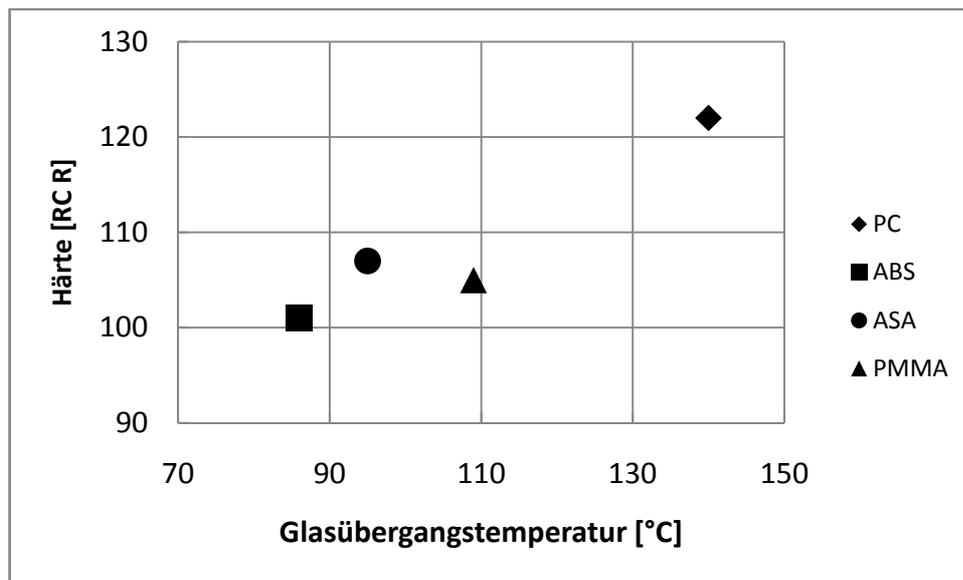


Abb. 13: Foliensubstrate für automobiler Exterieur Anwendungen nach Härte und Glasübergangstemperatur nach [47]

Die Ableitung der Materialeignung für eine Exterieur Anwendung erfolgt dabei herstellerabhängig unterschiedlich und wird vom Einsatzbereich am Fahrzeug sowie der Ausrichtung zum Sonnenlicht beeinflusst [14]. Der Vergleich der Materialien hinsichtlich ihrer Warmformbeständigkeit und Oberflächenhärte nach Abb. 13 zeigt, dass Polycarbonat (PC) und Polymethylmethacrylat (PMMA) die höchsten Werte erzielen. Polycarbonat weist neben seiner hohen Warmformbeständigkeit eine hohe Festigkeit und Schlagzähigkeit auch bei tiefen Temperaturen auf, neigt jedoch als reines Substrat zur Spannungsrissempfindlichkeit bei schneller Abkühlung [48]. Daher wird Polycarbonat für automobiler Serienanwendungen im Exterieur in einer Polymermischung, beispielsweise mit ABS, eingesetzt [49]. PMMA ist besonders licht-, witterungs- und alterungsbeständig, jedoch unbeständig gegen benzolhaltiges Benzin und Alkohole [48].

Die Materialauswahl erfolgt gemäß dem Stand der Technik nach den Kriterien der Warmformbeständigkeit und Kratzbeständigkeit der Oberfläche bei gleichzeitig hoher Medienbeständigkeit. Nachfolgende Untersuchungen stützen sich auf die Materialklasse der Polycarbonate mit einer Beimischung von Acrylnitril-Butadien-Styrol (ABS) zur Minderung der Spannungsrissempfindlichkeit.

3. Verwendete Geräte und Verfahren

Experimentelle und rechnergestützte Verfahren sowie dafür eingesetzte Geräte und Einstellungen zur Untersuchung

- einzelner Werkstoffe (Folie, Faser, Matrix)
- sowie deren Zusammenwirken im Verbundbauteil

werden im nachfolgenden Kapitel beschrieben. Das Kapitel gliedert sich dabei in die Punkte

- Verfahren der Entwicklung zur systematischen Zielplanung
- Experimentelle thermische-/ mechanische Analyse von Einzelwerkstoffen und deren Zusammenwirken im Verbundwerkstoff
- Experimentelle optische Analyse des Zusammenwirkens aus Folie und Faser mit Matrix im Bauteil
- Rechnergestützte Analyse zur
 - Drapierbarkeit des Fasermaterials
 - Modellierung von Oberflächenwelligkeiten infolge anisotroper Materialeigenschaften unter Temperatureinwirkung

3.1. Verfahren der Entwicklung

3.1.1. VDI 2221

Anhand der erwarteten komplexen mechanischen und thermischen Zusammenhänge wird die Gesamtkomplexität in Teillösungen mit anschließender Überlagerung zur Gesamtlösung [50] gegliedert. Unter der Gesamtkomplexität wird die Prozesskette von den Ausgangsmaterialien bis zum Bauteil verstanden. Arbeitsschritte wie Faserhandhabung oder Tränkung, also Elemente des Systems, werden als Teilaufgaben oder Teilprobleme [50] verstanden, die in einer weiteren Betrachtung zunehmend untergliedert werden können. Mit zunehmender Untergliederung erfolgen eine Abstraktion und eine Annäherung an die zugrunde liegenden physikalischen Effekte. Eine Änderung in Art und/ oder Ablauf des jeweiligen eingesetzten physikalischen Effekts soll zielgerichtet an das gegenwärtige Einsatzfeld angepasst und von bekannten Lösungsoptionen getrennt betrachtet/ bewertet werden können. Dafür ist eine Zielplanung notwendig. Der Methode entsprechend beginnt der Aufbau der Arbeit zunächst mit der Zielformulie-

rung und Beschreibung der Gesamtkomplexität, anschließend wird diese in Teilprobleme, wie der Folienanhaftung oder Faserdrapierung durch die Folie aufgeteilt, um diese anschließend wieder zusammenzufügen.

3.1.2. 9-Felder-Methode

Die Zielplanung erfolgt anhand der Methode des 9-Felder-Denken [51]. Sie gilt als Basiswerkzeug zur *Erfinderischen Problemlösung*, wie sie u.a. in [52] formuliert ist. Die Grundidee der Methode basiert darauf, die bisherige Entwicklung eines Systems unter Einbeziehung seiner Komponenten (Subsysteme) und Umwelt (Supersystem) in die Zukunft zu extrapolieren.

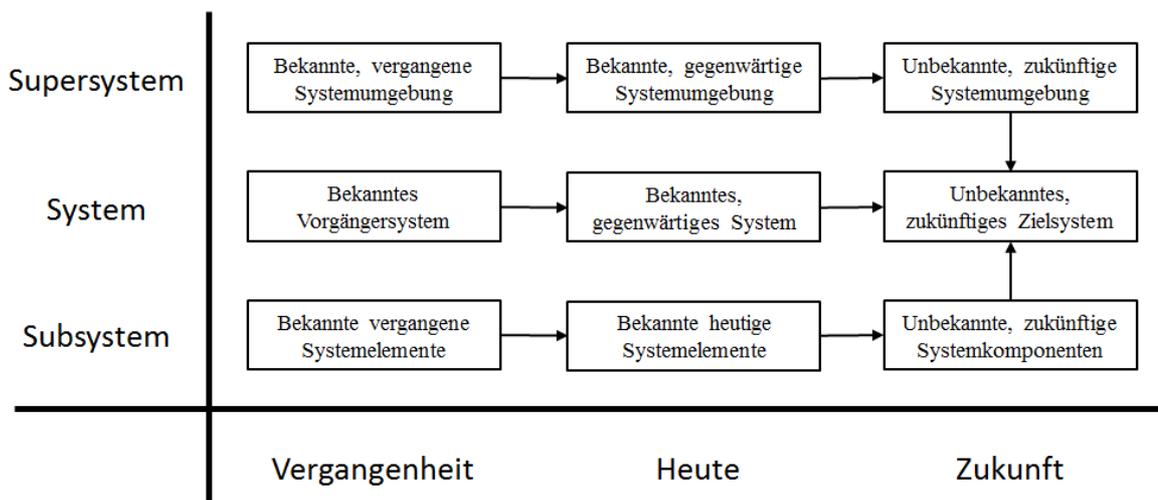


Abb. 14: Zielplanung nach der 9-Felder-Methode [51]

Die Umgebung der Prozesskette, also das Umfeld der Verbundfertigung, wird als Supersystem (Abb. 14 oben) bezeichnet. Eine Prozesskette wird bedarfsgerecht, wenn diese an sie angepasst ist. In der vorliegenden Betrachtung wird das Supersystem der Faserverbundverarbeitung auf die Veränderung von automobilen Antriebssystemen, der Energiekosten in Produktion und Materialentwicklung, eingegrenzt.

Die Ressourcen, aus denen der Prozess schöpft, werden durch das Material und die eingesetzte Verarbeitungstechnologie beschrieben. Die Gesamtheit der Ressourcen, also der aufsetzenden Technologien des betrachteten Systems der Faserverbundfertigung, werden als Subsystem bezeichnet.

Änderungen der Randbedingungen in Sub- und Supersystem sind Entwicklungsströmungen unterworfen und damit nicht exakt vorhersagbar. Eine Auslegung folgt somit keiner langfristig planbaren und exakten Wissen-

schaft, sondern dem Aufgreifen von Entwicklungstendenzen, die sich aus vorangegangenen technischen Veränderungen ergeben.

3.2. Thermisch / Mechanisch Messung

3.2.1. Dynamische Differenz-Thermoanalyse (DSC)

Anwendungsbereich

Die eingesetzte Matrix (Polyurethan) wird experimentell untersucht. Im Rahmen der Arbeit werden Vernetzungstemperatur, Katalysatorkonzentration und Entformungszeitpunkt der Matrix durch dieses Verfahren analysiert.

Methode

Die dynamische Differenz-Thermoanalyse (*engl. differential scanning calorimetry, DSC; auch differential thermal analysis, DTA*) ist in der Literatur [53]; [54]; [55]; [56] als Methode zur thermischen Analyse u.a. von Polymeren und Polymermischungen beschrieben. Durchgeführte Prüfungen und Auswertungen finden auf Basis der Normen DIN EN ISO 11357 und DIN 65467 statt. Der Anwendungsbereich beider Normen umfasst ein Prüfverfahren zur Bestimmung des Reaktionsverhaltens duroplastischer Polymersysteme mit und ohne Faserverstärkung.

Physikalische Grundlage

Physikalische Grundlage dieses Verfahren ist eine Differenz in der Wärmestromausbildung zwischen zwei Körpern, die den gleichen thermischen Randbedingungen ausgesetzt sind. Da sich beide Körper lediglich durch die Probenmengen in den sonst gleichen Körpern (Tiegel) unterscheiden, ist sichergestellt, dass der Ursprung gemessener Wärmestromdifferenz dem Füllunterschied entspringt.

Bei Polyurethanen (PUR) reagieren funktionale Gruppen aus Isocyanaten ($R-N=C=O$) und Alkoholen ($R-O-H$) zu einer Urethan-Bindung ($R-NH-CO-O-R$) in einer Additionsreaktion. Bei der Ausbildung chemischer Verknüpfungen von Monomeren zum Netzwerk ändert sich ihr energetischer Zustand. Diese Änderung wird von Wärmeentwicklung und/ oder Wärmeaufnahme begleitet [57]. Zusätzliche Wärmestromunterschiede werden im

Wechsel der physikalischen Eigenschaften der Proben erfasst und lassen dabei Rückschlüsse auf den Temperaturbereich ihrer Änderung zu.

So können anhand der Wärmesignatur während der chemischen Vernetzung wie auch im vernetzten Zustand Rückschlüsse auf den Materialzustand im Temperaturniveau gezogen werden.

Verwendete Einstellungen

Der thermische Eintrag in die Tiegel kann über die Zeit konstant (isotherm) oder variabel, das Signal einfach oder mit einer Schwingung überlagert (moduliert) aufgebracht werden. Die Werte zur Erfassung modulierter, isothermer und dynamischer Messungen sind in Tab. 2 enthalten.

Tab. 2: verwendete Messeinstellungen

Modus	Temperaturbereich [°C]	Bemerkung
isotherm	60-90	Wärmestromintegration über horizontale Basislinie
dynamisch	-60 - +280	5-10K/60s zur Bestimmung der Gesamtenthalpie, 20K/60s zur Bestimmung der Glasübergangstemperatur
moduliert	-60 - +280	5K/60s und 1,5K/60s Amplitude

3.2.2. Dynamisch mechanische Analyse (DMA)

Anwendungsbereich

Das untersuchte Verfahren zielt auf die Fertigung dreidimensionaler Bauteile ab, zu deren Entstehung die thermische Formung von Folie notwendig ist. Untersuchungen dieser Methode finden zur Vorauslegung der Formung statt.

Methode

Die durchgeführten Experimente zur Charakterisierung der dabei auftretenden thermisch-mechanischen Effekte erfolgen anhand von beidseitig eingespannten Proben im Biegeversuch gemäß DIN ISO 6721-5 A3 [58] und DIN 65583:1999-04 im Dreipunkt-Festlager-Versuch (Abb. 55 links und rechts).

Physikalische Grundlage

Das Messprinzip zur dynamisch-mechanischen Analyse basiert auf einem zyklischen Energieaustausch zwischen Probenmaterial und Messinstrument (TA Instrument DMA Q800). Wird Material mit einer Kraft belastet und erfährt als Folge dieser Belastung eine Dehnung, wird Arbeit daran verrichtet und führt zum Energieeintrag in das Material. Wird die ursprünglich einwirkende Kraft reduziert, wobei sich die Dehnung dem vormaligen Zustand annähert, wird die eingetragene mechanische Energie zurück auf das Prüfsystem übertragen. In diesem Zyklus findet ein Austausch mechanischer Energie statt. Eingesetzte und vom Material zurückgegebene Energie können sich in Abhängigkeit des Materialzustandes unterscheiden. Zur Bestimmung temperatur- und frequenzabhängiger mechanischer Materialeigenschaften werden thermische und mechanische Zustände überlagert, auf ein Probenmaterial aufgebracht und die resultierende Materialantwort gemessen [59].

Verwendete Einstellungen

Tab. 3: Messparameter der thermomechanischen Analyse nach [60] und [58]

Parameter	Wert	Einheit
Amplitude	400	[μm]
Frequenz	1	[1/s]
Stützweite	20	[mm]
Vorspannkraft	0,1	[N]
Temperaturrampe	4	[K/60s]
Temperaturspanne	80-185	[$^{\circ}\text{C}$]

3.2.3. Zugprüfung

Anwendungsbereich

Der verfolgte Lösungsansatz führt zu einer Schichtung aus thermoplastischen mit faserverstärkten duroplastischen Anteilen. Zur Bestimmung seiner Leichtbaueigenschaften werden zugehörige mechanische Zugeigenschaften erfasst.

Methode

Durchgeführte Zugprüfungen finden am Aufbau aus Folie und Faserverbundwerkstoff gemäß der Norm DIN EN ISO 527-4 statt. Die Norm hat Gültigkeit bei der Anwendung auf isotrop und anisotrop faserverstärkte Kunststoffverbunde und ist auch geeignet für aus „*vergleichbaren Verfahren hergestellten Prüfplatten oder aus fertigen der halbfertigen Erzeugnissen mit geeignet ebenen Bereichen*“ [61].

Der Probenzuschnitt erfolgt sägend, Dehnungsmessung erfolgt durch den Einsatz biaxialer Dehnungsmesstreifen (DMS FCA-5-11-1L/ Fa. DML, Messverstärker, Software CATMAN-EASY/ Fa. HBM), Kräfteeintrag und Messung erfolgt durch eine Universalprüfmaschine und angeschlossener Kraftmessdose (inspect 250/ Fa. Hegewald & Peschke).

Proben werden an Einspannstellen durch aufgeklebte Einspannelemente aus Glasfaserverbundwerkstoff geschützt; die Proben brechen innerhalb der Messlänge. Die Probenbreite beträgt 25mm, ihre Dicke zwischen 2mm und 4mm, die Prüfgeschwindigkeit 5mm/min gemäß der Norm DIN EN ISO 527-4. Die Auswertung der nach DIN EN ISO 527-4 erhobenen Messdaten erfolgt nach DIN EN ISO 527-1. Die direkt im Versuch erhobenen Daten umfassen Kraftniveau und Traversenweg der Prüfmaschine, Probengeometrie, sowie Dehnung längs und quer zur Messrichtung über die Dehnungsmesstreifen. Daraus errechnete und dargestellte Daten umfassen Zugmodul und -festigkeit sowie Schubmodul.

3.2.4. Biegeprüfung

Anwendungsbereich

Durch die Zusammenführung von Folie und Faserverbundssubstrat entsteht eine Materialschichtung, deren mechanische Eigenschaften zur Darstellung des Leichtbaupotentials im Biegeversuch untersucht werden.

Methode

Die durchgeführte Biegeprüfung findet im Dreipunkt-Biegeversuch gemäß DIN EN ISO 14125 statt. Die Norm findet Anwendung bei der Ermittlung von Biegeeigenschaften faserverstärkter Kunststoffe [62]. Der Probenzuschnitt ist sägend, Kräfteeintrag und Messung erfolgen durch eine Universalprüfmaschine (inspect 250/ Fa. Hegewald & Peschke). Die Prüfge-

lienmaterials vom Substrat untersucht. Die verwendeten Parameter entsprechen den Normvorgaben.

Tab. 4: Prüfparameter des Rollenschälversuchs nach DIN EN 1464:2010-06 [64]

Parameter	Wert	Einheit
Traversengeschwindigkeit	100±5	[mm/min]
Aufzeichnungslänge	115	[mm]
unberücksichtigte An-/ Ablaufstrecke	25	[mm]
Anzahl Prüfkörper	8	[1]

3.3. Konfokales Mikroskop

Anwendungsbereich

Thermoplastische Folien werden auf der Außenseite des Faserverbundssubstrates zur Haftung gebracht. Durch die verfahrensbedingte chemische wie thermische Einwirkung auf den Verbund prägt sich die Faserarchitektur des Substrates durch die Folie. Die Folge ist eine dreidimensionale Strukturierung und wird durch optische Verfahren erfasst.

Methode

Konfokale Mikroskope unterscheiden sich von Auflichtmikroskopen in ihrer Trennschärfe des Fokusbereiches [65]. In Kombination mit einem tiefenverstellbaren Objektiv können Höheninformationen erfasst werden. Eine mechanische Schädigung von Kunststoffoberflächen und damit einhergehender Messverfälschungen sind aufgrund der kontaktlosen Erfassung ausgeschlossen.

Physikalische Grundlage

Zugrundeliegendes Messprinzip ist die Asymmetrie des Strahlengangs, wie er in Abb. 16 dargestellt ist. Licht wird aus der Strahlenquelle emittiert (Abb. 16 an Stelle 10) und trifft auf eine Lochblende (an Stelle 16). Das Licht, das durch die Lochblende und einen halbdurchlässigen Spiegel (an Stelle 11) auf das Objektiv trifft, wird im Brennpunkt der Linse gebündelt und trifft auf die Probe (an Stelle 22). An der Probenoberfläche reflektiertes Licht durchläuft wieder das Objektiv, wird nun jedoch am halbdurchlässigen Spiegel abgelenkt und trifft auf eine zweite Lochblende (an Stelle 24). Das Licht, das durch diese Lochblende tritt, wird detektiert. In dieser

Anordnung ist die Möglichkeit gegeben, das Licht, das im Brennpunkt des Objektivs von der Probe reflektiert wird, gegen jenes, das vor oder nach dem Brennpunkt reflektiert wird, scharf abzugrenzen. Kleine Unterschiede der Probenhöhe können in große Signalunterschiede am Emitter überführt werden (Asymmetrie). Eine Reflektion des Substrats außerhalb des Brennpunktes des Objektivs resultiert in der Verschiebung des Kreuzungspunktes an der Lochblende (Abb. 16 an Stelle 24) und resultiert in einem abrupten Abfall der Signalstärke.

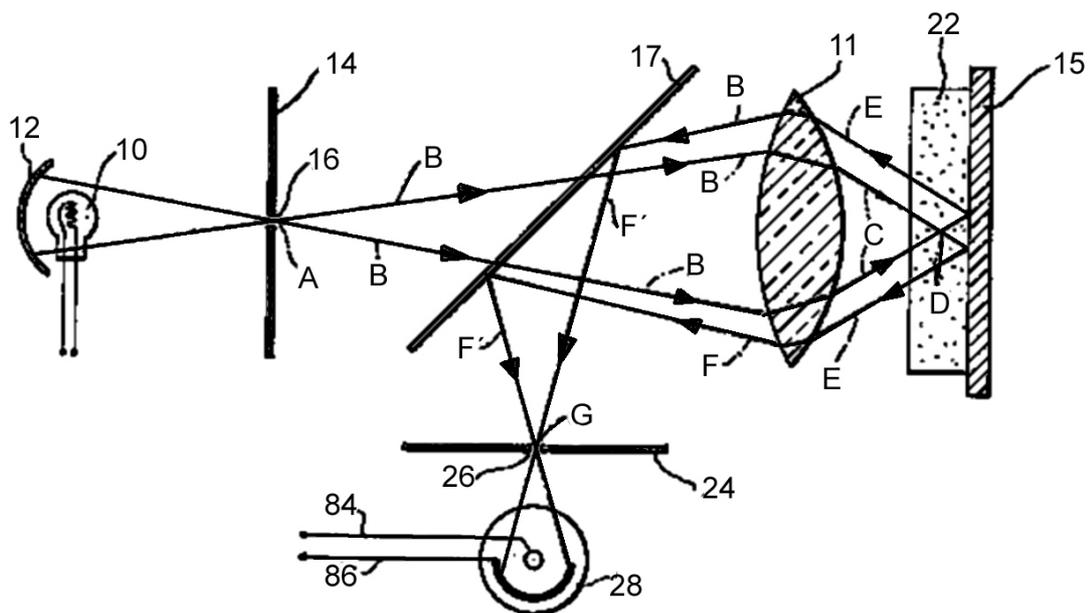


Abb. 16: Strahlengang des Konfokalmikroskops nach [65]

Die optischen Informationen werden in elektrische Signale umgewandelt. Ein elektrischer Schwellenwert definiert die Aufnahmebreite des optischen Signals und damit die Auflösungsgenauigkeit des Objektivabstandes.

Verwendete Einstellungen

Es findet ein Weißlicht-Konfokal-Mikroskop μ Surf® der Firma NanoFocus AG in Kombination mit einem Objektiv 3200-S Verwendung.

Verwendetes Messgerät verfügt über eine automatisierte Wegsteuerung des Objektivs mittels Piezoaktuatoren. Weiterhin ist eine Drehmechanik zur Brennpunktbewegung mehrerer gleichzeitig erfasster Strahlengänge zugänglich. Damit kann dreidimensionale Topologie in Schichten über den Sichtbereich des Objektivs hinweg erfasst und deren Daten gespeichert werden. Werden mehrere Schichten unterschiedlicher Höhen nacheinander

gespeichert, ist eine Zusammenführung der Oberflächeninformationen zum dreidimensionalen Datenmodell möglich. Die Verfahrbareit der Probe orthogonal zur Erfassungsrichtung des Objektivs ermöglicht die Anordnung mehrere Oberflächeninformationen eines Objektivausschnittes und vergrößert damit den Aufnahmebereich auf ein Vielfaches des Erfassungsbereiches.

Tab. 5: Spezifikation des Konfokal-Mikroskop μ Surf® [66]

Objektiv	Messfeldgröße [μm] x [μm]	Messfläche [mm^2]	Vertikalauflösung [nm]
3200-S	3200 x 3088	730	60

Auswertung

Die digitalisierte Probenoberfläche ist zur Vergleichbarkeit ihrer Eigenschaften von der dreidimensionalen Information auf einen Skalar zu reduzieren. Die dreidimensionale Probe wird mit einer zur Probenoberfläche orthogonalen Ebene geschnitten. Die Ausrichtung der Schnittebene verläuft in Abhängigkeit der Faserorientierung. Proben werden in zwei Richtungen vermessen. Ein Schnitt der Ebene verläuft orthogonal zur obersten Faserorientierung, der zweite orthogonal zur darunter liegenden zweiten Faserorientierung. Das Schneiden dreidimensionaler Flächen mit der Profilebene reduziert die Information um eine Dimension. Das resultierende Primärprofil wird durch normierte mathematische Modelle analysiert, deren Ergebnis ein Skalar ist.

Skalar erfasste Oberflächenkenngrößen sind Mittenrauwert, Rauheitsprofilhöhe und Welligkeit. Gestaltabweichungen von Oberflächen werden nach [67] in Ordnungen klassifiziert, wobei Abweichungen erster Ordnung von der Dimension des Bauteils sind und sich auf Ebenheits- und Rundungsunterschiede beziehen. Diese werden noch vor dem Schnitt zum Primärprofil durch eine Korrektur (Dreipunkt-Ebenen-Korrektur) im Messverfahren der Probenvermessung kompensiert.

In zweiter Ordnung der Gestaltabweichung steht die Welligkeit; höhere Ordnungen, also die weitere Reduktion der längenbezogenen Größenordnung mittlerer Abweichungen, bezeichnen die Rauigkeit. Um die zweite Ordnung aus dem Primärprofil von der Ordnung der Rauigkeit trennen zu

können, werden Filter eingesetzt. Eingabewert der Filterfunktion ist eine Grenzwellenlänge λ_c , die das Übertragungsband für die Welligkeit festlegt [68]; [69].

Sofern nicht anders gekennzeichnet, unterliegen die skalaren Größen der Konformität nach [69] und der Anwendung folgender Profilterwerte:

Tab. 6: Profilter der Gestaltabweichung

λ_c [μm]	Nadelfilter [mm]	Anzahl Messtrecken [1]	Messwiederholung pro Richtung und Probe [1]
800	0,00	5	6

3.4. Chemische Untersuchung

Anwendungsbereich

Im gewählten Ansatz wird thermoplastische Folie im flächigen Kontakt mit reaktiver Matrix verarbeitet. Dabei steht der thermoplastische Folienanteil während des reaktiven Kontaktes verarbeitungsbedingt unter mechanischer Spannung. Chemische Untersuchungen zur Einflussnahme der Matrix auf verschiedene Foliensubstrate zur Auslegung der folieninternen Schichtung finden statt.

Methode

Die Norm DIN EN ISO 22088-3 findet Anwendung und beschreibt ein Prüfverfahren zur Bestimmung der Beständigkeit von thermoplastischen Kunststoffen gegen umgebungsbedingte Spannungsrissbildung [70].

Physikalische Grundlage

Grundlage der eingesetzten Testmethode ist die Abnahme mechanischer Zugeigenschaften infolge kombinierter chemischer und mechanischer Belastung. Der Spannungseintrag auf das Probenmaterial während der chemischen Belastung erfolgt durch Biegung (Abb. 17).

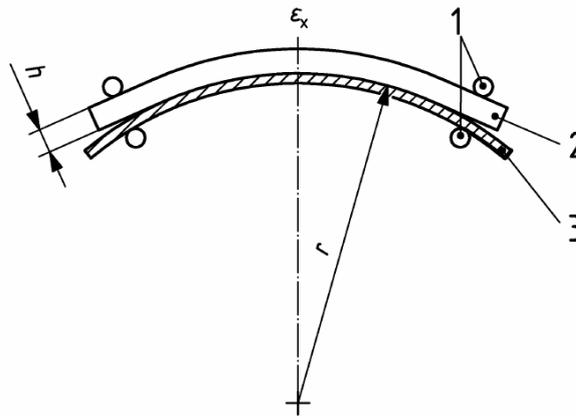


Abb. 17: Versuchsaufbau zur chemischen Untersuchung nach [70]; 1: Klemme; 2: Probenkörper; 3: Biegeschablone; h: Dicke des Probenkörpers; r: Krümmungsradius der Biegeschablone; ε_x : Nennwert der Dehnung in der zugbelasteten Oberfläche

Der Ablauf einer chemischen Prüfung erfolgt in zwei Schritten. In einem ersten Schritt wird das zu untersuchende Probenmaterial unter Biegespannung dem Prüfmedium einer definierten Einwirkzeit ausgesetzt. Im zweiten Schritt werden diese Proben einer Zugprüfung unterzogen und der Abfall mechanischer Kennwerte gegenüber unbelasteten und rein auf Biegung belasteten Proben ermittelt.

Verwendete Einstellungen

Die chemische Einwirkzeit beträgt 24h, beginnend unmittelbar nach Biegespannungseintrag; die Proben werden anschließend 48h gelagert. Die Versuchsdurchführung erfolgt bei Raumtemperatur (23°C).

Anschließend werden belastete und unbelastete Proben mechanisch geprüft und miteinander verglichen. Der Zuschnitt der vormals unter Einwirkung des Prüfmediums befindlichen Bereiche zur Probengeometrie findet fräsend statt, die Zugprüfung erfolgt gemäß [71].

Als Referenz werden unbelastete Proben ohne mechanische und chemische Einwirkung sowie nach reiner Biegebelastung und ohne chemische Einwirkung vergleichend getestet.

3.5. Rechnergestützte Verfahren

3.5.1. Statistik

Die aus den Messungen stammenden Daten werden zur verbesserten Interpretation statistisch aufbereitet. Die statistische Auswertung und Ergebnisdarstellung erfolgt anhand der Statistiksoftware Minitab® 16.2.3. Die Erstellung von Versuchsplänen, Datenspeicherung, mathematischer Verarbeitung und grafischer Aufbereitung erfolgen anhand programminterner (Minitab®) Tabellen.

Wird ein Versuchsergebnis als statistisch signifikant bezeichnet, gilt, sofern nicht anders angegeben, ein Konfidenzniveau von 95% und ein Signifikanzniveau von 5% ($\alpha = 0,05$). Das Signifikanzniveau beschreibt die Fehlerwahrscheinlichkeit bei Ablehnung der Nullhypothese. Die Beurteilung auf Normalverteilung erfolgt anhand von Quantil-Quantil-Diagrammen.

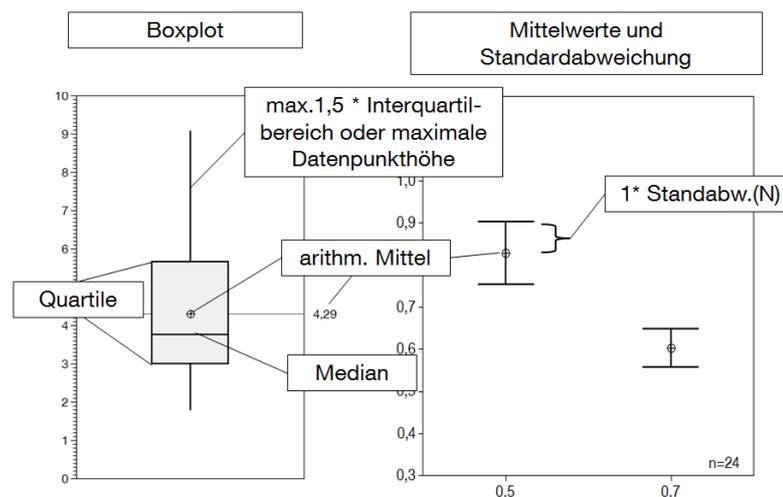


Abb. 18: Darstellungsform einer Stichprobe

Der Vergleich mittlerer Differenzen von Stichproben erfolgt über den t-Test. Die Anzahl der Beobachtungen je Stichprobe eines t-Tests ist drei oder größer. Dem Hypothesentest unterzogene Stichproben mit Überlappung der angenommenen Verteilung wird zur besseren Einschätzung der Ergebnisse der p-Wert beigelegt. Liegt der p-Wert unter dem Signifikanzniveau von 5%, gilt der Unterschied des Stichprobenmittelwertes als signifikant.

Zwei grafische Darstellungsformen der Stichproben werden verwendet (Abb. 18).

3.5.2. Kinematische Drapier-Simulation

Im dreidimensionalen Formungsvorgang von ehemals ebenen Faserhalbzeugen kommt es zu Verschiebungen und Drehungen innerhalb des Halbzeuges. Da diese Bewegungen und damit auch die Formung geometrisch begrenzt sind, wird ihr Zusammenhang vorab rechnergestützt abgeschätzt.

Eine generelle Drapierbarkeit der Demonstratorgeometrie für das trockene Fasermaterial ist anhand einer Drapier-Simulation abzuschätzen, damit die gemeinsame Formung aus Folie und Faseranteil einer zielführenden Auslegung genügen. Aus diesem Grund werden in Bezug auf die Demonstratorgeometrie kritische Scherwinkelbereiche identifiziert und ihr Verhalten bei der folienbasierten Formgebung beobachtet.

Die numerische Simulation der Drapierung lässt sich in geometrische Lösung und finite-elemente Methoden unterteilen, wobei im Rahmen vorliegender Arbeit die geometrische Lösung Anwendung findet. Geometrische Lösungen werden als kinematische Drapier-Simulation bezeichnet. Sie basieren in der Form des *Fishnet-Algorithmus* [72] auf der Annahme unveränderlicher Abstände zwischen den Kreuzungspunkten orthogonaler Faserüberschneidung. Von einem Startpunkt aus kommt es zur stückweisen geometrischen Verschneidung der Bogenstücke des Netzes mit der (doppelt) gekrümmten Oberfläche [72]. Definiert werden Gittergröße, der Startpunkt der Drapierung und die dortige Achsausrichtung. Damit sind drei Punkte bestimmt. Der vierte Punkt ergibt sich aus dem Schnittpunkt (geometrisch) zweier Kreise mit dem Radius des Gitterabstandes auf der zu drapierenden Fläche um die beiden unverbundenen Punkte. Die Bogenstücke sind durch Gelenke miteinander verbunden. Materialkennwerte werden nicht bemessen, Biege- und Schubsteifigkeit der Faserbündel sowie Lagedicke, Kompaktierung und weitere Materialeigenschaften finden keine Berücksichtigung.

Auf Grund der einfachen Implementierung und der Ergebnisstabilität über weite Grenzen der Diskretisierung [72], findet die geometrische Drapier-Simulation breite Industrieanwendung in Form von kommerziellen Lösungen (Dassault Systems©: Catia-CPD; Siemens PLM Software©: Fibersim;

ESI Group©: PAM-Quickform). Ergebnisse beinhalten startpunktabhängige Näherungslösungen der Faserorientierung, dem Scherwinkel und dem ebenen Abwicklungszuschnitt.

Die kinematische Drapier-Simulation unter Verwendung der ESI Group©: PAM-Quickform 2011.0 findet hier Anwendung. Die Drapiersimulation wurde ausschließlich zur Darstellung der Lagenzuschnitte und zur Erstab-schätzung der Werkzeugauslegung verwendet; die Ergebnisse finden sich im Anhang (vgl. Abb. 64, Abb. 99, Abb. 100). Materialspezifische Kennwerte, Interaktionen der Lagen untereinander zum Werkzeug und das Setzverhalten des Fasermaterials finden dabei keine Berücksichtigung.

3.5.3. Numerische Modellierung thermischer Effekte

Bei der Schichtung von Materialien unterschiedlicher Wärmeausdehnungskoeffizienten und ihrer Zusammenführung unter Wärmeeinfluss wird der Verarbeitungszustand im Material konserviert, der sich bei der Rückführung auf Umgebungsbedingungen auswirkt. Thermische Dehnungs-Anisotropie wird als Einflussfaktor für lokale Oberflächeneffekte angenommen. Daraus resultierende Spannungen sowie thermisch bedingte Einfallstellen aus der Abzeichnung der Faserarchitektur werden in einem zweidimensionalen Ansatz numerisch untersucht. Ziel dieser Untersuchung ist die Abschätzung der Grenzflächenbelastung zwischen Folie und Faser-verbundmaterial in Abhängigkeit der bei der Fertigung auftretenden Temperatur sowie der Vergleich der simulativ ermittelten Einfallstellen mit im Experiment ermittelten Einfallstellen.

Die verwendete Software ist Dassault Systems©: Abaqus/CAE© 6.11-2. Modellaufbau, Diskretisierung, Modellrechnung und Visualisierung entsteht in dieser Umgebung. Die Diskretisierung erfolgt durch Standard-S4R- und S3-Schalenelemente und robusten Mehrzweckelementen [73]. Materialgesetze sind linear elastisch gewählt. Biegespannungen, hier aus der Faserebene heraus, sind grundsätzlich möglich, orthogonal zur Schale treten im Modell jedoch keine Spannungen auf. Wölbungen der zweidimensionalen Modelle aus der Ebene treten nicht auf (plain stress). Randbedingungen werden gemäß Abb. 32 definiert. Der Belastungseintrag auf das Modell erfolgt über isotrope Felddefinition von Starttemperatur auf Endtemperatur. Die Knoten angrenzender Materialien sind miteinander verbunden. Anhand

eines vollfaktoriellen Versuchsplanes werden die Eingabezustände variiert, die Höhendifferenz erfasst und die Einflüsseffekte softwareunterstützt ausgewertet. Die Netzabhängigkeit der Ergebnisse wird geprüft. Es werden verschiedene Elementgrößen eingesetzt und ihr Einfluss auf die sich ergebende Deformation der thermisch bedingten Knotenverschiebung über der Reinhartzstelle untersucht. Bei der Variation der Elementgrößen zwischen $5e-6$ und $2e-5$ ergibt sich dabei ein maximaler Unterschied von 4%, was übertragen auf die zu untersuchende Einfallstelle eine Höhenabweichung von ca. 3-4nm (zum Vergleich: 1-10 μ m experimentell gemessene Faserabzeichnungen) entspricht (Abb. 19). Dieser Einfluss wird vernachlässigt, die Elementgröße beträgt $1e-5$. Parameter nach

Tab. 7 & Tab. 8.

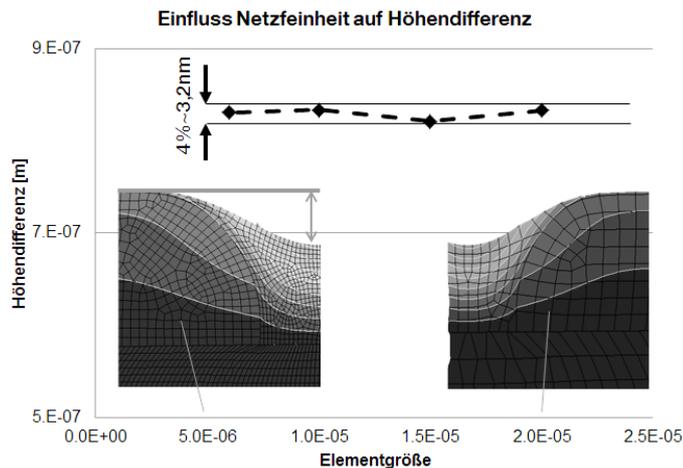


Abb. 19: Vernetzungseinfluss auf die Höhendifferenz der Einfallstelle

Tab. 7: Materialparameter isotroper Werkstoffe

Material	Dichte [kg*m ⁻³]	Gesetz [1]	Modul [N*m ⁻²]	Poisson [1]	CTE [K ⁻¹]
Matrix	1150	el. , is.*)	2.8e9	0.3	143e-6
Polycarbonat	1200	el. , is.*)	2.3e9	0.3	65e-6
ABS	1020	el. , is.*)	2.4e9	0.3	90e-6
Längslage	1455	el. , is.*)	4.8e9	0.3	42e-6

*) el.: elastisch; is.: isotrop

Tab. 8: Materialparameter der Faserquerlage

	Dichte [kg*m ⁻³]	E1 [N*m ⁻²]	E2 [N*m ⁻²]	Nu12 [1]	G12 [N*m ⁻²]	G13 [N*m ⁻²]	G23 [N*m ⁻²]	CTE [K ⁻¹]
Quer	1455	142e6	7.2e6	0.23	3.4e6	3.4e6	2.6e6	1e-6

4. Prozessauslegung

Vorliegende Arbeit verfolgt den Grundgedanken, das Leichtbaupotential von Faserverbundwerkstoffen mit der Massentauglichkeit und Oberflächeneigenschaften thermoplastischer Folien zu kombinieren. Hierzu bedarf es eines Verarbeitungsprozesses, der im Rahmen dieses Kapitels in drei Schritten ausgelegt wird.

1. Zielplanung:

- Wo beginnt und wo endet der Prozess?
 - Systemgrenzen, Eingangs-/ Ausgangsmaterialien
- Was soll der Prozess warum können?
 - Annahmen und Zielformulierung

2. Konzeption:

- Welche Werkstoffeigenschaften lassen sich wie kombinieren?
 - Zusammenführung Thermoplast/ Faserverbund
- Welche Randbedingungen sind bei der Zusammenführung zu berücksichtigen?
 - Randbedingungen Konzeption -

3. Formulierung des Prozesses

4.1. Zielplanung

Betrachtetes System und Systemgrenzen

Die Gesamtheit miteinander verbundener Elemente, die in zielgerichteter Interaktion eine übergeordnete Funktion erfüllen, werden als System bezeichnet [74]; [75]. Diese zeichnen sich durch Systemgrenzen aus, die es von der Umgebung abgrenzen [76] und lediglich durch definierte Eingangs- und Ausgangsgrößen durchdrungen werden. In einem ersten Schritt wird die Aufgabe des Prozesses sowie seine Eingangs- und Ausgangsgrößen definiert. Das betrachtete System ist der Herstellungsprozess von schalenförmigen Faserverbundbauteilen. Es unterliegt durch Materialbewegungen einer Dynamik und interagiert durch die Ein- und Ausgabe von Materialien mit der Umwelt und ist somit ein dynamisch offenes Prozesssystem [74]. Die Eingangsmaterialien in das System umfassen trockene und ebene

Faserlagen, Hilfsstoffe sowie die flüssige Matrix. Die Ausgangsmaterialien umfassen ein daraus gefertigtes, dreidimensionales Faserverbundschalen-teil.

Eingangs- und Ausgangsmaterialien

Zwischen Eingangs- und Ausgangsgröße kommen dem Verarbeitungssystem (in Anlehnung an Abb. 6) Aufgaben in Schnitt, Handhabung und Positionierung der trockenen und ebenen Faserhalbzeugen, deren dreidimensionale Formgebung sowie ihre Einbettung in eine polymere Matrix und der Oberflächengestaltung der daraus entstehenden Bauteile, zu.

Die Aufgabe des angestrebten Verarbeitungssystems besteht aus folgenden Funktionen:

- Fasern zuschneiden, handhaben und drapieren
- Fasern mit Matrix zusammenführen
- Veredelung der Bauteiloberfläche

Der Aufgabenumfang aus Materialbewegung, -trennung und geometrischer Umwandlung erfordert eine Mehrzahl mechanischer und eventuell thermischer Einwirkungen. Es wird von der Annahme ausgegangen, dass diese Vielzahl der Einwirkungen eine zeitliche- und/ oder räumliche Trennung notwendig machen.

Annahmen und Zielformulierung

Der Anteil an Fahrzeugen mit alternativem Antriebsstrang ist, bezogen auf Neuzulassungen (Tab. 24), noch gering, weist jedoch ein stabiles Wachstum auf [77]. Diese Fahrzeuge verlangen nach darauf abgestimmten Fahrzeugarchitekturen [78 S. Tomforde], Werkstoffen und Bauweisen. Zunehmende Diversifizierung [2] der Antriebssysteme und steigende Energiekosten führen zum Bedarf an energieeffizientem Leichtbau. Bauteile aus Kohlenstofffaserverbund, die diesen Leichtbau ermöglichen, bedürfen erhöhter energetischer Ressourcen bei der Herstellung [79]; [80]; [81]; [82] (Tab. 26), die es im Gesamtlebenszyklus zu kompensieren gilt. Prozesse mit einem sparsamen Verhältnis aus Energieeinsatz und Leichtbaupotential werden angestrebt.

Faserverbundwerkstoffe (Endlosfasern mit duroplastischer Matrix, nach dem RTM-Verfahren) weisen nach der Entnahme aus dem Werkzeug eine

strukturierte und trennmittelbehaftete Oberfläche auf. Werden bei der Verarbeitung duromere Matrixsysteme eingesetzt, kommt es zum chemischen und thermischen Schrumpf [24] und folglich zur Volumenänderung der Matrix, die sich vom Fasermaterial unterscheidet und lediglich anteilig kompensiert werden kann [14]. Die Faserarchitektur zeichnet sich an der Bauteiloberfläche ab [37]; [83]; [84]; [85]; [86]; [87]. Ein weiter wachsendes Bedürfnis nach der effizienten Veredelung von Schalenteilen aus Leichtbauwerkstoffen in Wagenfarbe mit zu metallischen Substraten vergleichbaren Oberflächen wird angenommen.

Die automatisierte Erschließung der Verbundpotentiale für neue Fahrzeugkonzepte (10.000er Stückzahlen [4]), ausgehend von offenen und manuellen Halbschalenprozessen zu geschlossenen automatisierten Zweischalenprozessen ist von Prozessketten geprägt, deren Mehrkosten die gegenwärtig tragbaren (Tab. 33) überschreiten. Kurze Prozessketten durchgängiger Automatisierung, die die Transportvorgänge der Fasermaterialien berücksichtigen, sind technologisch und räumlich separierbar.

Ziel ist ein energieeffizienter Verarbeitungsprozess von endlosen und orientierten Kohlenstofffasern zu Schalenteilen hoher Oberflächenqualität. Der angestrebte Prozess ist automatisierbar, besteht aus einer kurzen Verarbeitungskette parallelisierter Verarbeitungsschritte mit transport- und lagerstabilen Zwischenprodukten.

Der Prozess berücksichtigt die Ausweitung des polymeren Werkstoffanteils bei Fahrzeugen (Tab. 25) und kombiniert die Vorteile thermoplastischer Materialien wie Oberflächenqualität, Schweißbarkeit und Stückzahlfähigkeit mit dem Leichtbaupotential der gerichteten Kohlenstofffaser [3]. Der Prozess ermöglicht die kontrollierte Ausbildung von Scherwinkeln des Fasermaterials in der Formgebung und berücksichtigt die Verknüpfbarkeit zwischen den Verarbeitungsmodulen.

4.2. Konzeption

Aus der Zielformulierung ist die Vereinigung thermoplastischer Werkstoffeigenschaften mit dem Leichtbaupotential der gerichteten Kohlenstofffaser abgeleitet worden. In diesem Kapitel zur Konzeption werden die Materialcharakteristika der Thermoplaste und Faserverbundwerkstoffe betrachtet und nach miteinander verknüpfbaren Verarbeitungszuständen gesucht.

4.2.1. Zusammenführung Thermoplast- und Faserverbundverarbeitung

Liegen die Fasern bereits eingebettet in thermoplastischer Matrix vor, werden sie zur Umformbarkeit erhitzt und unter Einwirkung von Normal- und Zugkräften geformt. Die Faser wird dabei an der gewünschten Geometrie ausgerichtet und muss jenen Widerstand überwinden, den die bereits eingebettete Matrix der Faserbewegung beim Abgleiten der Fasern untereinander entgegen bringt. Dieser Umstand schränkt die Scherbewegung der Faserdrapierung ein und begrenzt die Gestaltungsfreiheit.

Liegen Fasern und Matrix getrennt vor, ergibt sich aufgrund matrixloser Faserbewegungen im Drapierprozess eine vereinfachte Faserbewegung. Jedoch sind die eingesetzten Faserhalbzeuge biegeschlaff, gasdurchlässig und anfällig für Verschmutzung und Faserschädigung. Das Fasermaterial wird nach der Drapierung mit einer flüssigen Duromermatrix getränkt. Im Reaktionsprozess der Matrix bilden sich Adhäsionskräfte an den Grenzflächen aus. Dies ist an der Grenzfläche zu den Fasern gewünscht, an der Grenzfläche zum Werkzeug unerwünscht. Deshalb werden Trennmittel eingesetzt. Diese kontaminieren die Bauteiloberfläche und beeinträchtigen den Nachbearbeitungsaufwand der Oberflächenveredelung oder Fügung.

Wenn es nicht gelingt, die grenzflächenunabhängige Ausbildung von Adhäsionskräften der vernetzenden Matrix zum Werkzeug hin zu unterbinden, so liegt eine Lösung in der Nutzung dieser Adhäsionsausbildung, beispielsweise durch ein ganzheitliches Umhüllen der Matrix mit einem am Bauteil verbleibenden Material auf der Außenseite.

Dazu müssen die zur späteren Separation bei Bauteilentformung vorgesehenen Grenzflächen mit einer verbleibenden Anbindungsschicht versehen werden, deren Verbleib zur Steigerung der Gebrauchsfertigkeit des Bauteils beitragen. Die Grenzfläche zwischen Matrix und Werkzeug ist von einer flächigen Natur, wodurch der verbleibenden Anbindungsschicht auf dem Faserverbundssubstrat ebenfalls eine flächige Natur zukommt. Flächige Strukturen aus thermoplastischen Materialien werden auch als Folie bezeichnet. Folien können im Injektionsprozess die Reaktionsmasse von der Werkzeugoberfläche trennen und selbst angebunden werden. Thermoplastische Folien sind schweißbar und weisen geschlossene Oberflächen auf.

Dies ist mit einem nachträglichen Auftrag von Folie auf Faserverbundbauteile möglich, führt jedoch auf eine additive Konstruktionsweise und in Bezug auf die Anordnung der Prozessschritte zur Monofunktionalität der Funktionsschicht. In diesem seriellen Ansatz kommt es zur Verlängerung der Prozesskette um mindestens ein Element für die Folienformung (nachträglich auf das Faserverbundssubstrat oder vorab bei der Fertigung eines Folieneinlegers). Damit führt eine derartige additive Einbringungsform zur höheren Ressourcenaufwendung.

In der gewählten Definition des betrachteten Systems zur Prozesskette der Faserverbundverarbeitung von Umformung, Injektion und Oberflächenveredelung ist die Folie in den Ablauf der Prozessierung parallel zu integrieren. Dies findet statt, wenn die Folie den umzuformenden Faseranteil frühzeitig im trockenen Zustand umschließt. Eine frühe Form der Folieneinbindung findet statt, wenn die Folie den noch nicht drapierten, zweidimensionalen Faserstapel vollständig auf der Außenseite umhüllt. Daraus resultiert die Konsequenz einer gemeinsamen Formgebung von Folie und Fasermaterial. Die notwendige Aufwendung an Zug- und Normalkräften müssen durch die Folie auf das zu orientierende Fasermaterial aufgebracht werden. Damit nimmt die Folie eine Multifunktionalität wahr. Sie ist Teil der Faserhandhabung bei der ebenen Umhüllung des trockenen Faserstapels, überträgt Zug- und Normalkräfte zur Orientierung des Fasermaterials bei der Faserdrapierung, trennt die Reaktionsmasse vom Werkzeug und verbleibt auf dem Bauteil unter der Bedingung gesteigerter Gebrauchsfertigkeit. Diese Steigerungen beziehen sich beispielsweise auf die schweißende Fügbarkeit derartiger Bauteile oder deren reduzierter Oberflächenveredelungsaufwand.

Mit zunehmender Temperatur sinkt der E-Modul von Thermoplasten, bis sie von einem elastischen in einen zunehmend viskoplastischen Zustand überführt sind. Der Verlauf des Speichermoduls eines amorphen Thermoplasten (Polycarbonat: Abb. 20) über der Temperatur zeigt einen Abfall bis zum Erweichungspunkt und einen Einbruch bei seinem Überschreiten.

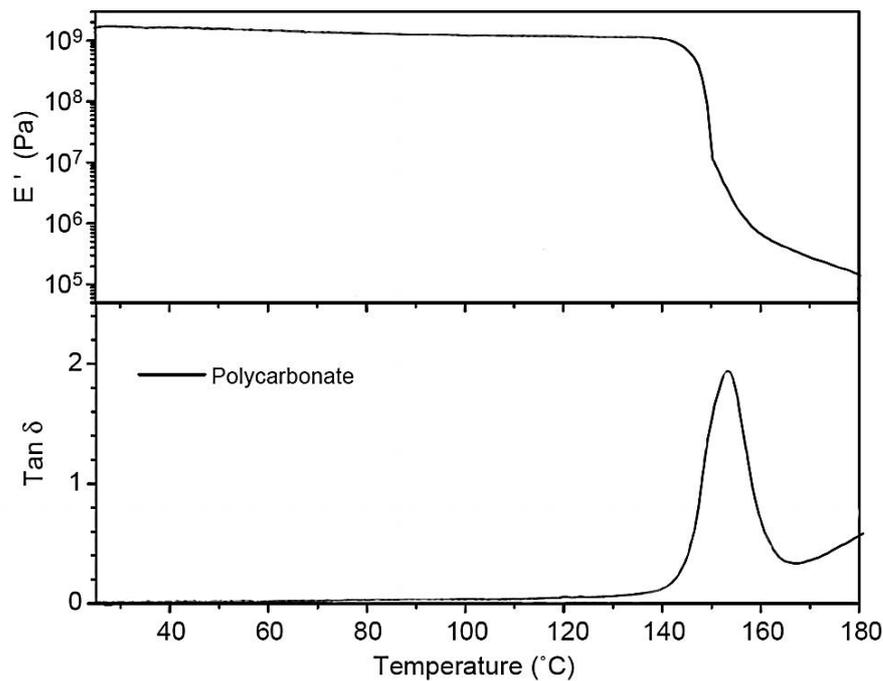


Abb. 20: Literaturangabe zum Temperatureinfluss auf Speichermodul und Verlustfaktor von Polycarbonat [88]

In diesem Zustand kann thermoplastisches Folienmaterial tiefgezogen werden. Das Material bietet gegenüber der plastischen Deformation einen mechanischen Widerstand, der zur Überführung aus dem Ausgangszustand in die Geometrie des Bauteils überwunden werden muss. Das Spannungsniveau, das zur plastischen Deformation erforderlich ist, lässt sich über die Temperatur beeinflussen und zur Drapierung des Fasermaterials funktionalisieren.

4.2.2. Randbedingung der Konzeption

Die Zusammenführung von Folie mit dem Prozess der Faserverbundverarbeitung umfasst somit drei Materialien – die thermoplastische Folie, die endlose Kohlenstofffaser und eine vernetzende Matrix. Thermoplastische Folien unterscheiden sich von Faserverbundmaterialien in ihrer Eigenschaft. Sie weisen einen vergleichsweise hohen Wärmeausdehnungskoeffizienten auf.

Wenn nun der Wärmeausdehnungskoeffizient von Folien höher ist als der des Verbundmaterials und

- Matrixsysteme unter (isothermer) Temperatureinfluss verarbeitet werden
- eine Anbindung der Folie im Vernetzungsprozess der Matrix erfolgt,

dann

- findet eine Abkühlung des Bauteils bei Entnahme aus der Werkzeugkavität statt
- wirken sich Wärmeausdehnungskoeffizienten im Abkühlungsvorgang in Form von Schrumpf aus
- werden Schrumpfungsvorgängen am Übergangspunkt der Materialkombination bei vollständiger Ausbildung von Adhäsion eingeschränkt
- folgen Abkühlungsspannungen, die zur Bauteildeformation und zur Belastung der Grenzschicht am Materialübergang führen.

Ein Lösungsansatz, die sich einstellenden Bauteildeformationen zu reduzieren besteht im symmetrischen Aufbau der verwendeten Schichten. Unter Vernachlässigung der Anisotropie des Folienmaterials und unter der Annahme, dass nur eine Art des Folienmaterials eingesetzt wird, folgt daraus der Einsatz des Folieneinsatzes zu gleicher Folienstärke auf beiden Seiten der Faserstruktur.

Folie wird in den Ablauf der Faserverarbeitung integriert, sie umschließt trockenes Fasermaterial, der Aufbau ist symmetrisch. Einsparungen von Ressourcen resultieren aus Multifunktionalität [89]. Diese entsteht, wenn das Folienmaterial Aufgaben bisher eigenständiger Prozessschritte übernimmt. Hierzu zählen bei einer frühen Einbringungsform der Folie die Handhabung und Fixierung des Fasermaterials zur Herstellung des Fasereinlegers. Unterschiedliche Mechanismen zur Faserfixierung sind dem Stand der Technik zu entnehmen und basieren auf der Ausbildung von Adhäsionskräften oder mechanischer Hemmung. Umhüllen Folien das Fasermaterial und sollen diese fixieren, so liegen die zu hemmenden Flächen parallel zueinander. Um Reibungskräfte zu steigern, kann der Reibungsbeiwert oder die Normalkraft erhöht werden. Dazu wird der Innenraum zwischen den Folien evakuiert; die Druckdifferenz zur Atmosphäre vermit-

telt die Normalkraft auf das Fasermaterial und es kommt zur Kompaktierung (Abb. 21). Die Kräfte zur Verschiebung der Faserlagen werden dabei erhöht [90]. Die Kombination aus einem gasdichten Umschließen der Fasern mit Folie und dem Evakuieren des Innenraumes führt somit zu einer Anordnung, die sich durch erhöhten Schubwiderstand gegenüber Biegung und damit vereinfachter Handhabung auszeichnet.

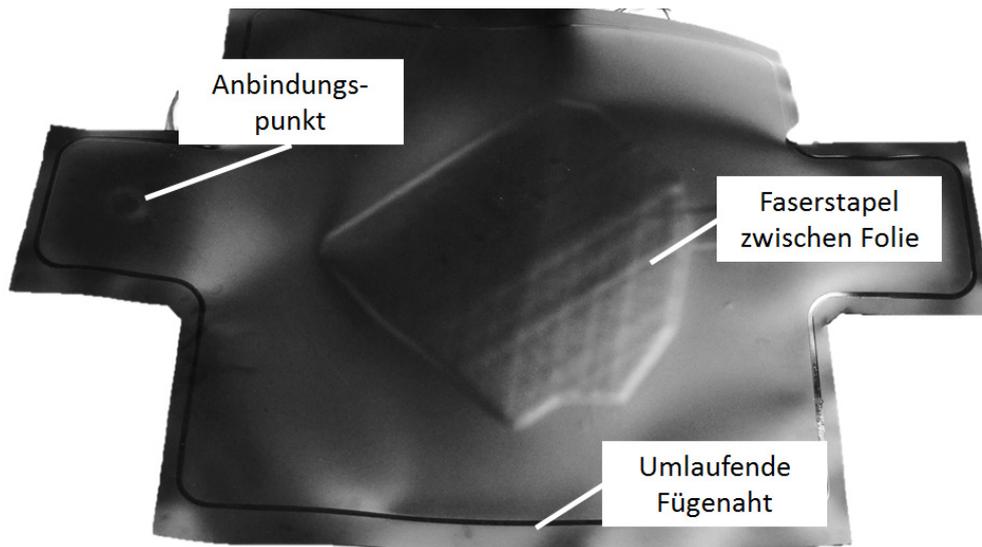


Abb. 21: Demonstrator des vakuumierten, folienintegrierten Fasereinlegers

Eine Anordnung aus Folie und trockenem Faserhalbzeug im Sinne der Zielsetzung ist erreicht, wenn

- die umhüllende Anordnung der Folie das Fasermaterial zur vereinfachten Handhabung mechanisch stabilisiert
- ein Austausch des Fasermaterials mit der Umwelt unterbunden wird und dadurch die Anordnung zeitlich stabil und lagerbar ist
- eine zeitlich/ räumlich kombinierte Umformung aus Fasermaterial und Folie nachfolgend möglich ist

Unter diesen Voraussetzungen kann die Verarbeitungskomplexität der Prozesskette aufgeteilt werden. Die Aufteilung in Module

- zur Herstellung der transport-/ lagerstabilen Fasereinleger (Abb. 21)
- zur Formung und Injektion

sind durch den Austausch ebener, stapelbarer und definierbarer Zwischenprodukte verknüpft. Prozessschritte mit hoher wechselseitiger Abhängigkeit wie

- Faserzuschnitt / Lagenorientierung / Fixierung
- Faserformung / Konsolidierung

bleiben anlagenseitig verbunden (Abb. 22).

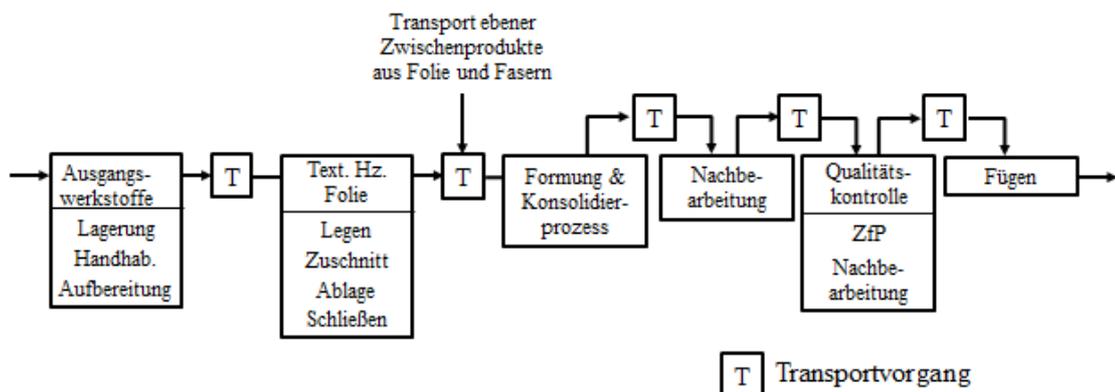


Abb. 22: Prozesskette folienbasierter Faserverbundverarbeitung in Anlehnung an [5]

Diese Zwischenprodukte unterscheiden sich von Fasereinlegern der RTM-Prozesskette (Abb. 6) durch ihre zweidimensionale Geometrie bei der Zuführung zum RTM-Werkzeug. Sie entsprechen damit einer Vorstufe jener Fasereinleger, die in endkonturnaher, dreidimensionaler Form in der RTM-Prozesskette Anwendung finden.

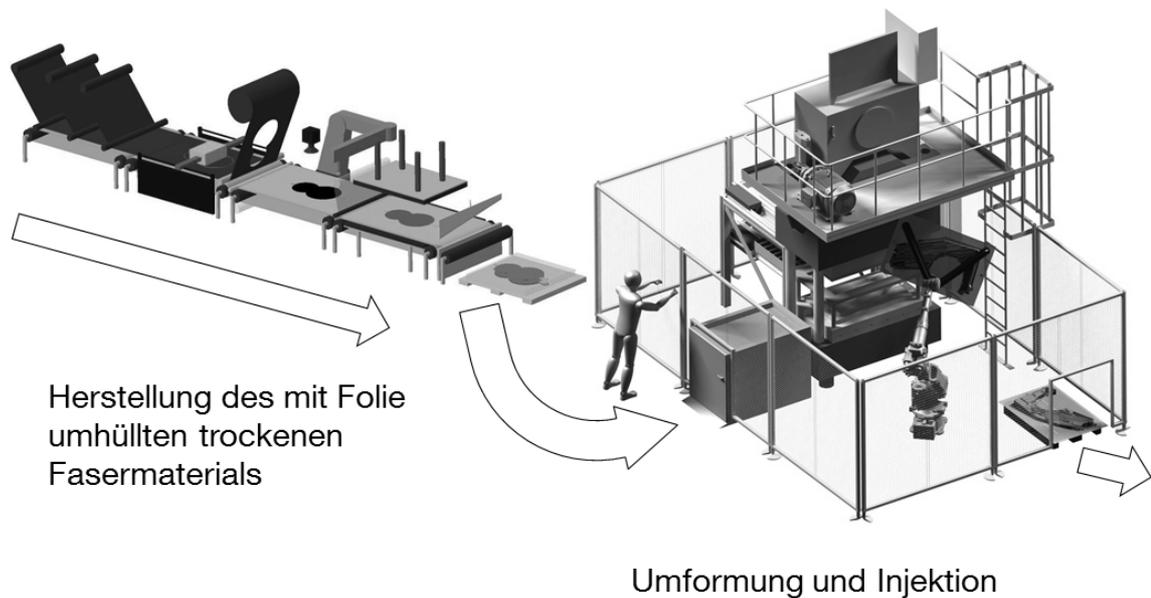


Abb. 23: Module des folienbasierten Verarbeitungsansatzes als Verarbeitungskette

1. Beschreibung des Zwischenprodukts

Folienintegrierte Faservorformlinge bestehen im vorliegenden Konzept (Abb. 24) aus trockenen Verstärkungsfasern innen, beidseitig und vollständig umgeben von gasdichtem und thermoformbarem Schichtmaterial außen. Sie sind transport- und lagerstabil. Das trockene Fasermaterial ist drapierbar, Scherbewegungen sind nicht unterbunden. Die umhüllende organische Schicht, aufgebaut als thermoplastischer Schichtverbund, ist durch ihre Anbindungsfähigkeit auf der Innenseite zur eingesetzten Reaktionsmasse gekennzeichnet, verfügt über Anbindungsstelle(n) zum kontrollierten Eintrag dieser, überragt die Kontur des Fasermaterials und fixiert dieses während Lagerung und Transport durch die Aufrechterhaltung einer Druckdifferenz zur Atmosphäre.

2. Umformung und Injektion

Die folierten Faservorformlinge werden dem Umformprozess in ebener Form bei geöffnetem Werkzeug zugeführt. Ein anschließender Formgebungsprozess findet statt, wobei eine Materialbewegung vollzogen wird. Am Ende dieser Materialbewegung liegen Fasern in drapierter, Folie in geformter und Werkzeug in geschlossenem Zustand vor. Die Randbedingungen dieser Materialbewegung umfassen

- Temperatureinwirkungen auf das zu formende Folienmaterial zu dessen Überführung in den viskoplastischen Materialzustand
- Auslenkungen des Folienmaterials aus der Ebene, begleitet durch eine plastische Materialdeformation der Folie unter Abnahme der Wandstärke, der Zunahme der Oberfläche und einhergehender Verlängerung von Punktabständen
- Auslenkungen des Fasermaterials aus der Ebene, ohne / mit vernachlässigter Verlängerung von Punktabständen entlang von Faserfilamenten
- Abformungen der Werkzeuggeometrie auf Folie und Fasermaterial
- Öffnen eines Querschnitts in die Folienumhüllung zum Eintritt der Reaktionsmasse.

Grundlage der plastischen Foliendeformation ist die Umformspannung der Fließgrenze, die bei gegebener Geometrie maßgeblich mit der Temperatur korreliert. Hierzu wird die Folie vor der Formgebung erwärmt. Ort, Höhe und Richtung des Spannungseintrags und der Materialantwort führen zur Abformung. Einleitendes Element der Zugspannung ist das Eindringen eines konvexen Werkzeugkörpers oder die Einwirkung einer Druckdifferenz bei der Abformung konkaver Geometrie.

3. Spannrahmenkonzept

Erfährt die einleitende Zugkraft keine ihr entgegen gerichtete Kraft gleicher Größe, so kommt es nicht zur angestrebten Deformation, sondern lediglich zur räumlichen Verschiebung. Eine Einspannung der umzuformenden Folie unterbindet Verschiebungen; bei umlaufender Einspannung können Deformationskräfte in Richtung und Größe zeitlich variieren, eine Verschiebung ist unterbunden. Vor dem formgebenden Schritt der Folie wird diese erwärmt. Eine Erwärmung außerhalb des Werkzeuges auf Umformtemperatur würde den Transport des heißen und formbaren Zwischenprodukts bedeuten und könnte zum Positionsverlust des Fasermaterials führen. Dies wird durch eine Aufheizung im allseitig eingespannten Zustand innerhalb des Werkzeuges umgangen. Dabei erfolgt erst das Einspannen und dann das Aufheizen innerhalb der Einspannung.

Zur Formung des Einlegers sind beide Folien auf beiden Seiten des Faserhalbzeuges aufzuheizen. Je nach Innendruck zwischen den Folien können

sich isolierende Luftschichten zwischen den Folien ergeben, die einen beidseitigen Wärmeeintrag notwendig machen. Die Kombination aus beidseitiger Zugänglichkeit zur Aufheizung des Folienmaterials sowie die umlaufende Einspannung führen auf einen frei liegenden, beweglichen Spannrahmen im Werkzeug.

4. Anbindungspunkt des Einlegers zur Anlagentechnik

Um Reaktionsmasse in den Innenbereich zwischen den Folien eintragen zu können, ist eine offene Querschnittsfläche durch das Folienmaterial notwendig. Dieser Querschnitt ist zur Aufrechterhaltung der faserfixierenden Druckdifferenz zur Atmosphäre während Lagerung und Transport geschlossen. Die Anbindung erfüllt die Erfordernisse hinsichtlich Druck- und Temperaturbelastung während Injektions- und Härtingsphase. Sie ist dicht und weist einen geringen Fließwiderstand auf.

Berührungsdichtungen an ruhenden Flächen basieren auf einem Formschluss unter Normalkrafteinwirkung auf der Dichtfläche. Wird das Paket aus zwei Folien an ihrer Oberfläche für eine Dichtwirkung um den Öffnungsquerschnitt herum verpresst, liegen beide Folieninnenseiten aufeinander auf. Dies führt zur ungewollten Dichtwirkung zwischen den Folien, so dass der Transport der Reaktionsmasse hindurch behindert ist. Dieser technische Widerspruch aus Normalkraft auf die Folie zur Erzeugung von Dichtwirkung und keiner Einwirkung von Normalkraft zum ungehinderten Transport der Reaktionsmasse dazwischen kann gelöst werden, indem zwischen den Folien ein Element eingelegt wird, das die Normalkräfte aufnimmt und dennoch durchlässig bleibt. Dieses Element bedeckt die Anbindungsstelle. Nimmt die Folie an der Umformung teil, verändern sich im umgeformten Bereich die Punktabstände auf der Folie. Dies führt zu einer Verschiebung der Anbindungsstelle. Entweder wird das Anbindungselement in ausreichender Größe eingebunden, so dass eine Verschiebung durch seine Größe kompensiert werden kann, oder es wird zwischen den Folien an einer Stelle positioniert, die keine Umformung erfährt. Dies ist im Spannrahmenbereich unmittelbar außerhalb der Folienklemmung der Fall.

Eine Anbindung des folierten Zwischenprodukts zum Eintrag der Reaktionsmasse innerhalb des beweglichen Spannrahmens führt zu einer dem

Spannrahmen folgenden An-/ Abgussposition (nachfolgend Injektionskopf für Anguss- und Innendrucksteuerung für Abgussposition).

Innerhalb des Injektionskopfes treffen die Komponenten der Reaktionsmasse aufeinander, werden vermengt und unter Hochdruck homogenisiert, bevor sie in die Kavität als Reaktionsmasse eingetragen werden. Das Modul zur Innendrucksteuerung umfasst ein Ventil, das im Kontakt mit der Reaktionsmasse nicht geschädigt wird und den Druck in der Kavität vor und während der Injektion steuert. Beides entspricht dem Stand der Technik.

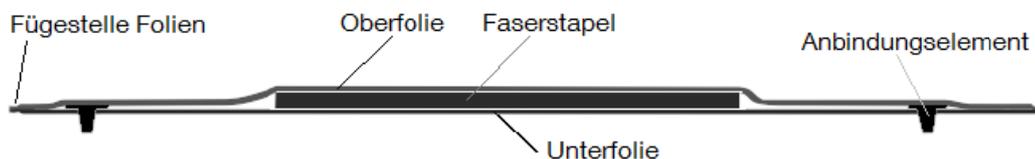


Abb. 24: Folienintegrierter Fasereinleger

5. Werkzeugaufbau

Die Anbindung des folienintegrierten Einlegers erfolgt an einer Stelle, die nicht umgeformt wird. Zur Lösung des technischen Widerspruchs aus Normalkraft zur Dichtwirkung und Fließbehinderung wird ein Zwischenelement zwischen die Folien integriert. Der Injektionskopf sowie das Modul zur Innendrucksteuerung befinden sich direkt am beweglichen Spannrahmen. Die Umformung von Folie und Drapierung des Fasermaterials erfolgt innerhalb eines Schließvorganges der Presse. In dieser Bewegung vollzieht sich eine Annäherung zwischen der Folien- und der Werkzeugoberfläche. Dabei kann es zum Einschluss von Umgebungsluft kommen. Kanäle zur Abfuhr der eingeschlossenen Luft sind an der Werkzeugoberfläche zu integrieren. Diese weisen einen Durchmesser auf, der zu einem Bereich auf dem Folienmaterial führt, in dem die Folie während der Injektionsbelastung rückseitig nicht durch das Werkzeug stabilisiert ist. Während der Formung der Folie besteht somit die Gefahr, diese werkzeugseitigen Bohrungen abzuformen; während der Injektion besteht die Gefahr, die Folie an dieser Stelle durchzubrechen. Ein kleinstmöglicher Bohrungsdurchmesser ($\sim 0,6\text{mm}$ [48]) ist angestrebt, der dennoch ausreichend groß ist, eingeschlossene Luft im Formungsvorgang abzuführen.

Der folierte Fasereinleger wird dem Werkzeug eben zugeführt. Ein beweglicher Spannrahmen fixiert das zu formende Folienmaterial umlaufend. Ein beidseitiger und flächiger Zugang zur Aufheizung des Folienmaterials ist gewährleistet. Die Aufheizung des Folienmaterials erfolgt nach der Einspannung, um den Transport biegeweicher Folien zu umgehen. Die Anbindung des Innenraumes zwischen den Folien an die Injektionsstelle erfolgt innerhalb des Spannrahmens. Für die Auflösung des technischen Widerspruchs Dichtwirkung/ Fließwiderstand infolge Normalkräfte werden Anbindungselemente zwischen die Folien eingebracht. Zur Abfuhr eingeschlossener Luft führen Kanäle von der Werkzeugoberfläche ab. Diese können mit Vakuum beaufschlagt werden.

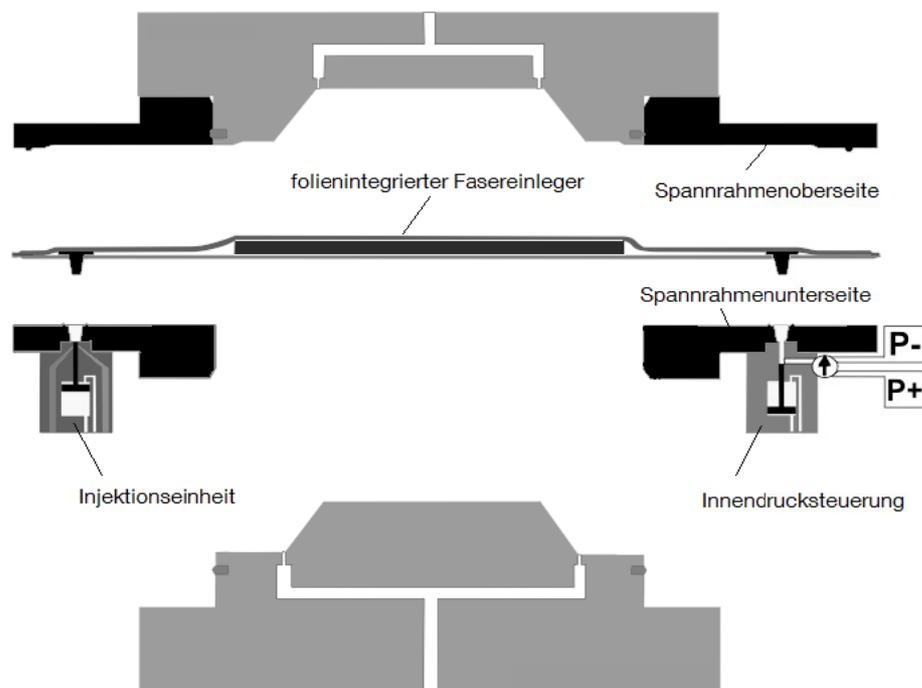


Abb. 25: Werkzeugkonzept

4.2.3. Zusammenfassung Konzeption

Aus der Ableitung der Zielplanung ergibt sich eine Materialhybridisierung zur Vereinigung der Eigenschaften thermoplastischer Anteile mit den Möglichkeiten zur Scherwinkelausbildung trockener Faserlagen und deren anschließender Matrixkonsolidierung mit einem Duroplasten.

Kernidee der Konzeption ist die vollständige Umhüllung des Fasermaterials mit Folien, um eine räumliche Trennung der vernetzenden Matrix von der Werkzeugoberfläche zu vollziehen und gleichzeitig die Ausbildung von

Adhäsionskräften im Vernetzungsprozess durch die dauerhafte Anbindung der Folie an das Faserverbundssubstrat zu nutzen. Den Folien wird zusätzlich eine Multifunktionalität verliehen, wenn der Kraftbereich während ihrer plastischen Formung zur Faserdrapierung genutzt wird und das Fasermaterial vorab transportiert. Damit der Zugewinn der vereinfachten Handhabung der trockenen Fasermaterialien durch Folie mit erschwelter Handhabung biegeweicher Folien in ihrer Umformungsphase nicht kompensiert wird, erfolgt dessen Erweichung erst durch ein Aufheizen im Spannrahmen des Werkzeugs.

4.3. Prozessbeschreibung

Das Ziel der Prozessauslegung ist die Verknüpfung der Arbeitsschritte zum Verarbeitungssystem. Diese Arbeitsschritte umfassen im Einzelnen:

- Formung Oberfolie - Unterfolie
- Drapierung Fasermaterial
- Anbindung Injektionspunkt– Innendrucksteuerung
- Injektions/ Fasertränkung
- Bauteilentnahme

Das in Abb. 25 dargestellte Werkzeugkonzept zeigt die Einlegesituation des Zwischenproduktes in den Spannrahmen. Mit dem Schließen des Spannrahmens erfolgt die Anbindung an die Innendrucksteuerung und Injektionseinheit. Ab diesem Zeitpunkt kann geformt und Matrix injiziert werden. Zwei Herangehensweisen für den Zeitpunkt des Matrixeintrages werden unterschieden:

- Entweder wird die Matrix vor dem formgebenden Schritt, also im ebenen Zustand,
- oder nach der Formung des Aufbaus in das geschlossene Werkzeug eingebracht.

Bei einer Tränkung des Fasermaterials im ebenen Zustand unterliegt der Materialanteil aus Folie und Faser keiner werkzeugseitigen Auflage. Folglich wirkt dem Injektionsdruck lediglich der atmosphärische Druck entgegen. Unter der Annahme, dass das Fasermaterial zu dessen Drapierung oh-

ne Vorfixierung an der Folie durch Reibung fixiert ist, darf die Folie während der Tränkung nicht vom Fasermaterial abheben. Dies bedeutet, dass der Druck innerhalb des Aufbaus stets unter dem atmosphärischen liegt. Die zur Tränkung verfügbare Druckdifferenz liegt folglich unterhalb des atmosphärischen Druckes. Eine hohe Zykluszeit zur Tränkung des Fasermaterials wäre die Folge.

Weiterhin wird die Folie vor der Formung erhitzt. Wird die Matrix erst eingetragen und dann geformt, erfährt sie in der Aufheizphase der Folie einen Wärmeeintrag. Dieser Wärmeeintrag kann die Reaktion der Matrix beschleunigen und zu einem anteiligen Aushärten noch vor der Formung führen. In der Kombination aus begrenzter Druckdifferenz, thermischer Verknüpfung von Folienformung und Reaktionsbeschleunigung wird von der Matrixinjektion vor dem formgebenden Schritt für Folie und Fasern abgesehen. Der Konsolidierung des Fasermaterials geht die Formung des trockenen Aufbaus voran.

Abb. 26 zeigt die Zustände vor und nach der Formung. Vor der Formung (links) ist der folierte Fasereinleger im Spannrahmen fixiert, die Anbindungspunkte zur Vakuum- und Injektionseinheit hergestellt, eine flächige, separate Temperierung der Folienflächen durch bewegliche Heizelemente für Ober- und Unterfolie zugänglich.

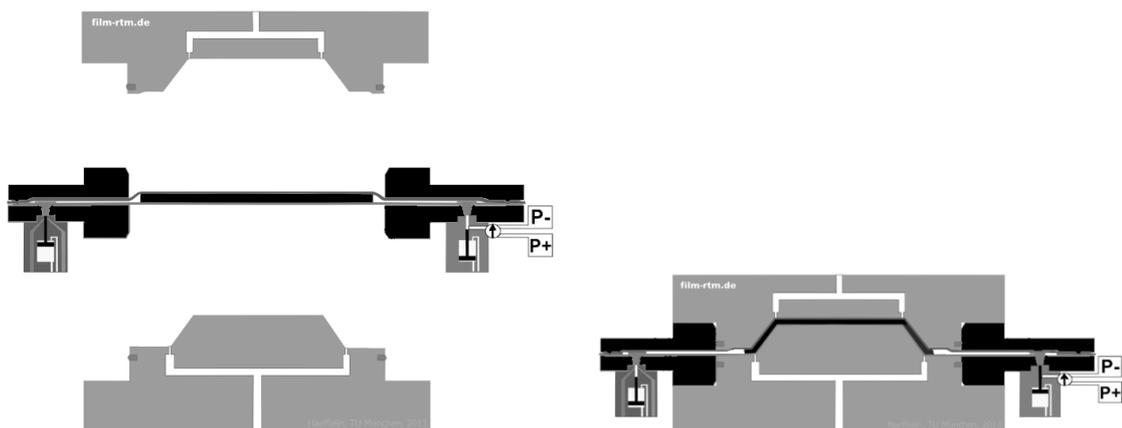


Abb. 26: Anfangs- (links) und Endzustand (rechts) der Umformung

Im umgeformten Zustand und vor der Injektion der Matrix (rechts) ist das Werkzeug geschlossen, die Folie liegt an der Werkzeugoberfläche an. Die Steuergrößen zur Formgebung werden in Druck, Weg, Temperatur und Material gegliedert. Ziel der Steuergrößen ist es, ungewollte Störgrößen

wie Falten oder thermische Schädigung der Folien zu minimieren. Der Arbeitsschritt der Formung kann weiter in Folienformung und Faserdrapierung unterteilt werden. Sie weisen eine thermomechanische Verknüpfung auf, da die zur Drapierung notwendigen Normal- und Querkräfte durch die thermisch erweichten Folien vermittelt werden. Da die Injektion erst nach der Formung erfolgt, kann der Druck zwischen den Folien für den Zeitraum der Formung den atmosphärischen überschreiten, sofern dabei die Faserposition nicht verloren geht.

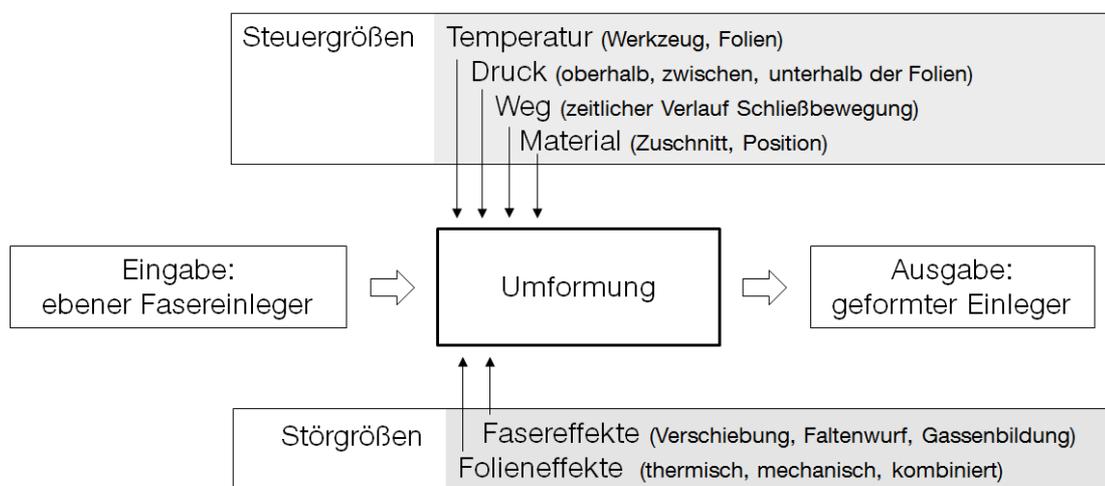


Abb. 27: Darstellung der Einflüsse auf die Umformung

Unter der Zielvorgabe, dass die konvexe Folienseite keine optische Beeinträchtigung durch das darunterliegende Fasermaterial erfährt, ist ein Faserkontakt im erweichten Zustand der Oberfolie zu vermeiden. Daher wird die Oberfolie vor der Erweichung vom Fasermaterial abgehoben. Die Werkzeugtemperierung ist isotherm und befindet sich unterhalb des Erweichungspunktes der Folie.

Eine Auswirkung der Reihenfolge, wann sich welche Materialschicht (Unterfolie / Fasereinleger / Oberfolie-) unter welchem Einfluss bewegt, wird erwartet.

Drei unterschiedliche Abläufe werden identifiziert:

- Diaphragma-Formung (Abb. 28 oben)
- Doppel-Diaphragma-Formung (Abb. 28 mitte)
- Press-Formung (Abb. 28 unten)

Den drei Abläufen zur Formung ist gemein, dass zunächst die Oberfolie durch eine eingetragene Luftmenge vom Fasermaterial abgehoben wird. Das Aufheizen der Oberfolie ohne Faserkontakt dient optischen Ansprüchen an die spätere Sichtseite. Ist die Oberfolie erhitzt, schließt das Oberwerkzeug bis zu einer Zwischenposition auf Höhe des Spannrahmens. Die dabei eingeschlossene Luftmenge wird abgesaugt und führt zur Druckdifferenz, die die Oberfolie formt. Die Oberfolie legt sich durch diese Formung an die Werkzeugoberfläche an. Da durch das Entfernen des Heizelements der Oberfolie und den Schließvorgang des Oberwerkzeuges bis auf die Spannrahmenhöhe Zeit vergeht, in der die Folie durch Strahlung, Konvektion und Wärmeleitung kühlt, unterscheidet sich die Zieltemperatur der Folie von jener der Formung. Die maximale Temperatur der Folie ergibt sich somit aus der Summe aus

- der zur Formung gewählten Temperatur und
- einer Zusatztemperatur zur Kompensation der Folienabkühlung während des Schließvorganges.

Diese Zusatztemperatur steigt mit dem Temperaturverlust der Abkühlung und wird experimentell ermittelt. Mit dem Anlegen der Folie an die Werkzeugoberfläche kommt es zur Angleichung der Folientemperatur an die Werkzeugtemperatur. Die Temperatur des Oberwerkzeuges begrenzt sich auf einen Temperaturbereich der Folie, in dem die mechanischen Eigenschaften der Folie den Anforderungen der nachfolgenden Verarbeitung, wie Faserdrapierung und Injektionsdruck, Stand halten. In den weiteren Materialbewegungen unterscheiden sich Druck-, Weg- und Temperaturführung gemäß Abb. 28. Jedoch unterliegen sie vor/ während der zweiten Werkzeugbewegung zum geschlossenen Werkzeug den Randbedingungen, dass

- das Gewicht des ebenen Fasermaterials auf der unteren Folie lastet
- eine Erweichung der Unterfolie zu deren Formung notwendig ist
- das Gewicht des Fasermaterials bei der Erweichung der Unterfolie zu keinem schädigenden Durchhang oder einer Faserverschiebung führen darf

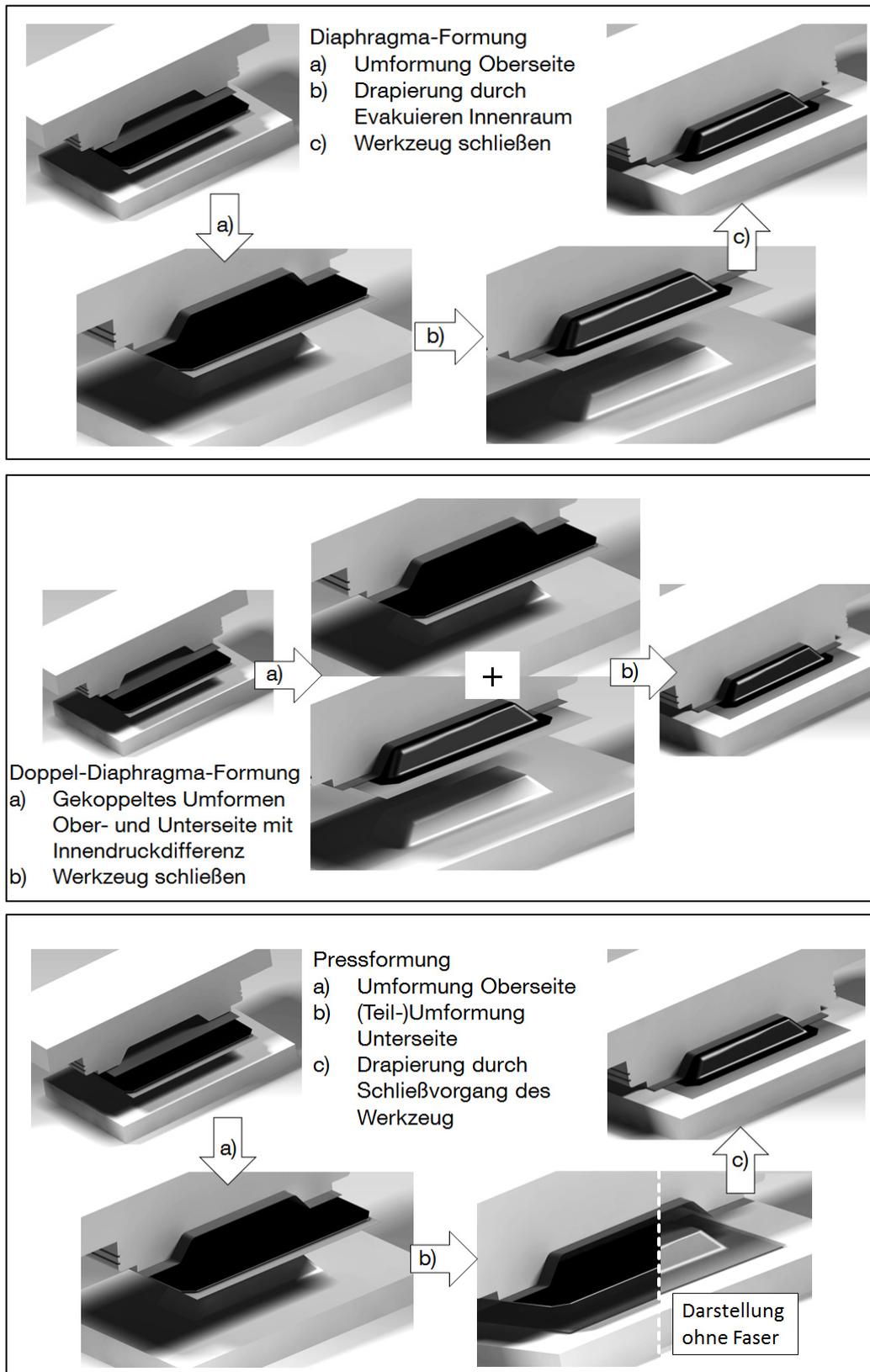


Abb. 28: Umformstrategien

4.3.1. Diaphragma-Formung

Dieser Ablauf basiert auf der Faserformung durch Ansaugen der Unterfolie an das Oberwerkzeug.

Formung Oberfolie

In einem ersten Schritt wird die Oberfolie unabhängig von Unterfolie und Fasermaterial geformt. Der Innendruck wird angehoben bis die Oberfolie vom Fasermaterial abhebt. Hat die Oberfolie ihre Zieltemperatur erreicht, wird das Oberwerkzeug bis auf den Spannrahmen abgesenkt. Der sich bildende Zwischenraum zwischen Werkzeug und Oberfolie wird evakuiert, die Oberfolie dadurch geformt.

Faserdrapierung und Formung Unterfolie

Im Folgenden werden die noch ebenen Anteile aus Folie und Fasern geformt. Dazu wird die Steifigkeit der Unterfolie durch thermische Einwirkung abgesenkt, was zu technisch widerläufigen Anforderungen führt. Einerseits soll die Folie ausreichende mechanische Steifigkeit aufweisen, um einen Durchhang infolge des Fasergewichtes zu vermeiden, andererseits soll ihre Steifigkeit soweit reduziert werden, dass eine Umformung möglich wird. Da das Volumen des Folieneinlegers durch die Formung der Oberfolie zunimmt, kann in Abhängigkeit der anfänglich eingetragenen Luftmenge ein Wechsel des Innendruckes von oberhalb zu unterhalb des Umgebungsdruckes erreicht werden. In diesem Zustand, also unmittelbar nach der Formung der Oberfolie, wird die Unterfolie durch diesen Unterdruck gegen Durchhang während der Aufheizung der Unterfolie stabilisiert und somit der technische Widerspruch bei Erweichung der Unterfolie gelöst.

Faserdrapierung

Befindet sich die Unterfolie im Temperaturbereich der Formung, wird diese an die Oberfolie durch Entlüftung des Folieninnenraumes angesaugt. An den ersten Kontaktpunkten der Fasermaterialien mit der umgeformten Oberfolie kommt es zur Kompaktierung und dem Aufbau von Normalkräften zur Faserebene. Wird das Fasermaterial in Faserebene bewegt, entsteht Reibung zwischen Faser und Folie. Befindet sich zwischen zwei gegenüberliegenden Auflagepunkten Fasermaterial, das eine weitere Umformung oder Längenänderung erfährt, so sind die Reibungskräfte anteilig gegenei-

inander gerichtet. Dadurch kann Zugspannung auf das Fasermaterial in der weiteren Umformung aufgebracht werden. Das Werkzeug mit drapierter Faser wird anschließend geschlossen. Abweichungen von der ursprünglichen Faserlagendicke (durch die Ausbildung von Scherwinkeln, Faltenwurf oder Faserverzug) werden verpresst. Daraus resultierende Spannungskonzentrationen können die Folie schädigen.

4.3.2. Doppel-Diaphragma-Formung

Dieser Ablauf basiert auf der Faserformung zwischen den Folien, die zeitnah kombiniert vom Oberwerkzeug angesaugt werden. Der zur Diaphragma-Formung abweichende zeitliche Verlauf von Folieninnendruck und Schließweg ist in Abb. 29 dargestellt.

Analog zum Ablauf nach der Diaphragma-Formung steht die Oberfolie in der Aufheizphase nicht in Kontakt mit dem Fasermaterial. Die zur Anhebung der Oberfolie eingesetzte Luftmenge ist kleiner als die Volumenzunahme des Folienpaketes durch die Formung der Oberfolie. Dies resultiert im Druckwechsel innerhalb des Folienaufbaus im Formungsprozess; die Unterfolie folgt verzögert der Formung der Oberfolie.

Die zeitliche Koppelung beider Folienformungen mit der Faserdrapierung führt dazu, dass eine Stabilisierung gegen den Durchhang durch ein Absenken des Innendrucks erst dann möglich ist, wenn sich dieser auf die sinkende Druckdifferenz zwischen Oberfolie und Werkzeug übertragen lässt. Damit kommt es zu einem instabilen und dynamischen Zusammenspiel aus zeitlich verzögerter Erweichung beider Folien.

Ein zeitgleiches Umformen beider Folien mit dem Fasermaterial führt auf die flächige Einwirkung von Normalkräften auf die trockenen Faserlagen während ihrer Drapierung. In der Kombination aus Reibungskräften zwischen Faser und Folie werden die Fasern mit dem Anstieg der Punktabstände auf Zug belastet.

Im Unterschied zum Ablauf nach dem Diaphragma-Formen, bei dem sich Zugkräfte im Fasermaterial mit der Reibung im lokalen Kontakt der Faser an die Oberfolie ausbilden, ist bei einem frühen Unterschreiten des Innendrucks zum Umgebungsdruck der Kontakt der Fasern zum Folienmaterial beidseitig flächenartig. Über die Innendrucksteuerung ist eine zusätzliche Einflussnahme möglich und führt zum komplexen Zusammenspiel aus Um-

formung, Innendruck, lokaler Verteilung der Faserkompression, Ausbildung von Reibungskräften und lokaler Verteilung der Folientemperatur.

4.3.3. Press-Formung

Dieser Ablauf basiert auf der Faserformung durch die Schließbewegung des Werkzeuges mit voreilender Teilausformung der Unterfolie auf dem Unterwerkzeug. Der Ablauf gliedert sich in drei Teilschritte:

- Formen der Oberfolie am Oberwerkzeug
- das (über-) druckbasierte Teilausformen der Unterfolie und Legen des Fasermaterials auf das Unterwerkzeug
- mit der anschließenden werkzeuggesteuerten Ausformung durch Verpressen der Unterfolie und Drapierung

Die Umformung der Oberfolie verläuft im Formungsschritt analog zur Diaphragma-Formung.

Die Unterfolie wird aufgeheizt. Mit Erreichen der Zieltemperatur senkt sich der Spanrahmen mit dem Oberwerkzeug, ausgehend von der Zwischenposition, auf das Unterwerkzeug. Zu diesem Zeitpunkt liegt das Fasermaterial auf der flachen und erhitzten Unterfolie auf; diese ist durch eine zwischen den Folien eingeschlossene Luftmenge gegen Durchhang stabilisiert. In Folge des entstehenden Überdrucks durch das Eindringen der konvexen Werkzeuggeometrie in die Folienebene entsteht eine anteilige Ausformung der Unterfolie auf dem Unterwerkzeug, wobei engere Radien in dieser Legephase des Fasermaterials von der Folie überspannt bleiben.

Die zunächst unvollständige Ausformung der Unterfolie ist wesentlicher Bestandteil der Faserdrapierung. Dieses Vorgehen ermöglicht zunächst die lose Ablage des Fasermaterials in einer der Bauteilgeometrie nahen Werkzeugtopologie und einer anschließenden Ausformung enger Radien durch das Eindringen des Werkzeuges in die vom Fasermaterial bedeckten und noch in der Formungstemperatur befindlichen Folienbereiche. Enge Radien bleiben anteilig von formbarer Folie und aufliegendem Fasermaterial überspannt bis es zur mechanischen Einwirkung der Geometrie der Oberseite kommt. Die sich dabei vollziehenden Längenänderungen, also die Weitung von Punktabständen im Folienmaterial an den überspannten Bereichen, führen in der Ausformungsphase zur Normalkrafteinwirkung der Faser auf

die Folie, damit zu Reibungskräften und in der Kombination zur Zugbelastung der Faser während ihrer Drapierung.

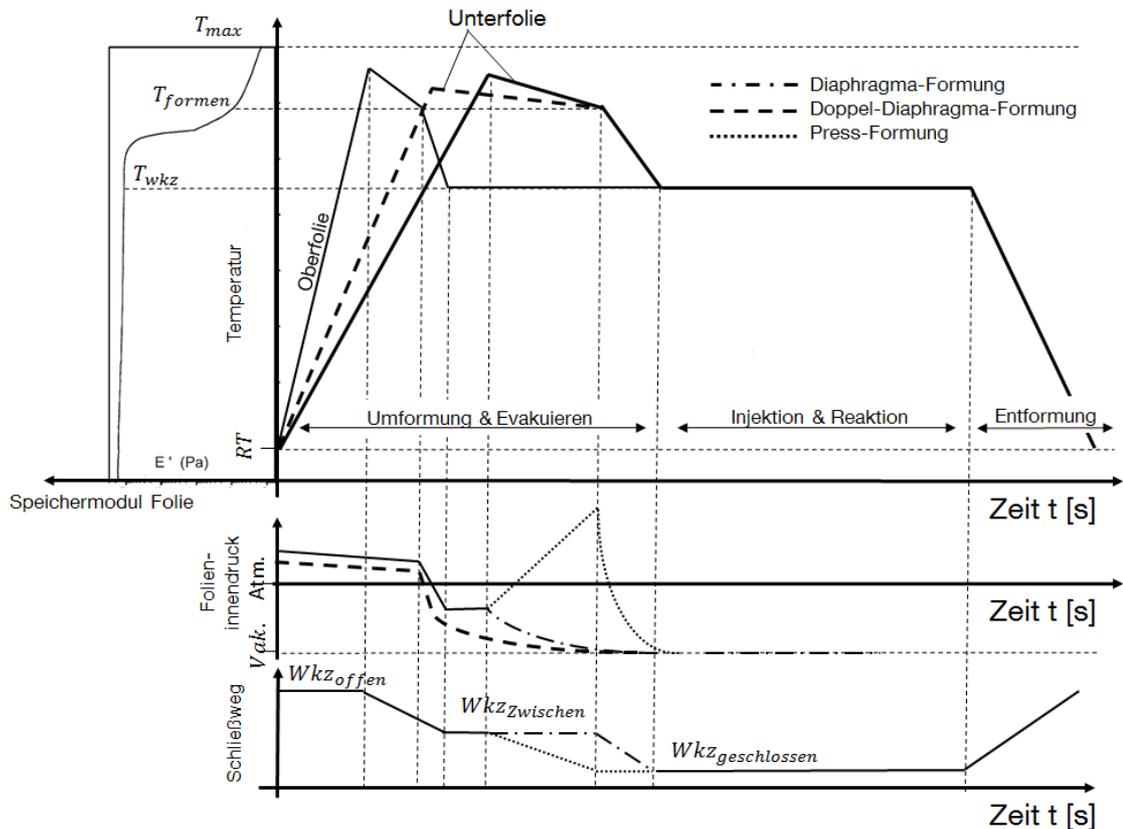


Abb. 29: Prozessauslegung zur Folienintegration in den RTM-Prozess

4.4. Zusammenfassung zur Prozessauslegung

Das betrachtete System ist der Herstellungsprozess von schalenförmigen Faserverbundbauteilen. Die Auslegung des Prozesses gliedert sich in die Schritte zur Aufgabenanalyse, Konzeption und Formulierung des Prozesses.

Duromere Matrixsysteme bilden bei Ihrer Vernetzung Adhäsionskräfte aus. Dies ist zum Fasermaterial hin erwünscht, zur Werkzeugoberfläche hin jedoch nicht erwünscht. Im gewählten Ansatz wird zwischen die Werkzeugoberfläche und dem Fasermaterial eine Folie aufgebracht, die am Bauteil verbleibt und zur Steigerung der technischen Gebrauchsfertigkeit beiträgt. Werden thermoplastische Folien im viskoplastischen Zustand mit einer Spannung oberhalb ihrer Fließgrenze belastet, kommt es zur plastischen Deformation. Der mechanische Widerstand, der zur Überführung der Folie

in die Geometrie des Bauteils aus der Ebene heraus aufzubringen ist, wird zur Drapierung des Fasermaterials eingesetzt. Die Formung des Fasermaterials erfolgt trocken und vor der Injektion; Formung und Injektion finden zusammen in einem Werkzeug statt. Die Randbedingungen der Konzeption umfassen einen symmetrischen Aufbau bei vollständiger Umhüllung des Fasermaterials mit Folie. Daraus abgeleitet ergibt sich ein ebenes, lager- und transportstabiles Zwischenprodukt sowie zwei Module einer Prozesskette. Im ersten Modul werden die ebenen, trockenen Zwischenprodukte gefertigt, im zweiten verarbeitet.

Unter der Zielvorgabe, dass die konvexe Folienseite keine optische Beeinträchtigung durch das darunterliegende Fasermaterial erfährt, wird die Oberfolie vor der Erweichung vom Fasermaterial abgehoben. Drei Abläufe der Formung werden weiter untersucht. Diese sind:

- Diaphragma-Formung (Abb. 28 oben): basiert auf der Faserformung durch Ansaugen der Unterfolie an das Oberwerkzeug
- Doppel-Diaphragma-Formung (Abb. 28 mitte): basiert auf der Faserformung zwischen den Folien, die zeitnah kombiniert vom Oberwerkzeug angesaugt werden
- Press-Formung (Abb. 28 unten): basiert auf der Faserformung durch die Schließbewegung des Werkzeuges mit voreilender Teilausformung der Unterfolie auf dem Unterwerkzeug

5. Untersuchungen der Prozesskette

Der aus der Auslegung resultierende Prozess basiert auf der Annahme, dass eine Formung der Folienumhüllung und ein Drapieren der Faser gemäß Abb. 29 möglich ist und das dabei entstandene Zwischenprodukt mit duroplastischer Matrix getränkt werden kann, wobei eine Anbindung der Folie mit der Reaktionshärtung der Matrix erfolgt. Um die Richtigkeit der Annahmen zu prüfen, bedarf es dem Experiment, der realen Umsetzung der Prozesskette. Auf Grund der erwarteten komplexen mechanischen und thermischen Zusammenhänge wird die Gesamtkomplexität in Teillösungen zur

- Folienformung
- Faserdrapierung
- Folienanhaftung

mit anschließender Überlagerung zur Gesamtlösung [50] gegliedert. Untersuchungen zu Teillösungen umfassen eine Vorauslegung durch numerische Modellierung thermischer Spannungen, Auslegung der Matrix hinsichtlich des zeitlichen und thermischen Prozessfensters, deren Haftung zur Folie sowie Voruntersuchungen zur Folienformung. Auf diesen Voruntersuchungen aufbauend wird die Versuchsanlage zum Prozess konzipiert und umgesetzt. In einer von der Injektion separierten Untersuchung zur Umformbarkeit des Aufbaus werden die drei beschriebenen Umformungsabläufe untersucht. Der zur Formung der Folie und Drapierung der Faser geeignetste Ablauf wird ausgewählt, der Aufbau mit Matrix injiziert und Einflussparameter auf die Oberflächeneigenschaften untersucht. Die Experimente zum dynamischen Lasteintrag und dem Brandverhalten des Laminates sind in [9] dokumentiert.

5.1. Voruntersuchungen zur Anlagenentwicklung

Voruntersuchungen finden vor der Auslegung der Anlage statt und führen zu Teillösungen und der Einschränkung von Prozessparametern. Diese Teillösungen umfassen eine numerische Modellrechnung zur Abschätzung thermischer Spannungen, der experimentellen Eingrenzung und Auslegung der Prozessparameter zur Matrixverarbeitung, der Untersuchung zur Ausbildung von Adhäsionskräften zwischen Matrix und Folie, die Effekte der

Folienaufheizung sowie eine Eingrenzung der Folienstärken im Hinblick auf mechanische Eigenschaften.

5.1.1. Numerische Modellierung thermischer Spannung/ Faserabzeichnung

In der gewählten Anordnung aus beidseitiger Folie und Faserverbund bilden sich Grenzflächen aus: zwischen der thermoplastischen Phase mit hohem und zwischen dem Faserverbundmaterial mit geringem Wärmeausdehnungskoeffizienten. Die Matrix vernetzt unter Temperatur. Das Werkzeug ist beheizt. Nach Entnahme des Bauteils aus der Werkzeugkavität kühlt dieses ab. Hierbei werden Abkühlungsspannungen erwartet, die zu keinem Ablösen der Folie führen dürfen. In diesem Unterkapitel wird ein zweidimensionales Modell zur rechnergestützten Abbildung auftretender Spannungen beschrieben und ausgewertet.

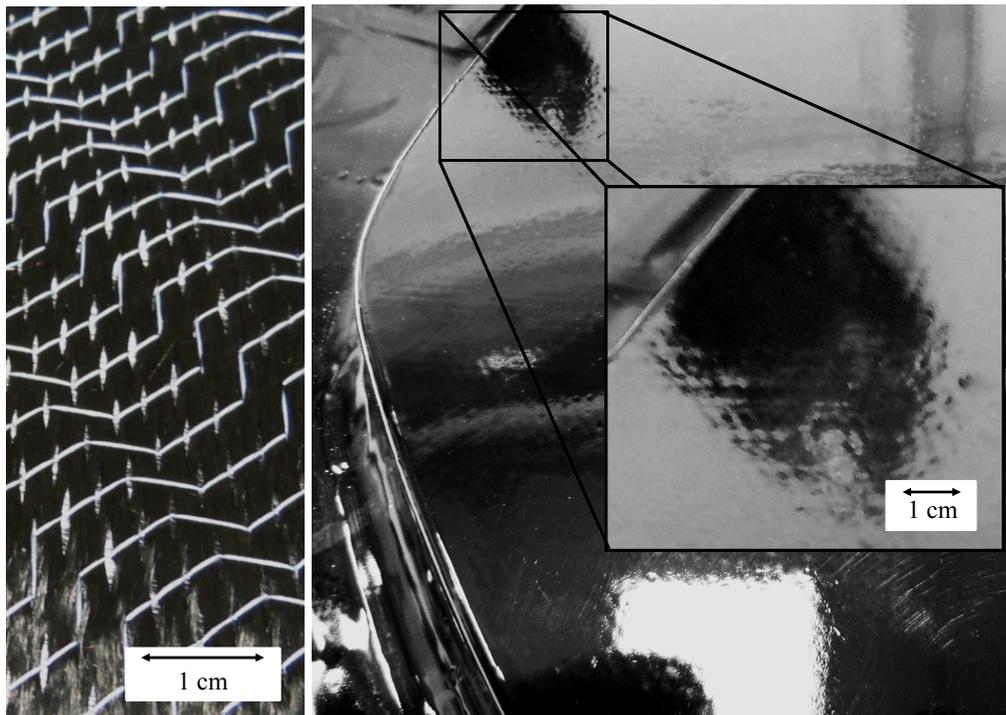


Abb. 30: links: Fasermaterial mit Faserbündelabständen an Einstichstelle; rechts: Abzeichnung des Fasermaterials infolge ausbildender Höhendifferenz der Oberflächenfolie (250 μ m Folienstärke, \sim 4 μ m Höhendifferenz)

Ziel des Modells ist die Darstellung des Wirkzusammenhangs aus Temperaturdifferenz, Folienstärke, Folienaufbau und Faserbündelabstand auf die

Ausbildung interner Spannungen und resultierende Deformationen der Oberfläche (Abb. 30).

Es geht der Frage nach, durch welchen mechanischen Zusammenhang Folien einen kaschierenden Effekt auf die Faserabzeichnung ausüben und ob ein Prozessfenster zur gemeinsamen Verarbeitung existiert.

5.1.1.1. Modellaufbau

Die ersten beiden Faserlagen werden modelliert. Zwei separate, voneinander unabhängige Modelle bilden die beiden Faserrichtungen derart ab, dass

1. im ersten Modell die Faserbündel der ersten Lage orthogonal zur Modellebene stehen und das Reinharzgebiet zwischen den Bündeln unmittelbar an die Folie grenzt
2. im zweiten Modell die dazu orthogonale Richtung modelliert ist, so dass sich das Reinharzgebiet der zweiten Faserschicht durch eine darüber liegende Faserschicht zeichnet.

Zwischen dem Reinharzgebiet und der Folie wird ein querliegendes Faserbündel nachgebildet.

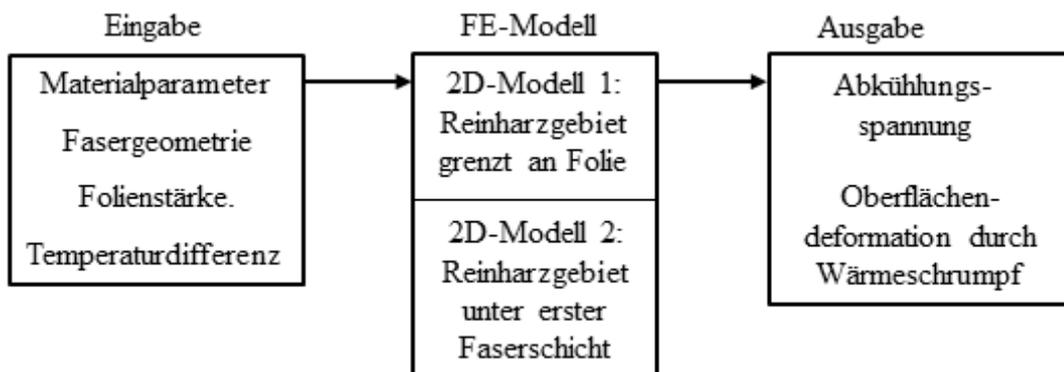


Abb. 31: Modellansatz zur Wärmeschrumpfung (FE-Modell: Abaqus)

Materialparameter

Der thermische Ausdehnungskoeffizient α , die Dichte ρ , der Modul E , der Schubmodul G werden im vereinfachten Ansatz als konstant und damit temperaturunabhängig (für alle modellierten Materialien) definiert.

Tab. 9: Parameterstufen numerischer Modellierung beider Modelle

Parameter	Stufe 1	Stufe 2	Stufe 3
Temperaturdifferenz [K]	50	75	100
Reinharzbreite [μm]	200	400	600
Reinharzhöhe [μm]	140	210	280
Folienstärke aus Deckfolie und 50 μm Haftfolie [μm]	350	-	-

Unter der Annahme kleiner Deformationen gemäß 3.5.3 werden ausschließlich linear-elastische Materialgesetze verwendet.

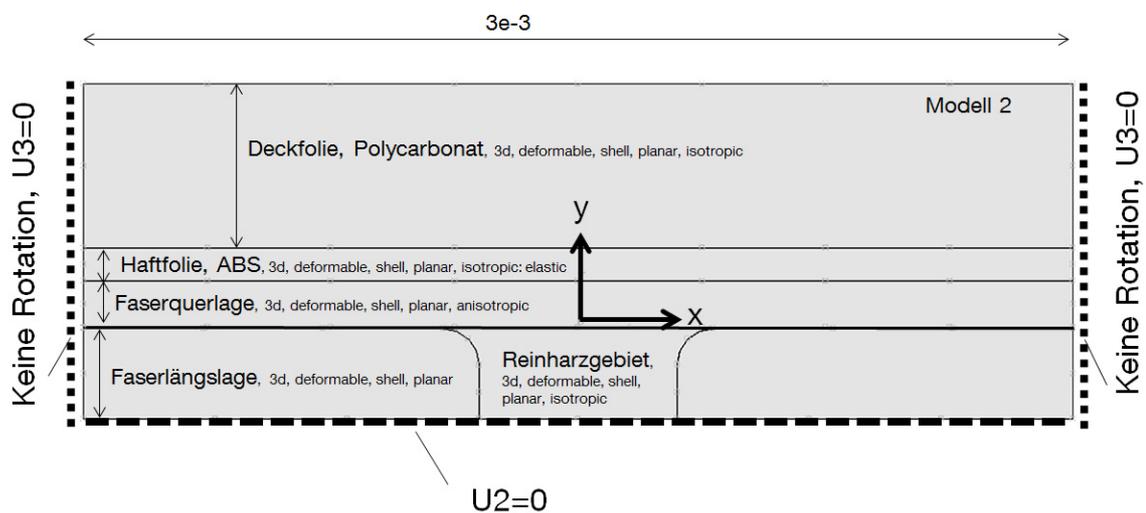


Abb. 32: Aufbau des Modells quer zur obersten Faserlage

Untersuchte und damit variable Modellparameter (Abb. 33) umfassen die Reinharzbreite, Reinharzhöhe, die Folienstärke sowie die Temperaturdifferenz (homogene Flächendefinition) bei Abkühlung. Reinharzbreite und Reinharzhöhe werden zur Abschätzung notwendiger Oberflächeneigenschaften des trockenen Fasermaterials als variable Parameter gewählt. Zur Auswertung der Deformation wird die Höhendifferenz oberhalb des Reinharzgebietes herangezogen. Diese ergibt sich als vertikaler Abstand zwischen der obersten Knotenposition der Oberfolie an der Stelle $x=0$ und der zur obersten Knotenposition insgesamt.

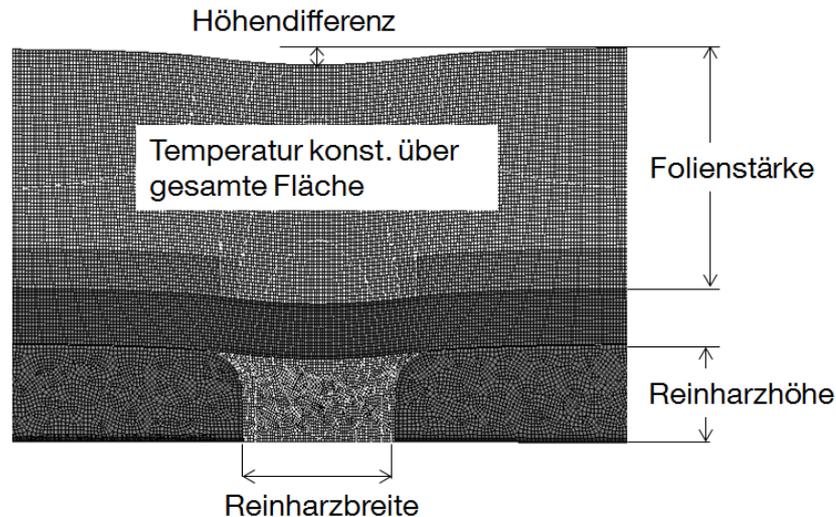


Abb. 33: Darstellung der numerischen Modellparameter nach Temperaturdifferenz am Modell 2

Die Vereinfachungen des Modells umfassen:

- Deformationen sind klein; linear elastisches Materialgesetz
- Materialparameter sind temperaturunabhängig und konstant
- wärmebedingte Oberflächendeformation ergibt sich durch Superponieren zweier unabhängiger zweidimensionaler Modelle der ersten beiden Faserlagen und der eingesetzten Folie; Interaktionen werden vernachlässigt (vgl. Abb. 35 und Abb. 36)
- ideales Interface, Grenzflächen bleiben verbunden (perfekte Verklebung)
- Spannungsfreier Zustand vor Abkühlung

5.1.1.2. Ergebnisse der Faserabzeichnung

Modellergebnis zur wärmebedingten Höhendifferenz ohne Folie

Die Ergebnisse der Höhendifferenz ohne Folie sind in Abb. 37 dargestellt. Der hohe Wärmeausdehnungskoeffizient der Reinharzstelle führt in Abhängigkeit der isotropen Änderung des Temperaturfeldes zur Schrumpfung. Es bildet sich ein komplexer Spannungszustand aus, der eine geometrische Abhängigkeit von Breite und Höhe des Schrumpfungsfeldes zeigt.

In Modell 1 ohne Folie (Abb. 37 oben) liegt die Reinharzstelle unmittelbar an der Oberfläche. Das Reinharzgebiet erfährt außer der Anbindung zum darunterliegenden und den seitlichen Faserbündeln keine weitere Randbe-

dingung. Die Deformation der Oberseite durch die Temperaturdifferenz liegt im Größenbereich weniger Mikrometer. Es bildet sich eine Höhendifferenz zwischen den ebenen Faserbündeln und der sich bildenden Krümmung des Reinharzgebietes in der Symmetrieachse des Modells. Diese Höhendifferenz stellt die Faserabzeichnung nach, die sich durch den Abstand zweier Faserbündel, beispielsweise an der Einstichstelle des Nähfadens, bildet. Sie steigt mit der Temperaturdifferenz bei der Abkühlung, der Höhe des Reinharzgebietes und seiner Breite. Im Abkühlungsschritt baut sich durch die thermisch eingetragene Reduktion der Elementlänge Spannung auf, die im Reinharzgebiet von Zug dominiert ist. In der Spannungsrichtung parallel zur x-Achse (S11) führt die Zugspannung der Reinharzstelle zu einer geringen Schubspannung und Druckspannung im Grenzbereich des angrenzenden Faserbündels. Die daraus resultierenden Knotenverschiebungen sind aufgrund der hohen Steifigkeitswerte des Faserbündels in 11-Richtung gering. Gegenteilig wirkt sich die wärmebedingte Reduktion der Elementlängen in y-Richtung aus. Die Matrixstelle steht auch in S22-Richtung (y-Richtung) unter Zugspannung, dies resultiert jedoch in einem Schubfeld an den seitlichen Faserbündeln. Die Zugspannung nimmt mit dem Abstand zur seitlichen Grenzfläche in Mittenrichtung zunehmend ab.

Im Modell 2 ohne Folie (Abb. 37 unten)

Im Vergleich der Abzeichnungsmechanismen aus erster und zweiter Schicht ohne Folie bildet sich in beiden Modellen eine vertikale Schubspannung im Grenzgebiet des Reinharzes zum seitlichen Fasermaterial aus, die die Deformation des Reinharzes hemmt. Der Effekt nimmt mit dem Abstand zur Grenzfläche Reinharzgebiet/ Faserbündel ab. Im Unterschied der beiden Modelle erfährt eine Faserlage oberhalb des Reinharzgebietes eine Druckspannung, die Höhendifferenz steigert sich, die Einfallstelle ist breiter.

Modellergebnis zur wärmebedingten Höhendifferenz mit Folie

Modell 1 mit Folie (Abb. 38 oben) zeigt die beschriebene Situation unter Einfluss einer thermoplastischen Oberflächenschicht. Im Temperaturschritt der Abkühlung bildet das Reinharzgebiet horizontale wie vertikale Zugspannungen aus.

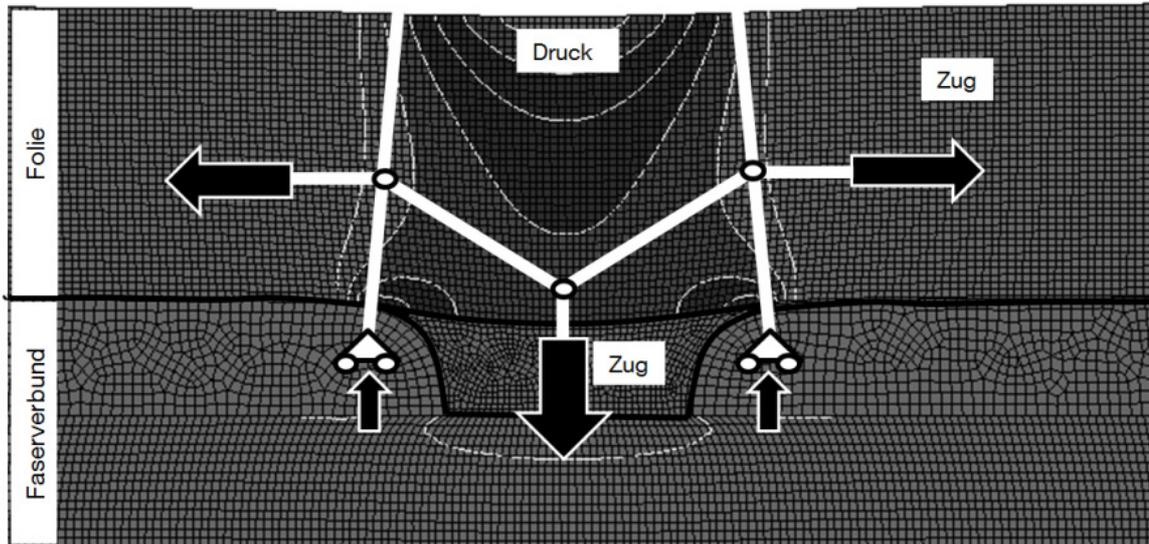


Abb. 34: mechanisches Ersatzmodell der Abzeichnung

Eine Matrixschrumpfung des Reinharzgebietes in vertikaler Richtung führt zur erneuten Ausbildung eines Schubfeldes an der Grenzfläche zum seitlichen Faserbündel. Dieser Einfluss reduziert sich wieder mit steigendem Abstand zur Grenzfläche. Im Unterschied zu den Modellen ohne Folie kommt es unter Folieneinfluss zu einer Aufrechterhaltung vertikaler Zugspannungen auch im Bereich der Reinharzmitte. Diese vertikalen Zugspannungen werden von der Folie eingeleitet.

Die Folie wechselt im Bereich oberhalb der Reinharzstelle den Spannungszustand. In horizontaler Richtung entlang der Folie weist diese

- außerhalb der Reinharzstelle eine Zugspannung auf. Diese Zugspannung resultiert aus der gegenüber dem Fasermaterial erhöhten Wärmeausdehnung. Die Folie oberhalb und seitlich der Reinharzstelle steht unter Zug.
- unmittelbar über dem Reinharzgebiet eine Druckspannung auf. Das Reinharzgebiet selbst steht unter Zugspannung. Die Druckspannung in der Folie resultiert aus einem Biegemoment bei der Foliendeformation infolge vertikaler Zugspannung sowie der horizontalen Zugspannung des angrenzenden Reinharzgebietes.

Ein Wechsel von Zugspannung zu Druckspannung unmittelbar über dem Reinharzgebiet in horizontaler Richtung ist die Folge. Abb. 34 zeigt den komplexen Spannungszusammenhang an einem vereinfachten mechanischen Ersatzmodell. Der Schrumpfung der Reinharzstelle folgt ein vertika-

ler Krafteintrag in die Folie sowie deren horizontale Beaufschlagung mit Druckspannung. Eine Umlagerung der vertikalen Zugspannung in die horizontale erfolgt in der Folie und oberhalb des Reinharzes. Somit koppelt sich das Vermögen der Folie, vertikale Zugspannung auf das Reinharzgebiet einzuleiten, an das Verhältnis aus Folienstärke zu Reinharzbreite. Daraus lässt sich ableiten, dass mit einer Steigerung des vertikalen Abstandes der Zugumlagerung in der Folie, beispielsweise durch zunehmende Folienstärke, die Höhendifferenz und somit die Faserabzeichnung abnimmt.

Umgekehrt reduziert sich die Abzeichnung bei gegebener Folienstärke durch ein reduziertes Verhältnis des gegebenen vertikalen Umleitungsabstandes zum horizontalen Einleitungspunkt bzw. zur Einleitungsfläche. Demnach bestimmt das Verhältnis aus Folienstärke zu Abstand zwischen den Faserbündeln in dominanter Weise die Höhendifferenz. Liegt die Folienstärke in der Größenordnung der Reinharzbreite oder darüber, ergibt sich im Modell 1 nur noch eine schwache Einflussnahme durch die Reinharzhöhe (Abb. 38 rechts oben, rechts unten). Dies bedeutet, dass bei Unterschreiten eines Verhältnisses von Reinharzbreite zu Folienstärke die Faserabzeichnung an der Bauteiloberfläche von der Dicke der eingesetzten Faserschicht unabhängig wird, da die Schubfelder an der Grenzfläche Reinharz/ Faserbündel eine Auswirkung der Reinharzschumpfung in tiefer gelegene Bereichen aufnehmen.

Abzeichnung aus der zweiten Faserschicht mit Folie (Abb. 38 unten)

Das Reinharzgebiet und die innere Folienschicht mit dem höheren Wärmeausdehnungskoeffizienten stehen nach dem Temperaturschritt unter Zugspannung. Beide Gebiete grenzen an die quer liegende Faserlage, die unter Druckspannung steht. Die äußere Folienschicht zeigt im Modell den gleichen Wechsel von Zugspannungen außerhalb und Druckspannungen oberhalb des Reinharzgebietes, wie in Abb. 34. Im direkten Vergleich der Höhendifferenz aus erster und zweiter Lage zeigt sich eine gesteigerte Höhendifferenz aus der zweiten Lage. Das deformierte Gebiet ist ebenfalls breiter. Im Unterschied zu den Modellen ohne Folie ergibt sich nur ein geringer Unterschied zwischen Höhendifferenzen aus erster zu jenen aus der zweiten Schicht.

Alle vier Modelle zeigen die temperaturabhängige Ausbildung einer Höhendifferenz an der Oberfläche. In Abhängigkeit der Reinharzbreite, Rein-

harzhöhe, Temperaturstufe und ob Folie Verwendung findet, werden Einflüsse auf die Höhendifferenz in den Modellen beobachtet. Ein Anstieg der Temperaturdifferenz führt dabei stets zur Zunahme der Oberflächenabzeichnung. An der vertikalen Grenzfläche des Reinharzes zu den seitlichen Faserbündeln entsteht in allen Modellen Schubspannung, die die Ausbildung von Reinharzdeformationen hemmt. Dieser Effekt nimmt mit dem Abstand der Faserbündel zueinander ab. Die Integration von Folie führt zur Reduktion der Höhendifferenz an der Oberfläche.

5.1.1.3. Auswirkungen thermischer Spannungen

Werden Folie und Faserverbundstruktur miteinander verbunden und unterliegen einer gemeinsamen Temperaturänderung, führen lokale Unterschiede im Ausdehnungskoeffizienten zum Spannungsaufbau. Diese Spannungen dürfen im Einsatz des Bauteiles zu keiner Beeinträchtigung oder Schädigung führen. Schädigung liegt u.a. dann vor, wenn die Spannung zur Rissbildung im Folienmaterial oder dessen Ablösung führt. Der Spannungsverlauf des Modells ist in Abb. 35 und Abb. 36 dargestellt. Es werden zwei Spannungsrichtungen ausgewertet: der Spannungen in Tiefenrichtung für Modell 1 (Abb. 35) und der für Modell 2 (Abb. 36).

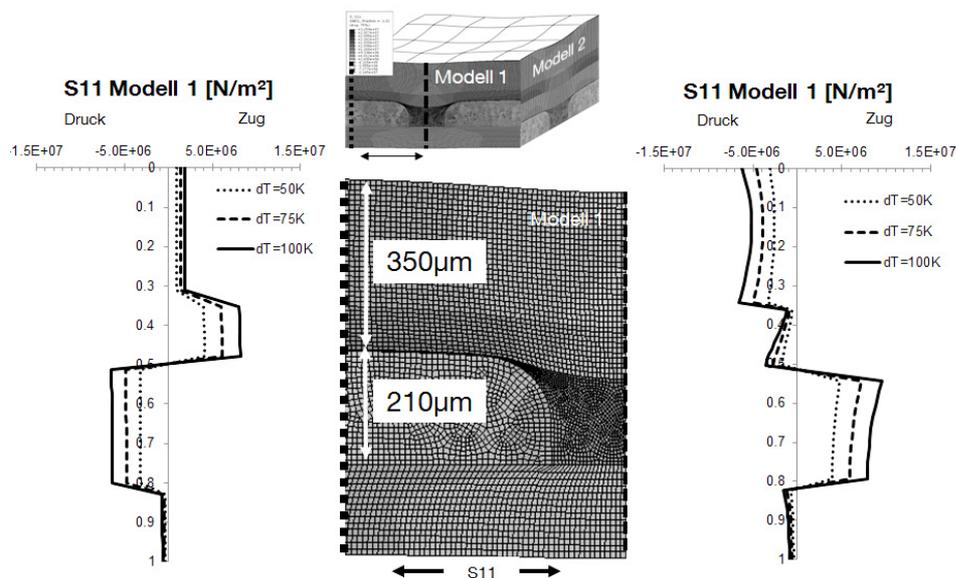


Abb. 35: Abkühlungsspannungen quer zur ersten Faserbündellage

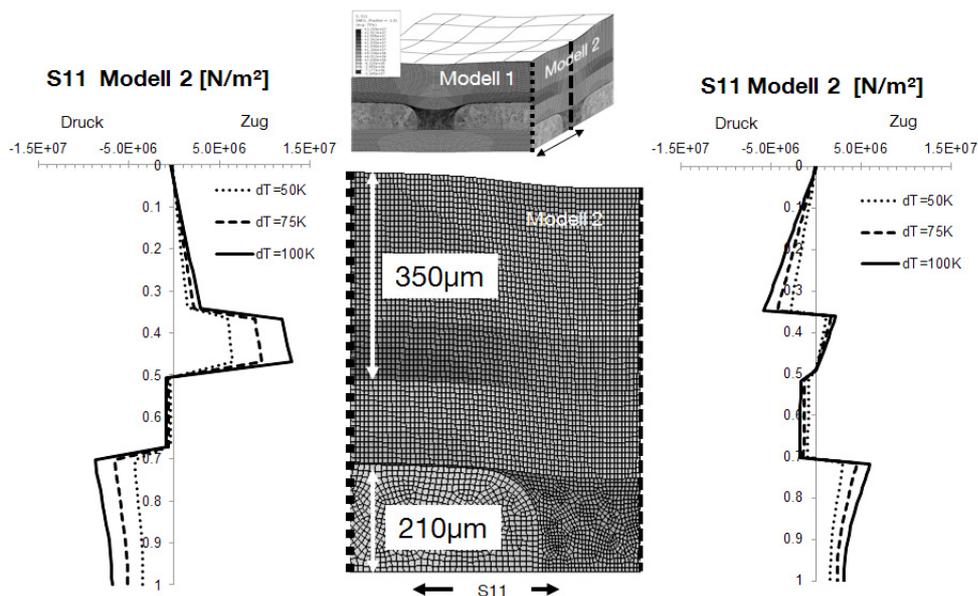


Abb. 36: Abkühlungsspannungen parallel zur ersten Faserbündellage

Zug-Druckspannungen Modell 1

Abb. 35 zeigt den Spannungsverlauf: Dargestellt sind die Verläufe für drei Temperaturdifferenzen (50K; 75K; 100K) des Abkühlungsschrittes. Der Übergang vom Bereich über dem Reinharzgebiet (rechts) und dem Bereich über dem Faserbündel (links) zeigt den Wechsel von Druck- und Zugspannung innerhalb der Folie. Mit zunehmender Differenz zwischen Verarbeitungs- und Anwendungstemperatur steigt die Belastung des Schichtverbundes. Über dem Faserbündel (links) zeigt das Modell eine Zugbelastung der Folie an, die sich in der inneren Folienschicht steigert. Die innere Schicht weist dabei gegenüber der oberen einen höheren Ausdehnungskoeffizienten auf und grenzt direkt an das vergleichsweise steife Faserbündel mit geringer Wärmeausdehnung. Das Faserbündel interagiert mit der darunterliegenden Querlage geringer Wärmeausdehnung und hoher Steifigkeit, wodurch es unter Druckspannung steht. Ein Spannungssprung zwischen dem druckbelasteten Faserbündel und der zugbelasteten Folie ist die Folge. Über dem Reinharzgebiet steht die Folie unter Druckbelastung.

Zug-Druckspannungen Modell 2

Abb. 36 zeigt den Spannungsverlauf über Dickenrichtung für die Stelle über dem Reinharzgebiet nach Modell 2. Analog zum Modell 1 steht die Folie über dem Faserbündel unter Zugspannung (links) und über dem

Reinharzgebiet (rechts) anteilig unter Druckspannung. Die Folie trifft im Kontakt mit der querliegenden Faserlage auf ein Gebiet mit geringer Wärmeausdehnung und hoher Steifigkeit in dieser Richtung. Es resultieren die höchsten Zugspannungen im Folienmaterial, die an der Grenzfläche Folie/Faserbündel ihr Maximum einnimmt. Diese Spannungsspitze im Übergang von der Faserschicht zur Anbindungsschicht der Folie weist eine hohe Abhängigkeit von der Temperaturdifferenz auf, so dass bei Überschreiten des zu definierenden Prozessfensters an dieser Stelle und in dieser Orientierung ein Versagen der Folie vom Modell angezeigt wird, weil sich hier die höchste Spannung zeigt. Die Reinharzstelle steht unter Zugspannung, das seitlich angrenzende Faserbündel unter Druckspannung.

5.1.1.4. Grenzen der Modellierung

Zahlreiche Einschränkungen zur Umsetzung des Modells begleiten die Ergebnisse. Im chemischen Vernetzungsvorgang der Matrix findet ein Wechsel vom flüssigen in den festen Zustand statt, der von einer chemischen Schrumpfung begleitet wird. Der Zeitpunkt, an dem der Modulanstieg der Matrix die Wirkung von oberflächenverbessernden Maßnahmen, wie der Injektion unter Nachdruck, dem Schließen eines Werkzeugspaltes nach dem Gelierpunkt und der Temperaturdifferenz der Werkzeughälften, einschränkt, ist nicht berücksichtigt. Die aus der verbleibenden chemischen Schrumpfung resultierende Höhendifferenz ist nicht dargestellt.

Es werden zwei separate Modelle für die jeweilige Richtung eingesetzt. Interaktionen werden nicht berücksichtigt. Eine Überlagerung der richtungsabhängigen Spannungen findet nicht statt. Es wird von einer idealen Verbindung der Grenzflächen ausgegangen; verbundene Knoten bleiben verbunden. Durch Abweichungen im Material und der Verarbeitung treten Spannungsspitzen auf, die nicht abgebildet sind

Tritt Matrix zur Ausbildung von Adhäsionskräften in Interaktion mit der Folie, bildet sich eine Mischzone aus thermoplastischen und duroplastischen Polymeranteilen aus. Wärmeausdehnungskoeffizienten der Schichten werden als lokal und unveränderlich den Schichten zugeordnet angenommen. In der Realität können mehrschichtige Folien am Materialübergang Mischzonen aufweisen, die eine endliche Breite eines Mischbereiches des Wärmeausdehnungskoeffizienten zur Folge haben. Aus ihnen resultieren

Änderungen des Moduls, die sich auf die Ausbildung von Spannungsspitzen auswirken.

Duromere Matrixsysteme auf Basis von Polyurethan vernetzen exotherm. Die Reaktionsenthalpie führt zur lokalen Abweichung von der als isotherm angenommenen Temperaturverteilung. Aus der Kombination hoher Reaktionsraten der Matrix, wärmeisolierender Effekte durch Folie und dem Übergang zum Werkzeug kann die Matrixtemperatur im Vernetzungsvorgang von der angenommenen homogenen Verteilung abweichen.

5.1.1.5. Zusammenfassung numerischer Modellierung

Ziel des Modells ist die Darstellung des Wirkzusammenhangs aus Temperaturdifferenz, Folienstärke/ Aufbau, Faserbündelabstand und resultierenden Deformationen der Oberfläche. Das Modell zeigt infolge einer Temperaturdifferenz (Abkühlungsschritt nach Bauteilentnahme aus Injektionskavität) die Ausbildung eines komplexen Spannungszustandes und einen kaschierenden Effekt der Folie auf die Abzeichnung der Reinharzgebiete der ersten beiden Faserlagen an der Oberfläche. Eine Erhöhung von Reinharzbreite, Reinharzhöhe und Temperaturdifferenz führt dabei stets zur Zunahme der Faserabzeichnung. Tieferliegende Schrumpfbereiche verbreitern die im Modell beobachtete Einfallstelle und steigern die Höhendifferenz. Während die Treiber der Abzeichnung ohne Folie in der Temperatur und der Reinharzhöhe liegen, gewinnt mit der Integration der Folie die Breite der Faserbündelabstände gegenüber ihrer Höhe (Reinharzhöhe) an Bedeutung. In der modellierten Materialanordnung und den modellierten thermischen Schrumpfungseinflüssen zeigen sich gute Ergebnisse bei einer Folienstärke, die im gleichen Größenbereich liegt, wie der Abstand der Faserbündel zueinander oder größer. Dabei werden Höhendifferenzen von unter $1\mu\text{m}$ in einem relevanten Prozessfenster bei einer Folienstärke von $350\mu\text{m}$ beobachtet. Diese Wandstärke für Folie im umgeformten Zustand und korrelierende Größe der Reinharzgebiete werden angestrebt.

Die eingangs des Kapitels gestellte Frage, ob ein Prozessfenster zur gemeinsamen Verarbeitung von Folie und Verbundwerkstoff existiert, wird im Zusammenhang mit dem Aufbau interner Spannungszustände bei der Abkühlung betrachtet. Quer zur obersten Faserorientierung treten innerhalb der Folie sowie im Grenzbereich Folie/ Faserbündel und Folie/ Reinharzgebiet Spannungssprünge auf, die durch das Anbindungsverhalten von Fo-

lie/ Matrix vermittelt werden müssen. Parallel zur obersten Faserorientierung tritt die Folie in Interaktion mit einem Gebiet hoher Steifigkeit und geringer Wärmeausdehnung. Das Modell zeigt hier die höchste Zugbelastung der Folie in dieser Richtung und über dem Faserbündel an. Das Maximum der Spannungsspitze befindet sich im Inneren der Folie und zeigt eine starke Abhängigkeit von der Temperaturdifferenz. Mit dieser Information der berechneten Spannungskonzentration des Modells liegen die Spannungswerte in einem real darstellbaren Temperatur- und Spannungsbereich, der in Experimenten zu belegen ist.

Wärmeschrumpfbedingte Abzeichnung mit 350µm PC/PC_ABS Folie

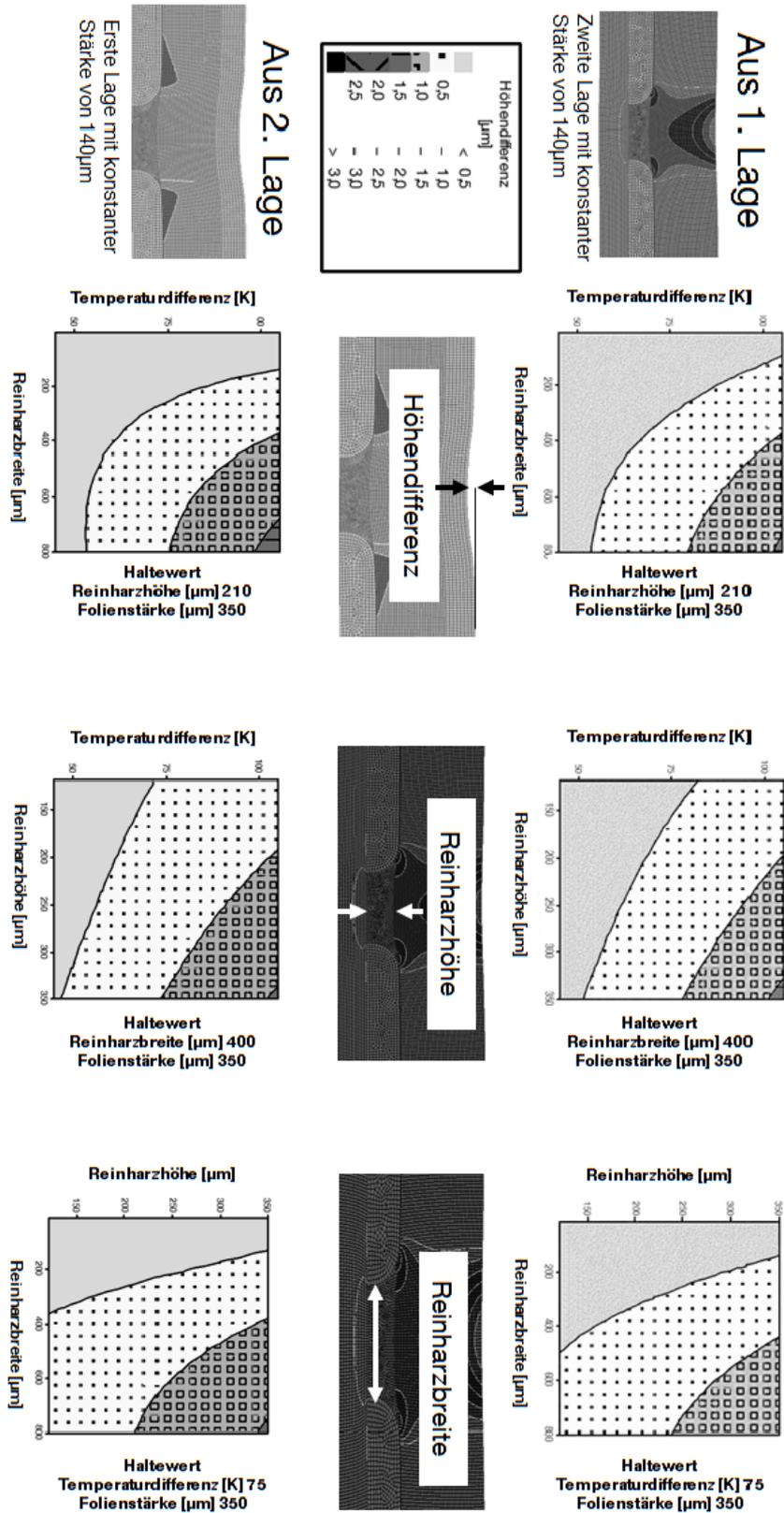


Abb. 38: numerisches Ergebnis wärmebedingter Höhendifferenz mit Folie

5.1.2. Voruntersuchung zur Matrix

Das verwendete Matrixsystem auf Basis von Polyurethan (Henkel Loctite® Max2) besteht aus drei Komponenten: einer Harzkomponente (Polyol), einer Härterkomponente (Isocyanat) und einem Katalysator auf Basis einer Zinkverbindung, die die Reaktion mit zunehmender Konzentration beschleunigt. Matrixsysteme wirken sich über ihre Reaktionszeit und dem einhergehenden Modulanstieg auf den Prozesszyklus aus. Dieses Kapitel widmet sich experimentell dem Vernetzungsverhalten des gewählten Matrixsystems, um Randbedingungen der Verarbeitung abzuleiten. Diese Randbedingungen umfassen vorrangig die Verarbeitungszeit und die Verarbeitungstemperatur im Verhältnis zum eingesetzten Reaktionsbeschleuniger. Während der Reaktionszeit durchläuft das Matrixsystem verschiedene Eigenschaftszustände, von [57], [24]

- flüssig/ niederviskos über
- gelartig bis
- fest.

In diesen Zuständen entstehen Prozessfenster für

- Tränkung des Fasermaterials,
- etwaige Spaltschließung der Kavität und
- Entformung des Bauteils.

Die Auslegung der Matrixverarbeitung basiert auf einer isothermen Prozessführung des Werkzeuges. Matrixparameter, wie sie herstellerseitig für die Verarbeitung bei 90°C Werkzeugtemperatur empfohlen sind, sind in Abb. 39 aufgeführt. Sie zeigt den Viskositätsverlauf der Einzelkomponenten über der Zeit (links oben), den Viskositätsanstieg bei Verarbeitungstemperatur (rechts oben), die initialen Mischviskosität (links unten) sowie den Enthalpieanstieg bei isothermer Verarbeitung. Bei Raumtemperatur weist die Polyol-Komponente eine hohe Verarbeitungviskosität auf. Sie wird daher vor der Injektion auf 80°C aufgeheizt. In diesem Zustand trifft es auf die Isocyanatkomponente von 45°C. Im Werkzeugkontakt erreicht die Matrix die Vernetzungstemperatur. Die chemische Reaktion setzt ein, die Mischviskosität (initial: Abb. 39 links unten) steigt an. Sie erreicht dabei einen Grenzwert, an dem eine vollständige Fasertränkung nicht mehr möglich ist. Der viskose Injektionsgrenzwert der Versuche, also jene Vis-

kosität, bei der die Tränkung abgeschlossen sein soll, wurde zu 200mPas gewählt. Der Übertrag der Enthalpie als Indikator der viskosen Injektionsgrenze berücksichtigt den Zustand des gleichen Vernetzungsfortschritts, nicht jedoch deren temperaturabhängiges Verhalten. Unter isothermen Prozessparametern (90°C) und unter Einbezug der Standardabweichungen wird der exotherme Wärmeaustrag der Vernetzung für das Ende der Injektion zu 100J/g gewählt und entspricht dem Übertrag auf den Grenzwert von 200mPas (Abb. 39 rechts).

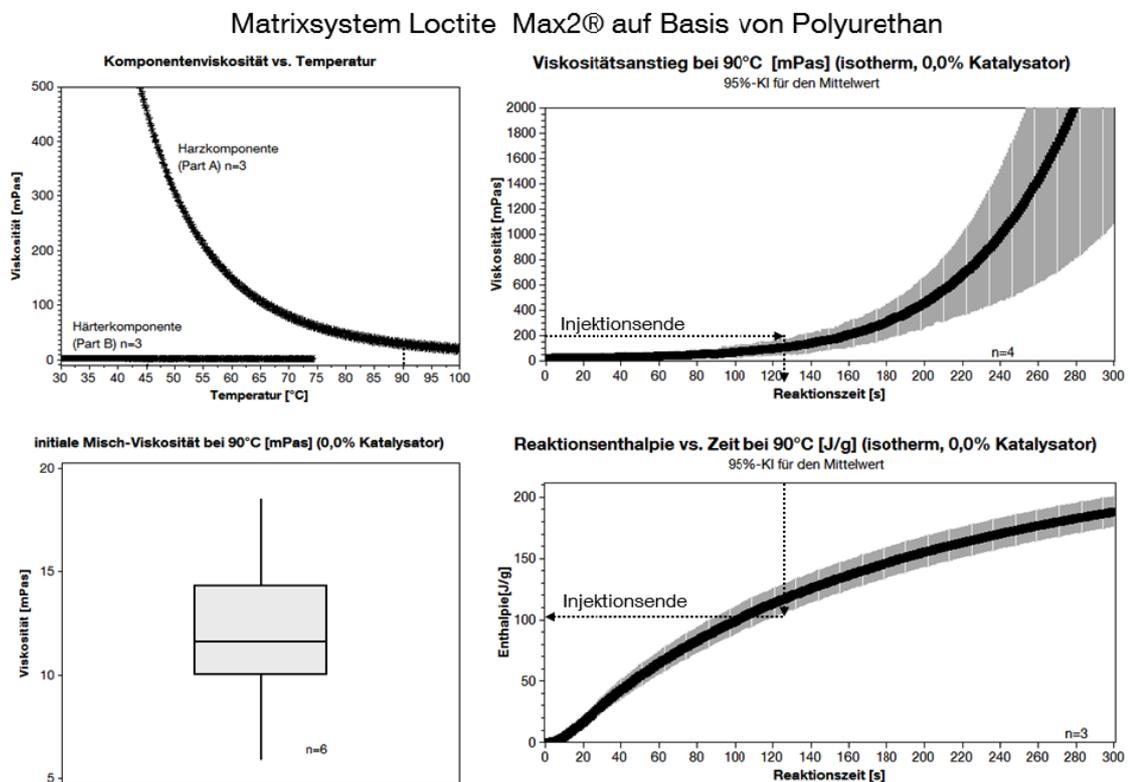


Abb. 39: Materialparameter der Injektion Loctite Max2

Abb. 40 zeigt den Modulanstieg der Matrix bei Verarbeitung nach Herstellerangaben (links) sowie der dabei erreichten exotherme Reaktionsenthalpie (rechts). Der Speichermodul übersteigt dabei den Verlustmodul nach ca. 33 Minuten. Der Verlustmodul bleibt während der vom Hersteller angegebenen Härtungszeit hoch. Eine Phase der Nachvernetzung außerhalb des Reaktionsgesenkes ist notwendig. Die Matrix zeigt in Injektionsversuchen ohne Fasern sowie bei Injektionsversuchen von dünnen Bauteilen mit Fasern eine plastische Verformbarkeit unmittelbar nach Werkzeugöffnung. Um den Verzug der Bauteile zu minimieren, werden diese einseitig und

unter Stabilisierung der zweiten Werkzeughälfte entformt, das Bauteil durch die entformte Bauteilfläche abgekühlt und erst dann aus der zweiten Seite entformt.

Im vom Hersteller angegebenen Verarbeitungszyklus zeigt das Harzsystem einen Aushärtegrad von 92% (Abb. 40 rechts) bei Bauteilentnahme. Dies entspricht einer mittleren Reaktionsenthalpie von ca. 248J/g. Die gemessenen Werte unterliegen einer breiten Streuung (233-264J/g). Die Entnahmefähigkeit des Bauteils aus der Werkzeugkavität ist von weiteren Parametern wie der Bauteilgeometrie, Entformungskräften und der Abkühlung während der Öffnungsphase abhängig. Große Wandstärken der Bauteile und eine langsame Entnahme wirken sich positiv aus, so dass Bauteile unterhalb der Angaben des Herstellers (248J/g) entformt werden. Durch die mechanische Stabilisierung des Aufbaus mit Folie erfolgen deformationsfreie Entformungen unterhalb der Herstellerangaben (bei 220J/g).

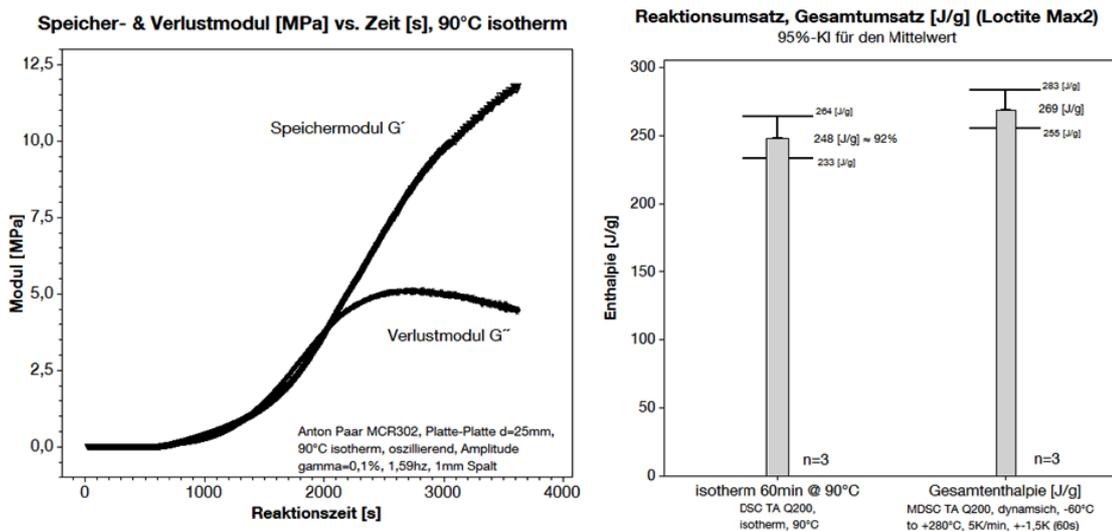


Abb. 40: Modulanstieg bei Verarbeitung nach Herstellerangaben

Somit wird anhand der experimentell festgelegten Aushärtegrade für das Ende der Injektion und den Beginn der Entformung der Zyklus ausgelegt. Durch die Bestimmung dieser Grenzwerte und der Annahme vergleichbaren Matrixverhaltens im Temperaturfenster der Verarbeitung (60-90°C) kann nun die katalysatorabhängige Zykluszeit ausgelegt werden.

Dazu wird der exotherme Reaktionsausstrag für drei Temperaturen und 6 Konzentrationen des Katalysators experimentell ermittelt. Die Untersu-

chung erfolgt anhand der Differenz-Thermoanalyse (DSC). Die Probenvorbereitung erfolgt bei Raumtemperatur. Die Einzelkomponenten werden separat abgewogen. Bei der Zugabe des Katalysators erfolgt dies durch Beimengung zur Harzkomponente (Polyol) vor der Mischung mit der Härterkomponente. Aufgrund der geringen Katalysatorkonzentrationen beträgt die gemischte Menge von ca. 20g ein Vielfaches der Probenmenge. Eine Homogenisierung findet statt, bis die Probenmenge klar wird.

Abb. 41 zeigt die Reaktionsenthalpie des Harzsystems Loctite® MAX2 über eine Reaktionszeit von 0s bis 1000s für die isotherme Härtung bei 60°C, 75°C und 90°C bei den jeweiligen Katalysatorkonzentrationen (massenbezogen auf die Polyolkomponente A) von 0,0%/ 0,3%/ 0,5%/0,7% und 0,9%.

Die Katalysatorkonzentration zeigt eine temperaturabhängige, nichtlineare Einflussnahme auf die zeitliche Ausbildung der Reaktionsenthalpie. Im untersuchten Temperaturbereich zwischen 60°C und 90°C zeigt sich eine reaktionsbeschleunigende Wirkung des Katalysators bis zur Konzentration von 0,7%. Bei weiterer Steigerung der Katalysatorkonzentration auf 0,9% wird ein temperaturabhängiger Reaktionsumsatz ab $\sim 70 \frac{\text{J}}{\text{g}}$ beobachtet. Das untersuchte Harzsystem zeigt in der Kombination aus hohen Katalysatorkonzentrationen (0,9%) und niedrigen Verarbeitungstemperaturen (60°C) keinen beschleunigten Umsatz. Mit fortschreitendem Aushärtegrad oberhalb $\alpha = 0,25 \sim 70 \text{ J/g}$ ist ein gesteigerter Reaktionsumsatz lediglich in Kombination mit einer Verarbeitungstemperatur von 90°C beobachtbar. Geringe Konzentrationen des Katalysators (0,3%) wirken sich bei 60°C Verarbeitungstemperatur nur geringfügig auf die Reaktion aus.

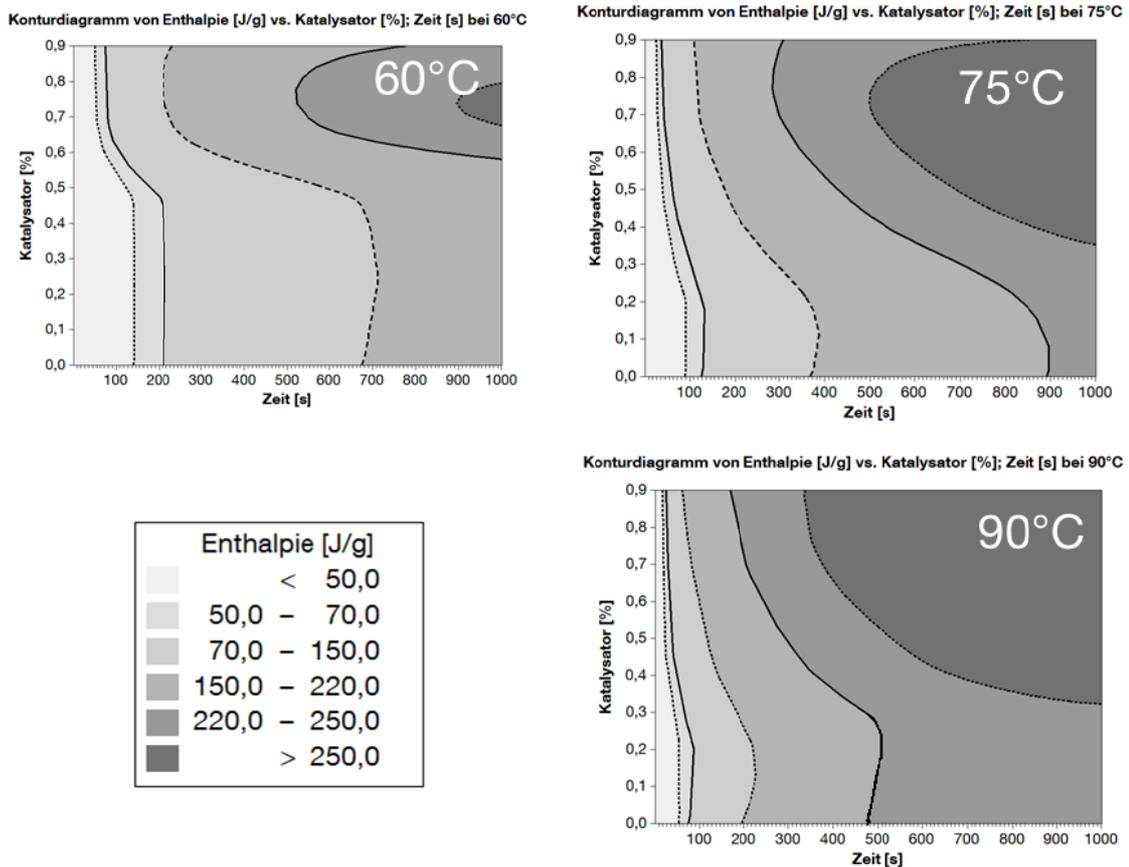


Abb. 41: Reaktionsenthalpie von Loctite MAX2 über Katalysator über Zeit isothermer Verarbeitung (vollständiger Reaktionsumsatz bei 269J/g \pm 14J/g, Entformung ab 220J/g)

Die Auslegung der Injektionsparameter (Temperatur, Katalysatorgehalt, Injektionszeit und Entformungszeit) erfolgt anhand von Abb. 41. Informationen zum viskosen Grenzwert und der Entformbarkeit werden im vereinfachten Auslegungsansatz auf Grenzwerte der Reaktionsenthalpie überführt und schlagen sich als Linien gleichem/ r Reaktionsgrad/ Reaktionsenthalpie in Abb. 41 nieder.

Dieses Vorgehen bietet unter den gemachten Vereinfachungen eine grafische Lösung im Schnittpunkt einer horizontalen Linie auf Höhe des Katalysatorgehaltes für die jeweilige Verarbeitungstemperatur.

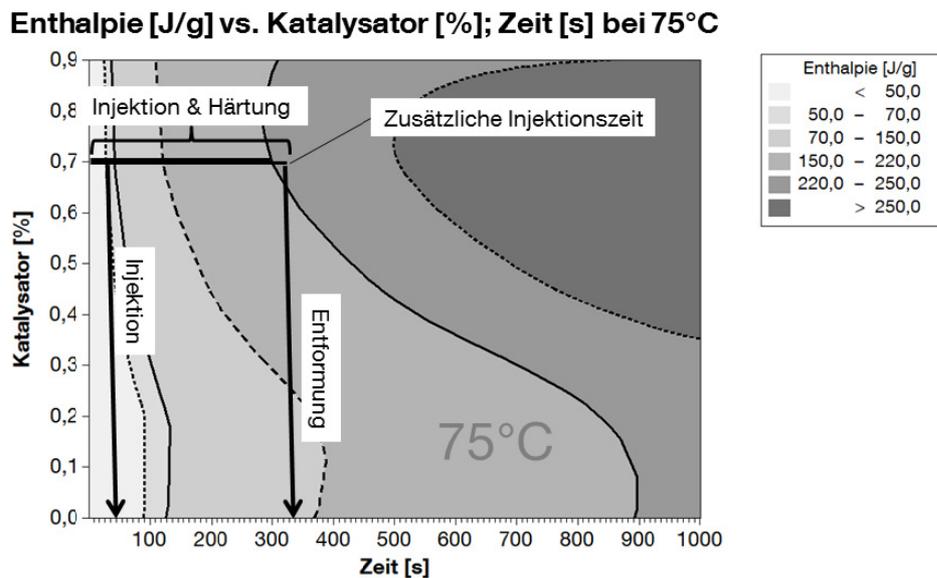


Abb. 42: Auslegung Loctite MAX2 mit 0,7% Katalysator bei 75°C Werkzeugtemperatur

Dabei bildet der Abtrag des Schnittpunktes der Linie gleichen Katalysatorgehaltes mit dem Enthalpie-Grenzwert für den viskosen Grenzwert auf der Zeitachse eine Abschätzung der Zeit, in der die Reaktionsmasse in die Kavität eingetragen werden kann. Bei weiterer isothermer Härtung erfolgt der Modulanstieg bis zur Entformbarkeit.

Es ergibt sich eine zeitliche Differenz zwischen dem Eintrag des ersten und dem des letzten Tropfens Matrixmaterials in die Kavität. Unter dem Anspruch, dass auch die letzte eingetragene Matrixmenge eine ausreichende Reaktionszeit zur Überschreitung des Enthalpie-Grenzwerts zur Entformung erreicht, verlängert sich die Zeit von Injektionsbeginn bis Entformung um die Injektionszeit.

Die Verarbeitungszeit wird, wie in Abb. 41 und Abb. 42 ersichtlich, maßgeblich von der Temperatur und dem eingesetzten Katalysatorgehalt bestimmt. Die Parameter der Injektion sind auf die matrixseitig verfügbare Injektionszeit, Werkzeugaufbau, Faserpermeabilität, Schließkraft, Druck und Massenstrom der Anlage zur vollständigen Fasertränkung abzustimmen. Aus Abb. 35 und Abb. 36 der Abkühlungsspannung wird eine damit korrelierende Grenzflächenbelastung zwischen Folie und dem Substrat sowie innerhalb der einzelnen Folienschichten erwartet.

5.1.3. Voruntersuchung Folienhaftung

Die Multifunktionalität der Folie ist Grundlage des angestrebten Verfahrens. Thermoplastische Folien weisen während ihrer Handhabung und Verarbeitung eine geschlossene Oberfläche auf, was im Produktionsprozess genutzt wird. Verbleibt die Folie während des Bauteilgebrauches am Substrat als funktionalisierter Bestandteil, beispielsweise zur Oberflächengestaltung oder schweißenden Fügung, kommt ihr eine weitere Funktion zu. Grundlage dieser mehrfachen Nutzung der Folie während der Produktion und des Gebrauchs ist ihr Vermögen, im Laufe des Vernetzungsprozesses der Matrix mit dieser eine dauerhafte Verbindung einzugehen. Eine sich ausbildende Mischungszone zwischen Folie und Matrix im gemeinsamen Verarbeitungsprozess wird erwartet. Ziel des Kapitels zur Folienhaftung ist die Beschreibung und Quantifizierung des Haftungsvermögens sowie die Untersuchung und Beschreibung der Grenzschicht zwischen der Thermoplastfolie und der Matrix. Das Vorgehen bei der Untersuchung zur Folienhaftung wird in die Untersuchungen

1. zur chemischen Beständigkeit (gegenseitige Löslichkeit)
2. zur mechanischen Haftung (Schälwiderstand und Versagensart)
3. zur Auswertung der Grenzzone (Breite des Materialübergangs)

gegliedert.

5.1.3.1. Folienaufbau

Verwendete Folien basieren auf einem dreischichtigen Aufbau und bestehen aus den Werkstoffen Polycarbonat (PC) und Acrylnitril-Butadien-Styrol (ABS), wie in Abb. 43 dargestellt. Amorphes Polycarbonat bildet aufgrund seiner Warmformbeständigkeit, Oberflächenhärte, Lackierbarkeit und Verarbeitbarkeit das Grundmaterial in Träger- und Deckschicht.

Polycarbonat weist eine Besonderheit in der Verarbeitung auf: Bei zu rascher Abkühlung (während der Formung im Kontakt mit zu kaltem Werkzeug) reduziert sich die Schlagzähigkeit, das Material bildet eine Spannungsrissempfindlichkeit aus und ist zerbrechlich [48]. Eine Warmauslagerung mit anschließender langsamer Abkühlung reduziert die Gefahr des Eintretens eines solchen Umstandes [48]. Der mittleren Trägerschicht wird

der gewünschte Farbton durch Beigabe von Pigmenten während der Folienfertigung inhärent verliehen.

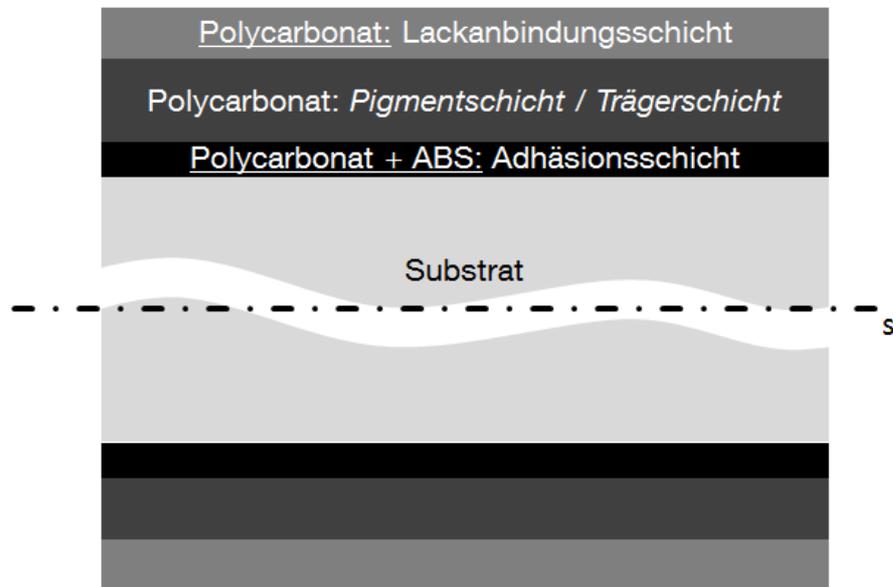


Abb. 43: Folienaufbau und Anordnung um das Substrat (s: Symmetrieebene)

Auf der Trägerschicht befindet sich die transparente Deckschicht, deren Eigenschaften auf die Lackierbarkeit abgestimmt sind. Die dritte Schicht ist auf die Ausbildung der Adhäsionskräfte ausgelegte (Anbindungsschicht 50µm Schichtstärke). Sie besteht im Grundmaterial ebenfalls aus einem Polycarbonat, dem ein Anteil ABS zugesetzt ist. Durch die Beimengung/ Mischung von Polymeren, beispielsweise der Zugabe von ABS in Polycarbonat können gezielt Eigenschaften verändert werden. ABS zeichnet sich durch eine gute Verarbeitbarkeit, Chemikalienbeständigkeit, Schlagzähigkeit und antistatische Eigenschaften aus [48]. Durch Beimengung von ABS werden die kautschukelastischen Anteile ins Grundsubstrat eingebracht [91]. Beide Polymere zeigen hydrophile Eigenschaften und müssen vor einer Verarbeitung getrocknet werden.

5.1.3.2. Chemische Beständigkeit

Die thermoplastische Folie tritt während der Verarbeitung in Kontakt mit der Matrix. Dabei trennt die Folie die flüssige Matrix von der Werkzeugoberfläche, wird mit dem Injektionsdruck belastet und steht somit unter Spannung. Wenn Monomere der Matrix eine chemische Veränderung und damit eine mögliche Schwächung der Folie hervorrufen, so ist die Komponente und die Folge ihres chemischen Angriffes zu quantifizieren. Ziel

nachfolgender Untersuchung ist es, die chemische Beständigkeit der Folie unter Spannung gegenüber den verwendeten Komponenten der Matrix zu bestimmen und eine Einschätzung der Beständigkeitsdauer zu erhalten. Untersuchungen zur chemischen Beständigkeit der Folie gegenüber der eingesetzten Matrix finden auf Basis von [70] statt. Die Daten wurden in [92] erhoben.

Ob chemische Beständigkeit des Folienaufbaus gegenüber eingesetzter Matrix vorliegt, ist Ziel der Untersuchung. Drei Formen chemischer Belastung werden getestet:

1. Homogenisierte Matrix
2. Isocyanat-Komponente
3. Polyol-Komponente

Der Versuchsaufbau ist in Abb. 44 dargestellt.

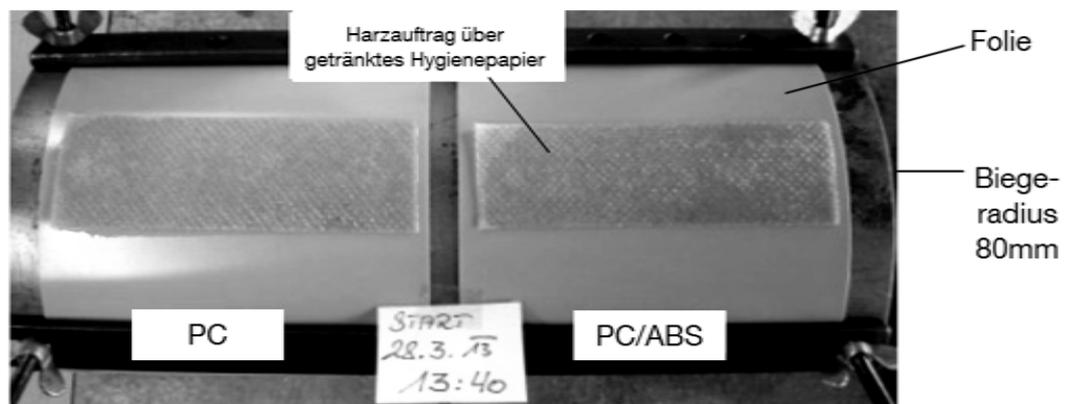


Abb. 44: Versuchsaufbau nach [70], Bildquelle:[92] zur chemischen Einwirkung unter Spannungsbelastung der Probe

Die Folie wird durch Aufspannen auf einen Zylinder mit Biegespannung belastet. Zugbereiche auf der Außenseite der Folie bilden sich aus. Diese Seite wird mit dem zu testenden Medium kontaminiert. Nach einer Einwirkphase werden aus den Bereichen der chemischen Einwirkung Zugproben gefertigt und geprüft. Im Vergleich mit unbehandelten und rein mechanisch belasteten Vergleichsproben wird durch Reduktion mechanischer Kennwerte die chemische Einwirkung beurteilt.

Beobachtung

Chemische Folienbeständigkeit gegenüber der homogenisierten Matrix:

Unter Einwirkung der Matrix und Biegespannungsbelastung wurde Rissbildung an beiden Materialseiten des 3-Schichtaufbaus beobachtet. Eine 24h-stündige Einwirkzeit führt zum Probenversagen. Rissbildung ereignet sich innerhalb der ersten Minuten, eine vollständige Schädigung liegt nach etwa 7-20 Minuten (PC – PC/ABS) vor. Die Prüfkörper gelten als zerstört; eine weitere mechanische Prüfung findet nicht statt.

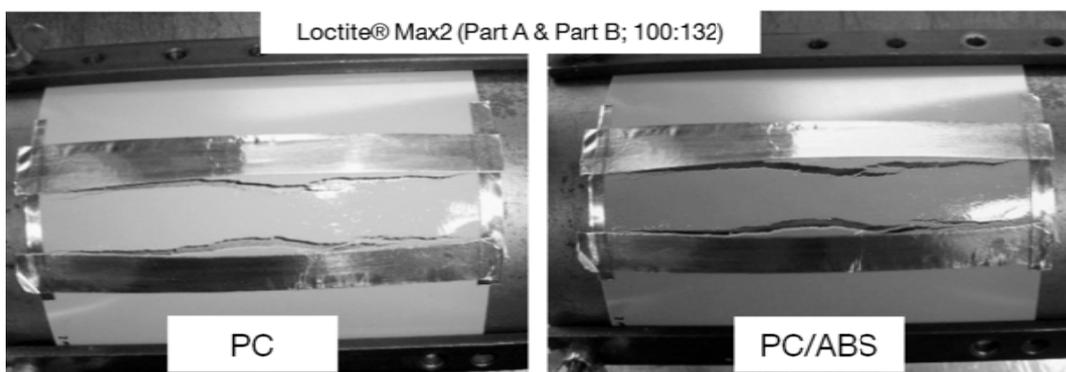


Abb. 45: Rissbildung spannungsbelasteter Folie nach chemischer Matrixeinwirkung, Bildquelle:[92]

Chemische Folienbeständigkeit gegenüber der Isocyanat-Komponente:

Eine Folienschädigung durch die kombinierte Einwirkung aus Spannung und chemischem Angriff durch die Isocyanat-Komponente wurde beobachtet. Die Rissbildung unterscheidet sich in Abhängigkeit der kontaminierten Folienseite.

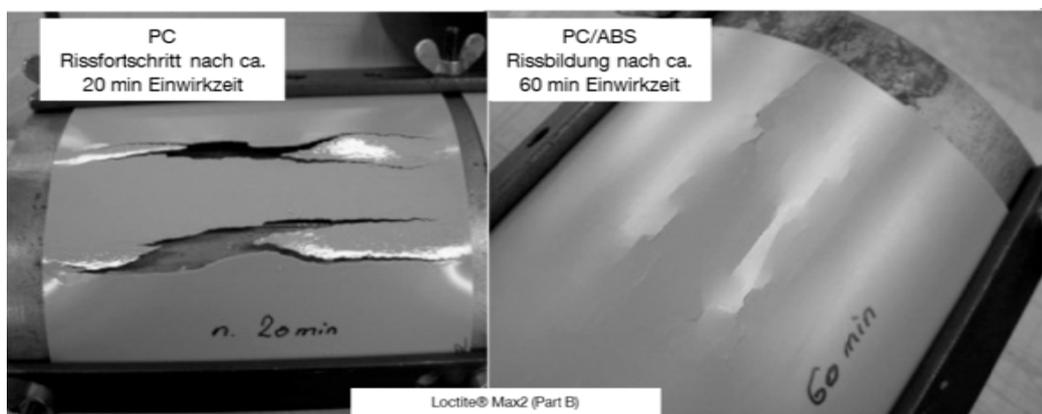


Abb. 46: Rissbildung spannungsbelasteter Folie nach chemischer Isocyanateinwirkung, Bildquelle: (63)

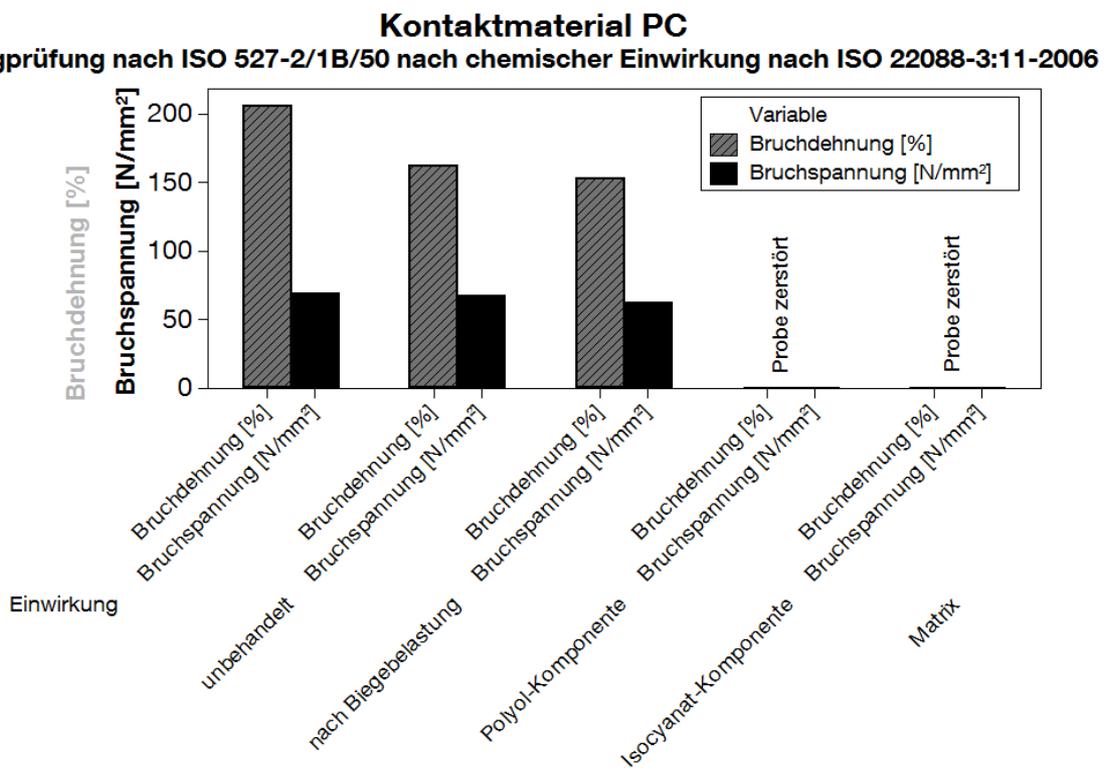
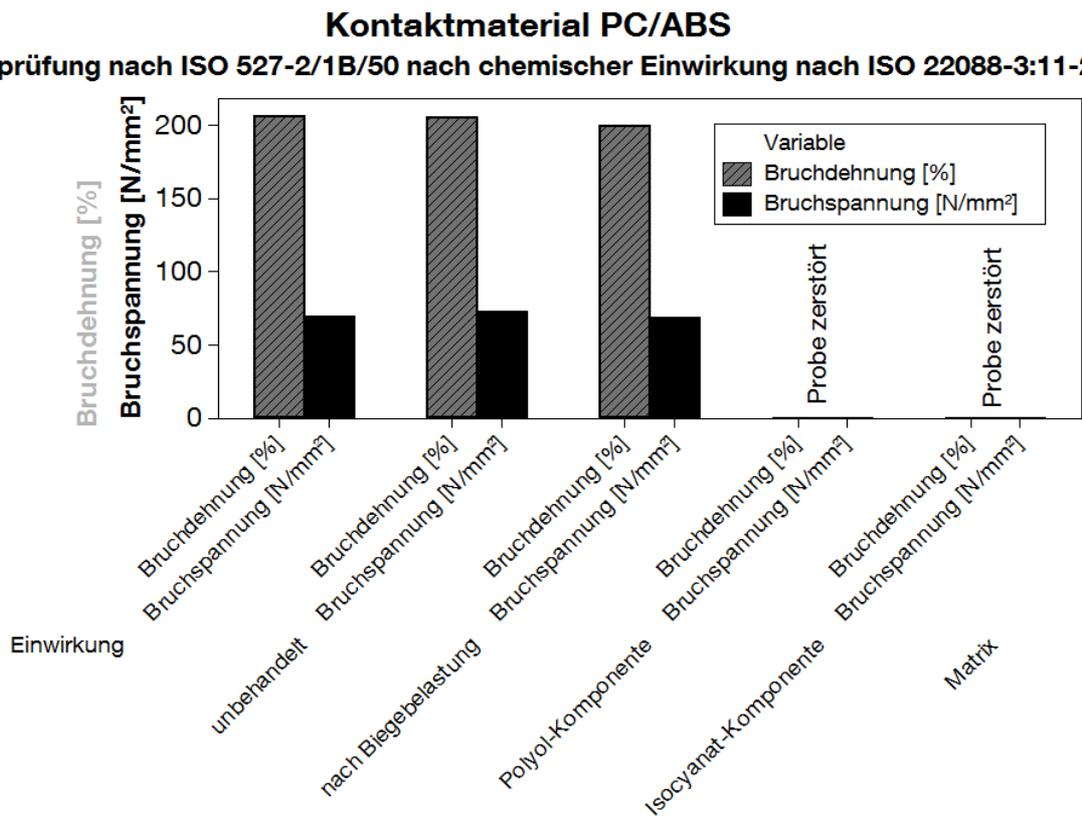


Abb. 47: Ergebnis mechanischer Zugprüfung nach chemischer Einwirkung von Loctite® Max2 auf Schicht aus Polycarbonat/ABS (oben) und Polycarbonat (unten), Datenquelle:[92]

Während des Kontaktes des Isocyanates mit der Polycarbonatschicht (Oberschicht und im Aufbau nach außen gerichtet), die bereits nach 20 Minuten eine vollständige Probenzerstörung zur Folge hat, zeigt die Anbindungsschicht aus dem thermoplastischen Gemisch von Polycarbonat mit Acrylonitril-Butadiene-Styrol im gleichen Zeitraum ein geringes Schadensbild.

Ebenfalls beobachtet wird die Ausbildung von Rissen. Diese führen jedoch nach dreifacher Einwirkzeit noch nicht zum vollständigen Versagen unter mechanischer Vorspannung. Wie auch unter Einwirkung der Matrix entfällt eine mechanische Prüfung, nachdem die vorgeschriebene [70] Einwirkzeit nicht eingehalten werden kann.

Chemische Folienbeständigkeit gegenüber der Harzkomponente

Die Polyol-Komponente der Matrix wurde im Versuchsaufbau auf die Polycarbonat-Schicht sowie auf die Schicht aus Polycarbonat und Acrylonitril-Butadiene-Styrol aufgetragen. Eine Rissbildung nach 24-stündiger Einwirkung und anschließender Trocknung wurde nicht beobachtet. Eine mechanische Prüfung wurde durchgeführt.

Zusammenfassung chemischer Beständigkeit

Ziel der Untersuchung ist, die chemische Beständigkeit der verwendeten Folie gegenüber reaktiver Matrix nachzuweisen oder eine zeitliche Größenordnung für ihre Verarbeitung ohne Folienschädigung zu geben.

Unter der Beteiligung der Isocyanat-Komponente kommt es zum chemischen Angriff auf die Folie. Der chemische Angriff führt in einem Zeitraum unterhalb der normierten Einwirkzeit zur Schädigung der Proben über das Maß weiterer Testbarkeit hinaus. Unterschiede in der Schädigungsgeschwindigkeit innerhalb des Folienmaterials unter reiner Isocyanateinwirkung werden beobachtet. Die Beimengung von Acrylonitril-Butadiene-Styrol zur Polycarbonat-Schicht führt zu einer zeitlich verzögerten Schädigung. Die Materialschicht zeigt eine höhere Beständigkeit gegenüber reinem Polycarbonat, ohne jedoch insgesamt eine Beständigkeit in der Definition nach [70] aufzuweisen. Der Zeitraum zur vollständigen Probenzerstörung bewegt sich im Kontakt Isocyanat/ Polycarbonat im Bereich weniger Minuten, im Kontakt Isocyanat/ PC-ABS größer 10 Minuten.

5.1.3.3. Haftungsuntersuchung im Rollenschälversuch

Folie wird im Laufe des Verfahrens dauerhaft an das Foliensubstrat angebunden. Im Rahmen nachfolgender Untersuchung werden verschiedene Folien auf ihre Adhäsionswirkung zum Fasersubstrat untersucht.

Aufbau

Versuchsplatten auf Basis von drei unterschiedlichen Anbindungsschichten wurden gefertigt. Probeplatten unterscheiden sich durch deren Anbindungsschicht; Faser- und Matrixmaterial sowie die Verarbeitungsparameter (Tab. 31 des Anhangs) unterscheiden sich nicht. Vier unterschiedliche Anbindungsschichten auf Basis von Polycarbonat und ABS wurden verarbeitet und anhand von Rollenschälversuchen getestet. Die Erhebung der Messdaten erfolgt nach [64]

Tab. 10: Anbindungsschichten zur Haftungsuntersuchung

Folie	Anbindungsmaterial
Senoplast VM 1R CM60C-12-026	PC/ABS
Senoplast VM 1E C96-12-023	PC/ABS
Senoplast VM 1E C96-12-023	PC
Senoplast VM C60-12-007	PC/ABS

Die Anbindungsschichten unterscheiden sich in Konzentration, Art der Beimengung und Verarbeitung des Acrylonitril-Butadien-Styrol (ABS). Dabei wird die Folie VM 1E C96-12-023 in zwei Versuchen eingesetzt, die sich durch die Seite des Matrixkontaktes unterscheiden. In einer Versuchsreihe tritt das reaktive Matrixgemisch auf die vorgesehene Anbindungsseite des PC/ABS und in einer weiteren auf die des reinen Polycarbonats.

Versuchsbeobachtung

Im Aufbau des Rollenschälversuches wird der Folienanteil über eine Vorrichtung nach [63] belastet. Zwei der vier Haftungskombinationen aus Thermoplastfolie und Duroplastmatrix sind nicht gemäß Prüfnorm messbar, da sich die Folie vorab löst oder mechanisch versagt.

Senoplast VM 1R CM60C-12-026 bildet aufgrund hoher Eigensteifigkeit und geringer Verbundhaftung einen abweichenden Abzugswinkel (Abb. 48 links) innerhalb der Prüfvorrichtung. Abzugskräfte können erhoben und

ausgewertet werden; ihre Gültigkeit entspricht nicht dem verwendeten Standard. Senoplast VM 1E C96-12-023 in der Kontaktvariante, in der die reine PC-Schicht in Kontakt mit der Matrix steht, zeigt eine Degradation des Folienmaterials. Die zur Messung erforderliche Abzugslänge wurde nicht erreicht, eine Datenerhebung war nicht möglich (Abb. 48 rechts).

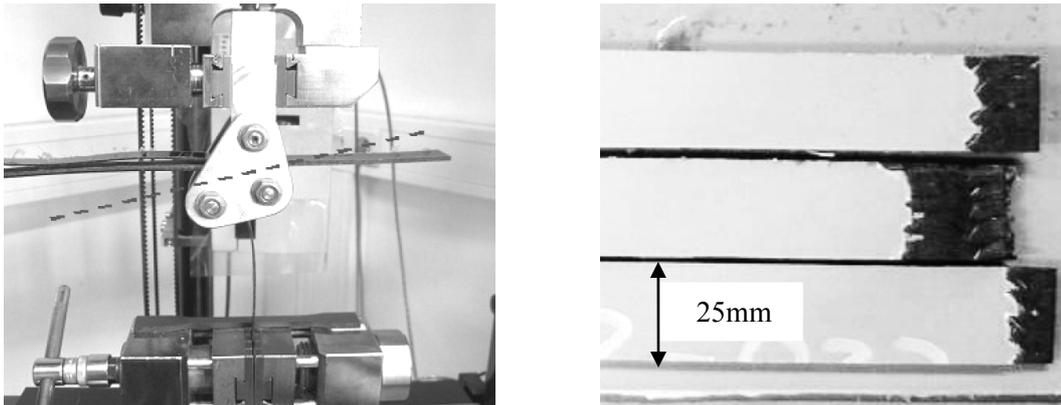


Abb. 48: ungültiger Rollenschälversuch: abweichender (unterbrochene Linie entspricht Normvorgabe) Abzugswinkel (links) und frühzeitiger Folienabriss (rechts) Bildquelle: [64]

Rollenschälversuch DIN EN 1464

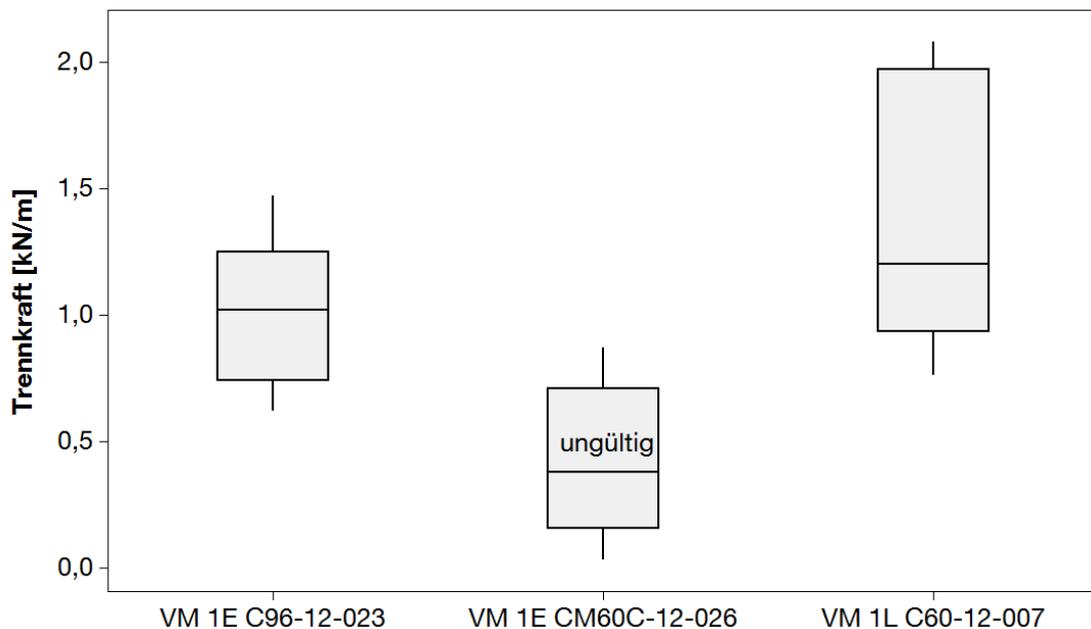
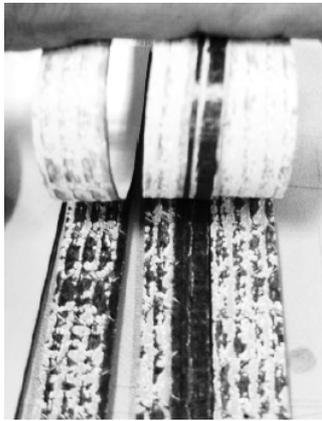


Abb. 49: Rollenschälversuche verschiedener Folienrenzschichten

Ergebnis Rollenschälversuche

Die Auswertung der aufgezeichneten Abzugskräfte erfolgt durch die Auswertung aller minimalen, maximalen und durchschnittlichen Kräfte. Somit fließen drei Datengruppen je Beobachtung in die Auswertung ein. Innerhalb der beiden gültigen Prüfreihe der Folien Senoplast VM 1E C96-12-023 und Senoplast VM 1L C60-12-007 zeigt sich eine Mittelwerts-Abweichung, wobei letztere gegenüber Senoplast VM 1E C96-12-023 eine (um ca. $0,37\text{kN/mm} - 36\%$) höhere mittlere Abzugskraft aufweist. Die Varianzanalyse zeigt aufgrund der breiten Streuung bei einem Konfidenzintervall von 95% und Normalverteilung keine Signifikanz im F-Test der beiden Folienabzugskräfte.



VM 1E C96-12-023



VM 1LC60-12-007

Abb. 50: Grenzfläche nach Folienabzug Bildquelle:[64]

Der Rollenschälversuch für beide gültigen Varianten zeigt ein Trennkraftniveau von durchschnittlich $1,0\text{-}1,4\text{ kN/mm}$, was ausreicht um ein Kohäsionsversagen in der Folie und/ oder im Faserverbundsubstrat hervorzurufen.

Wie Abb. 50 links zeigt, tritt ein Versagen im Schälversuch von VM 1E C96-12-023 überwiegend innerhalb der Folie zwischen Anbindungsschicht und Trägerschicht auf, was eine Übereinstimmung mit der Vorhersage des Spannungsmodells (Abb. 35 und Abb. 36) darstellt. Im Schälversuch werden folieninterne Spannungen mit der mechanischen Schälbelastung überlagert und führen im Fall von VM 1E C96-12-023 zum Kohäsionsversagen.

Wie Abb. 50 rechts zeigt, tritt ein Versagen im Schälversuch von VM 1LC60-12-007 überwiegend im Substrat auf. Die abgezogenen Folien zeigen anhaftende Schichten des Faserverbundmaterials. Trotz der sich im Fo-

lienmaterial befindlichen Herstellungsspannungen, übersteigt die durch die Folie auf das Faserverbundssubstrat im Schälversuch übertragene Kraft die Festigkeit der Matrix. Die Unterschiede des Streuungsverhaltens bei mittlerem Kraftniveau des in Abb. 49 ersichtlichen Schälversuches, resultieren somit aus den unterschiedlichen Tiefen und dem Material des Rissfortschrittes.

Zusammenfassung Folienhaftung

Ebene Versuchskörper im vorgesehenen Aufbau nach Abb. 43 wurden unter einsatznahen Verarbeitungsparametern (Verarbeitungstemperatur, Zykluszeit, Katalysatorkonzentration, Tab. 31) gefertigt. Die Grenzfläche wurde im Rollenschälversuch nach DIN EN 1464 belastet, Schälkräfte und Trennfläche charakterisiert.

Die untersuchten Anbindungsschichten unterscheiden sich durch Art und Anteil des dem Polycarbonat beigemengten ABS.

In der Probe ohne beigemengtem ABS zeigt sich eine Versprödung im Folienmaterial (Abb. 48 rechts), das zu einem frühzeitigen Versagen noch vor Erreichen der zur Messung notwendigen Abzugsstrecke führt. Dies entspricht der Charakteristik, wie sie in der chemischen Beständigkeitsuntersuchung (Abb. 45 & Abb. 46) unter Beteiligung der Isocyanat-Komponente beobachtet wurde. Diese Untersuchung stellt eine geringere Beständigkeit des reinen Polycarbonats gegenüber eingesetzter Matrix zur Vergleichsschicht aus PC/ABS heraus. Trotz der gewählten Verarbeitungsdauer der Matrix unterhalb des Zeitraumes, der in der chemischen Beständigkeitsanalyse für die Isocyanat-Komponente des Matrixsystems noch zu keiner Rissbildung geführt hat, kommt es bei reinem Polycarbonat zur Schädigung der Folie.

Bei Versuchskörpern, deren Anbindungsschicht aus PC/ABS bestehen, wurde bei gleichem Einwirkungszeitraum der Matrix keine maßgebliche Versprödung beobachtet. In der Formulierung der Anbindungsschicht Senotop VM 1LC60-12-007 wurde im Experiment ein wiederholbares kohäsives Schälversagen innerhalb des Faserverbundssubstrates beobachtet. Damit ergibt sich das Polymergemisch aus PC und ABS gemäß VM1LC60-12-007 für die innere Anbindungsschicht, die eine ausreichende chemische

Stabilität aufweist, eine Schädigung der Folie im Zeitraum der Verarbeitung verhindert und ausreichende Adhäsionskräfte zum Substrat aufweist.

5.1.3.4. Grenzflächenuntersuchung Thermoplast/ Duroplast

Zwei der untersuchten Anbindungsschichten zeigen im relevanten Prozessfenster eine ausreichende Folienhaftung unter mechanischer Belastung [63]. Eine mikroskopische Betrachtung (Auflicht-/ Raster-Elektronen-Mikroskop (REM)) der Grenzfläche zur Bestimmung des Adhäsionsmechanismus findet statt.

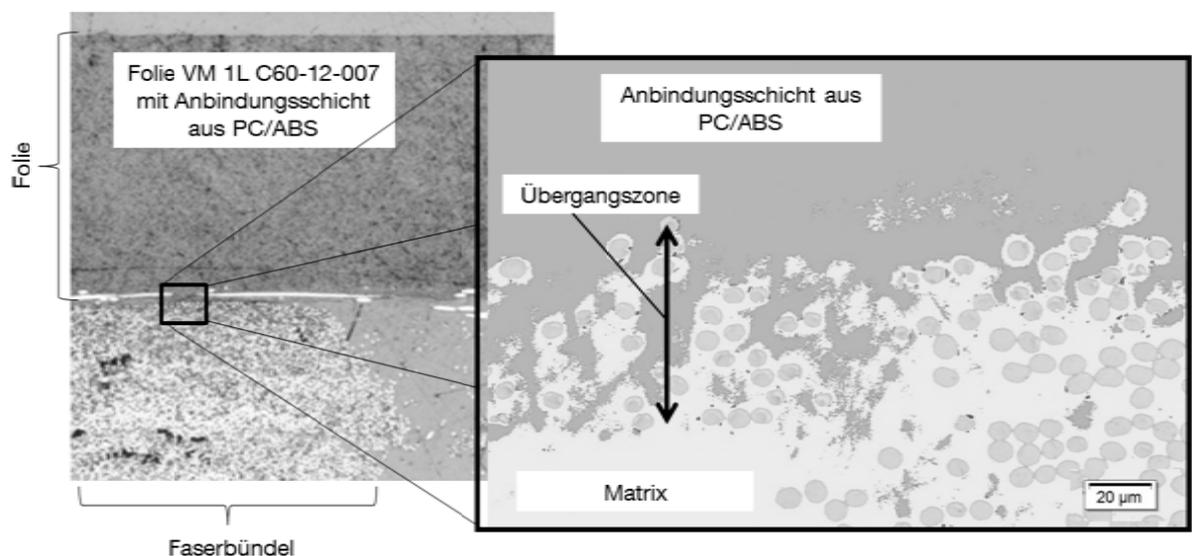


Abb. 51: Lichtmikroskopie-Aufnahmen der Grenzfläche von thermoplastischer Anbindungsschicht mit der Faser-Matrix-Phase

Abb. 51 zeigt links die Anordnung aus Folienmaterial Senoplast VM 1L C60-12-007 und dem angrenzenden Faserbündel mit einem Reinharzgebiet, rechts den daraus vergrößerten Ausschnitt an der Grenzfläche. Zur besseren Unterscheidung der Materialzonen sind diese entsprechend durch Grauabstufungen hervorgehoben. Der Übergang der Materialien erfolgt in einer Übergangszone. In dieser Übergangszone befinden sich sowohl thermoplastische Materialgebiete als auch Gebiete, die duroplastisch sind. Vereinzelt Einschlüsse des Materials in der Gegenseite werden beobachtet. Unter der Annahme, dass die Fasermaterialien vor der chemischen Einwirkung der reaktiven Matrix keinen Einschluss in die Thermoplastschicht gefunden haben, ist das Umschließen thermoplastischer Anteile einzelner Filamente mit einem thermoplastischen Anteil damit zu begründen, dass sich die thermoplastischen Anteile in einem Zustand der Lösung befunden haben.

Wie anhand der Versuche zur chemischen Beständigkeit gezeigt wurde, liegt keine Beständigkeit der verwendeten Materialkombination nach [70] vor. Ein Auf- oder Anlösen der Folie findet statt. Mit fortschreitender Reaktion der vernetzenden Matrix reduziert sich die Konzentration ungebundener Isocyanate, gegen die keine chemische Beständigkeit vorliegt.

Der Zeitraum zur vollständigen Probenzerstörung in den Versuchen nach [70] bewegt sich im Kontakt Isocyanat/ Polycarbonat im Bereich weniger Minuten, im Kontakt Isocyanat mit PC/ABS >10 Minuten. Reduziert sich nun in dem Zeitraum die Konzentration des Lösungsmittels (Isocyanat) infolge einer chemischen Bindung (Reaktion des Isocyanat mit dem Polyol), so steht es für weitere Lösungsvorgänge der thermoplastischen Anbindungsschicht nicht mehr zur Verfügung.

Somit stehen die gewählten Parameter der Injektion, wie Werkzeugtemperatur und Katalysatormenge, über die Reaktionszeit (Abschätzung nach Abb. 41) in Korrelation mit der Ausbildung einer Mischungszone. Weiterhin wird die Mischungszone von der Formulierung der PC/ABS-Anbindungsschicht beeinflusst, wie in Abb. 52 ersichtlich wird.

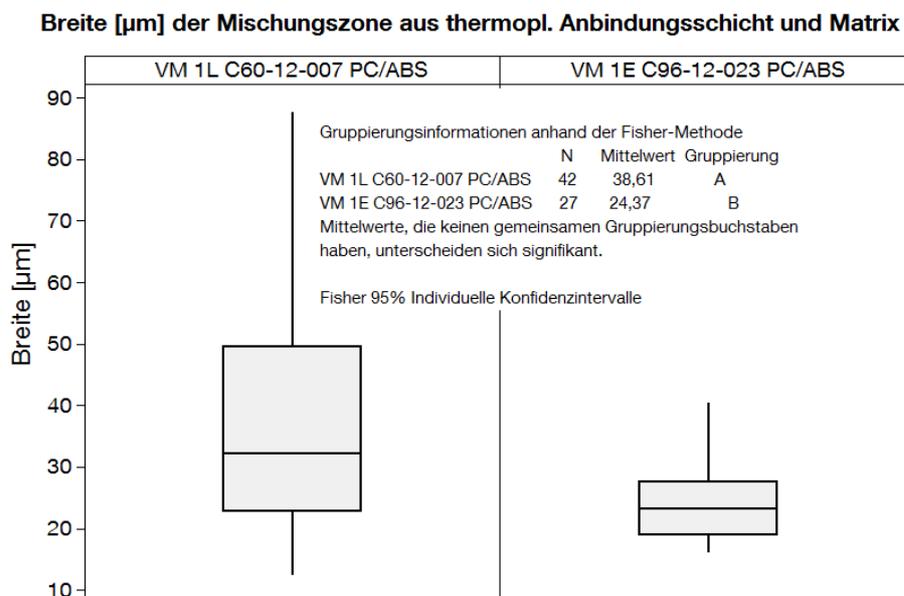


Abb. 52: Breite der Grenzschichtzone der haftungsvermittelnden Folien

Trotz gleicher Verarbeitungsparameter bei der Probenfertigung zeigen die Anbindungsschichten der unter mechanischer Prüfung als haftungsvermit-

telnd eingeschätzten Formulierungen einen signifikanten (Abb. 52) Unterschied in der Breite der ausgebildeten Mischungszone.

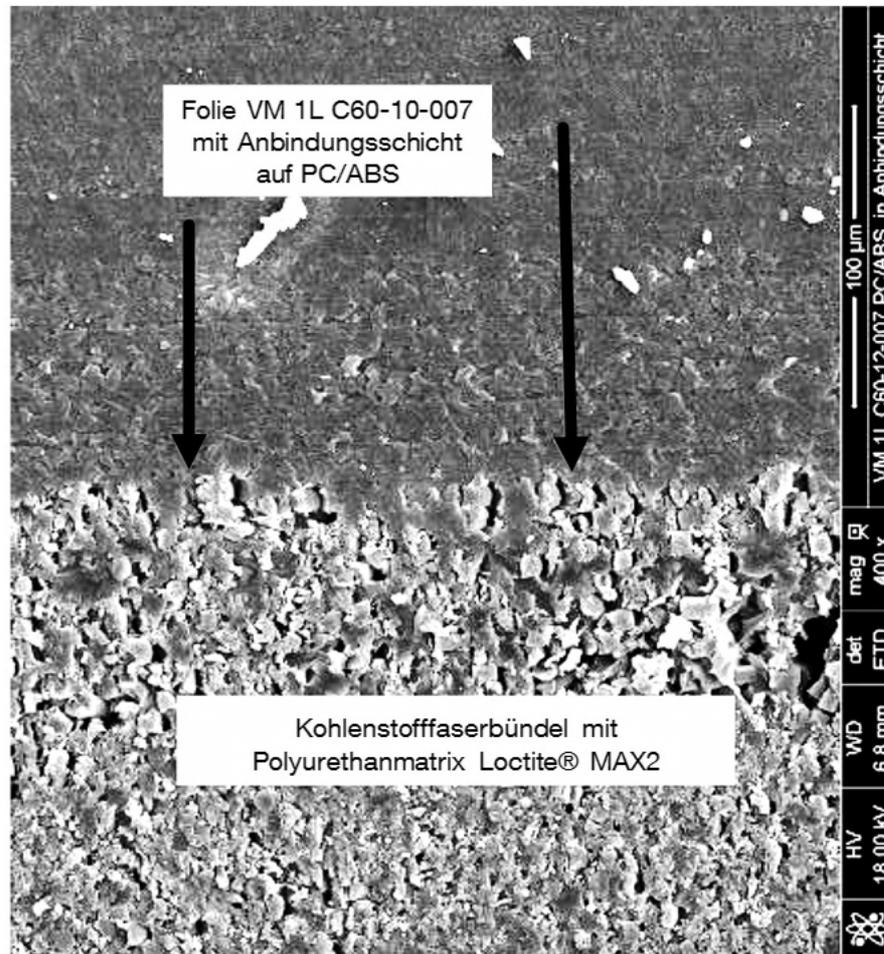


Abb. 53: Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme der Grenzschicht PC/ABS und Matrix nach [93]

Somit entscheidet die Kombination aus Verarbeitungsparametern und Materialkombination über die Ausbildungsbreite der Mischungszone. Sie ist für die Anbindungsschicht VM 1L C60-12-007 als REM-Aufnahme in Abb. 53 dargestellt. (Abb. 53) Die oberen dunklen Bereiche stellen die Anbindungsschicht dar, die unteren Bereiche stellen den Faserverbundanteil dar. Dazwischen bildet sich ein Mischungsgebiet aus, das von einzelnen, länglichen und vertikalen thermoplastischen Gebieten durchzogen ist.

5.1.3.5. Zusammenfassung Folienhaftung

Bei der angestrebten Prozesskette werden thermoplastische Folien eingesetzt, die im Kontakt mit der reaktiven Matrix unter Verarbeitungsbedingungen stehen. Unter dieser thermischen und chemischen Belastung ist es

die Aufgabe der Folie, eine flächige Grenzschicht zwischen Werkzeug und Reaktionsmasse zu bilden, die im Laufe des Vernetzungsprozesses der Matrix eine Adhäsionswirkung zum Substrat aus Faserverbundwerkstoffen ausbildet. Durch die Kombination aus Verarbeitungstemperatur und inhomogener Wärmeausdehnungskoeffizienten der verwendeten Ausgangsmaterialien entstehen im Materialaufbau Spannungen, die von Betriebslasten überlagert werden. Dabei darf es zu keiner Folienablösung kommen.

Zur Abschätzung der chemischen Einflüsse werden Folienschichten auf Basis von Polycarbonat unterschiedlicher ABS-Anteile den Einzelkomponenten der Matrix und der homogenisierten Matrix ausgesetzt und anschließend im Zugversuch mechanisch charakterisiert. Eine chemische Schädigung bis zum vollständigen Foliensversagen gegenüber der Isocyanat-Komponente wurde beobachtet. Der Zeitraum zur vollständigen Probenzerstörung bewegt sich im Kontakt Isocyanat/ Polycarbonat im Bereich weniger Minuten, im Kontakt Isocyanat/ PC-ABS >10 Minuten.

Die Charakterisierung der Grenzschicht erfolgt durch die Fertigung ebener Versuchskörper unter prozessrelevanten Bedingungen, die dem Rollenschälversuch unterzogen werden. Die Reaktionszeit der Matrix zur Herstellung der Probenkörper unterschreitet den Zeitraum, in dem in den Versuchen zur chemischen Beständigkeit ein Foliensversagen beobachtet wurde. Schälversuche ergeben bei zwei der untersuchten Anbindungsschichten ausreichende Haftung. Die Auswertung des Rissfortschrittes zeigt in Abhängigkeit der verwendeten Folie Kohäsionsversagen innerhalb des Thermoplastaufbaus oder Kohäsionsversagen im Faserverbundsubstrat.

Eine Folienanbindung mittels Anbindungsschicht VM1LC60-10-007 und Verarbeitungsparameter nach Tab. 31 führen zur dauerhaften Anbindung.

5.1.4. Voruntersuchung: Effekte der Folienaufheizung

Bauteile der Transportindustrie weisen im überwiegenden Anteil eine dreidimensionale, zweifach gekrümmte Geometrie auf. Fasern und Folie liegen zu Beginn des Formungsprozesses eben, nach dem formgebenden Schritt in einer Bauteilgeometrie vor. Zwischen diesen beiden Zuständen findet eine Materialbewegung statt, die im Fall der Folie von Änderungen der Punktabstände auf der Oberfläche während ihrer plastischen Deformation beglei-

tet ist. Das Kraftniveau dieser plastischen Deformation weist eine Temperaturabhängigkeit auf und wird nachfolgend untersucht.

Das thermische Materialverhalten des verwendeten Polycarbonats kann der Literatur entnommen werden (beispielsweise Abb. 54 in [88]). Ziel der Untersuchung ist die Darstellung des temperaturabhängigen Materialverhaltens des mehrschichtigen Folienaufbaus zur Bestimmung des Temperaturbereiches der maximalen Aufheizung, Formung und Injektion sowie der Erfassung der Effekte, die die Formung dieses mehrschichtigen Folienverbundes begleiten. Das Verhalten der Folie unter prozessnahen Bedingungen steht im Vordergrund.

5.1.4.1. Versuchsaufbau

Zur Erfassung der Anisotropie des Folienmaterials erfolgt eine richtungsabhängige Analyse. Versuche zum Folienverhalten erfolgen in zwei zueinander orthogonalen Folienrichtungen, wobei diese längs und quer zur Fertigungsrichtung der Co-Extrusion angeordnet sind.

Die Experimente erfolgen anhand der Methode zur Dynamisch Mechanischen Analyse (DMA) nach DIN ISO 6721-5 A3 [58] und DIN 65583:1999-04 [59] im Dreipunkt-Festlager-Versuch (Abb. 55 links und rechts; TA Instrument DMA Q800). Dieser Aufbau der beidseitigen festen Einspannung berücksichtigt die Aufheizensituation im Prozess des im Spannrahmen fixierten folienintegrierten Einlegers.

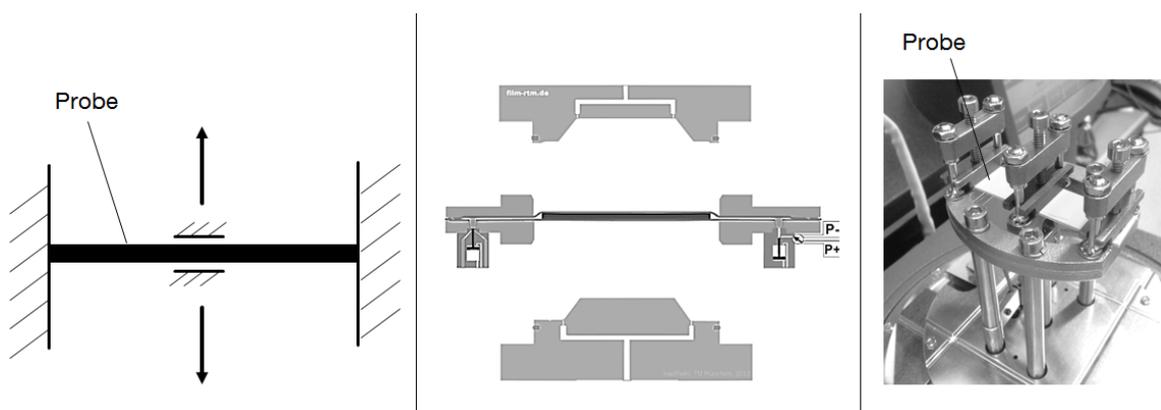


Abb. 55: DMA Versuchsaufbau (li. u. re.); Folieneinspannsituation im Prozess vor Aufheizung (Mitte)

5.1.4.2. Beobachtung

Abb. 56 zeigt den Speicher- und Verlustmodul sowie den Verlustfaktor $\tan(\delta)$ (Tangensfunktion der Phasenverschiebung zwischen der Kraft und Wegamplitude) über einem Temperaturbereich von 80-185°C.

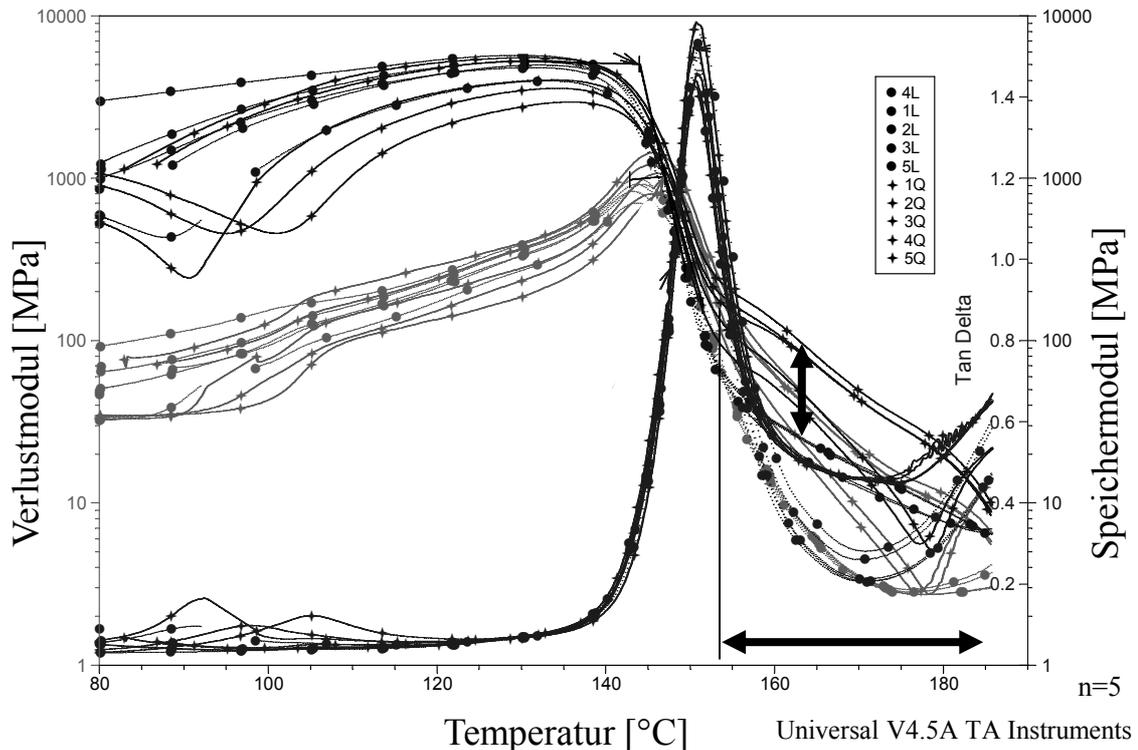


Abb. 56: thermomechanisches Folienverhalten nach DIN EN ISO 6721-5 A3 für Senoplast VM 1E C96-12-023

Energieelastischer Bereich

Im gewählten Aufbau kommt es mit zunehmender Temperatur zunächst zum Anstieg des Speichermoduls. Gegenüber den Literaturkennwerten ist zudem der Speichermodul im linearelastischen Bereich vor dem Erweichungspunkt überhöht. Wird die Probe spannungsfrei bei Raumtemperatur fixiert und bis zum Beginn der Messtemperatur erhitzt, führt die Wärmeausdehnung des Materials während der Messung zur Ausdehnung der Probe, Deformation und folglich zur Abweichung der Messwerte.

Übertragen auf die Einspannung des folienintegrierten Zwischenproduktes im Prozess (Abb. 55 Mitte) wird mit dem spannungsfreien Einspannen im Schließvorgang des Spannrahmens bei der anschließenden Aufheizphase der Folie ohne weitere Maßnahme eine Welligkeit der Folie beobachtet.

Diese ist das Resultat der Folienausdehnung in der Aufheizphase des energieelastischen Materialbereiches und der allseitigen Einspannung. Wird die Folienausdehnung nicht kontrolliert abgebaut oder gerichtet umgelenkt, beispielsweise durch ein Vorblasen, tritt eine Folienwelligkeit auf. Veränderte Abstände der Wellenberge zur Heizebene führen zu einer lokalen Abweichung der Temperaturverteilung, was bis zur thermischen Schädigung (Lochbildung) führen kann.

Übergangsbereich – energieelastisch zu entropieelastisch

Im Übergangsbereich nach dem Erweichungspunkt des Polymers kommt es ab ca. 144°C zum Abfall des Moduls.

- Der Speichermodul wird reduziert.
- Der Verlustmodul steigt an.

Im Übergangsbereich vom energieelastischen in den entropieelastischen Materialbereich erweicht die Folie und wird zunehmend formbar. Im Übergangsbereich werden Auswirkungen der Werkstoffanisotropie beobachtet. Diese sind gering.

Entropieelastischer Bereich

Nach Überschreiten des Maximums des Verlustfaktors (Tab. 32) wird eine zunehmende Differenz in den mechanischen Kennwerten zwischen den Längs- und Querproben (Abb. 12) beobachtet. Mit weiter zunehmender Temperatur kommt es zur verstärkten Absenkung des Verlustmoduls, der Verlustfaktor nimmt ab. Das Polymer, dessen Eigenschaften von elastisch in plastisch wechseln, erweicht zunehmend im entropieelastischen Bereich. Mit dem Modulverlust verliert das Folienmaterial die Eigensteifigkeit auf ein Niveau, in dem sich eingebrachte Fertigungsspannungen (z.B. Spannungen der Extrusion oder Walzwirkung) auswirken. Dabei bildet sich die Probendeformation richtungsabhängig aus. Längsproben, deren Polymerorientierung parallel zur Biegedehnung verläuft, zeigen eine Einschnürung zwischen den Einspannpunkten, wie in Abb. 57 dargestellt. Bei Proben quer zur Fertigungsrichtung der Folie zeigt sich eine Aufwölbung der Bereiche zwischen der Einspannung.

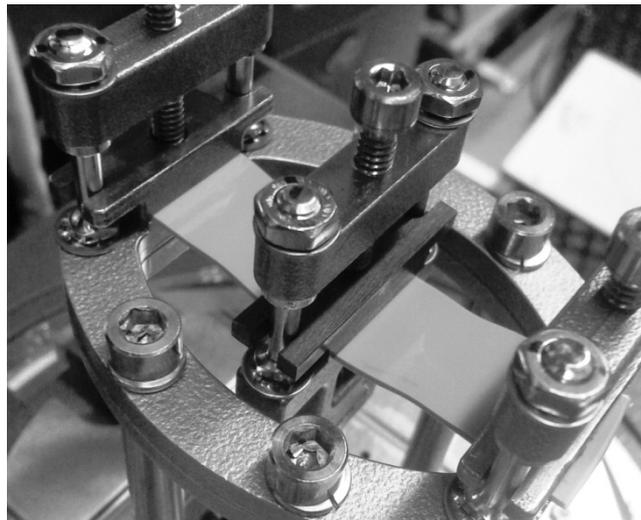


Abb. 57: Probeneinschnürung durch Anisotropie der Probe im Messaufbau nach DIN EN ISO 6721-5 A3

5.1.4.3. Zusammenfassung Effekte der Folienaufheizung

Ziel der Untersuchung ist die Darstellung des temperaturabhängigen Verhaltens der Werkstoffschichtung zum Folienverbund (VM 1E C96-12-023). Rückschlüsse über das amorphe Folienverhalten in der Aufheizphase können in drei Bereiche gegliedert werden, die das Material mit zunehmender Temperatur durchläuft:

- energieelastischer Temperaturbereich
- Übergangsbereich mit geringer Auswirkung der Folienanisotropie
- entropieelastisches Temperaturbereich

Energieelastischer Temperaturbereich (bis ca. 144°C)

Der gewählte Aufbau mit der Einspannung des Probenmaterials nach [58] ist durch die beidseitige Festeinspannung charakterisiert. Wärmedehnungseffekte überlagern sich aufgrund der Einspannung mit den Belastungen des Experimentes. Mechanische Kennwerte im linearelastischen Materialbereich werden überschätzt.

Ergebnisableitung zur Folienverarbeitung: Wird die Folie unter einer allseitigen Einspannung erwärmt, führt die daraus resultierende Materialausdehnung zur Deformation des Materials. Der hohe Speichermodul im Temperaturbereich unterhalb von 144°C erhält die Eigensteifigkeit, die Foliendeformation begrenzt sich auf reversible Durchbiegung/ Welligkeit.

Entropieelastischer Temperaturbereich (ab ca. 156°C)

Das Folienmaterial reduziert den Modul durch Abfall von Speicher- und Verlustmodul auf ein Niveau, in dem die Kraft aus den fertigungsbedingten Spannungen zur Deformation des Probenmaterials führt. Es kommt zur Ausbildung irreversibler Deformationen; eine Richtungsabhängigkeit wird beobachtet. Proben mit Polymerausrichtung parallel zum Kraftfluss zeigen eine seitliche Einschnürung, Proben quer dazu ein Aufwölben.

Ergebnisableitung zur Folienverarbeitung: Es können in der Aufheizphase des allseitig eingespannten Einlegers aus Folie und Fasermaterial Welligkeiten auftreten. Im energieelastischen Bereich stammen diese aus zunehmender Wärmedehnung, die einspannungsbedingt nicht abgeführt werden kann. Welligkeiten führen zu unkontrollierten Abständen des Folienmaterials zur Heizebene und dürfen zu keiner Schädigung führen. Aus diesem Grund ist das Folienmaterial während seiner Aufheizung mit einer gerichteten Spannung, beispielsweise durch Vorblasen zu belasten, um die Welligkeit infolge der Materialausdehnung wiederholgenau abzubauen.

5.1.5. Voruntersuchung mechanischer Eigenschaften

Thermoplastische Folien und Faserverbundwerkstoffe auf Basis endloser Kohlenstofffasern weisen unterschiedliche physikalische Eigenschaften auf, die in ebenen Platten kombiniert und untersucht werden. In einer mechanischen Analyse des ebenen Aufbaus soll der Zusammenhang aus Folieneinfluss und Faserverbundmaterial im Zug- und Biegeversuch dargestellt werden. Die Datenerhebung findet in [94] statt.

5.1.5.1. Aufbau

Der umhüllende Aufbau aus Kohlenstofffaser, Folie und Matrix ist in Abb. 43 dargestellt. Der genaue Aufbau des Faserverbundssubstrates basiert auf der Verwendung der Werkstoffe nach Tab. 27 des Anhangs in einer quasiisotropen Anordnung aus 4 Lagen Biaxialgelege. Die Materialeigenschaften sind unter Zugbelastung richtungsunabhängig und sind für den Bauteileinsatz im Lastfall mit geringer/ ohne Vorzugsrichtung ausgelegt.

Der Faseraufbau wird (zu 0/ 90/ +45/ -45s) geschichtet ($\sim 1224\text{g/m}^2$) und im RTM-Prozess (Materialparameter nach Tab. 28, Prozessparameter nach Tab. 29 des Anhangs) verarbeitet. Um Einflüsse durch folienseitige Feuch-

tigkeitsaufnahme zu reduzieren, werden die Folien vorab bei 60°C für 12h getrocknet. Unterfolie, Faserschichten und Oberfolie werden nacheinander eingelegt, im Schließvorgang des Werkzeuges (Abb. 58) kompaktiert und die Dichtigkeit der Folien gegenüber der Werkzeugoberfläche durch Normalkraft zur Folienebene hergestellt. Die Matrix trifft zentral auf den Aufbau, durchdringt die Folie an einer perforierten Stelle und tränkt das Fasermaterial parallel zur und zwischen den beiden Folien.

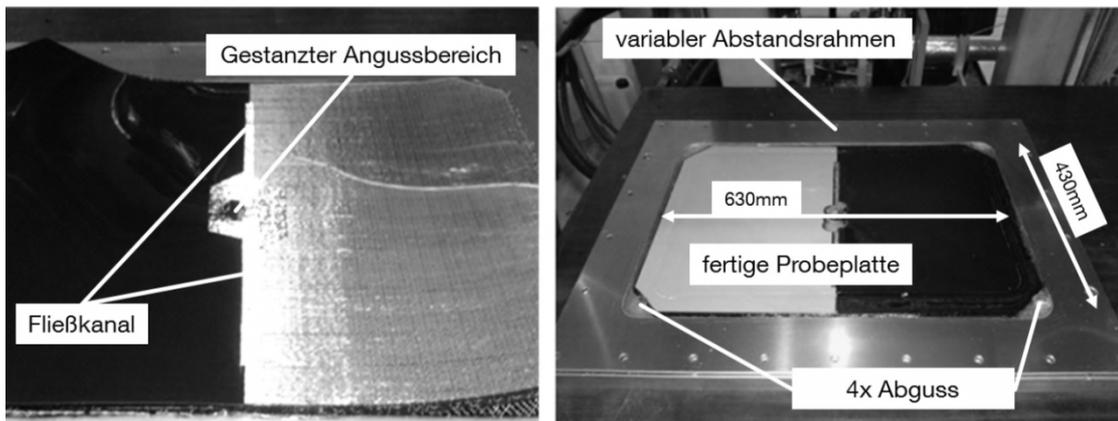


Abb. 58: Plattenfertigung variabler Kavitätshöhe in RTM

Der veränderliche Faktor ist die Folienstärke (Anhang Tab. 30), das Faser-substrat bleibt unverändert. Die Vorüberlegung zur Auslegung der Folienstärke orientiert sich am Vergleichswert des Flächengewichtes von Aluminium. Die Faktorstufen der Folien werden zu 0,33mm, 0,5mm und 0,75mm festgelegt.

Tab. 11: rechnerischer Gewichtseinfluss der Folie bei konstantem Faserverbunds-substrat, Matrixdichte = 1,2g/cm³, Faserdichte = 1,76g/cm³, Foliendichte = 1,05 g/cm³

Material / Folienstärke [mm]	Faservolumen- (theoretisch) [%]	Plattendichte [g/cm ³]	Plattensstärke [mm]	Flächengewicht [kg/m ²]	Flächengewicht zu Stahl 0,8mm [%]	Flächengewicht zu Aluminium 1,2mm [%]
Stahl	-	7,86	0,8	6,29	100	187
Al	-	2,8	1,2	3,36	53	100
0 (CFK qi)	48	1,48	1,45	2,14	34	63
0,1	48	1,42	1,65	2,35	37	70
0,2	48	1,38	1,85	2,56	41	76
0,3	48	1,34	2,05	2,76	44	82
0,4	48	1,32	2,25	2,97	47	88
0,5	48	1,29	2,45	3,17	50	94
0,6	48	1,27	2,65	3,38	54	101
0,7	48	1,25	2,85	3,59	57	107

Die Verwendung unterschiedlicher Folienstärken führt zu unterschiedlichen Wandstärken der Probeplatten. Die notwendige Anpassung der Kavitätshöhe erfolgt durch ein System aus veränderlichen Abstandsrahmen (Abb. 58 rechts) und Abstandsfolien, die entsprechende Verwendung finden.

5.1.5.2. Beobachtung

Der beschriebene Aufbau wies ohne Dichtungsvorkehrungen zwischen Folie und Werkzeug kein Eindringen des Matrixmaterials auf. Die Folie dichtete eigenständig gegen das Werkzeug ab. Es kam zur Folienhaftung am Substrat, Probeplatten konnten gesägt und getestet werden. Die vorausgerechneten Wandstärken der Probeplatten wurden in einem akzeptablen Wandstärkenbereich (Toleranzbereich $< \pm 0,1\text{mm}$) gefertigt. Die beobachtete Streubreite der Messungen ist für die Steifigkeitsuntersuchungen gering, die untersuchten Faktorstufen führten zur signifikanten Unterscheidung der Steifigkeit in Abhängigkeit der Folienstärke (Abb. 59). Mit zunehmender Folienstärke war eine Abnahme der Zug- und Biegesteifigkeit zu beobachten (Abb. 59). Der Modul des Aufbaus unter Zugbelastung wies in Abhängigkeit der verwendeten Folienstärke eine Bandbreite von $29189^{\pm 867} \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$ bei 0,33mm starken, bis auf $23285^{\pm 221} \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$ für 0,75mm starken Folien auf. Der Biegemodul in 0° -Richtung, also mit der Faserorientierung der äußersten Lage parallel zur Biegebelastung, zeigte eine Bandbreite von $21373^{\pm 549} \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$ für 0,33mm starke, bis $8452^{\pm 223} \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$ für 0,75mm starke Folien. Orthogonal hierzu überspannte der Biegemodul (90° -Richtung) einen Bereich von $11529^{\pm 678} \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$ für 0,33mm starke, bis $6090^{\pm 377} \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$ für 0,75mm starke Folien. Der aus der biaxialen DMS-Messung errechenbare Schubmodul wurde in Abhängigkeit der Folienstärke zwischen $8300\text{--}10900 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$ beobachtet.

Bei der Festigkeitsbetrachtung (Abb. 60) der Aufbauten ergab sich für die Untersuchung zur Zugfestigkeit ein breiter Streubereich der Stichproben der Folienstärke zu 0,5mm. Die Beobachtungen wurden auf Normalverteilung geprüft und als solche eingestuft. Die Festigkeit des Aufbaus unter Zugbelastung wies in Abhängigkeit der verwendeten Folienstärke eine Bandbreite von $376^{\pm 14} \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$ bei 0,33mm starken, bis auf $326^{\pm 11} \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$ für 0,75mm starke Folien auf.

Die Biegefestigkeit in 0°-Richtung, also mit der Faserorientierung der äußersten Lage parallel zur Biegebelastung, zeigte eine Bandbreite von $629 \pm 21 \frac{N}{mm^2}$ für 0,33mm starke, bis $355 \pm 17 \frac{N}{mm^2}$ für 0,75mm starke Folien. Orthogonal hierzu überspannt die Biegefestigkeit (90°-Richtung) einen Bereich von $465 \pm 20 \frac{N}{mm^2}$ für 0,33mm starke, bis $272 \pm 18 \frac{N}{mm^2}$ für 0,75mm starke Folien.

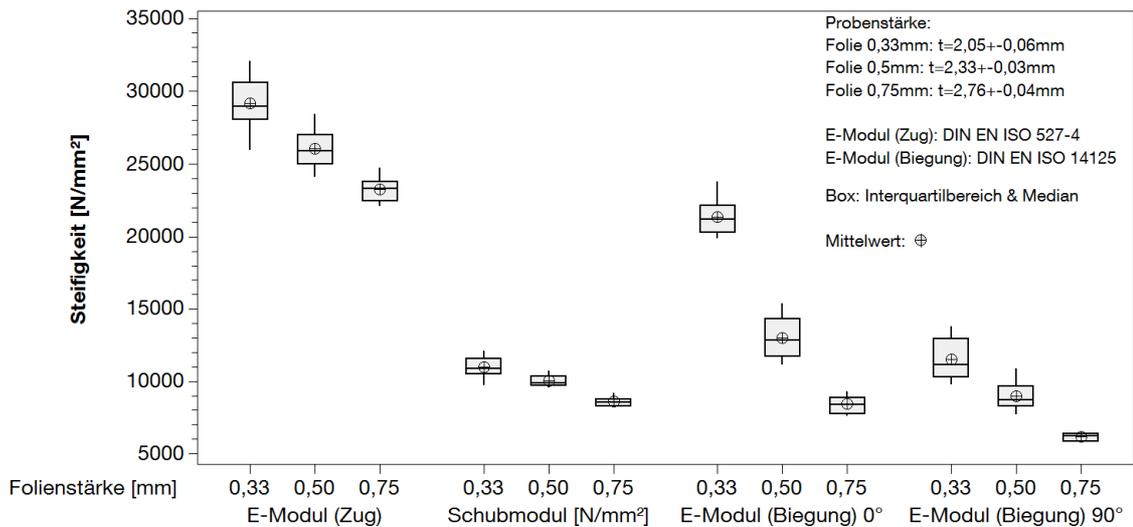


Abb. 59: Einfluss der Folienstärke auf Steifigkeit

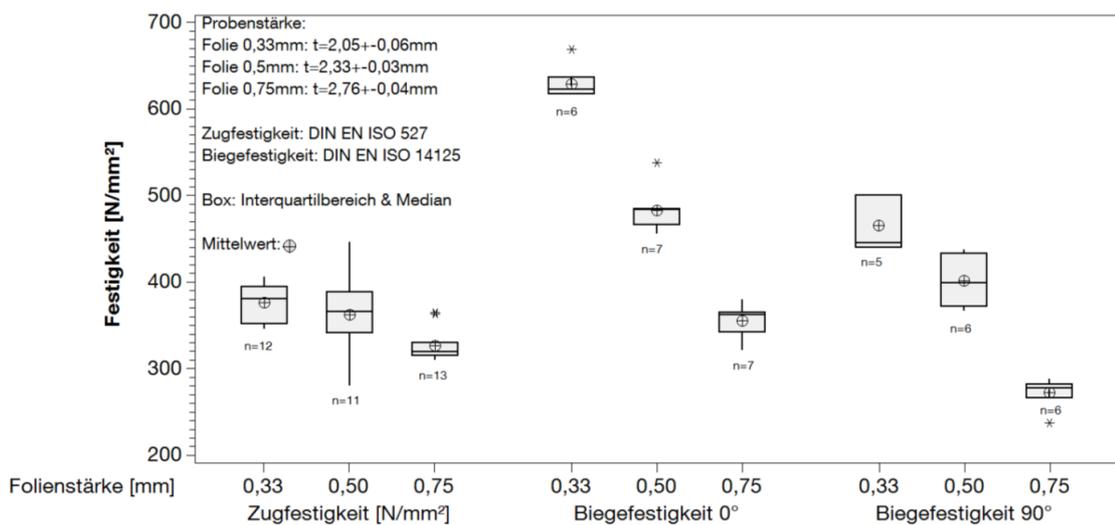


Abb. 60: Einfluss Folienstärke auf Festigkeit

5.1.5.3. Zusammenfassung zur mechanischen Voruntersuchung

Ebene Probenkörper unterschiedlicher Folienstärke wurden gefertigt und auf Zug- und Biegeverhalten untersucht. Die gewählte Folienstärke wurde anhand rechnerischer Vorauslegung derart gewählt, dass das zu vergleichende Flächengewicht eines 1,2mm starken Aluminiumbleches vom Aufbau übertroffen und unterschritten wird.

Unterschiede in den physikalischen Eigenschaften der Aufbauten werden beobachtet. Mit zunehmender Folienstärke sinkt die mittlere Dichte des Aufbaus, die Wandstärke der Platten steigt durch das konstant gehaltene Faserverbundssubstrat. Mit steigender Wandstärke des Probenmaterials kommt es zum Anstieg der Querschnittsfläche, auf die der Krafteintrag bezogen wird. Am Beispiel der Zugfestigkeit und des Zugmoduls kommt es trotz vergleichbarer Bruchlasten und Dehnungsverläufen somit zu geringeren Werten. Der mechanische Hauptbeitrag wird durch das Fasersubstrat aufgebracht.

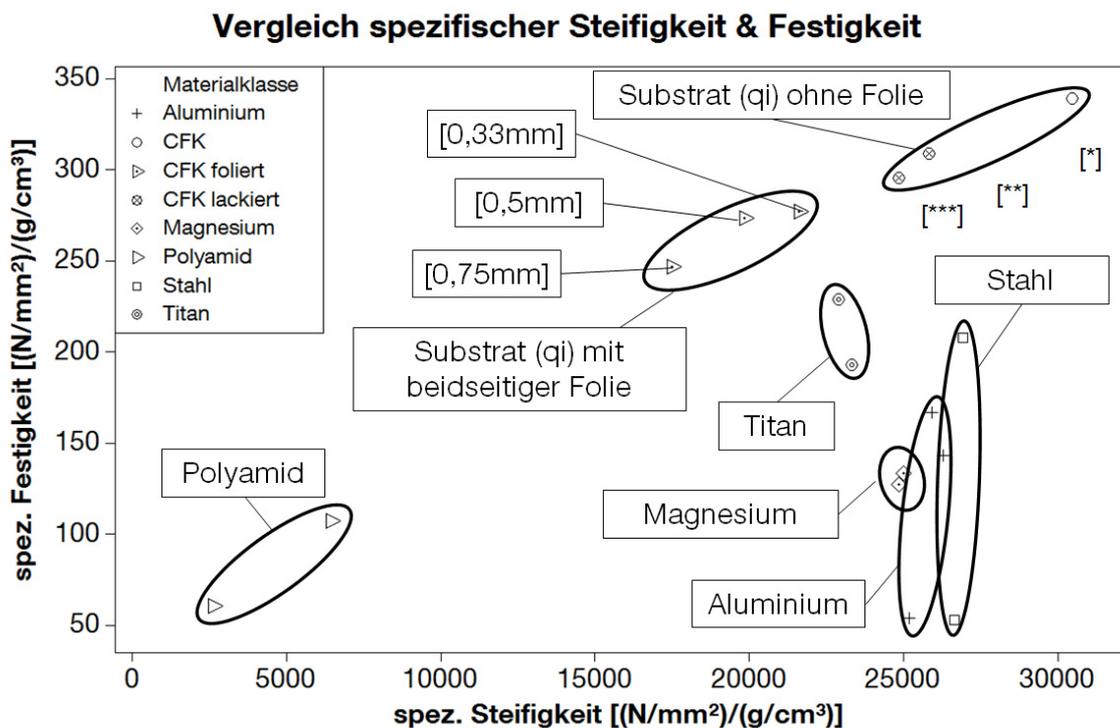


Abb. 61: Materialvergleich spez. Festigkeiten und Steifigkeiten; Flächengewicht der Lackierung: [**]=290g/m², [***]=450 g/m² aus [39], qi: quasiisotrop

Zur Einordnung des Leichtbaupotentials des Aufbaus werden spezifische Steifigkeit und Festigkeit mit denen von Metallen, Faserverbundmaterial

des gleichen Aufbaus, jedoch ohne Folie und Polyamid als Vertreter der Thermoplaste, aufgetragen (Abb. 61).

Das höchste Leichtbaupotential zeigt sich hier im reinen, unlackierten Faserverbundssubstrat (Abb. 61 [*]). Wird dieses Substrat gemäß dem Stand der Technik [39] lackiert, reduziert sich die spezifische Steifigkeit durch das Zusatzgewicht der aufgetragenen Lackschichten.

Das dargestellte Leichtbaupotential folienintegrierter Faserverbundwerkstoffe kann zwischen jenem des unverstärkten (Thermoplasten) und des reinen Faserverbundssubstrates eingeordnet werden. Mit sinkender Folienstärke steigt das Leichtbaupotential. Eine minimale Folienstärke ist für die Steigerung des Leichtbaupotentials anzustreben. Die spezifische Steifigkeit der Metalle kann in der Versuchsanordnung für dünne Schalen nicht erreicht werden. Ab einer Folienstärke von 0,75mm des gewählten Aufbaus und symmetrischer Verwendung wird eine spezifische Zugfestigkeit beobachtet, die jene von Titan und Stahl übersteigt.

5.1.6. Zusammenfassung der Voruntersuchungen

Ein numerisches Modell zur Simulation folieninterner Spannungszustände bei der Bauteilabkühlung zeigt ein Prozessfenster zur gemeinsamen Verarbeitung von Folie und Verbundwerkstoff auf. Die experimentelle Matrixcharakterisierung ermöglicht die grafische Vorauslegung gemäß Abb. 42 von Werkzeugtemperatur, chemischer Formulierung und zeitlichem Reaktionsverlauf, womit eine Anpassung an die Grenze chemischer Schädigung der Folie und Grenze des Haftungsaufbaus der Folie zum Substrat ermöglicht wird.

Untersuchungen zur Haftung führen auf eine an den Prozess angepasste Anbindungsschicht des Folienmaterials, die eine dauerhafte Haftung der Folie an das Substrat ermöglichen. Das thermische Verhalten der Folien-schichtung wird untersucht und führt auf den Temperaturbereich der Formung zwischen 156°C und 185°C. Unbekannt ist die Art der Reihenfolge, also welche Materialschicht unter welchem Einfluss zur fehlerfreien Ausformung/ Drapierung führt und welche Oberflächeneigenschaften die daraus entstandenen dreidimensionalen Bauteile aufweisen. Dieser Zusammenhang wird anhand einer Versuchsanlage experimentell untersucht.

5.2. Aufbau Versuchsanlage

Entsprechend den Anforderungen der Prozessauslegung und den Erkenntnissen der Voruntersuchungen wird die Anlagentechnik (Abb. 23), bestehend aus den Modulen

- zur evakuierten Umhüllung des zugeschnittenen Faseraufbaus und
- zur Umformung und Injektion, realisiert.

Beide Module sind über den stofflichen Transport des folierten Fasereinlegers miteinander verbunden. Der technische Aufbau der Prozesskette wird dargestellt. Voruntersuchungen des vorangegangenen Teilkapitels sowie Untersuchungen an einer generischen Demonstrator-Geometrie (Anhang Abb. 98) gehen der dargestellten Werkzeugauslegung voraus.

5.2.1. Bauteilgeometrie, Werkzeugauslegung

Auswahl der Geometrie

Die Geometrie des gewählten Bauteils (Abb. 62 und Abb. 96) stellt ein automobiles Verkleidungsteil des Exterieurs dar. Es zeichnet sich durch mehrfach gekrümmte Flächen und Außenradien kleiner 6mm aus. Es handelt sich um ein Verkleidungsteil der B-Säule und befindet sich im Sichtbereich des Fahrers.

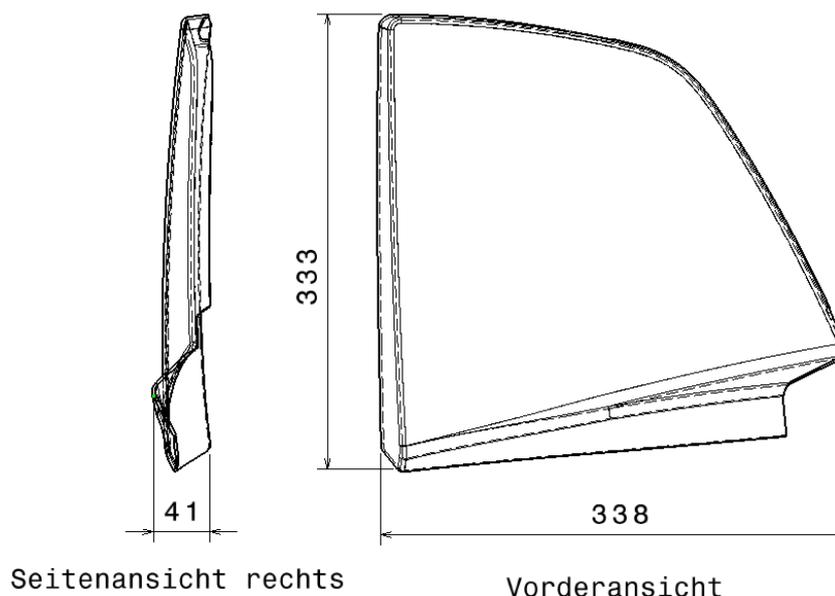


Abb. 62: Dimension des gefertigten Bauteils (Angaben in mm, Quelle: Roding Automobile GmbH)

Das Bauteil weist in seiner Hauptfläche eine zweifache Krümmung auf, die in einem nahezu orthogonal verlaufenden Randbereich eingefasst ist. Am unteren Randbereich findet ein Wechsel von konvex in konkav und wieder in konvex statt. Dieser Wechsel ist überwiegend einfach gekrümmt. Die Wandstärke des Bauteils ist konstant und beträgt in der Auslegung 2mm.

Der Aufbau in Dickenrichtung aus Folie – Kohlenstofffaserverbund – Folie (Abb. 63) erstreckt sich über die Gesamtfläche des Bauteils. Die Bauteilränder werden mit stetig angesetzten Auslaufzonen zur Folienformung und Faserdrapierung verlängert (Anhang Abb. 100).

Die technische Aufgabe der Auslaufzone:

- Überlappung des Fasermaterials über den Zuschnittbereich hinaus
- Faserkompaktierung außerhalb des Sichtbereiches zur Steuerung des Harzflusses während der Tränkung
- Bedeckung aller Grenzflächen der eingetragenen Reaktionsmassen mit Folien

Die Summe aus Bauteiloberfläche und auslaufender Zusatzfläche im Bauteilrandbereich ist im Werkzeug zu positionieren. Die ungeformte Folie und die Trennebene des Werkzeuges liegen parallel zueinander; die Bauteilgeometrie ist in dieser Ebene anzuordnen. Damit kann Einfluss auf den Drapiervorgang (Startpunkt) und die Auszugsschrägen im Öffnungsvorgang des Werkzeuges genommen werden. So stellt der höchste Punkt der Werkzeugunterseite den initialen Kontaktpunkt des Folienauftreffens dar [9].

Die Orientierung der Bauteilfläche gegenüber der Spannrahmenebene findet in einem iterativen Prozess statt, in dem ein Zielbereich für den ersten Folien-Faserkontakt gegenüber den Entformungswinkeln des Werkzeuges abgewogen wird. Der Zielbereich für den Initialkontakt richtet sich nach der Drapierung des Fasermaterials. Die Auswahl des Bereiches erfolgt anhand einer Abfolge kinematischer Drapier-Simulationen variierender Startpunkte. Startpunkte werden innerhalb der Bauteiloberfläche gewählt. Entscheidungskriterium für einen Startpunkt ist der sich damit ergebende maximale Scherwinkel innerhalb des Beschnittbereiches.

Ergebnis der kinematischen Drapier-Simulation ist die Abwicklung der dreidimensionalen Geometrie sowie die lokale Verteilung der Scherwinkel in Abhängigkeit der ursprünglichen Faserorientierung und des Startpunktes.

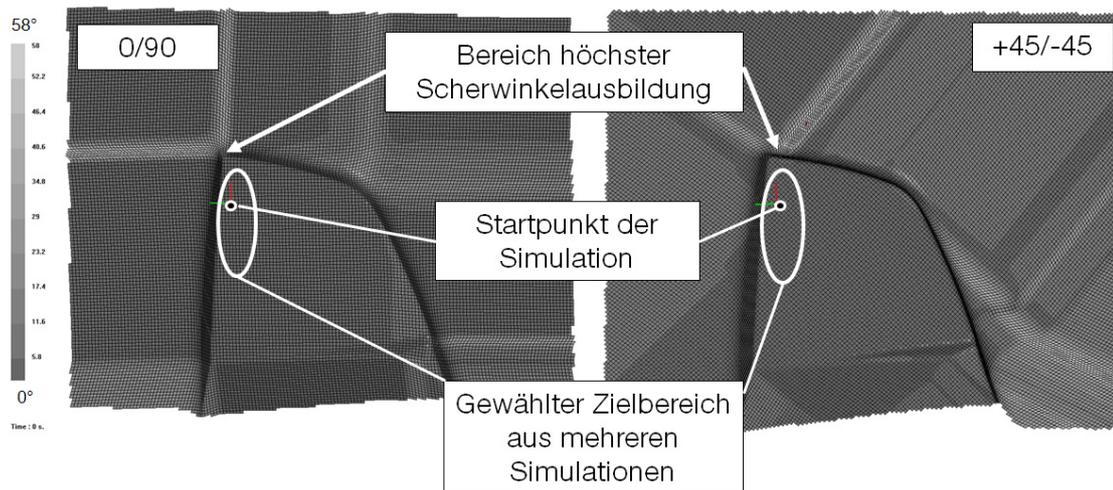


Abb. 64: Abschätzung der geometrieabhängigen Scherwinkelausbildung im Textil aufgrund einer kinematischen Drapier-Simulation ESI® Group PAM-Quickform

Im Ergebnis zeigt sich ein Zielbereich des ersten Faserkontaktes im direkten Umfeld der höchsten vorausgesagten Scherwinkeländerungen (Abb. 64). Diese wird im nahezu orthogonal zur Hauptfläche umlaufenden Randbereich durch die kinematische Drapiersimulation [9] vorhergesagt. Außerhalb dieser kritischen Stelle beträgt der errechnete Scherwinkel weniger als 40° . In Bereichen starker Faserscherung wird eine Schädigung des Fasermaterials, wie Falten und Gassenbildung zwischen den Faserbündeln erwartet, sofern der Zuschnitt des trockenen Fasermaterials den Bauteilbeschnitt überragt. Die Auslegung des Faserzuschnittes erfolgt anhand der numerisch errechneten Abwicklung (Abb. 99 im Anhang). Dabei wird der Zuschnitt durch einen Zug gerader Linien vereinfacht, weitere Änderungen finden nicht statt.

Die kinematischen Drapier-Simulationen mit veränderlichen Startpunkten und der Auswertung der maximalen Scherwinkel im Bauteilbereich führen auf einen Zielbereich des initialen Faserkontaktes auf dem Bauteil. In diesem iterativen Ansatz werden der Zielbereich des Faserkontaktes und die Auslaufflächen/ Auszugsschragen angepasst. Im Ergebnis führt dieses

Vorgehen auf die Auslegung der Werkzeuggeometrie und auf einen, durch gerade Züge angenäherten, Faserzuschnitt.

5.2.2. Werkzeugaufbau

Das Werkzeug gliedert sich im Konzept nach Abb. 25 in drei Elemente: einem stationären und konvexen Unterwerkzeug, einem in der Schließbewegung verfahrbaren, konkaven Oberwerkzeug und einem Spannrahmen. Dieser folgt der Bewegung des Oberwerkzeuges im Bereich der Zwischenposition bis zum vollständigen Schließen. Oberhalb der Zwischenposition kann der Spannrahmen automatisiert geöffnet werden, um die Zuführung von ebenen Zwischenprodukten und die Entnahme umgeformter, injizierter und aus der Kavität entformter Bauteile zu ermöglichen.

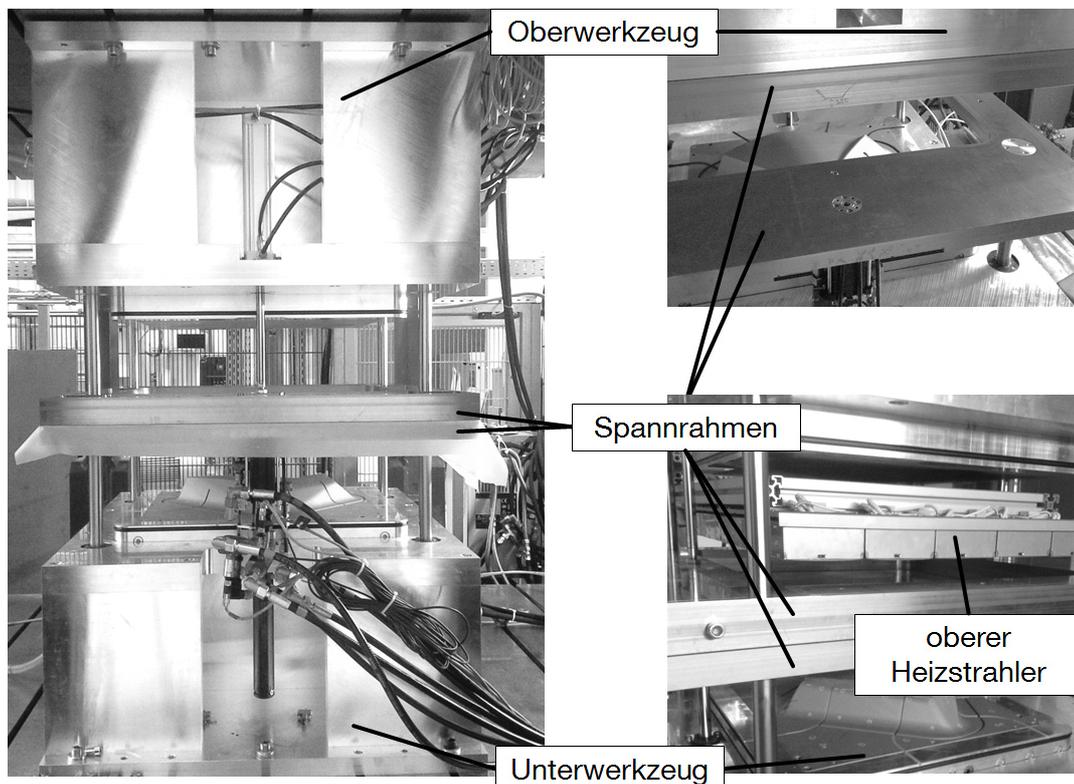


Abb. 65: Werkzeugaufbau des Umform- und Injektionsprozesses (links), offener Spannrahmen in Einlegesituation (rechts oben), eingefahrenes Heizfeld oben (rechts unten)

Oberwerkzeug

Das Oberwerkzeug enthält jene Oberfläche, deren Abformung die konvexe Sichtseite des Bauteiles bildet. Die Aufgabe dieser Oberfläche besteht in der Abformung der Oberfolie und der Entlüftung der Kammer, die sich mit dem Aufsetzen des Oberwerkzeuges auf den Spannrahmen zwischen

Werkzeug und Folie bildet. Hierzu ist die formgebende Werkzeugfläche mit Kanälen versehen, die rückseitig mit einem Vakuum beaufschlagt werden können. Der Bohrungsdurchmesser richtet sich nach optischen Anforderungen an die Oberfläche und an jene Zeit, die zur Formung benötigt wird. Bei zu kleiner Wahl des Durchmessers besteht die Gefahr der Folienabkühlung im Formungsschritt. Bei zu großer Wahl des Durchmessers besteht die Gefahr der optischen Abzeichnung und des Durchbruchs in der anschließenden Tränkungsphase. Die Durchmesser im späteren Sichtbereich des Bauteiles wurden nach [48], die Durchmesser außerhalb nach der Evakuierungszeit empirisch ausgelegt.

Tab. 12: Literaturangaben zur Werkzeugauslegung nach [48]

Material	Formungstemperatur [°C]	Erweichungstemperatur [°C]	Vakuumbohrung [mm]	Vakuumschlitz [mm]	Werkzeugtemperatur [°C]
PC	150-180	150	0,6	0,5	130
ABS	130-160	100	0,8	0,5	85
ASA	120-160	90	0,8	0,5	85

Zusätzlich zur Bauteilgeometrie enthält das Oberwerkzeug die Automatisierungsmechanik, die zum Abheben des teilbaren Spannrahmens führt. Nach Einlegen des ebenen Zwischenproduktes zu deren Fixierung und nach Öffnen der Schließeinheit (Presse) zur Bauteilentnahme ermöglicht diese Mechanik eine unabhängige Bewegung.

Spannrahmen

Die Konzeption des Prozessablaufes sieht die Aufheizung der ebenen Zwischenprodukte innerhalb des Werkzeuges vor. Dabei ist eine umlaufende Fixierung des Folienmaterials sicherzustellen. Gelöst wird diese Anforderung durch einen teilbaren, der Werkzeugbewegung folgenden Spannrahmen, bestehend aus einer separat beweglichen Spannrahmenober- und einer werkzeugfolgenden Spannrahmenunterseite. Der Schnitt durch den Spannrahmen an der Stelle des Injektionskopfes zeigt dabei die für den Prozess relevanten Vorrichtungen (Abb. 66). Dargestellt ist der geschlossene Spannrahmen mit Ober- und Unterseite. Der Injektionseinleger befindet sich zwischen den Folien und verhindert, dass beide Folien gegeneinander Abdichten, wenn sie aufeinander gepresst werden.

Im Schließvorgang des Spannrahmens wird die Anbindung an das Werkzeugsystem, bestehend aus Injektionseinheit und Innendrucksteuerung hergestellt und alle Dichtungsflächen werden ausgebildet. Im Ausgangszustand des Einlegers sind die beiden Folienseiten lediglich durch eine Schweiß- oder Klebnaht umlaufend und gasdicht verbunden. Wird der Spannrahmen geschlossen, werden die Dichtungsflächen durch plastische Deformation der Thermoplaste erzeugt. Grundlage der Dichtwirkung ist zum einen das gegenseitige Eindringen der Kunststoffgrenzflächen ineinander und zum anderen die plastische Deformation des Thermoplasts um Pressflächen des Werkzeuges.

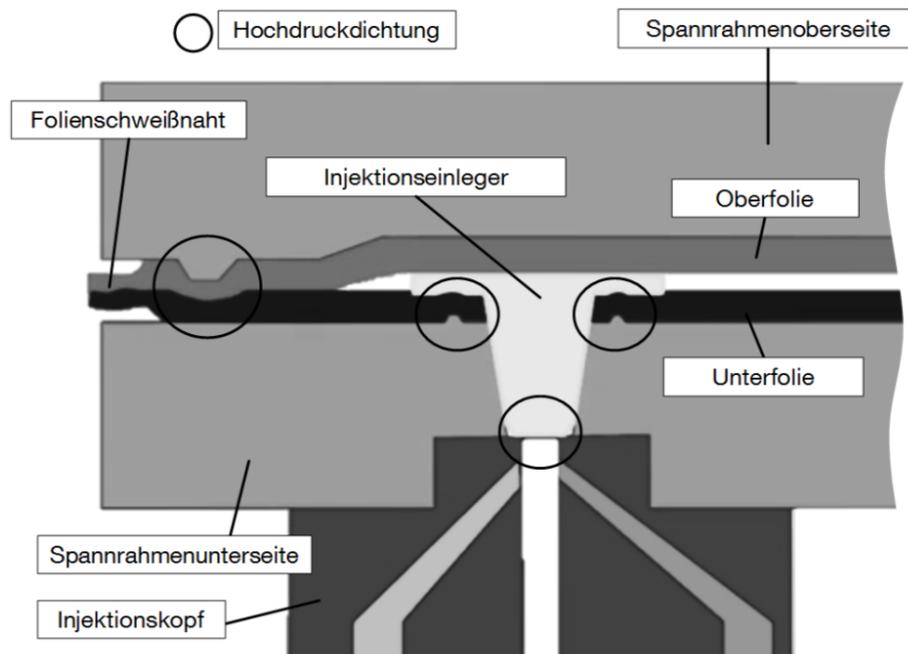


Abb. 66: Querschnitt des Spannrahmens am Injektionskopf: Funktionsprinzip

Folienüberstände als Einwegdichtungswerkstoff

Ausschließlich Dichtflächen, die durch den Schließdruck des Spannrahmens entstehen, werden mit dem Injektionsdruck belastet, was eine Dichtwirkung, beispielsweise der Schweiß- oder Klebnaht, ausschließt.

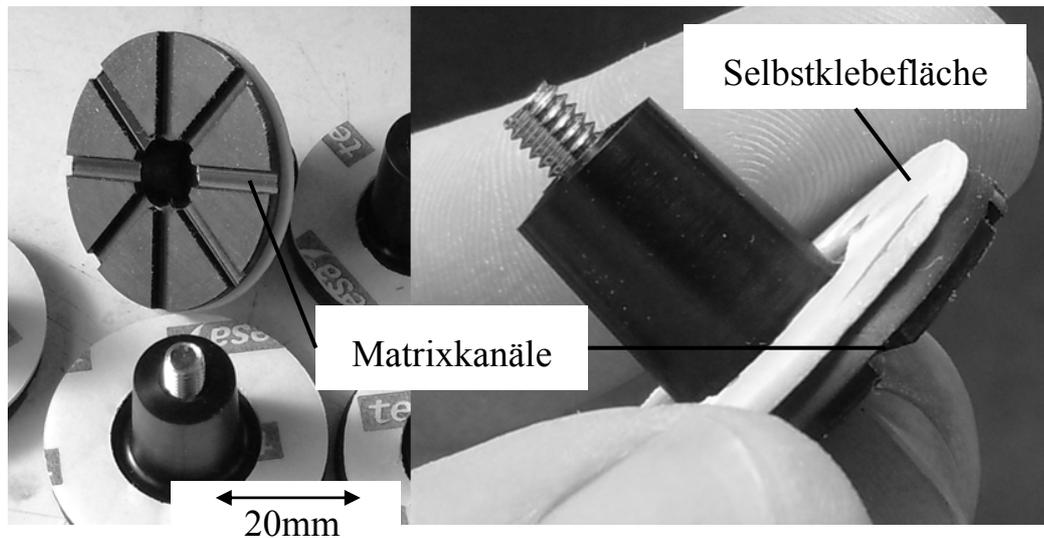


Abb. 67: Injektionseinleger mit Selbstklebefläche und Öffnungsmechanik

Dichtflächen der Hochdruckinjektion entstehen somit umlaufend innerhalb des Schweißnahtbereiches und an den Verbindungsstellen zwischen Folie und Injektionseinleger sowie zwischen Injektionseinleger und Injektionskopf.

Die Spannrahmenoberseite ist über die Verfah-Mechanik mit der Werkzeugoberseite verbunden. Diese beinhaltet die umlaufende Dichtung, um eine ebene Einlegesituation für die Spannrahmenunterseite sicherzustellen.

Die Spannrahmenunterseite ist über die werkzeugfolgende Verfah-Mechanik mit dem Unterwerkzeug verbunden. Die Unterseite trägt die Injektionseinheit und die Innendruckelemente, da die Injektionseinleger zusätzlich zur Positionierung verwendet werden und somit nach unten gerichtet sind.

Unterwerkzeug

Das konvexe Unterwerkzeug enthält jene Oberfläche, deren Abformung keine optischen Anforderungen stellt. Im Schließvorgang des Oberwerkzeuges bewegt sich der folientragende Spannrahmen auf das Unterwerkzeug zu; eine abgeschlossene Kammer zwischen der Unterfolie und dem Unterwerkzeug entsteht. Die darin eingeschlossene Luft wird über Kanäle abgeführt. Deren Durchmesser wird analog zur Werkzeugoberseite ausgelegt. Die Besonderheit der Werkzeugunterseite besteht in einer netzartigen Nutenanordnung, die bedarfsgerecht mit Einlegeprofilen versehen wird, um

Einfluss auf die Ausbildung der Fließfront in der Tränkungsphase des Fasermaterials auszuüben. In der Kombination aus Wandstärkenänderung der Folie durch Umformung und Dickenschwankungen des Fasermaterials entsteht eine komplexe Tränkungssituation lokal veränderlicher Permeabilität im Fasermaterial. Der Tränkungskomplexität wird die schnelle Adaptionfähigkeit des Werkzeuges entgegengesetzt. Die Adaptionfähigkeit umfasst die lokale Anpassung eines Nutensystems zu Fließstopper durch lokale Überpressung des Fasermaterials, zu neutralen Flächen und zu Fließkanälen durch Folienabformung der Nutvertiefung. Einlegeprofile unterscheiden sich in ihrer Größe, füllen die Nut entweder vollständig aus (neutral), oder sind kleiner/ größer als die Nut. Weiterhin kann die Aufsatzhöhe, also der Kavitätsabstand in Schließrichtung, durch Einlegebleche zwischen Spannrahmen und Oberwerkzeug angepasst werden.

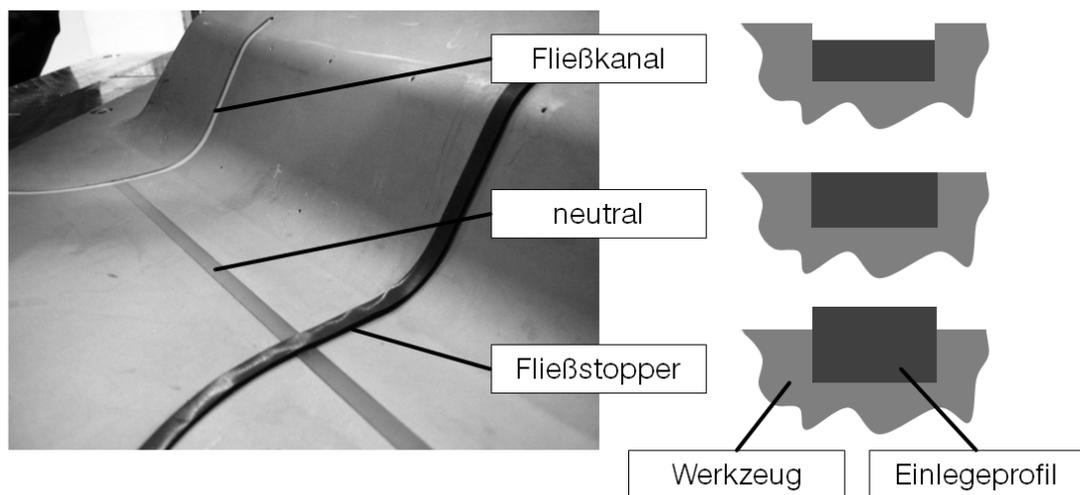


Abb. 68: Einflussnahme auf Füllverhalten durch variable Einlegeprofile in eine netzartige Nutenkonfiguration des Unterwerkzeuges

5.2.3. Heizstrahler

Die Folie wird vor dem Formungsschritt im Spannrahmen erhitzt. Zwei Möglichkeiten zum Wärmetransport werden allgemein unterschieden:

- stoffgebunden durch Wärmeleitung und Konvektion
- stofflich ungebunden durch Strahlung.

Ein Wärmeeintrag über Strahlung stellt dabei eine Möglichkeit zum mechanisch entkoppelten Wärmeeintrag dar. Haben Körper, wie die Heizelemente der Strahler, eine thermodynamisch positive Energie, geben sie

elektromagnetische Strahlung ab [95]. Von Art und Temperatur des Strahlungskörpers ist die spektrale spezifische Ausstrahlung abhängig, wobei mit steigender Temperatur des Strahlungskörpers die Wellenlänge (nach der Planck'schen Schwarzkörperstrahlung) abnimmt. Das Verteilungsmaximum (Anhang Abb. 101) der spezifischen Ausstrahlung [96] wird auf die spektrale Abhängigkeit des Absorptionsvermögens der Thermoplaste (Anhang Abb. 102) abgestimmt. Die Wellenlänge der Strahlungsquelle zur Aufheizung liegt im Absorptionsbereich des aufzuheizenden Materials, also im Spektralbereich minimaler Transmission. Da sich das elektromagnetische Sichtspektrum im kurzwelligeren Bereich als das typische Absorptionsspektrum von Thermoplasten befindet, können auch durchsichtige Thermoplastfolien aufgeheizt werden. Wird die Temperatur des Strahlkörpers reduziert, nimmt die mittlere Wellenlänge zu, die spezifische Ausstrahlung sinkt und somit der absorbierte Wärmeeintrag. In Abhängigkeit der spektralen Absorptionsverteilung kommt es zum materialspezifischen Verhalten.

Die eingesetzten Heizstrahler sind horizontal beweglich und ragen für die Aufheizdauer in das Werkzeug (Abb. 65 rechts unten). Zwei separat voneinander bewegliche Heizstrahlfelder für Ober- und Unterfolie werden eingesetzt. Die Heizfelder bestehen aus einer Aneinanderreihung einzelner, rechteckiger Infrarotstrahler. Unterschiedliche Bauarten von Infrarotstrahlern sind bekannt. Gängige Bauarten umfassen Folien-, Quarzrohr- und Keramikradiatoren [97]. Auslegungskriterien, die zur Wahl auf Folienradiatoren führen, umfassen das schnelle Ansprechverhalten (geringe thermische Trägheit), das geringe Gewicht und Robustheit.

Tab. 13: Technische Angaben verwendeter Heizstrahler KRELUS IR-Strahler G11-12 SM5 [98]

Name	Art	Maße [mm]	Leistung / Strahler [kW]	Spez. Ausstrahlung [kW/m ²]
SM5	Folienstrahler	123x123	0,96	61

Daraus gefertigte Heizfelder der Ober- und Unterseite umfassen jeweils 30 Heizstrahler, die unabhängig voneinander einzeln und stufenlos in ihrer Leistung geregelt werden können. Die Notwendigkeit zur lokal veränderli-

chen Heizfeldleistung ergibt sich aus der Notwendigkeit zur Kompensation von

- Konvektionseffekten im Randbereich des Spannrahmens
- veränderlichen Abständen zwischen Heizfeld und Folie infolge der gewölbten Folie durch Vorblasen
- Unterschieden im Aufheizverhalten in Abhängigkeit der Faserauflage
- Einflussnahme auf die Folienwandstärke im Formungsschritt

Je Heizfeld wird eine Temperatur zentral an der Thermoplastfolie gemessen. Dies erfolgt optisch durch ein Pyrometer (Pyrometer MI320LTH).

5.3. Umformung

In der allgemeinen Betrachtung der Umformung nach Abb. 27 besteht das System aus der Anwendung von Steuergrößen wie Druck und Temperatur, die zur Überführung ebener Fasereinleger in den geformten Zustand eingesetzt werden. Der Einfluss von Störeffekten, wie Faltenwurf und unzureichende Ausformung, soll minimiert werden. Das System der Umformung ist dynamisch. Im Verlauf der Umformung kommt es zur Deformation des Folienmaterials und zur Drapierung des Fasermaterials. Dafür ist Deformationsarbeit (zur Überwindung innerer Reibung im Material und zwischen den Materialien) am Einleger zu leisten. Das System muss Energie, in Form mechanischen Potentials, aufbauen und zielgerichtet in Deformationsarbeit überführen. Dieses Potential wird entweder durch eine Druckdifferenz oder durch die Schließbewegung des Werkzeuges in den Aufbau eingetragen. Die Kombination der Abläufe entscheidet über die Umlagerungsform mechanischen Potentials in Deformationsarbeit innerhalb von Folie und Faser. Die Einflussnahme der Steuergrößen auf die Deformationsarbeit am Einleger wird untersucht.

Werden die Ausgangs- und Endzustände anhand des Werkzeuges betrachtet (Abb. 26), so liegt eine hohe Kombinationsmöglichkeit der Steuergrößen vor, das System ist komplex. Eine erste Einschränkung der Gesamtkomplexität aller möglichen Zustände erfolgt anhand der Prozessformulierung der zeitlichen Bewegungsabläufe zu Diaphragma-, Doppeldiaphragma- und Pressformen. Eine weitere Einschränkung des Lösungsraumes er-

gibt sich durch die Voruntersuchung der Folienaufheizeffekte, die zur Eingrenzung des Temperaturbereiches führt.

Der verbleibende Lösungsraum umfasst 10 quantitative Steuergrößen (Abb. 69):

- eine skalare (Werkzeugtemperatur)
- 7 eindimensionale (zeitabhängige Verläufe aus Temperatur, Druck und Weg) und
- 2 mehrdimensionale (Position und Zuschnitt des Materials)

Die Komplexität des Umformsystems erfordert die Aufgliederung in Teil- und Einzelprobleme, deren Teil- und Einzellösungen anschließend zur Gesamtlösung verknüpft werden.

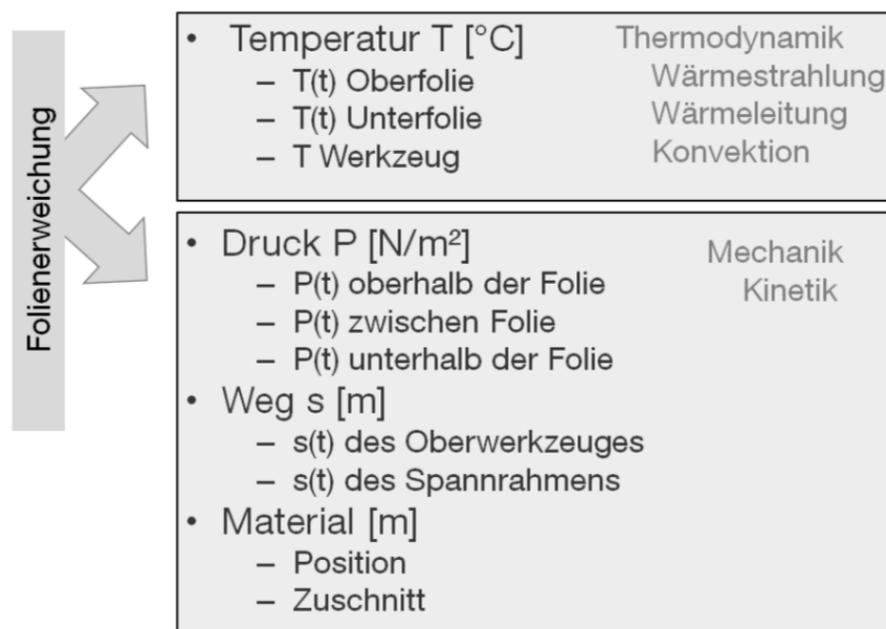


Abb. 69: Steuergrößen des folienbasierten Drapier-Prozesses

Die Steuergrößen können den Teilgebieten der Thermodynamik und Mechanik zugeordnet werden. Eine Aufgliederung der Umformkomplexität entsteht durch Teillösungen für die Einzelbereiche der Thermodynamik und Mechanik. Der thermodynamische Bereich beschreibt die Einflussfaktoren auf Art und Verlauf der Folientemperatur während der Formung. Der thermodynamische Bereich wirkt sich über die Erweichung der Folien auf den mechanischen Bereich aus. Kräfte, die im Zusammenspiel aus Werk-

zeugführung auf Drucksteuerung von der Folie auf das Fasermaterial und dessen Formgebung übertragen werden, sind davon abhängig. Die Aufgliederung wird umgesetzt, indem mechanische Einflussfaktoren wie Druckführung und Werkzeugwege unabhängig von thermischen Einflüssen untersucht werden. Dies ermöglicht die Verwendung einer temperaturunabhängigen, dauerelastischen Folie anstelle der thermoplastischen Folie.

Somit gliedert sich die Untersuchung zur Umformung in die Bereiche zur

- Mechanik: Untersuchung mittels dauerelastischer Folien zur Entkopplung von zeitlichen Temperatureffekten
- Thermodynamik: Untersuchung zum Aufheiz- und Abkühlungsverhalten der Folie

Die daraus gefundenen Teillösungen werden anschließend zur Gesamtlösung der Umformung überlagert.

5.3.1. Teillösung zur Mechanik der Umformung

In der Prozessauslegung werden drei unterschiedliche Abläufe zur Umformung von Folie und Fasermaterial unterschieden, die den Anforderungen der Konzeption gerecht werden.

Anhand eines allgemeinen, voll-faktoriellen Versuchsplans (Tab. 35 Anhang) soll der Wirkzusammenhang aus Umformkinematik, Faserhalbzeug und dem Zuschnitt untersucht werden. Die Gruppe der Untersuchungsfaktoren ist linear unabhängig. Zwei qualitative, Kinematik und Material, sowie ein quantitativer Faktor, der Zusatzrand, werden untersucht. Ziel der Untersuchung ist die Quantifizierung der Effektgrößen auf die Qualität der Umformung im Rahmen der mechanischen Teillösung. Diese erfolgt anhand der Ausformung der Geometrie des Demonstrators. Messgrößen stellen die Ausbildung von Falten und die Größe von Bereichen, die keine vollständige Ausformung erfahren, dar.

Tab. 14: vollfaktorieller $(3 \times 2 \times 4)^2$ -Versuchsplan zu 3 Replikationen (72 Beobachtungen aus 72 Versuchskörpern)

Faktor	Anzahl Stufen	Art	Bezeichnung
Kinematik	3	Qualitativ	Diaphragma(-1); Doppeldiaphragma(0); Pressformung(1)
Material	2	Qualitativ	Aufbau M1; Aufbau M2
Zusatzrand	4	Quantitativ	0mm; 10mm; 20mm; 40mm

5.3.1.1. Aufbau der Faktoren/ Faktorstufen

Kinematik

Der Einflussfaktor der Kinematik stellt einen qualitativen Faktor dar. Er kann drei diskrete, klar unterscheidbare Zustände einnehmen, die durch eine Ablaufreihenfolge der Bewegungen von Folie und Fasermaterial definiert sind (Abb. 28 und Abb. 29). Die Druckdifferenzen (Differenzdruck Oberfolie-Werkzeug, Innendruck-Umgebungsdruck) entsprachen 750mbar, gemessen an der Innendrucksteuerung oder am Werkzeug im Folienkontakt.

Stufe -1: Die Diaphragma-Formung basiert auf einer zweistufigen Umformstrategie, die vom zeitlichen Verlauf des Drucks zwischen den Folien dominiert wird. In einem ersten Schritt wird die Oberfolie weitestgehend unabhängig von Unterfolie und Fasermaterial geformt, anschließend erfolgt die Formung der Unterfolie zeitgleich mit der Faserdrapierung durch angelegte Druckdifferenz zwischen Innendruck und Umgebungsdruck.

Stufe 0: Die Doppel-Diaphragma-Formung bezeichnet einen einstufigen Umformungsvorgang, bei dem der durch das aufsetzende Oberwerkzeug eingetragene Unterdruck sich durch ein geringes Luftpolster zwischen den Folien auf die Unterfolie fortpflanzt. Die Formgebung von Unter- und Oberfolie erfolgt somit mit einem nur geringen zeitlichen Versatz, beide Bewegungen sind zeitlich sowie thermisch gekoppelt.

Stufe 1: Die Press-Formung basiert auf einem in drei Stufen gegliederten Ablauf: 1: Formen der Oberfolie, 2: Legephase des Fasermaterials auf Unterwerkzeug und Teilausformung der Unterfolie, 3: werkzeuggesteuerte Ausformung der Unterfolie und Drapierung enger Radien.

Material/ Zuschnitt

Im allgemein betrachteten Lösungsraum stellt das Material mit dessen Zuschnitt, Aufbau, Gewicht, Orientierung, Nähart und vielen weiteren Parametern einen komplexen mehrdimensionalen Einflussfaktor dar, der nicht umfassend untersucht wird. Daher wird der Materialeinfluss vor der Untersuchung durch Entscheidungen weiter eingegrenzt. Die Eingrenzung umfasst Art und Position des Zuschnittes. Dieser entspricht in seiner Grundform der Abwicklung der Bauteilgeometrie. Sie stammt aus der kinematischen Drapiersimulation. Der Zuschnitt wird für die einzelnen Stufen des Experimentes durch einen konstanten Faktor in seiner Größe skaliert, wodurch ein Zusatzrand entsteht. Dieser Zusatzrand überdeckt mit seinem Anstieg Gebiete auf dem Bauteil, die zur faltenfreien Drapierung eine gesteigerte Ausbildung von Scherwinkeln bedürfen. Damit bildet die quantitative Größe des Zusatzrandes eine Faktorstufe, die das Maß der geometrischen Komplexität widerspiegelt, die durch die jeweilige Parameterkombination im Fasermaterial abbildbar sind. Mit steigendem Zusatzrand steigt die geometrische Abbildungskomplexität im Fasermaterial.

Tab. 15: : Faktor Material

	Material M1	Material M2
Bild gemäß generischem Demonstrator (Abb. 98 des Anhangs)		
Bezeichnung	(C300BX_TF + C300BD_TF)s	(C300BX_FF + C300BD_FF)s
Nähart	Trikot - Franse	Franse-Franse
Flächengewicht	4x 306 g/m ²	4x 306 g/m ²
Aufbau	(0/90/+45/-45)s	(0/90/+45/-45)s
Faser	Tab. 27	Tab. 27

Das Fasermaterial wirkt sich durch seine Kraft-Scherwinkel-Verlaufscharakteristik auf die Drapierbarkeit aus. Es werden zwei Materialsysteme unterschieden, die unterschiedlich vernäht sind. Flächengewicht,

Faser, Lagenaufbau und Orientierung sind gleich. Dieser Einflussfaktor stellt eine qualitative Größe mit zwei Zuständen, Materialsystem M1 und M2, dar.

Zusatzrand

Der durch Geradenzüge vereinfachte Abwicklungszuschnitt wird der kinematischen Drapiersimulation entnommen und ist in Abb. 99 des Anhangs dargestellt. Im quantitativen Faktor des Zusatzrandes wird in der ersten Stufe zu 0mm kein Überstand zur gewählten Kontur drapiert. Mit steigender Stufe, also mit steigendem Zusatzrand, kommt es zu einer Ablage des Fasermaterials in Gebiete erhöhter Scherwinkel (Abb. 64).

Stufe 0mm: Im Falle einer erfolgreichen Drapierung reicht das Fasermaterial geringfügig über den späteren Bauteilbeschnitt hinaus; die über die Folie auf das Fasermaterial übertragenen Kräfte reichen für die Ablage und Orientierung endloser Fasern in die Bauteilgeometrie aus.

Stufen > 0mm: Das Fasermaterial überragt den späteren Bauteilbereich; die auszubildenden Scherwinkel steigen mit dem Zusatzrand.

Die Aufstellung der zu untersuchenden Parameter wird durch die Wahl einer objektiven Beurteilungsgröße zum Versuchsplan vervollständigt. Diese Messgröße soll durch quantitative Darstellung die Umformungssituation widerspiegeln und wird auf die Vollständigkeit der Ausformung und der Schädigung des Fasermaterials bezogen. In der gewählten Definition zur erfolgreichen und vollständigen Umformung liegt diese vor, wenn bei Abschluss des Umformschrittes das Fasermaterial gleichmäßig und flächig auf der Werkzeugoberfläche anliegt und sich keine Faltenbildung ereignet.

Werden von Folie und Fasermaterial überspannte Bereiche ausgebildet und das Werkzeug dennoch vollständig geschlossen, so besteht die Gefahr eines Folienrisses durch die Streckung erkalteter Thermoplaste, der zur Undichtigkeit führt. Bilden sich während der Formung Falten im Fasermaterial und wird das Werkzeug anschließend bei erstarrter Folie geschlossen, so führt die zusätzliche, lokale Faseraufdickung zur punktuellen Folienbelastung und erhöht die Gefahr des Folienrisses. Voruntersuchungen zur Umformung haben gezeigt, dass Faltenwurf beim Diaphragma- und Doppel-diaphragma-Verfahren in der Zwischenposition des Werkzeuges entsteht. Das Verpressen dieser Falten durch Schließen des Werkzeuges führte zu

einer eingerissenen Membran und pulverförmigem Fasermaterial, wodurch die Falte nur indirekt über die Länge der Membranschädigung erfassbar war. In Voruntersuchungen zum Pressverfahren, dessen Formgebung erst mit dem vollständigen Schließen des Werkzeuges abgeschlossen ist, wurde dieser Effekt nicht beobachtet.

Auf dieser Grundüberlegung basiert die Definition der erfolgreichen Umformung im faltenfreien und vollständigen Abformen der Werkzeugtopografie ohne Schädigung der Folie oder des Fasermaterials, die durch zwei Längenmessungen, jeweils unmittelbar nach dem Schritt der Formung, quantifiziert wird. Gemessen werden somit die Länge der sich bildenden Falten und die Breite von Fasermaterial überspannter Werkzeugbereiche. Die Messung bei Diaphragma- und Doppeldiaphragma-Formung findet in der Zwischenposition, die Messung bei Press-Formung nach Öffnen des Werkzeuges statt. Mit der Zwischenposition verbindet sich das Aufsetzen der Werkzeugoberseite auf dem verfahrbaren Spannrahmen. Ein Messen der Faltenlänge nach vollständigem Schließen des Werkzeuges bei Diaphragma- und Doppeldiaphragma-Verfahren kann aufgrund der daraus resultierenden Membranschädigung und einhergehendem Verlust der Messbarkeit nicht erfolgen. Eine Messung der Faltenlänge nach dem Pressverfahren muss ablaufbedingt nach vollständigem Werkzeugschluss erfolgen. Damit ergeben sich die Zeitpunkte der Messung als Folge der qualitativen Faktorstufen durch unterschiedliche Abläufe der Kinematik. In der ersten Längenmessung werden Falten in ihrer Länge gemessen und diese aufaddiert; in der Messung zur Vollständigkeit der Umformung wird die maximale Länge eines nichtausgeformten, durch Fasermaterial überspannten Bereiches in seiner größten Breite gemessen. Zwei Messgrößen der Dimension Länge [m] werden erfasst. Ein jeweiliges Minimum wird angestrebt.

5.3.1.2. Beobachtung

In Abb. 70 sind die Beobachtungen hinsichtlich Faltenbildung und Ausformung der 24 Zustandskombinationen mit je drei Einzelbeobachtungen aufgetragen. Die Darstellung der summierten Faltenlängen (Abb. 70 oben) sowie die Darstellung der Überbrückungsweite (Abb. 70 unten) sind in der blockweisen Aufteilung zu Material, Kinematik und Zusatzrand dargestellt.

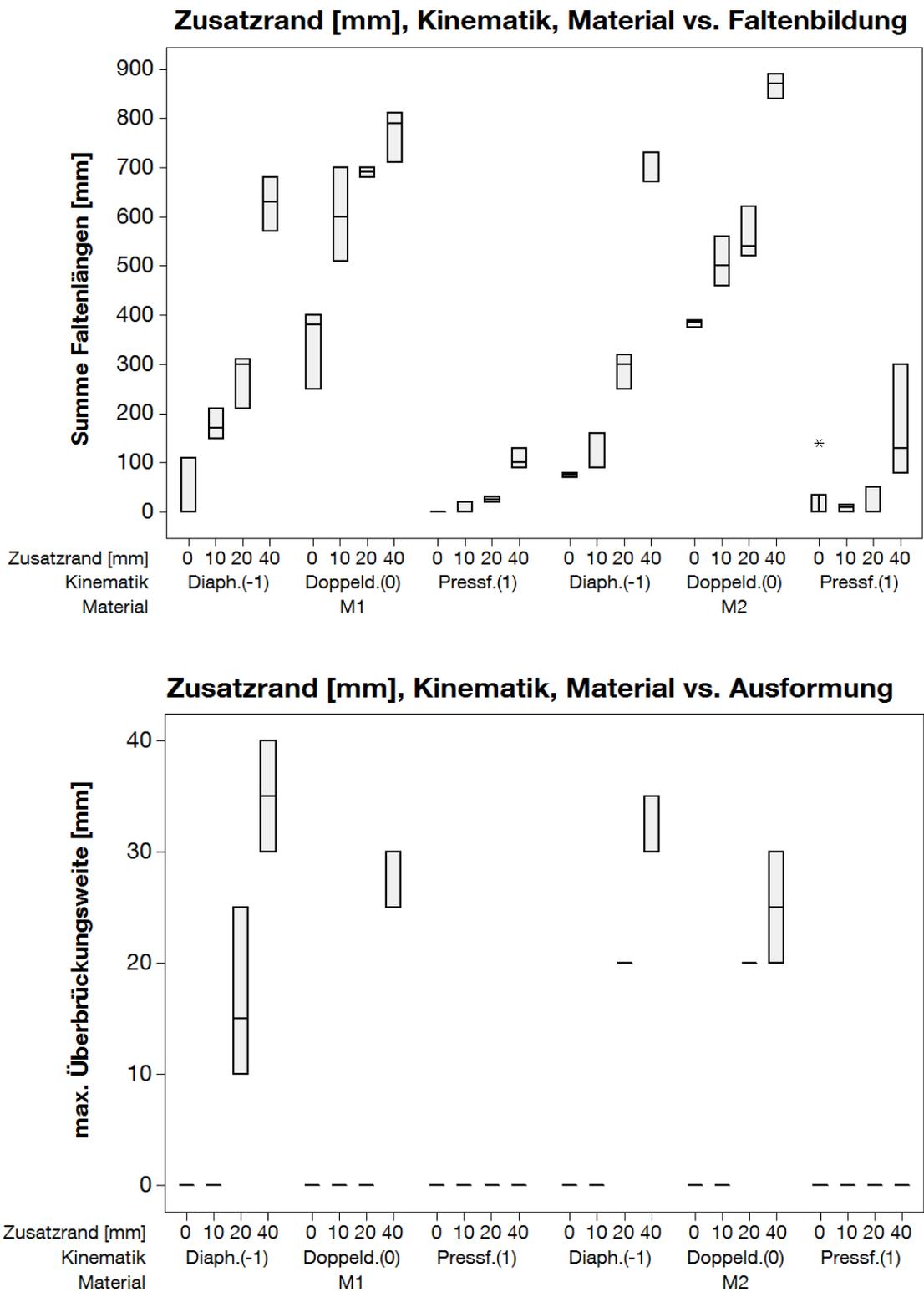


Abb. 70: Summe Faltenlänge (oben), max. Überbrückungsweite (unten) über Umformkinematik über Zuschnittgröße des Fasermaterials vs. Lagenaufbau; n=3

Residuen beschreiben die Abweichung tatsächlich gemessener Werte von jenen aus ihrer Regression stammenden. Eine Aufbereitung der Residuen über deren Verteilung, Wertebereich, Dichtefunktion und Beobachtungsreihenfolge lässt Schlüsse zur Normalverteilung, Konstanz der Streuung, Streubreitenverteilung und zeitlichem Einfluss der Messreihenfolge zu. Diese sind für die erhobenen Größen in Abb. 103 des Anhangs dargestellt. Für die Erhebung der Faltenlänge wird eine Normalverteilung der Beobachtungen (in der Quantil-Quantil-Darstellung) beobachtet; die Verteilung der Residuen ist über den Erhebungsbereich gleichmäßig, ein Einfluss der Beobachtungsreihenfolge wird ausgeschlossen.

Für die Erhebung der maximalen Überbrückungsweite (Abb. 104 Anhang) wird eine Normalverteilung der Beobachtungen ausgeschlossen; die Verteilung der Residuen über den Erhebungsbereich weist ein um Null gehäuftes Muster auf, die Beobachtungsreihenfolge zeigt eine Regelmäßigkeit. Eine mehrdimensionale (multivariate) Normalverteilung liegt vor, wenn eine mehrdimensionale Zufallsvariable (Überbrückungsweite) die Linearkombination von univariat normalverteilten Zufallsvariablen (Kovarianz aus der Faktorgruppe Material – Kinematik - Zusatzrand) darstellt [99].

So liegt beispielsweise keine mehrdimensionale Normalverteilung vor, wenn die einzelnen Zufallsvariablen nur diskrete Zustände aufweisen. In der Folge wird keine gruppierte Faktoranalyse durchgeführt, die Beobachtungen werden einzeln beurteilt. Im Gesamtmittelwert über die Faktorgruppe wurde eine durchschnittliche summierte Faltenlänge von 295mm und eine durchschnittliche Überbrückungsweite an der breitesten Stelle von 7mm beobachtet. Abhängig von der jeweiligen Faktorkombination ergaben sich signifikante Abweichungen von diesem Gesamtdurchschnitt.

Diaphragma-Formung

Die Diaphragma-Formung zeigte im Umformexperiment geringe Faltenbildung bei der drapierten Geometrie für geringe Zusatzränder. Die aufgetretenen Falten erreichten ohne Zusatzrand im Fasermaterial eine summierte Länge von 0-110mm. Das Fasermaterial konnte für diesen Zuschnitt vollständig geformt werden. Mit steigendem Zusatzrand kommt es zu einem Anstieg der Faltenbildung. Die Falten überstiegen dabei den Mittelwert der Messkampagne ab einem Zusatzrand von 20mm, die Ausformung war unvollständig. In Bereichen enger Radien konnte das Fasermaterial nicht voll-

ständig umgeformt werden, der Radius des Fasermaterials war größer als der des Werkzeuges. Werkzeugbereiche, die von Faser und Folie überspannt wurden, bildeten sich aus. Diese Beobachtung trifft auf beide Materialsysteme M1 und M2 zu.

Doppeldiaphragma-Formung

Die Länge sich ausbildender Falten war in diesem Umformmechanismus überdurchschnittlich hoch. Bereits im Faserzuschnitt ohne Zusatzrand ergab sich eine summierte Faltenlänge von 380mm (Mittelwert M1) bis 390mm (Mittelwert M2). Die Art der ausgebildeten Falten unterschied sich von jenen der Diaphragma-Formung. Während die Faltenbildung der Diaphragma-Formung in der Folie oder unter Einbindung der ersten Faserlage stattfand, kam es bei der Diaphragma-Formung vereinzelt zur Faltung des gesamten Aufbaus aus Folie und Faserstapel. Ober- und Unterfolie bildeten mit dem Fasermaterial eine gefaltete Einheit. Ein weiterer Anstieg der Faltenlänge mit dem Zusatzrand wurde beobachtet. Der Mechanismus zeigte eine vollständige Ausformung der Bauteilgeometrie bis zu einem Zusatzrand von einschließlich 10mm (M1) und eine vollständige Ausformung bis einschließlich 20mm Zusatzrand für das Materialsystem M2. Bei einer weiteren Steigerung des Zusatzrandes kam es zum abrupten Anstieg der vom Fasermaterial überbrückten Breite.

Press-Formung

Diese Umformstrategie bildete im Experiment über alle Faktorstufen hinweg eine geringe Faltenlänge aus. Die beobachteten Falten zeigten sich auf der Unterfolie mit vereinzelt dem Einschluss der untersten Faserlage; die meisten Umformungen wurden als faltenfrei eingestuft. Für beide Materialsysteme blieb die Faltenlänge bis zu einem Zusatzrand von 20mm unterhalb einer Gesamtlänge von 50mm. Die Größenordnung der Faltenlänge ist bei beiden Materialaufbauten vergleichbar. Bei einem Zusatzrand von 40mm kam es zu einem Anstieg der Faltenlänge von bis dahin maximal 50mm Gesamtlänge auf bis zu 130mm für das Material M1 und bis zu 300mm für das Material M2. Die Ausformung bei der Anwendung dieser Kinematik nahm für alle durchgeführten Experimente den konstanten Wert von 0mm ein, alle Fasermaterialien liegen vollständig und flächig an der Werkzeuggeometrie an.

5.3.1.3. Diskussion

Die Haupteffekte der untersuchten Faktoren auf die Ausbildung von Falten sind im Diagramm nach Abb. 71 dargestellt, die Wechselwirkungen in Abb. 72. In den Haupteffektdiagrammen zeigt sich:

- ein monotoner Anstieg der Faltenlänge mit steigendem Zusatzrand für alle Umformkinematiken
- die geringste summierte Faltenlänge bei der Anwendung der Press-, die höchste bei der Doppel-Diaphragma-Formung
- ein geringer Einfluss des Fasermaterials auf die Ausbildung von Falten.

In den Wechselwirkungsdiagrammen wird in den einzelnen Interaktionen beobachtet:

- Eine mit steigendem Zusatzrand von der Kinematik abhängende Steigerung der Faltenlänge wird ausgebildet. Die Press-Formung zeigt bis zu einem Zusatzrand von einschließlich 20mm keine Interaktion. Erst ab einem Zusatzrand von 40mm kommt es zum Anstieg. Dieser weist im Schritt von 20mm auf 40mm im Verhältnis zu den anderen Umformungsarten den geringsten Faltenzuwachs auf. Die Diaphragma-Formung zeigt ein monoton-progressives Faltenwachstum mit dem Zusatzrand. Die Differenz zwischen dem geringen Faltenwurf bei Press-Formung und der Doppel-Diaphragma-Formung wird mit steigendem Zusatzrand geschlossen. Die Doppel-Diaphragma-Formung zeigt über den gesamten Untersuchungsbereich die längste Faltenausbildung, das Wachstum ist monoton.
- Eine Interaktion zwischen Faserzuschnitt und dem verwendeten Materialaufbau, die bis zu einem Zusatzrand von einschließlich 20mm gering ist, wird festgestellt. Im größten Faserzuschnitt mit einem Zusatzrand von 40mm zeigt sich ein geringer Einfluss des Fasermaterials, wobei das Material M1 einen geringeren Faltenwurf zeigt.
- Keine signifikante Interaktion zwischen der Umformkinematik und dem verwendeten Fasermaterial wird beobachtet.

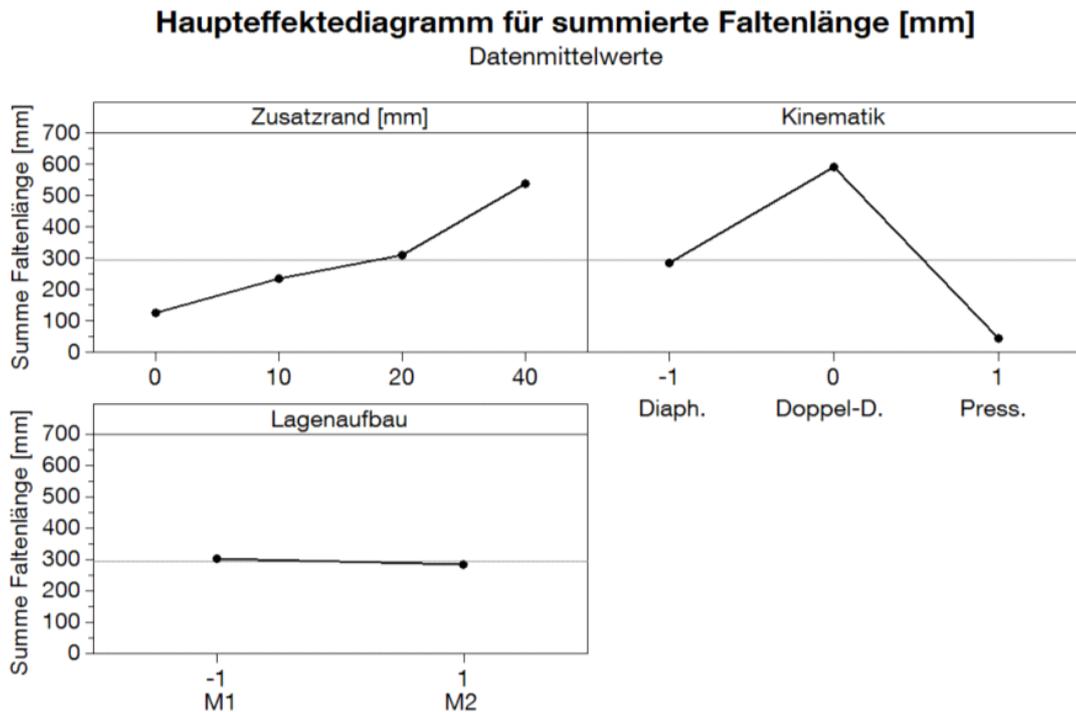


Abb. 71: Haupteffektdiagramm: summierte Faltenlänge [mm]

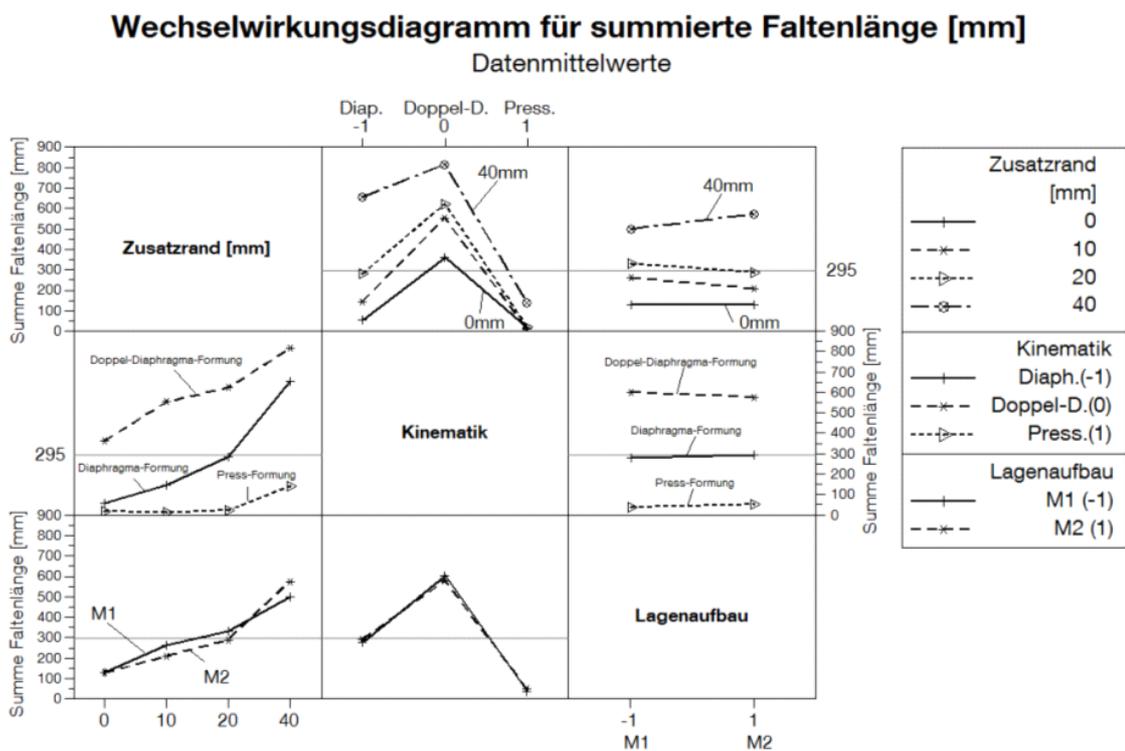


Abb. 72: Wechselwirkungsdiagramm: summierte Faltenlänge [mm]

5.3.1.4. Schlussfolgerung zur Umformung

Es gibt zwei kinematische Abläufe, mit denen die geforderte Umformung des Faseraufbaus in die gewählte Geometrie des Bauteils durchgeführt werden kann. Diese sind die Diaphragma- und die Press-Formung.

Die Doppel-Diaphragma-Formung zeigt zwar Potentiale zur Ausformung enger Radien auf, jedoch zu Lasten der Faltenbildung des gesamten Aufbaus aus Folien und Faserstapel. Während der Umformung muss die Druckdifferenz zwischen Oberwerkzeug und Oberfolie durch ein Abfall des Innendruckes auf die Unterfolie übertragen werden. Es kommt zu einem flächigen und zeitgleichen Kontakt beider Folien mit dem Fasermaterial. Das Fasermaterial erfährt dabei Normalkräfte, die es kompaktieren. In diesen Bereichen weist der umzuformende Aufbau aus Folie und Fasermaterial eine erhöhte Eigensteifigkeit auf, die Scherwinkelausbildung ist gehemmt. Die zur Faserscherung notwendige Umformenergie kann nicht durch die Folie hindurch in das Fasermaterial eingetragen werden. Das durch die Druckdifferenz zwischen Werkzeug und Folie eingetragene energetische Potential baut sich anteilig in der Deformation des Aufbaus aus Folie und Fasermaterial zur Falte ab. Aus diesem Grund findet die größte Gleitbewegung nicht innerhalb des Aufbaus, sondern zwischen Oberwerkzeug und gefaltetem Aufbau statt, der in diesem Zustand einen geringen Umformwiderstand aufweist. In dieser Kaskade aus Aufbau mechanischen Potentials, Fortpflanzung der Druckdifferenz auf die Unterfolie, Kompaktierung des Fasermaterials, Erhöhung der Eigensteifigkeit, Potentialabbau in Faltenbildung und Absinken des Umformwiderstandes bildet sich eine gefaltete Ausformung des Aufbaus aus. Daher wird die Doppel-Diaphragma-Formung nicht weiter betrachtet.

Die Diaphragma-Formung eignet sich als Umformkinematik für den Faserzusschnitt ohne Zusatzrand. Nach der Umformung der Oberfolie wird durch das Absenken des Innendruckes mechanisches Potential aufgebaut. Es kommt zur Deformation der Unterfolie. Dabei werden Normalkräften an Randbereichen des Fasermaterials eingetragen, die zur Ausbildung von Reibungskräften führen und das Fasermaterial unter Zugspannung halten. In Bereichen, die noch umzuformen sind, wirkt keine zusätzliche Normalkraft. Mit fortschreitender Umformung vergrößern sich Bereiche mit anliegender Faser, die Reibungskräfte in Richtung der Faserebene steigen mit

der Fläche über die dadurch einwirkende steigende Normalkraft. In Abhängigkeit des Zusatzrandes wird das Kräftegleichgewicht aus Reibungskräften des Fasermaterials und Umformkräften der Druckdifferenz zu einem Zeitpunkt erreicht, in dem die Umformung vollständig oder nur teilweise vollzogen ist. Am untersuchten Experiment findet dieser Wechsel zwischen 10mm und 20mm Zusatzrand statt (Abb. 70). Das vom System zur Umformung bereitgestellte mechanische Potential wird bei allen Experimenten anteilig von Falten behaftete Deformationsarbeit umgewandelt.

Die Press-Formung weist über einen breiten Variationsbereich des Faserzchnittes und des Fasermaterials eine faltenfreie Umformung auf. Die Ausformung ist vollständig. Die Menge der zwischen den Folien eingeschlossenen Luft wirkt sich auf die Breite von Folie in engen Radien überspannten Bereichen aus. Mit der letzten Schließbewegung werden die noch überspannten Bereiche durch die eindringende Werkzeuggeometrie umgeformt. Es kommt zu einer kombinierten Drapierung des Fasermaterials gemäß einer Teilausformung, wie sie ebenfalls durch die Diaphragma-Formung stattfindet, jedoch mit einem Anstieg der zur Deformation verfügbaren Umformkräfte in der Größenordnung der Schließkräfte der verwendeten Anlage. In der Aufteilung des Energieeintrages, kontrolliert über die Schließposition des Werkzeuges, kann die Deformationsenergie zur Faserscherung durch das Folienmaterial für die untersuchte Geometrie bis zu einem Zusatzrand von 20mm vollständig übertragen werden.

Die Umformkinematik nach der Press-Formung findet für die untersuchte Geometrie mit einem Zusatzrand von 20mm Anwendung. Sie zeichnet sich durch eine vollständige und faltenfreie Ablage des Fasermaterials in die Werkzeugtopografie aus, der Toleranzbereich im Faserzchnitt ist breit.

5.3.2. Teillösung Thermodynamik der Umformung

Die mechanische Teillösung basiert auf der Verwendung eines dauerelastischen Folienmaterials, um mechanische von thermischen Effekten trennen zu können. Diese sind über die Folienerweichung mit steigender Temperatur verknüpft (Abb. 69). In der Prozessauslegung (Abb. 29) steigt die Folientemperatur mit einer Aufheizrate auf eine Maximaltemperatur; von dort kühlt sie im Zeitraum der Werkzeugbewegung und Folienformung ab. Durch Voruntersuchungen zum Aufheizverhalten der Folie wird der Tem-

peraturbereich zur Formung eingeschränkt (156°C - 190°C). Ebenfalls ist durch die Voruntersuchungen bekannt, dass sich die Kombination aus allseitiger Festeinspannung und Ausdehnung durch Aufheizen auf die Wellung der Folie auswirkt. Aus diesem Grund wird eine mechanische Vorlast in Form eines geringen Über- oder Unterdrucks, bezogen auf den Umgebungsdruck, aufgebracht, der der sich ausbildenden Welligkeit eine kontrollierbare Vorzugsrichtung aufprägt. Wird Folie im gewölbten Zustand von einem ebenen Strahlerfeld über die Fläche konstanter spezifischer Ausstrahlung erhitzt, resultiert in Bereichen reduzierten Abstandes eine Temperaturerhöhung. Weitere Faktoren, die auf die Anpassung der lokalen Heizfeldleistung führen, umfassen den Wärmeeintrag der Folie auf die Faser, die Konvektion in Randbereichen sowie die Ausdünnung in Bereichen großer Streckung. Daraus folgt die lokale Anpassung der Heizfeldleistung in einem iterativen, experimentellen Vorgehen.

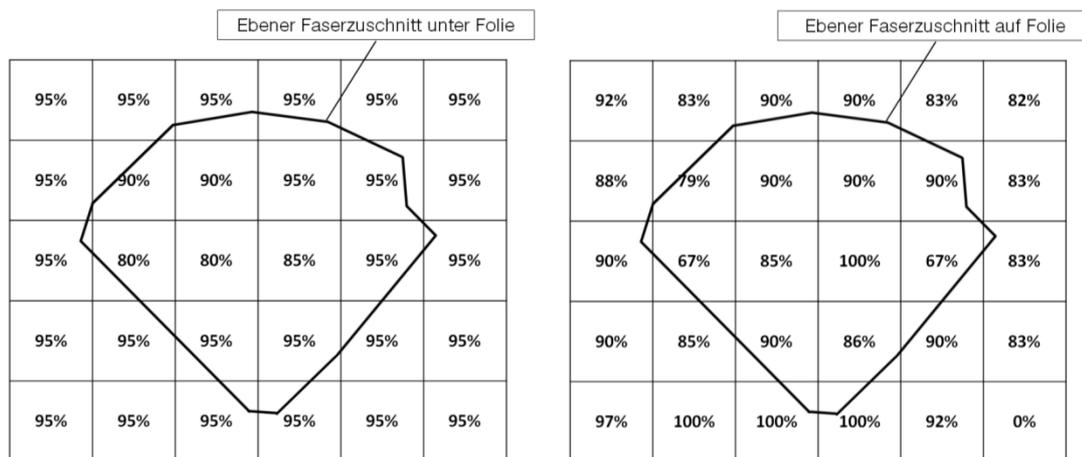


Abb. 73: lokale Verteilung spezifischer Ausstrahlung für oberes (links) und unteres (rechts) Heizfeld, 100% entspricht $0,61\text{kW/m}^2$

5.3.2.1. Versuchsaufbau

Die Heizfelder sind parallel zur Spannrahmenebene im Abstand von 200mm angeordnet. Untersucht wird das Aufheiz- und Abkühlverhalten von Folien der Stärke 0,5mm und 0,4mm. Die Messung erfolgt anhand eines zentral angebrachten, durch die Heizebene messenden Pyrometers (MI320LTH). Die Messung erfolgt ab einer Temperatur von 80°C . Fasermaterial im Zuschnitt gemäß Abb. 99 mit einem Zusatzrand von 20mm befindet sich zwischen den Folien. Bei der Messung des Aufheizverhaltens

der Unterfolie liegt das Oberwerkzeug auf der Spannrahmenebene auf, die Oberfolie ist umgeformt. Das Oberwerkzeug ist temperiert, seine Oberflächentemperatur beträgt $77\pm 2^\circ\text{C}$. Die Zeit vom Abschalten/ Entfernen des oberen Heizfeldes bis zum Aufsetzen des Oberwerkzeuges beträgt $5,8\pm 0,6\text{s}$. Die Zeit vom Abschalten/ Entfernen des unteren Heizfeldes bis zum geschlossenen Werkzeug beträgt $8,1\pm 0,9\text{s}$. Die Messungen zum Abkühlverhalten der Oberfolie finden ohne Werkzeugbewegung statt. Der Einfluss der Wärmestrahlung einer sich nähernden Werkzeugoberfläche wird vernachlässigt. Die Messungen zum Abkühlverhalten der Unterfolie werden mit aufliegendem Oberwerkzeug durchgeführt.

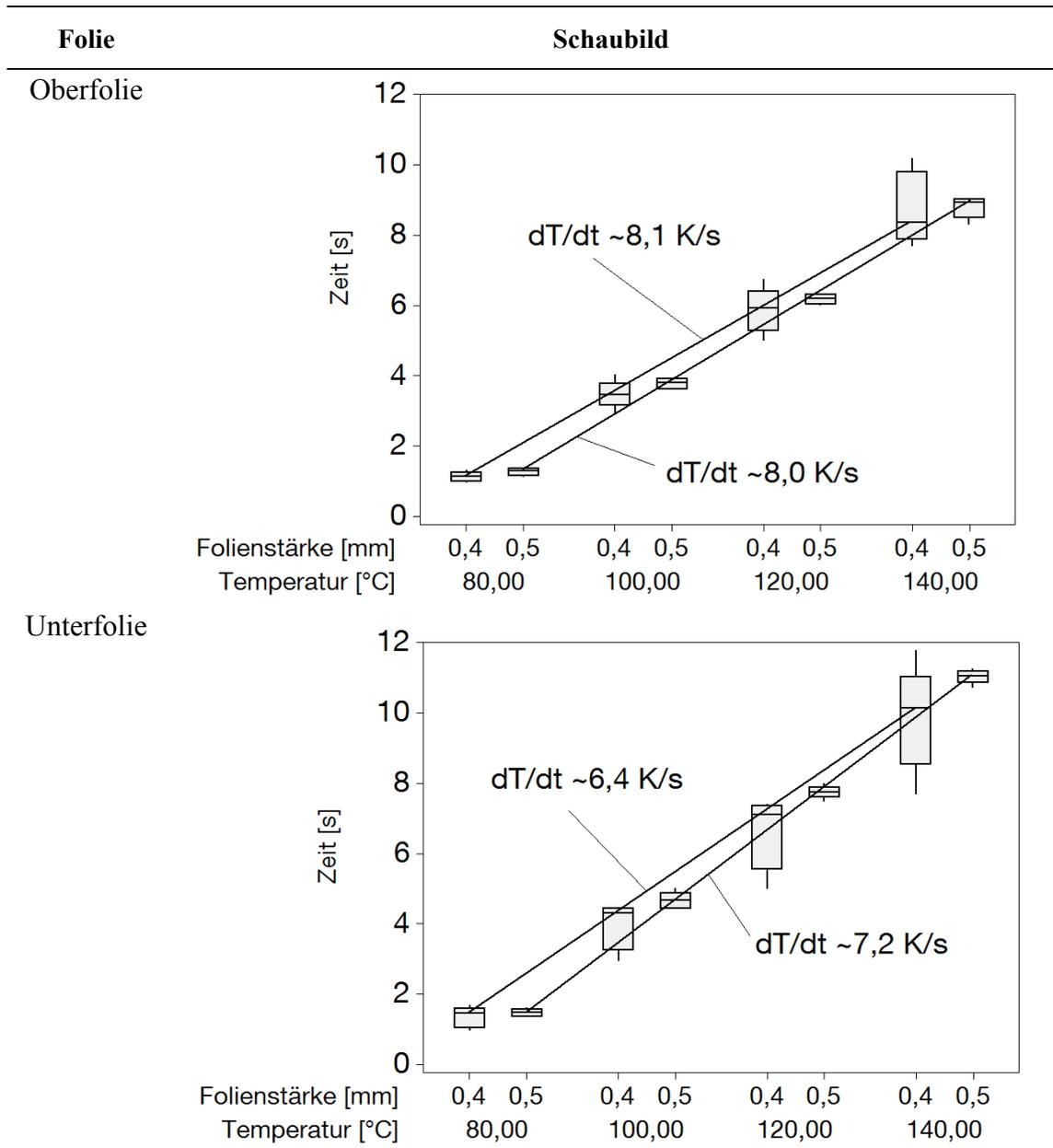
5.3.2.2. Beobachtung

In der Aufheizphase der Oberfolie lag diese gewölbt vorgespannt auf einer Luftschicht auf. Bei der Aufheizung der Oberfolie in diesem Zustand kam es in einer ersten Phase trotz Vorspannung zur Wellung. Folie mit einer Wandstärke von 0,4mm zeigte dabei eine stärkere Wellung. Mit zunehmender Temperatur zeigte die Folie ($>$ Erweichungspunkt) eine Materialbewegung zur Reduktion von Wölbung und Welligkeit. In diesem Temperaturbereich ist die Folie über die Spannrahmenfläche hinweg eben und glatt. Mit fortschreitender Aufheizung über diesen Zustand hinaus bildeten sich an Stellen gesteigerter spezifischer Ausstrahlung der Heizelemente Folienbereiche lokaler Erhebungen aus. Wird die spezifische Ausstrahlung nicht angepasst und damit reduziert, vergrößern sich die Erhebungen bis sie entweder in Kontakt mit der Heizstrahlerebene treffen oder Löcher bilden.

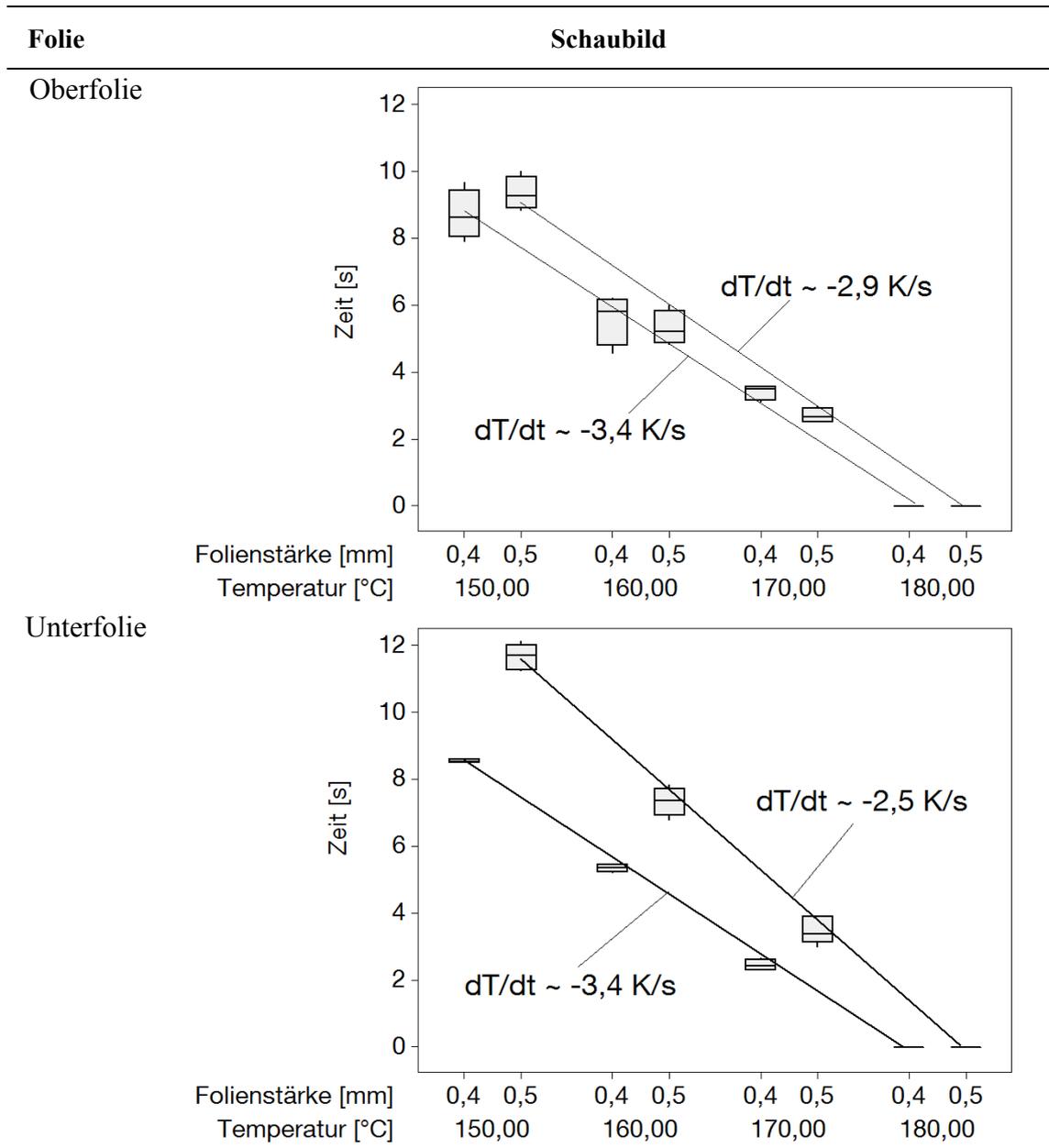
5.3.2.3. Ergebnisse

Die Ergebnisse umfassen den Temperaturanstieg für die gefundene Verteilung der spezifischen Ausstrahlung für zwei Folienstärken (0,5mm und 0,4mm; Tab. 16) sowie der Temperaturverlauf während der Abkühlung. Im untersuchten Temperaturbereich ergibt sich für die Aufheiz- und Abkühlphase ein Zusammenhang, der durch eine lineare Regression angenähert wird. Geringe Abweichungen im Aufheizgradienten von Ober- und Unterfolie in Abhängigkeit der Folienstärke werden beobachtet. Aufgrund der geringen Wandstärkenunterschiede von 0,1mm sind sie gering, die sich ergebenden Differenzen nicht signifikant.

Tab. 16: Aufheizverhalten von Ober- und Unterfolie der Wandstärken 0,4mm und 0,5mm; n=5



Tab. 17: : Abkühlverhalten von Ober- und Unterfolie der Wandstärken 0,4mm und 0,5mm; n=3



Ein signifikanter Unterschied in den Aufheizgradienten wird zwischen dem der Ober- und dem der Unterfolie beobachtet. Die Temperaturverteilung am Heizfeld der Unterfolie ist das Ergebnis eines iterativen und experimentellen Anpassungsprozesses zur Kompensation von Wölbung, aufliegendem Fasermaterial, Ausdünnung der Folie und Konvektionseffekten am Randbereich. Der gemessene signifikante Unterschied im Aufheizgradienten zwischen Ober- und Unterfolie ist somit die Systemantwort aus der Komplexität der Umformsituation, des Materialverhaltens und der räumlichen Anordnung von Faser, Folie und Werkzeug zueinander.

Die Standardabweichung der Darstellungen in Tab. 16 weisen in der Aufheizphase für die Folie mit 0,4mm Stärke eine höhere Schwankungsbreite auf. Die exakte Temperierung dieser Folie über die Zeit ist aufgrund ihrer sich stärker ausbildenden Welligkeit in der Aufheizphase erschwert. Ein geringer Einfluss der Folienwandstärke auf das Abkühlverhalten der Oberfolie wird beobachtet. Der Betrag des Abkühlungsgradienten ist geringer als der der Aufheizung. Zwar zeigen die Mittelwerte ein schnelleres Abkühlen der dünneren Folie, jedoch sind die Unterschiede nicht signifikant.

Einen größeren Einfluss der Folienwandstärke auf das Abkühlverhalten wird an der Unterfolie beobachtet. Hier zeigt sich, dass ein Wandstärkenunterschied der Folie von 0,5mm auf 0,4mm zu einer um durchschnittlich 0,9K/s schnelleren Abkühlung im untersuchten Temperaturbereich führt. Trotz aufliegendem Fasermaterial auf der Unterfolie kühlen Ober- und Unterfolie mit Abkühlgradienten gleicher Größenordnung ab.

5.3.3. Überlagerung der Teillösungen

Da die lokale Verteilung der spezifischen Ausstrahlung in einem iterativen Prozess gefunden wurde, ist die Information der Zusammenführung bereits in der Messkampagne zur thermodynamischen Teillösung enthalten. Die dort erhobenen Werte stützen sich auf die Grundlage einer damit erfolgreich durchführbaren Umformung. Somit besteht das Vorgehen zur Umformung darin, den Ablauf der Materialbewegungen (Diaphragma-, Doppel-Diaphragma- und Press-Formung) anhand einer dauerelastischen

Ersatzfolie zu definieren und diese anschließend durch eine thermoplastische Folie zu ersetzen, deren lokale Temperaturverteilung an die Erfordernisse hinsichtlich Konvektion, Faserzuschnitt, Folienausdünnung und Folienschädigung angepasst ist.

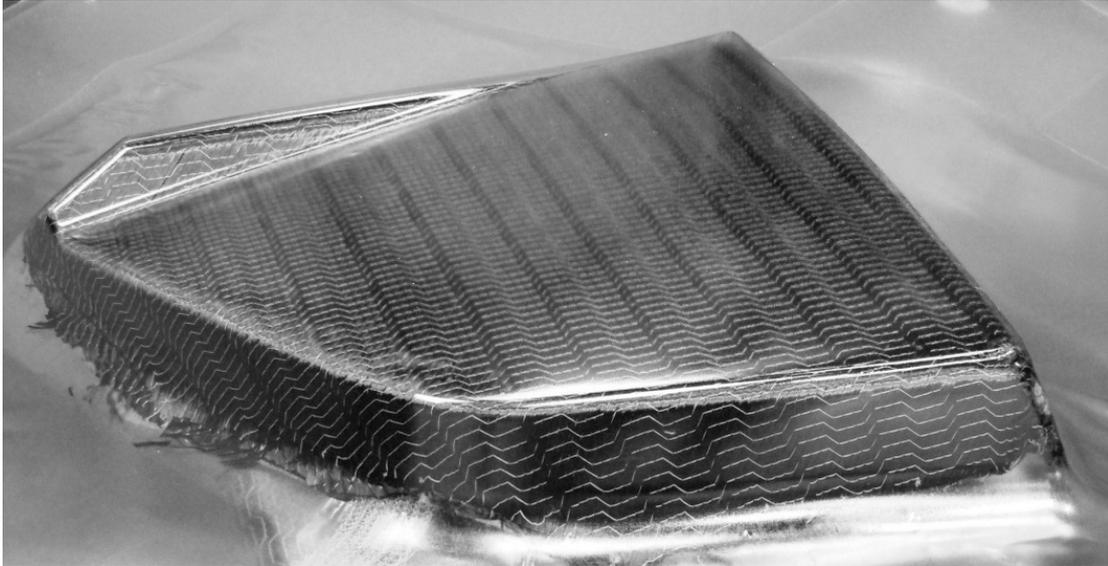


Abb. 74: Umgeformter Faser-Folien-Verbund als Ergebnis der Überlagerung der mechanischen und thermodynamischen Teillösungen

Abb. 74 zeigt das Ergebnis der Überlagerung beider Teilergebnisse anhand des Zuschnittes nach Abb. 99 mit einem Zusatzrand von 20mm und einer 0,5mm starken transparenten Folie. Das Ergebnis ist die Kombination der Steuergrößen (Abb. 69) in der Form einer vollständigen und faltenfreien Drapierung der Press-Formung (Abb. 70) mit der Aufheizung gemäß Abb. 73 und der Abkühlungskompensation während der Verfahrenwege nach Tab. 17.

5.4. Einflüsse auf die Bauteiloberfläche

Wird Folie an der Grenzfläche der Reaktionsmasse zum Werkzeug flächig eingesetzt und bindet an das Verbundmaterial dauerhaft an, so kann diese zur Oberflächenveredelung genutzt werden. Im Rahmen einer Versuchsreihe werden Einflüsse auf die Oberfolie für den Einsatz als optisch zu verbessernde Schicht untersucht. Zu den untersuchten Einflüssen gehören Werkzeugoberfläche, Werkzeugtemperatur und Katalysatorkonzentration. Die Katalysatorkonzentration wird untersucht, da sie Einfluss auf die Geschwindigkeit der Vernetzung der Matrix nimmt und damit zu einer dyna-

mischen Freisetzung von Reaktionsenthalpie beiträgt. Dies beschleunigt wünschenswerterweise die Verarbeitung, darf jedoch durch eine schnelle Wärmefreisetzung zu keiner negativen Wirkung auf die Oberfläche führen. Gemessenen wird die Auswirkung dieser Steuergrößen auf die Ausbildung der Faserabzeichnung.

5.4.1. Versuchsaufbau / Faktoren / Faktorstufen

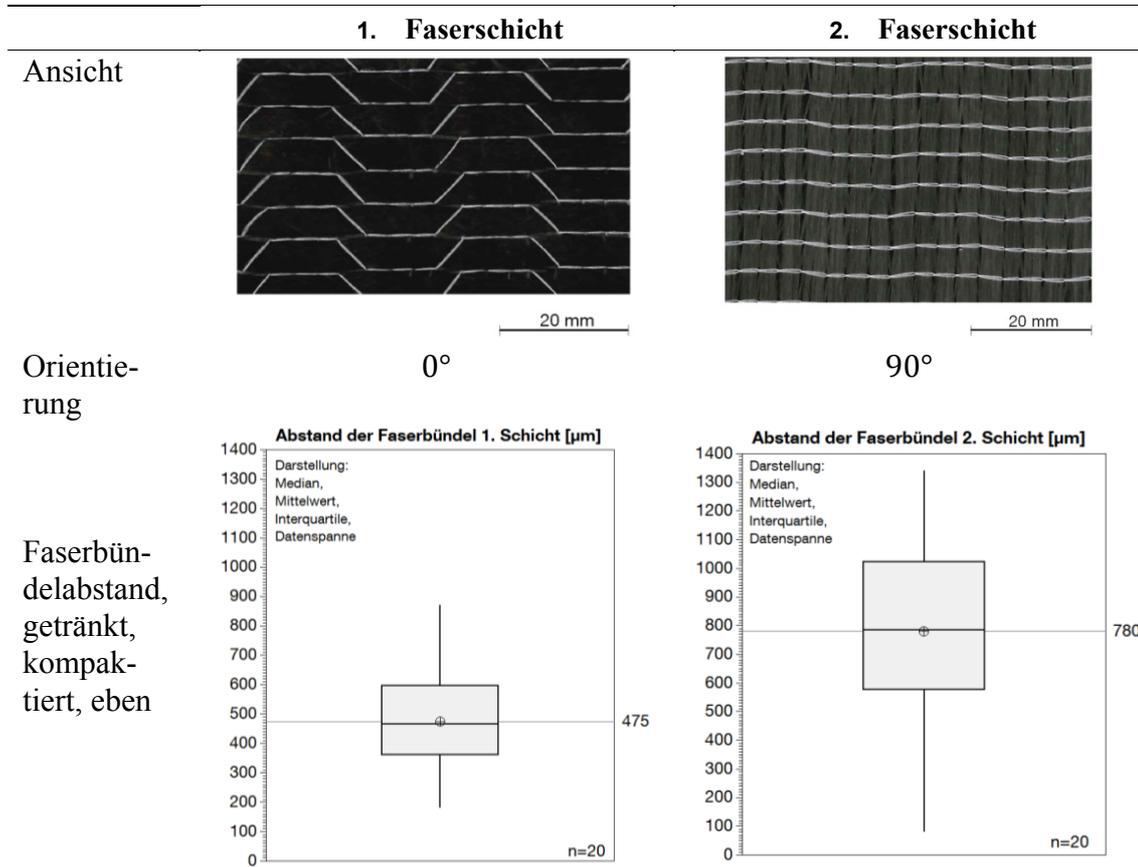
Aufbau und Probenfertigung

Die Auswahl des Materialaufbaus entstammt der Untersuchung zur Umformbarkeit und wird nicht verändert. Untersucht wurde der Faseraufbau M1 gemäß Tab. 18, dessen erste beide Faserlagen aus der C300BX_TF bestehen. Die durch die Einstichstellen des Nähfadens verursachten Abstände der Faserbündel zueinander unterscheiden sich je nach Lagentiefe. Diese Abstände wurden anhand einer ebenen und getränkten Faserlage im Auflichtmikroskop (Olympus BX41, 5fach vergrößert) vermessen. Um den Schereinfluss auf die Abstände zwischen den Faserbündeln zu vermeiden, erfolgte eine Auswertung anhand ebener Proben aus der Versuchsgeometrie nach Abb. 98. Die Stichprobe ist normalverteilt, ein signifikanter Abstandsunterschied zwischen der ersten und zweiten Faserlage wird festgestellt. Die Reinharzbreite der ersten obersten Faserschicht beträgt $475 \pm 186 \mu\text{m}$, die der zweiten darunterliegenden Schicht $780 \pm 325 \mu\text{m}$. Vor der Formung der Folien werden diese bei 80°C für 30min getrocknet und mit Isopropanol gereinigt. Die Werkzeugtemperatur während der Aushärtung war isotherm und betrug an der Oberfläche für das Oberwerkzeug $77 \pm 2^\circ\text{C}$ und für das Unterwerkzeug $75 \pm 3^\circ\text{C}$. Die Injektionsparameter sind für alle Versuche konstant, werden im Vorgehen nach Abb. 39/ Abb. 75 und einem Glasvliesanteil von 10% nach [100] ausgelegt und führen zur Füllung der Probenkörper.

Nach der Umformung und Injektion werden alle Probenkörper einer Nachvernetzung unterzogen. Der von den Proben durchlaufene Zyklus beträgt: 4h bei 60°C , anschließend mit einer Temperaturrampe von 4K/h auf 110°C , 2h bei 110°C und anschließend mit einer Temperaturrampe von -4K/h auf 50°C . Die Wandstärke der Folie auf der untersuchten Oberseite beträgt $250,2 \pm 39,8 \mu\text{m}$ (Anhang Abb. 106). Die Folienoberfläche weist an der Oberfläche weder Rückstände der Injektion noch Schädigungen durch die

Umformung auf. Die Proben werden nach der Nachvernetzung aus den Probenkörpern sägend herausgeschnitten und mit Isopropanol gereinigt. Weitere Behandlungen der Oberfläche finden nicht statt.

Tab. 19: C300BX_TF: Aufbau oberster Gelege-Lage (biaxial)



Werkzeugoberfläche

Untersucht wurde der Einfluss der Werkzeugoberfläche auf die sich ausbildende Oberflächenstruktur. Die Stufen des Faktors zur Werkzeugoberfläche orientieren sich an gängig eingesetzten Oberflächenveredelungsverarbeitungen des Werkzeugbaus; sie nehmen die drei Stufen „rau“ (Ra=10µm), „matt“ (Ra=5µm) und „poliert“ (Ra<0,2µm) ein. Alle drei Stufen werden als separate Fläche in einem Werkzeug zusammengebracht (Abb. 76).

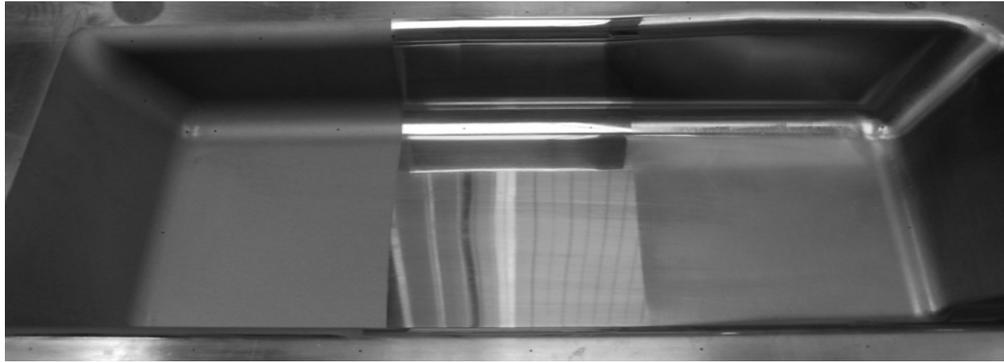


Abb. 76: Faktorstufen der Werkzeugoberfläche v.L.n.R.: rau ($R_a=10\mu\text{m}$), poliert ($R_a<0,2\mu\text{m}$), matt ($R_a=5\mu\text{m}$)

Werkzeugtemperatur

Mit steigender Werkzeugtemperatur wird die Temperaturdifferenz erhöht, die bei der Bauteilentnahme im Abkühlungsschritt auf das Bauteil einwirkt. In numerischen Voruntersuchungen zeigt die Abkühlung Einfluss auf das Spannungsniveau im Schichtverlauf des Aufbaus (Abb. 77 & Abb. 78), infolgedessen unterschiedliche Höhendifferenzen (Abb. 79 & Abb. 80) an der Oberfläche errechnet werden. Zwei Faktorstufen zur Werkzeugtemperatur (75°C und 90°C Abb. 41) werden untersucht.

Reaktionsgeschwindigkeit

Im Rahmen der Untersuchung kommt ein duroplastisches Matrixsystem auf Basis von Polyurethan zum Einsatz, dessen chemischer Vernetzungsvorgang durch die Zugabe einer Katalysatormenge beeinflusst werden kann. Der Einfluss der Katalysatormenge auf die ausgetragene Reaktionsenthalpie ist aus Voruntersuchungen bekannt und führt bis zu einer Konzentration von $0,7\text{m}\%$ (bezogen auf die Polyolmenge) zu einer generellen Beschleunigung der Reaktion. Der Einfluss einer Reaktionsbeschleunigung bei isothermer Werkzeugführung wird anhand von zwei Faktorstufen zu $0,5\%$ und $0,7\%$ untersucht.

Tab. 20: allgemeiner, voll-faktorieller ($3 \times 2 \times 2$)-Versuchsplan

Faktor	Anzahl Stufen	Art	Bezeichnung
Ra Werkzeugoberfl.	3	Quantitativ	$0,2\mu\text{m}$; $5\mu\text{m}$; $10\mu\text{m}$
Werkzeugtemperatur	2	Quantitativ	70°C ; 90°C
Katalysatorgehalt	2	Quantitativ	$0,5\%$; $0,7\%$

Messgröße

Zielgröße ist die sich an der Oberfläche des Bauteils einstellende Faserabzeichnung. Die Faserabzeichnung stellt ein Höhenprofil an der Oberfläche des Bauteiles dar. Welligkeit und Rauheit wird anhand der Messgrößen W_t und R_a unterschieden [69]. Die Faserabzeichnung ergibt sich infolge chemischer und physikalischer Anisotropie innerhalb der Faserarchitektur. Die Architektur endloser Fasermaterialien erhält durch ihre Schichtung, dem Schichtabstand zur Oberfläche und der Schichtorientierung eine Vorzugsrichtung und Stärke, die im Rahmen der Messung erfasst werden soll. Die Erfassung des Oberflächenprofils erfolgt dreidimensional durch konvokalmikroskopische Untersuchung. Um eine Vergleichbarkeit der Messungen herzustellen, wird die Datenkomplexität der Dreidimensionalität auf skalare Größen reduziert. Verschiedene skalare Messgrößen, wie der Welligkeit und Rautiefe von Oberflächen sind nach DIN 4287 [69] definiert. Richtungsabhängige Welligkeit und Rautiefe der Oberfläche werden gemäß Abb. 81 erhoben.

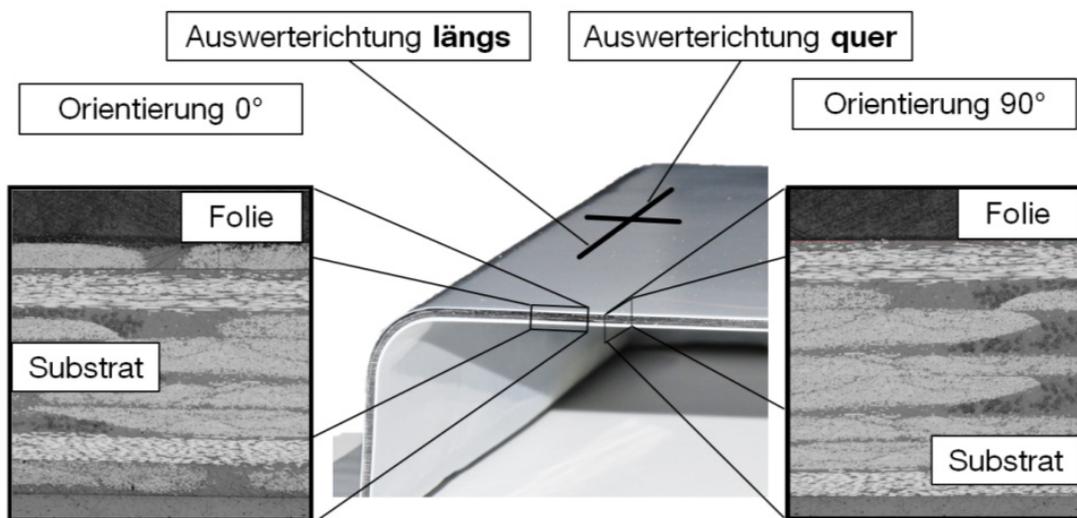


Abb. 81: Richtungsabhängigkeit der Messung in Abhängigkeit der Faserorientierung

Der Ansatz besteht darin, die Anteile der Faserabzeichnung auf der ersten Faserlage dadurch stärker gewichtet zu messen, in dem die Auswertung des Höhenprofils orthogonal zur Orientierung dieser Lage verläuft. Analog besteht der Ansatz der gewichteten Erhebung der Faserabzeichnung, resultierend aus der zweiten Faserschicht, durch parallele Auswertung zur ersten Faserorientierung, zu messen.

5.4.2. Beobachtung

Eine Faserabzeichnung (Abb. 30) wurde an allen Probenkörpern bei Entnahme beobachtet. Einschlüsse zwischen Werkzeug und Folie (vereinzelte Filamente, Staub oder aus dem Heizfeld fallende Isolationspartikel) führen im Abformschritt zu einem großflächigen Defekt, der die ausgebildete Welligkeit überlagert. Derartige Stellen sind in der Messung nicht enthalten.

Der Gesamtdurchschnitt der verzeichneten Welligkeit ist in Tab. 36 abgebildet. Dieser beträgt

- parallel zur obersten Faserlage $Wt_{l\ddot{a}ngs} = 4,29^{\pm 1,85} \mu\text{m}$
- quer zur obersten Faserlage $Wt_{quer} = 4,31^{\pm 1,59} \mu\text{m}$.

Der Stichprobendurchschnitt der mittleren Rautiefe beträgt $Ra = 0,71^{\pm 0,32} \mu\text{m}$. Für die Erhebung der Welligkeit längs und quer zur Faserorientierung der ersten Lage (Abb. 108 Anhang) und der mittleren Rautiefe wird eine Normalverteilung der Beobachtungen geprüft und angenommen; ein Einfluss der Beobachtungsreihenfolge wird geprüft und ausgeschlossen.

Bei der Umformung von Folien, die keine ausreichende Trocknungszeit erfahren haben, wurde bei deren Aufheizung an der Oberfolie eine Veränderung der Oberfläche beobachtet. Diese wechselte dabei in der Aufheizung von glänzend zu rau. Derartige Probenkörper sind nicht Bestandteil der Auswertung und wurden von der Analyse ausgeschlossen.

5.4.3. Diskussion

Die an der Oberfläche sichtbare Struktur wird von der Welligkeit dominiert, die mittlere Rautiefe ist im Vergleich hierzu klein.

In der Beobachtungsdarstellung nach Abb. 82 ist kein klares Muster innerhalb der Welligkeit erkennbar. Der Vergleich des Gesamtdurchschnittes von Messungen parallel und orthogonal zur Orientierung der ersten Faserlage ergibt zudem keinen signifikanten Unterschied (t-Test: p-Wert = 0,969).

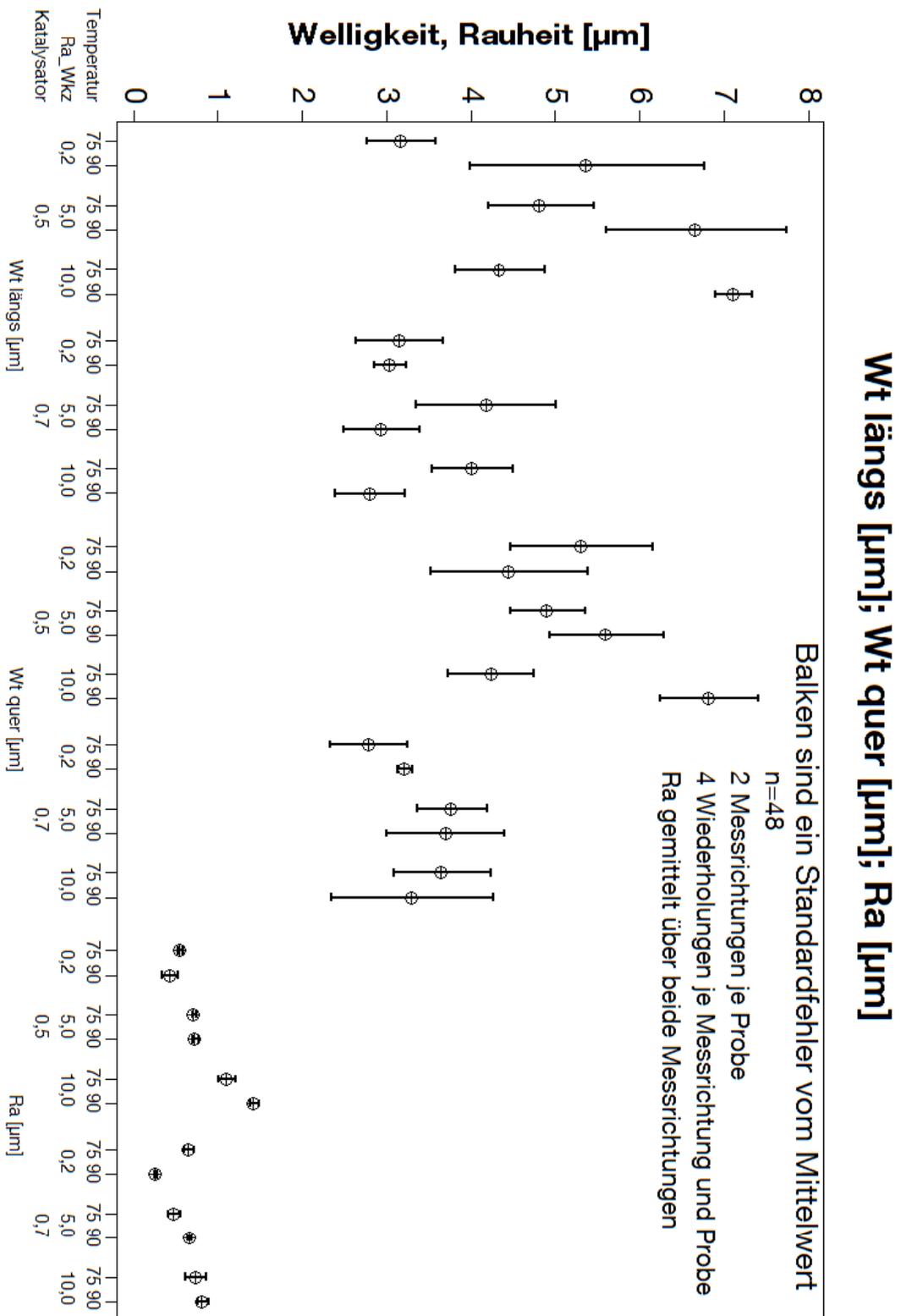


Abb. 82: Welligkeit und mittlere Rautiefe über Katalysator, Werkzeugtemperatur und Werkzeugoberfläche

Eine erste Betrachtung des mehrdimensionalen Zusammenhangs nach der Hauptkomponentenanalyse gibt unter reduzierter Datenmenge der auftretenden Varianzen einen grafischen Zusammenhang der wahrscheinlichen Korrelationen zwischen den Faktoren (Abb. 83). Die Darstellung links enthält den normierten Eigenwertanteil der Hauptkomponenten, die Darstellung rechts zeigt die Faktoren, dargestellt über die ersten beiden Hauptkomponenten. Eine Korrelation wird erwartet, wenn Linien parallel zueinander verlaufen; treffen sie orthogonal aufeinander, sind die Faktoren unter Bezug der reduzierten Datenmenge linear unabhängig.

Die Aussagekraft über die erste Komponente (horizontal) ist aufgrund des gesteigerten Eigenwertanteils größer als die der zweiten (vertikal). „Der Eigenwert bestimmt dabei, wie viel Anteil dieser Faktor an der Gesamtvarianz der Ursprungsdaten hat, und das bedeutet nichts anderes als den Beitrag, den dieser Faktor für die Originaldaten leistet.“ [101 S. 23]

Das Ergebnis der Hauptkomponentenanalyse zeigt in der Korrelation der Faktoren an, dass

- die Ausbildung der Welligkeit längs und quer einem ähnlichen Muster folgt
- mit zunehmendem Katalysatorgehalt die Welligkeit abnimmt
- die auf der Folie abgeformte Rauheit mit der Rauheit der Werkzeugoberfläche steigt und von den betrachteten Werkzeugtemperaturen und der Katalysatormenge weitestgehend unabhängig ist
- die Temperatur des Werkzeuges einen gegenüber dem Katalysator geringeren Einfluss auf die Ausbildung der Welligkeit ausübt, wobei mit zunehmender Temperatur die Welligkeit steigt, während sie mit zunehmendem Katalysatorgehalt sinkt
- die kumulierten Eigenwertanteile der ersten beiden Hauptkomponenten lediglich 65% der Gesamtvarianz der Originaldaten wiedergeben und somit nur bedingt aussagekräftig sind.

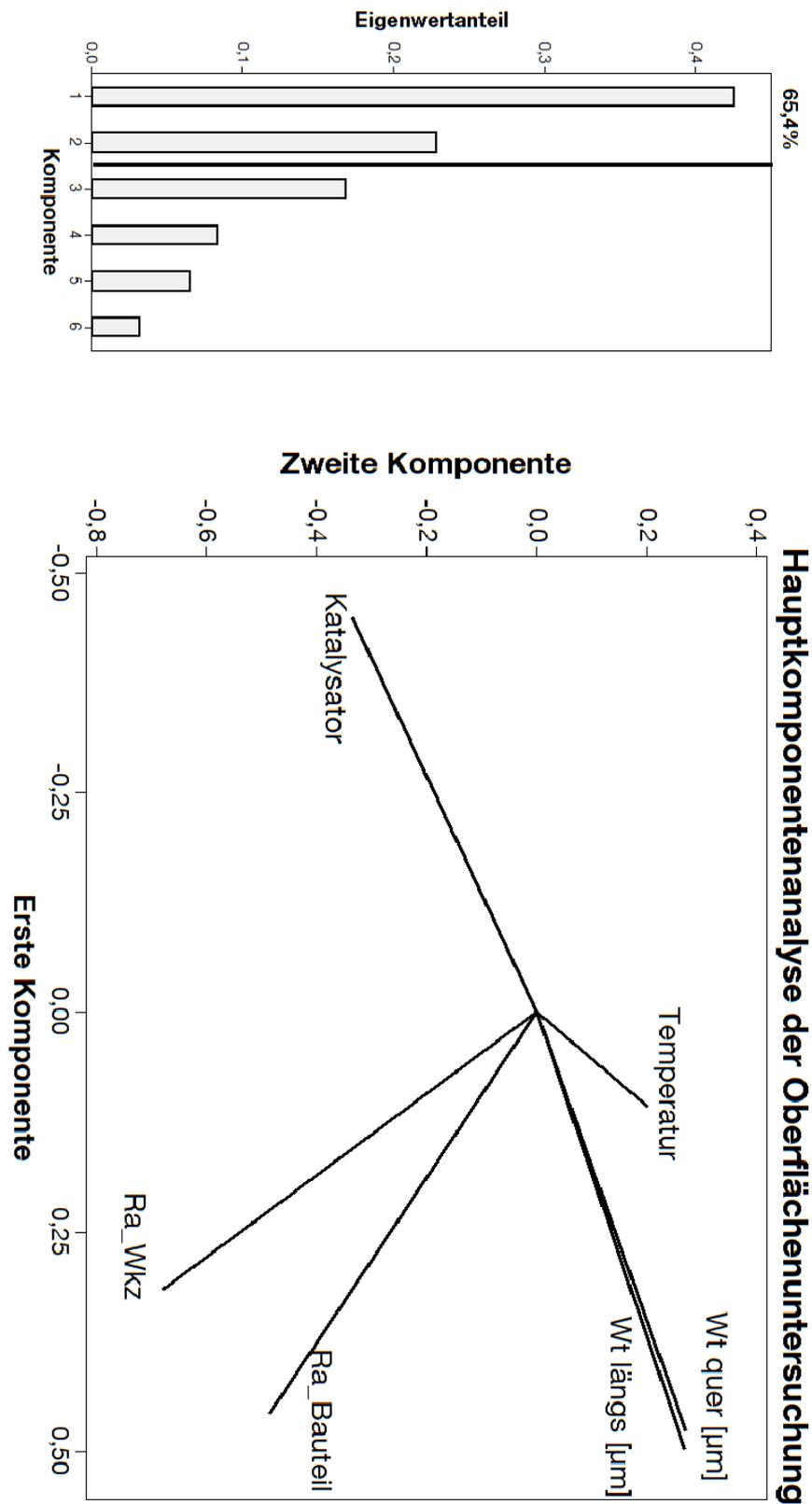


Abb. 83: Hauptkomponentenanalyse der Oberflächenuntersuchung; normierte Eigenwertanteile (links), Ladungsdiagramm (rechts)

Aus diesem Grund ist die weitere Betrachtung des Zusammenhangs in den Haupteffekten und deren Interaktionen notwendig. Es werden Mittelwerte über einzelne Faktorstufen hinweg verglichen und bei einer Datenmenge hoher Überschneidungsmöglichkeiten der Streubreiten für sich genommen noch keine Signifikanz festgestellt. Aus diesem Grund kommt es nachträglich zur Überprüfung der beobachteten Mittelwerteffekte zur Prüfung ihrer Signifikanz.

Haupteffekte der Welligkeit

In der Darstellung nach Abb. 84 sind die Mittelwertabweichungen der Faktorstufen für die Messungen längs und quer zur obersten Faserorientierung aufgetragen. Die aus der Hauptkomponentenanalyse erwartete Ähnlichkeit zwischen der parallel und quer zur Faserrichtung auftretenden Welligkeit zeigt sich bei den Haupteffekten in Höhe und Verlauf. Unterschiede in diesen Mittelwertabweichungen zwischen Längs- und Quermessungen bewegen sich in der Größenordnung von $0,1\mu\text{m}$ und werden vernachlässigt.

Katalysatorkonzentration:

Der Einfluss der Katalysatorkonzentration als stärkster Effekt wird deutlich. Eine Reduktion mittlerer gemessener Welligkeit (längs und quer) wird über die Zunahme der Katalysatorkonzentration (0,5m% auf 0,7m%) um durchschnittlich $1,85\mu\text{m}$ beobachtet.

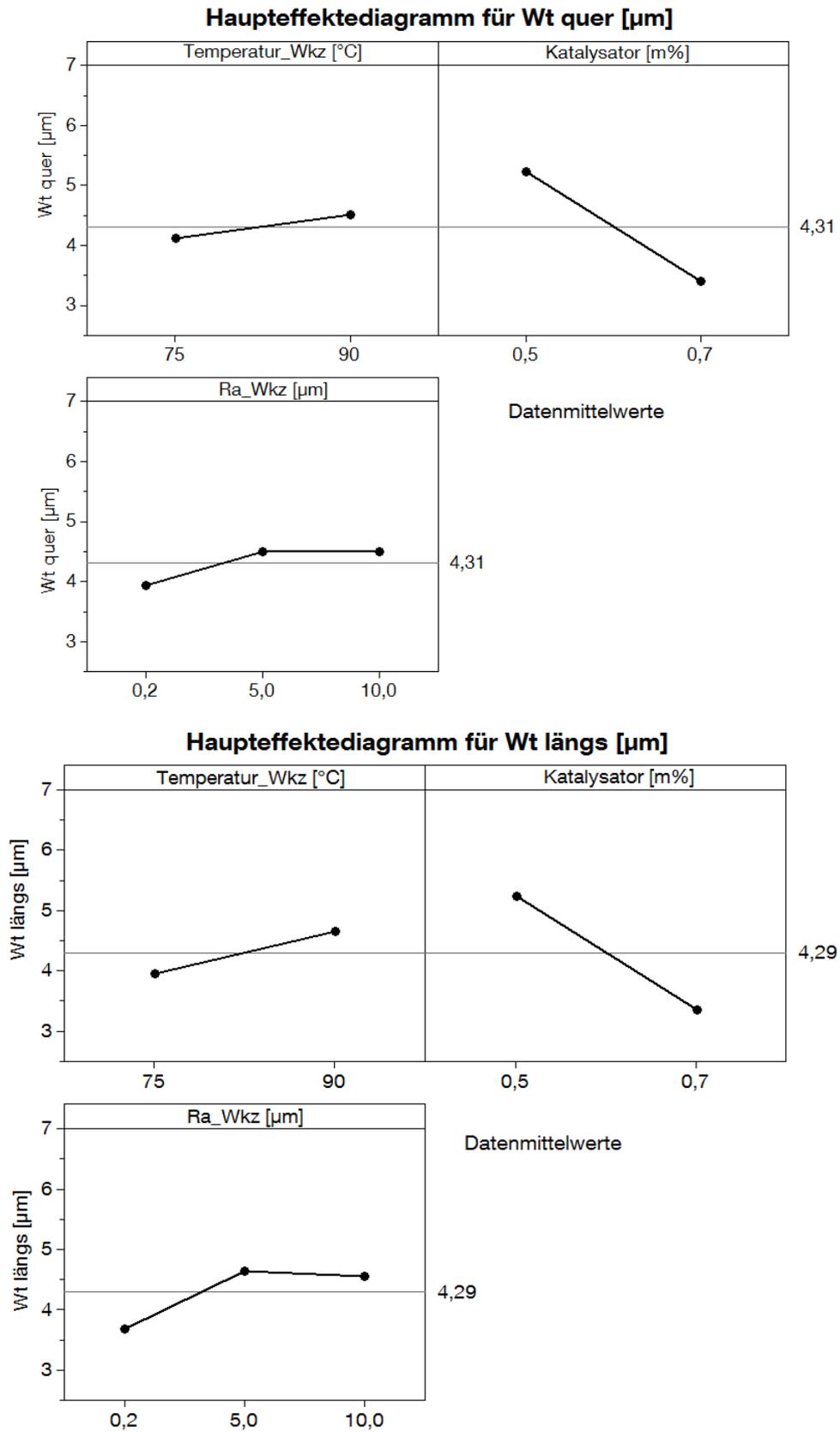


Abb. 84: Haupteffekte von Katalysator, Temperatur und Werkzeugoberfläche auf Wt

Temperatur:

Eine Steigerung der Welligkeit von $0,56\mu\text{m}$ bei gesteigerter Temperaturdifferenz um 15 Kelvin wird beobachtet.

Werkzeugoberfläche:

Die Rauheit der Werkzeugoberfläche zeigt zwischen samtierter ($R_a=5\mu\text{m}$) und rau ($R_a=10\mu\text{m}$) Oberfläche geringen Einfluss auf die Welligkeit, wohl aber zwischen matt und polierter ($<0,2\mu\text{m}$). Eine polierte Oberfläche führt dabei zur Reduktion gemittelter Welligkeit um $0,76\mu\text{m}$ gegenüber der matten Werkzeugoberfläche.

Interaktionen der Welligkeit

Interaktionen beschreiben die gegenseitige Einflussnahme der Faktorstufen untereinander und werden in der Literatur auch zum Fehler definiert, der sich bei der Reproduktion einer Faktorstufe ergibt, wenn ein anderer Faktor auf einem abweichenden Level steht [102]. Daraus folgt, dass Interaktionseffekte bei gleichem Schritt eines Faktors in Abhängigkeit eines anderen Faktors zu unterschiedlicher Messgröße führen und sich somit durch eine sich unterscheidende Steigung im Interaktionsdiagramm darstellen. Dies ist in den Interaktionsdiagrammen (Abb. 85) dargestellt.

Zwei Interaktionen der Einflussfaktoren auf die Welligkeit treten hervor:

1. Einfluss des Katalysators bei Temperaturanstieg auf Welligkeit
2. Einfluss der Werkzeugoberfläche bei Temperaturanstieg auf Welligkeit

Temperatur & Katalysator

Aus den Voruntersuchungen zur Harzreaktion (Abb. 41) ist bekannt, dass mit steigender Temperatur und mit steigendem Katalysatorgehalt im betrachteten Temperatur- und Konzentrationsbereich eine positive Korrelation mit dem Härtungsfortschritt auftritt. Dabei vollzieht sich eine mit beiden Faktoren beschleunigte Reaktion, der gleiche exotherme Wärmeaustrag findet in einer kürzeren Zeitspanne statt.

In der Interaktion aus Katalysator und Verarbeitungs-/ Werkzeugtemperatur steigt die Welligkeit mit der Temperatur bei einer Katalysatorkonzentration von 0,5% an.

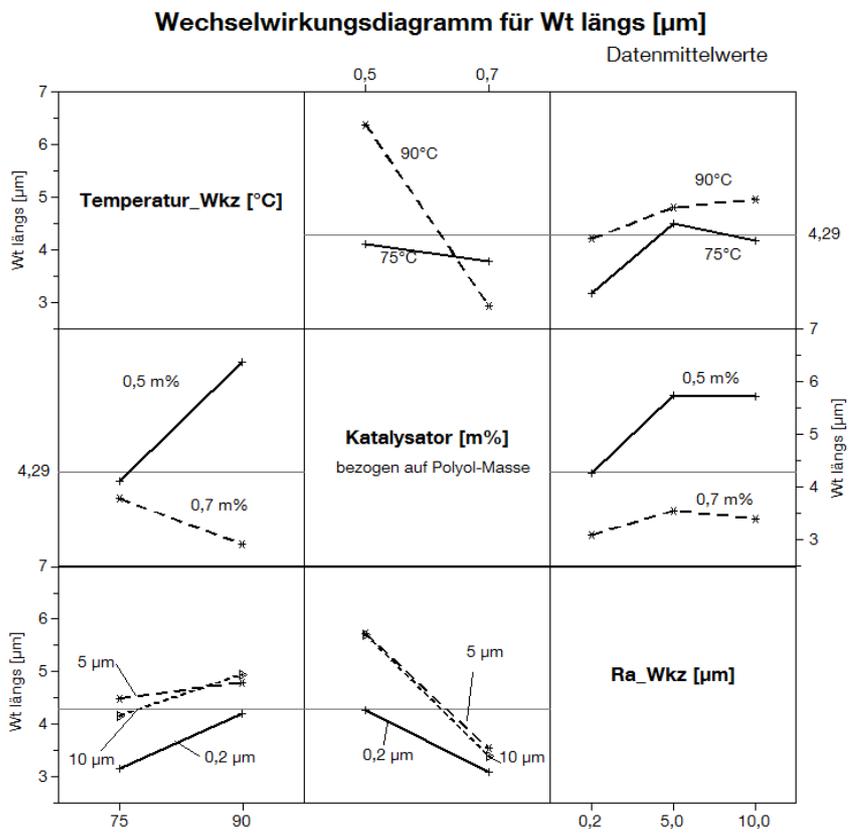
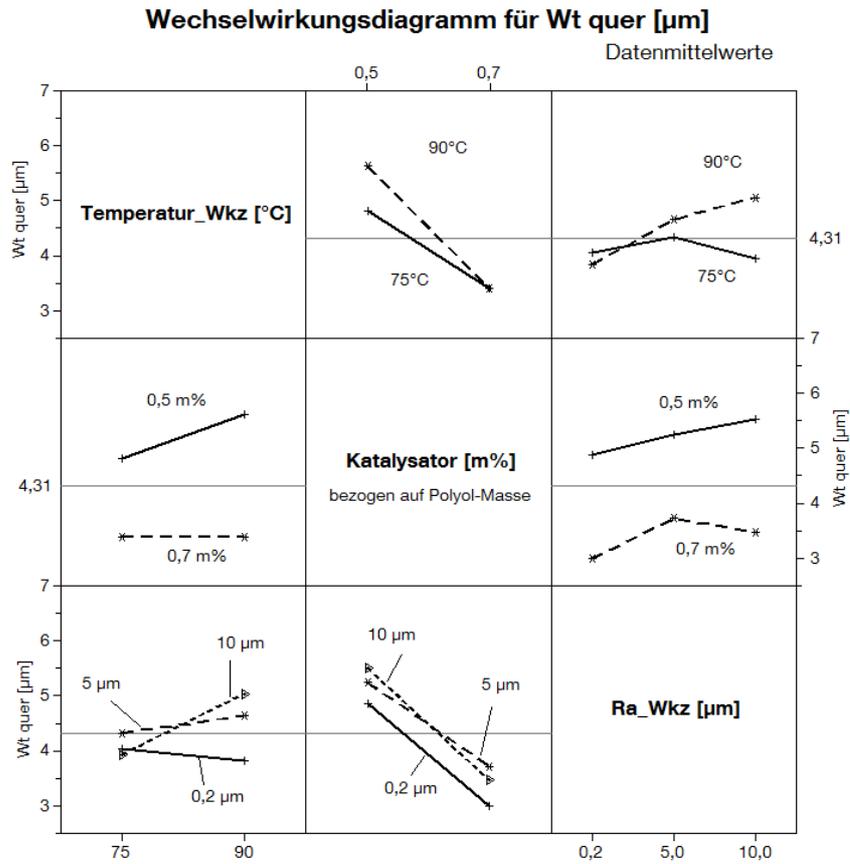


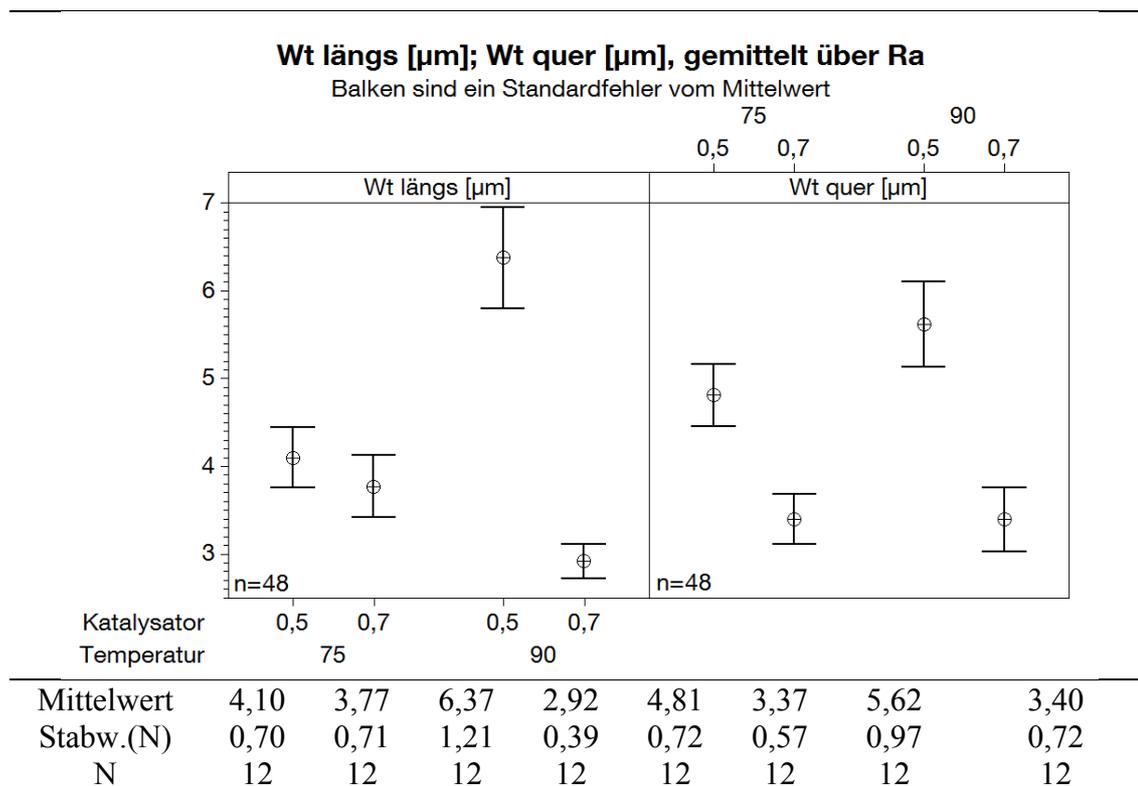
Abb. 85: Interaktionseffekte auf die Welligkeit

Es zeigt sich durch Erhöhung der Katalysatorkonzentration von 0,5% auf 0,7%

- für 90°C-Proben eine signifikante Verbesserung der Welligkeit
- bei der Auswertung quer zur obersten Faserorientierung eine signifikante Verbesserung der Welligkeit
- keine Signifikanz bei der Messung parallel zur obersten Faserorientierung für 75°C

Zwar wird mit zunehmender Temperatur eine Zunahme der Welligkeit erwartet, jedoch wird dieser Effekt von der positiven Wirkung eines höheren Katalysatorgehaltes kompensiert. Diese Kompensationswirkung zeigt sich im besonderen Maße in den Messungen längs der obersten Faserorientierung, die als Anhaltspunkt für die Faserabzeichnung aus der zweiten Faserschicht gilt.

Tab. 21: Einfluss von Temperatur und Katalysator auf Welligkeit



Eine mögliche Ursache liegt in der Temperaturverteilung in Dickenrichtung, wonach mit zunehmender Temperatur zwar die Wärmeschrumpfung insgesamt zunimmt, jedoch durch eine gesteigerte Katalysatormenge im

Inneren des Aufbaus eine dynamische Übertemperatur infolge steigender Reaktionsumsätze einsetzt, die eine Vernetzung der innenliegenden Matrix unter erhöhter Temperatur und Druck zur Folge hat. Diesbezügliche Temperaturmessungen in Dickenrichtung wurden nicht durchgeführt.

Es zeigt sich durch einen Temperaturanstieg im Werkzeug von 75°C auf 90°C

- und einer Konzentration von 0,5% Katalysator ein signifikanter Anstieg der Welligkeit in Längsrichtung und in Querrichtung ($p=0,031$).
- und einer Konzentration von 0,7% eine signifikante Verbesserung in der Auswertung längs zur Faserorientierung. Quer zu den obersten Reinharzgebieten des Geleges tritt keine signifikante Änderung ein.

Einfluss der Werkzeugoberfläche bei Temperaturanstieg

Der im Haupteffekt dargestellte positive Einfluss der polierten Werkzeugoberfläche auf die dadurch reduzierte Ausbildung der Welligkeit ist in Abb. 86 dargestellt.

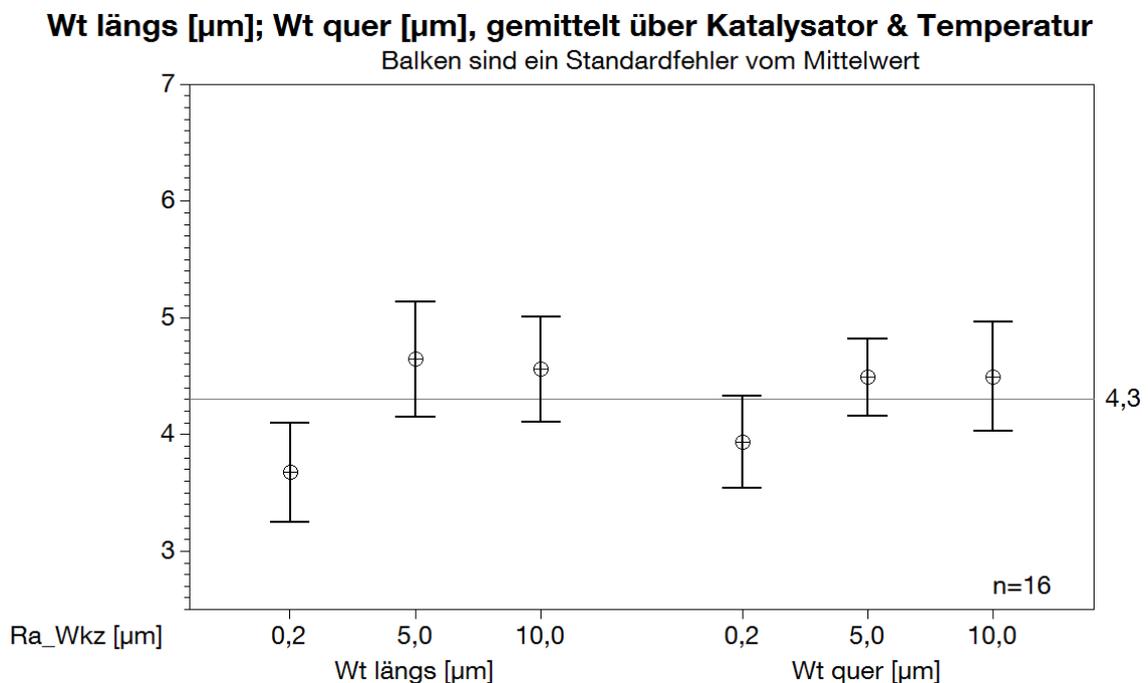


Abb. 86: Einfluss der Werkzeugoberfläche auf Welligkeit

Über die Konzentration und Werkzeugtemperatur gemittelt ergibt sich hier ein signifikanter Unterschied der Welligkeit für die polierte Werkzeugoberfläche gegenüber der matten.

Haupteffekte der mittleren Rautiefe

Neben der Welligkeit weist die Folienoberfläche eine Rauheit auf. Die Haupteffekte sind in Abb. 87, deren Interaktionen in Abb. 109 des Anhangs dargestellt. Dabei zeigt sich im gewählten Temperaturschritt von 75°C auf 90°C keine signifikante Änderung der Rauheit am Bauteil und bestätigt damit die Erwartungen der Hauptkomponentenanalyse.

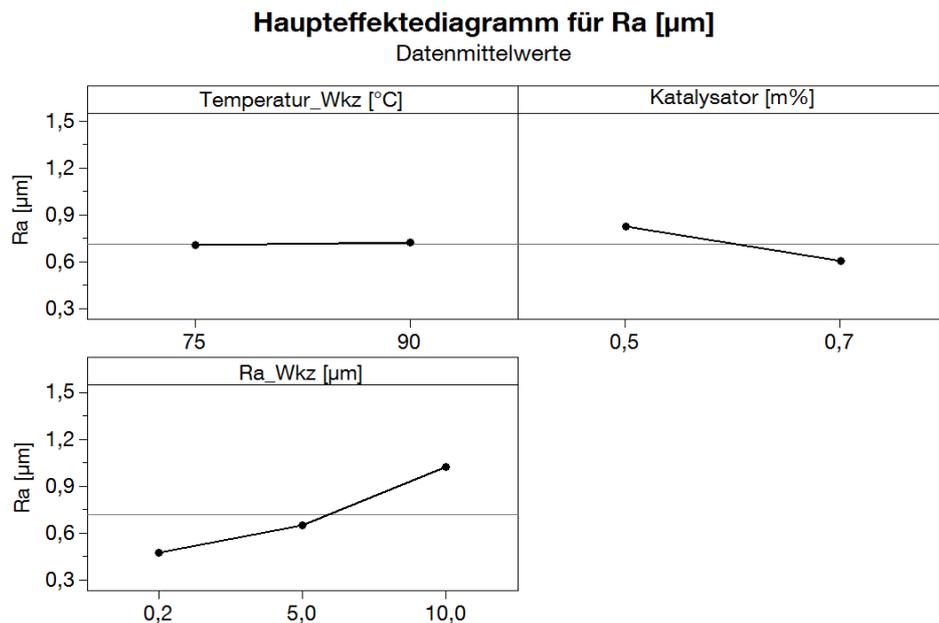


Abb. 87: Haupteffekte auf die mittlere Rautiefe

Weiterhin wird in den Haupteffekten eine sinkende mittlere Rautiefe

- mit abnehmender mittlerer Rautiefe der Werkzeugoberfläche von rau zu matt um $-0,38$ [μm] und von matt zu poliert um $-0,17$ [μm] (Datenmittelwerte)
- mit Zunahme des Katalysatorgehaltes von 0,5% auf 0,7% um $-0,23$ [μm]

beobachtet. Beide Faktorstufen wirken sich signifikant aus (Abb. 88).

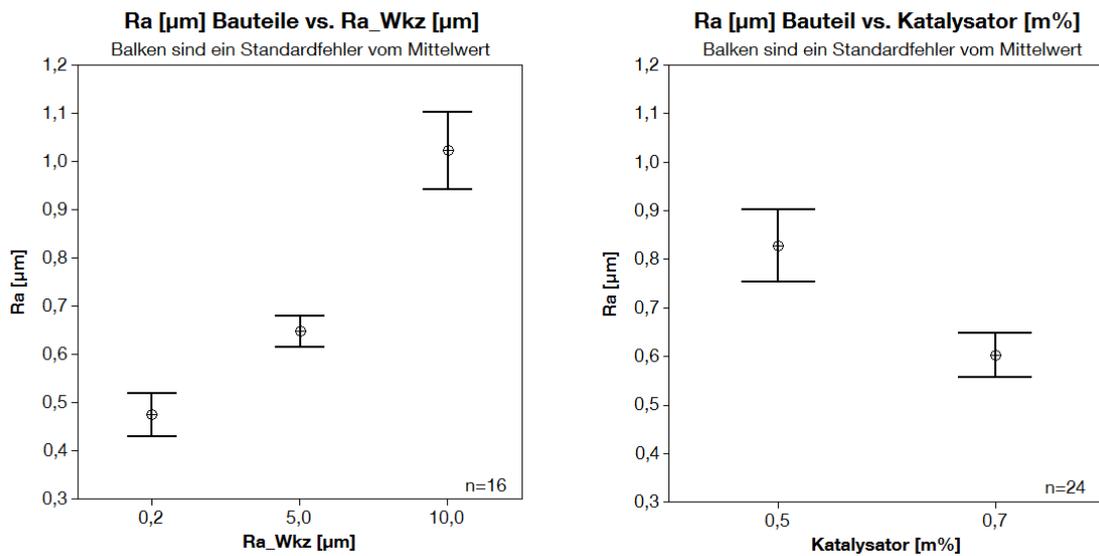


Abb. 88: Signifikanz der Einflussgrößen auf Rauheit

5.4.4. Vergleich Messung – numerisches Modell

Anhand des numerischen Modellaufbaus nach Abb. 31 wird der experimentelle Versuchsaufbau in Folien- und Schichtstärke nachgestellt. Die Werte für den Modellaufbau gleichen den Mittelwerten der Folien- und Schichtstärke des Fasermaterials. Der gewählte zweidimensionale FE-Modellansatz (Abb. 31) zur rechnergestützten Abbildung auftretender Deformationen der Oberfläche infolge des Abkühlungsvorganges wird in das Verhältnis mit der tatsächlich beobachteten Welligkeit gesetzt.

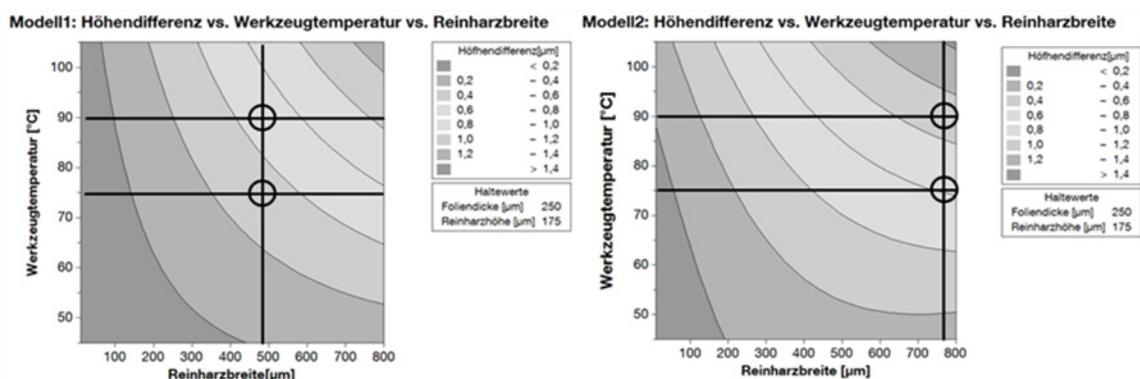


Abb. 89: Höhendifferenz vs. Werkzeugtemperatur vs. Reinharzbreite des FE-Modells, Modell 1 (links), Modell 2 (rechts)

Effekte der chemischen Schrumpfung, ihrer Beeinflussung durch die Katalysatorkonzentration sowie Einflüsse der Werkzeugoberfläche oder anderweitiger Prozessführungen sind im Modell nicht enthalten. Die Modell-

rechnung wurde auf die Temperatur bei der Messung der Oberfläche angepasst (22°C).

Wie anhand Abb. 89 dargestellt, schneiden sich die Mittelwerte der Abstände zwischen den Faserbündeln mit der aus der Werkzeugtemperatur resultierenden Höhendifferenz der ersten (Modell 1) und zweiten (Modell 2) Faserschicht. Beide resultierende Höhendifferenzen werden addiert. Im Vergleich zeigt sich eine Differenz aus Modell und Versuch.

Die Vorhersage des Modells zur thermischen Schrumpfung beträgt bei 75°C Werkzeugtemperatur mit $1,33\mu\text{m}$ ca. 48% des gemessenen Wt der Faktorkombination mit der geringsten mittleren Welligkeit ($Wt=2,78\pm 0,46\mu\text{m}$, $Ra<0,2\mu\text{m}$, 0,7% Katalysator; vgl. Abb. 90).

Bei 90°C Werkzeugtemperatur ergibt sich ein vergleichbarer Zusammenhang. Die vorhergesagte thermische Schrumpfung beträgt hier mit $1,76\mu\text{m}$ 55% der Faktorkombination mit der geringsten mittleren Welligkeit ($Wt=3,2\pm 0,09\mu\text{m}$, 90°C , $Ra<0,2\mu\text{m}$, 0,7% Katalysator).

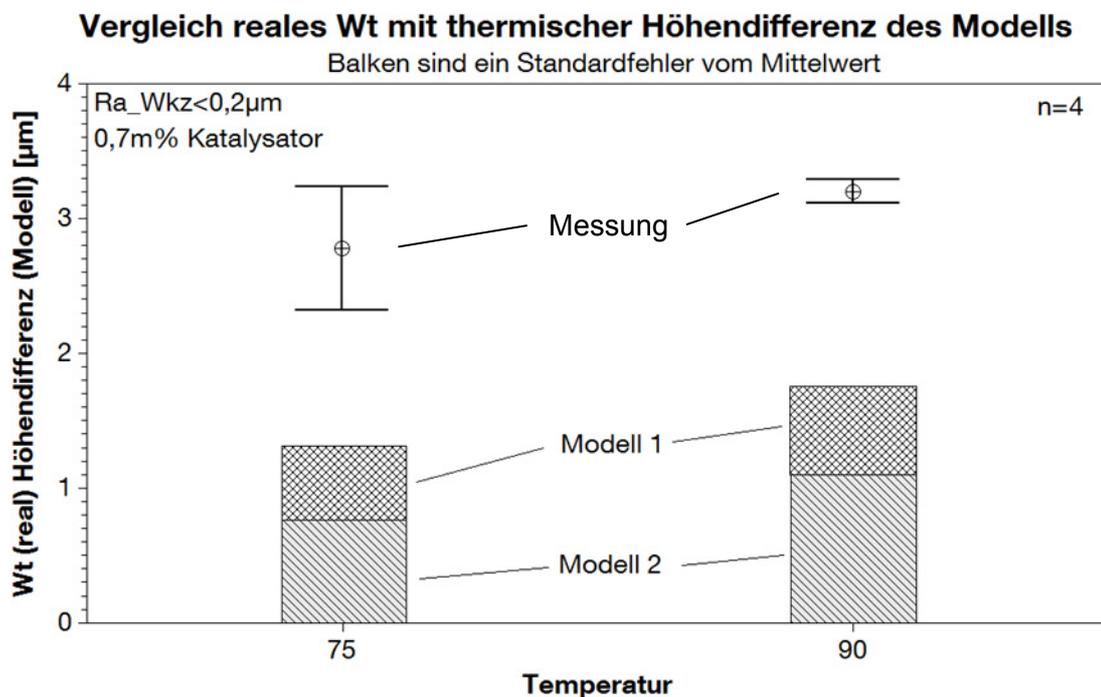


Abb. 90: Vergleich Experiment zur Welligkeit mit numerischem Modell zur Höhendifferenz aus thermischer Schrumpfung

Die Differenz der mittleren gemessenen Welligkeit infolge des Temperaturschrittes von 15K beträgt in dieser Faktorkombination $0,42\mu\text{m}$, die Dif-

ferenz der numerischen Lösung für den Temperaturschritt $0,43\mu\text{m}$. Damit liegt die numerische Vorhersage zur Höhendifferenz infolge des Temperaturschrittes in der Größenordnung des Experimentes.

Grenzen des Modells

Das Modell berücksichtigt den Anteil der thermischen Schrumpfung der Matrix. Chemischer Anteil, Beeinflussung durch Werkzeugoberfläche und Einflussnahme durch Reaktionsbeschleuniger bleiben unberücksichtigt.

Da das Modell an einem Fasermaterial (Kombination der Faserbündelabstände in erster und zweiter Schicht) untersucht wurde, kann durch die punktuelle Bestätigung der Größenordnung der erwarteten Wärmeschrumpfung und ihres Gradienten kein Rückschluss auf weitere Fasermaterialien, insbesondere tiefer liegende Faserschichten oder Gewebe, gegeben werden. Es bleibt zu prüfen, in welchem Zusammenhang tieferliegende Faserschichten Beiträge zur Welligkeit der Oberfläche leisten. Das numerische Modell mit der Strategie einer schichtweisen Berechnung der Einzelbeiträge zur Oberflächenwelligkeit unterliegt unter anderem den Fehlern der entkoppelten Spannungsbetrachtung und der Vernachlässigung daraus resultierender Interaktionen. Die Auswirkungen des eingesetzten Reaktionsbeschleunigers auf die Wärmeausdehnung des Matrixmaterials sind unbekannt.

5.4.5. Oberflächeneffekte außer Faserabzeichnung

Abweichungen der Oberfläche aus der Ebene erfolgen nicht ausschließlich durch die Abzeichnung der darunterliegenden Faserarchitektur. Bei der Faserverbundverarbeitung auf Basis des gewählten Folienansatzes können sich ohne Gegenmaßnahmen weitere Einflüsse auf die Oberfläche auswirken.

Partikel

Dabei zeigt sich eine Anfälligkeit des Verfahrens für Verschmutzung während des Formungsschrittes der Oberfolie. Ist die Oberfolie im Formungsschritt mit Partikeln kontaminiert, führen sie zu makroskopischen, trichterförmigen Defekten der Oberfolie, die ohne weitere Hilfsmittel mit dem menschlichen Auge wahrnehmbar sind (Abb. 91).

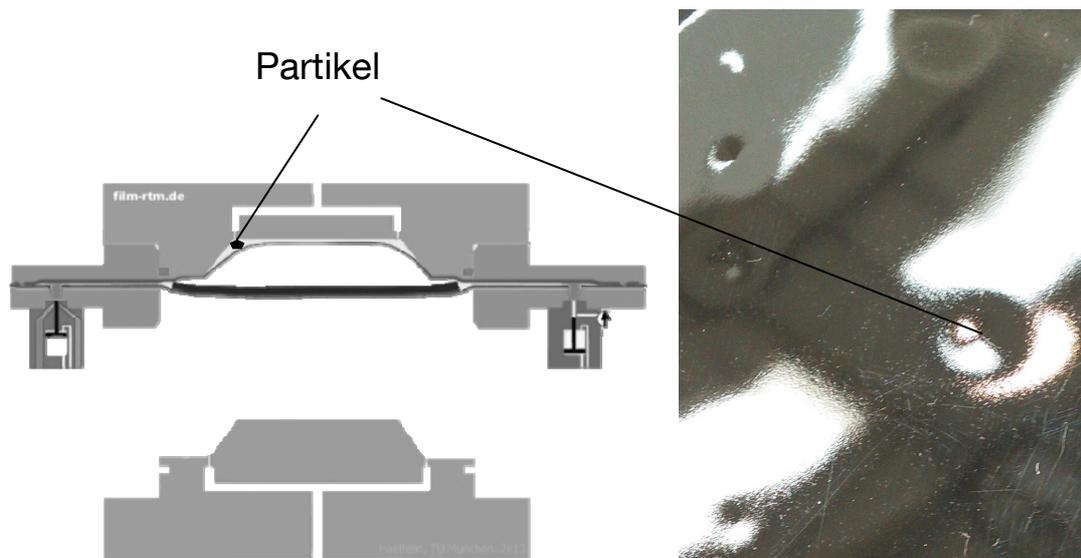


Abb. 91: Position und Auswirkung von Partikelverschmutzung der Oberfolie

Die Partikel befinden sich dabei zwischen der Werkzeuoberfläche und der zu formenden Oberfolie. Sie verteilen sich infolge der Konvektionsströmungen bei der Aufheizung und haften an Folie und Werkzeug. Daher ist ihre Eindämmung, beispielsweise durch Reinigung der Folie und des Werkzeuges vor der Formung in der Fertigungsumgebung ohne Reinraumbedingungen, notwendig. Weiterhin darf das zur Aufheizung der Folie verwendete Strahlerfeld selbst keine Partikel emittieren.

Feuchtigkeit

Hydrophile Folien werden vor der Formung getrocknet. Ist die Trocknung nicht vollständig oder nimmt die Folie im Zeitraum zwischen Trocknung und Formung zu viel Feuchtigkeit auf, wird diese in der Aufheizphase geschädigt. Dabei kommt es zu einer sichtbaren Zunahme der Folienrauheit noch vor der Formung mit der Aufheizung (Abb. 92). Diese Rauheit kann im Formungsprozess nicht ausgeglichen werden und verbleibt auf dem Bauteil.



Abb. 92: Folienrauheit infolge mangelnder Trocknung

5.4.6. Zusammenfassung Oberflächeneffekte

Es wurde Fasermaterial eingesetzt, dessen Umformbarkeit in die Testgeometrie durch das Verfahren nachgewiesen werden konnte. Die oberste Faserlage zeichnet sich durch eine Vernähung im Trikot-Fransen-Stich aus, die zu tiefenabhängigen Abständen zwischen einzelnen Faserbündeln des Geleges führt (Tab. 22). Unter der Annahme, dass sich diese tiefenabhängigen Reinharzbreiten in der Faserabzeichnung auswirken, erfolgt die Datenreduktion der dreidimensionalen Oberflächenerfassung richtungsabhängig. In der Querrichtung zur obersten Faserabzeichnung schneidet das erhobene Höhenprofil die obersten Reinharzgebiete orthogonal. In der Längsauswertung schneidet das Höhenprofil die Reinharzgebiete der zweiten Faserlage orthogonal (vgl. Abb. 81). Das erhobene Höhenprofil wird in Welligkeit und Rauheit der Oberfläche unterschieden, wobei signifikante Einflussfaktoren beobachtet und qualitativ wie quantitativ erfasst werden konnten. Es zeigte sich in den gewählten Einflussfaktoren aus Werkzeugtemperatur, Reaktionsbeschleuniger und Werkzeugoberfläche ein komple-

er Zusammenhang mit der Oberflächenwelligkeit, der nicht vollständig verstanden ist.

Zu den signifikanten Wirkzusammenhängen zählt im betrachteten Parameterbereich, dass:

- die Steigerung des Reaktionsbeschleunigers keinen negativen Einfluss auf die Welligkeit der Oberfläche ausübt. In der Interaktion mit der Werkzeugtemperatur und der Messrichtung kommt es zu einer Reduktion der Welligkeit. Dies wird bei einer Werkzeugtemperatur von 90°C oder quer zur obersten Faserorientierung beobachtet.
- die Steigerung der Werkzeugtemperatur zu einer Verschlechterung der Welligkeit der Oberfläche führt, sofern der Effekt nicht von der positiven Wirkung des Reaktionsbeschleunigers überlagert wird.
- die polierte Werkzeugoberfläche einen positiven Einfluss auf die Welligkeit ausübt.
- die Rauheit der Bauteile von der mittleren Rautiefe der Werkzeugoberfläche abhängt. Die mittlere Rautiefe der Werkzeugoberfläche wird nicht vollständig abgeformt.

Das numerische Modell zur schichtweisen Berechnung des Lagenbeitrags zur Höhendifferenz mit anschließender Überlagerung liegt im Vergleich mit der tatsächlich gemessenen Welligkeit der besten Faktorkombination in der erwarteten Größenordnung des Absolutwertes, eine gute Übereinstimmung des Gradienten über dem Temperaturschritt wurde beobachtet.

Die in das Modell einfließende Effektgröße der Werkzeugtemperatur wird in ihrer Einflussnahme von anderen Effektgrößen, wie beispielsweise der Konzentration des verwendeten Reaktionsbeschleunigers, übertroffen. Der Streubereich der Bauteilwelligkeit aller Beobachtungen liegt bei einer Folienstärke von 250µm, Faserbündelabständen von 475-780µm und Werkzeugoberflächen von matt bis poliert zwischen 2-8µm. Faserabzeichnungen dieser Größenordnung sind mit dem menschlichen Auge wahrnehmbar [14].

Die Untersuchung schließt den Einfluss von Scherbewegungen des Fasermaterials für die Vergleichbarkeit der Messungen aus. In der Fertigung zweifach gekrümmter, dreidimensionaler Bauteile bilden sich Scherwinkel aus, die zu einer lokalen Steigerung der Faserbündelabstände führen kön-

nen. Steigende Reinharzbreite, beispielsweise durch *Augenbildung* [14], führt zum Anstieg lokaler Harzansammlung und zeichnet sich an der Oberfläche ab.

Im Übertrag der ebenen Laborergebnisse auf die Fertigungsbedingungen dreidimensionaler Schalenteile wird ein zusätzlicher Anstieg der Welligkeit durch die scherbedingte Zunahme der Faserbündelabstände erwartet. Für höherwertige Oberflächen komplexer Geometrie ist die Kompensation über den maximalen Faserbündelabstand durch die Folie notwendig. Ein Folienabtrag zur Darstellung höherer Oberflächenqualitäten entspricht dem Stand der Technik und kann zusätzlich zur Steigerung des Leichtbaupotentials und dem Ausgleich von Dickenunterschieden bei der Folienformung genutzt werden.

Der beobachtete Effekt der großflächigen Abformung kleiner Schmutzpartikel zwischen Werkzeugoberfläche und Folie überlagert die Faserabzeichnung. Um formfallende Bauteile hochwertiger Oberflächen zu erzeugen, ist dieser Effekt auszuschließen und erfordert die Verarbeitung unter Reinraumbedingungen. Alternativ kann Folie Schmutzpartikel und leichte Defekte aufweisen, sofern ein Abtrag der obersten Folienschicht als Opferschicht erfolgt.

Durch die Verwendung von Folien ergibt sich somit die Darstellung hochwertiger Oberflächen in Foliensfarbe. Dies wird ohne spezialisiertes Faserhalbzeug, Einschränkung der Scherwinkelausbildung, Fließkanalgeometrie, jedoch mit einem Schleifschritt und einer Klarlackschicht (Abb. 96) erreicht.

5.4.7. Kosten / Nutzen

Zur wirtschaftlichen Einordnung wird eine Bilanzierung der Fertigungskosten durchgeführt. Grundlage der Bilanzierung ist eine Modellrechnung für die Außenhautanwendung an einem Kleinwagen. Daten der Annahme stammen aus [94], [9]. Berücksichtigung finden Werkstoffkosten (Stahl: Tab. 38; Al: Tab. 39; Kohlenstofffasern und Matrixsystem: Tab. 40; Verbundfolie: Tab. 41), Prozesskosten sowie Personal- und Investitionskosten (Tab. 43; Tab. 44; Tab. 45). Die Annahmen zum Modellfahrzeug (Tab. 37) sowie weiterer material- und verfahrensspezifischer Kosten (Tab. 44) sind dem Anhang zu entnehmen.

Im Modellvergleich wird die Außenhautanwendung in den Technologien

- Stahlblech, 0,85mm Wandstärke, lackiert gemäß [103]
- Aluminiumblech, 1,18mm Wandstärke, lackiert gemäß [103]
- Faserverbundschalenteil, 1,4mm Wandstärke, nach dem RTM Verfahren, lackiert gemäß [37]
- folienintegriertes Faserverbundschalenteil, 1,4mm Substratwandstärke, nach dem beschriebenen Verfahren mit einer Ausgangsfolienstärke von beidseitig 0,4mm, 0,28mm mittlerer Folienstärke nach Formung, mit einem Abtrag der Opferschicht und einer Klarlack-schicht

auf die Kostenstruktur, das Leichtbaupotential sowie die im Verfahren darstellbare Stückzahl miteinander verglichen.

Die Bilanzierung (Abb. 93) basiert auf flächenbezogene Angaben und setzt eine Fertigbarkeit der Aussenhautgeometrie in allen Materialien voraus. Unter der Annahme einer Gesamtfläche der Fahrzeugaußenhaut von insgesamt 8m² bei 11 Einzelbauteilen wird die Bauteilwandstärke in Abhängigkeit gängiger materialspezifischer Wandstärken berücksichtigt. Geometrische Komplexität einzelner Bauteile und Fügeverfahren werden nicht berücksichtigt.

Blech, lackiert	Faserverbund, lackiert	folienintegrierter Verbund
Lackschicht ~100µm	Lackschicht ~170µm	Lackschicht ~44µm
Substrat	Substrat	Folie ~280µm
Stahl ~0,85mm	Kohlenstofffaserverbund	Substrat
Al ~1,18mm	~1,4mm	Kohlenstofffaserverbund
		~1,4mm
		Folie ~280µm

Abb. 93: Grundlage der Bilanzierung

Der Gewichtsvergleich der Modellrechnung zeigt die Massenreduktion von Aluminium und Faserverbundwerkstoffen im Vergleich zu Stahl von 50% - 67% (Abb. 94). In Ableitung der Gewichtsangaben kann unter Berücksichtigung des Materialverschnittes die Aufwendung des für die Herstellung notwendigen Rohmaterials berechnet werden (Tab. 44).

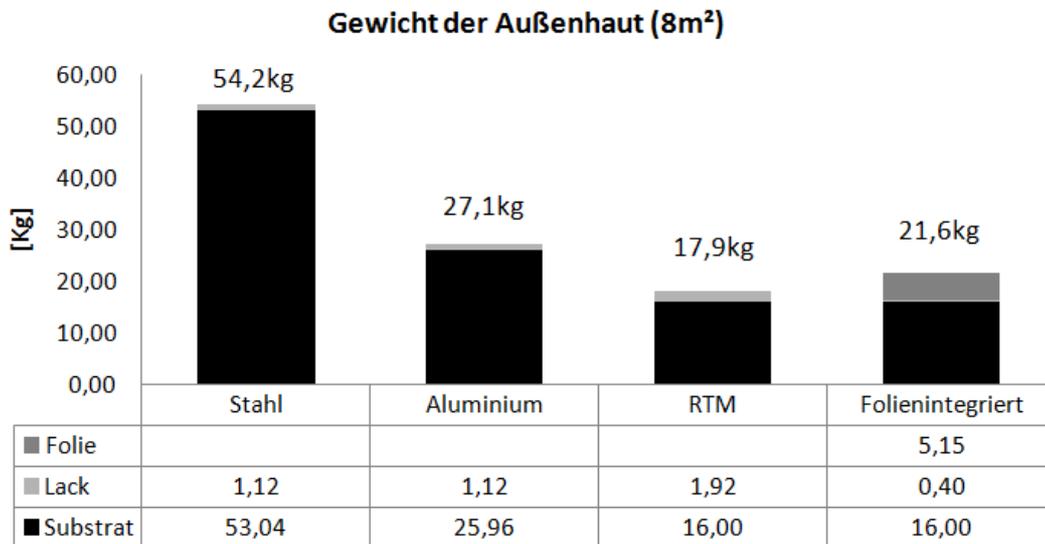


Abb. 94: Bilanziertes Gewicht der oberflächenveredelten Fahrzeug-Außenhaut (8m²)

Die dargestellten Herstellungskosten ergeben sich aus Aufwendungen für

- Abschreibung: auf Anlageninvestitionen bezogene Bauteilkosten
- Personal: 1 Facharbeiter zum Führen der Anlage pro Schicht (3-Schicht-Betrieb)
- Energiekosten: aufgeteilt nach Energieaufwendung zur Bauteilfertigung und Energieaufwendung zur Oberflächenveredelung nach [9]
- Kosten für Lackierung, Füller- sowie Schleifvorgang nach [104]
- Pauschalbetrag für Nebenkosten, enthalten in Abschreibungskosten.

Es ergibt sich daraus eine Kostenaufteilung gemäß Abb. 95. Dabei wird eine gute Übereinstimmung mit Literaturangaben (Tab. 1, [4]) sowohl für Aluminium als auch für Kohlenstofffaserverbund beobachtet.

Die Substratkosten der Verbundvarianten übersteigen die Gesamtkosten metallischer Lösungen. Stärkster Einflussgeber der Bauteilkosten der Verbundvarianten ist dabei das in der jeweiligen Technologie verfügbare Produktionsvolumen. Die Produktionsvolumina werden durch die Zykluszeit bestimmt und wirken sich auf die Faktoren Abschreibung, Personal und Energiekosten aus. Im Vergleich beider Verbundvarianten zeigt die folienintegrierte Variante hier wirtschaftliches Potential auf. Weiterhin ist mit der Folienintegration eine Verschiebung der Kostenverteilung zu beobachten.

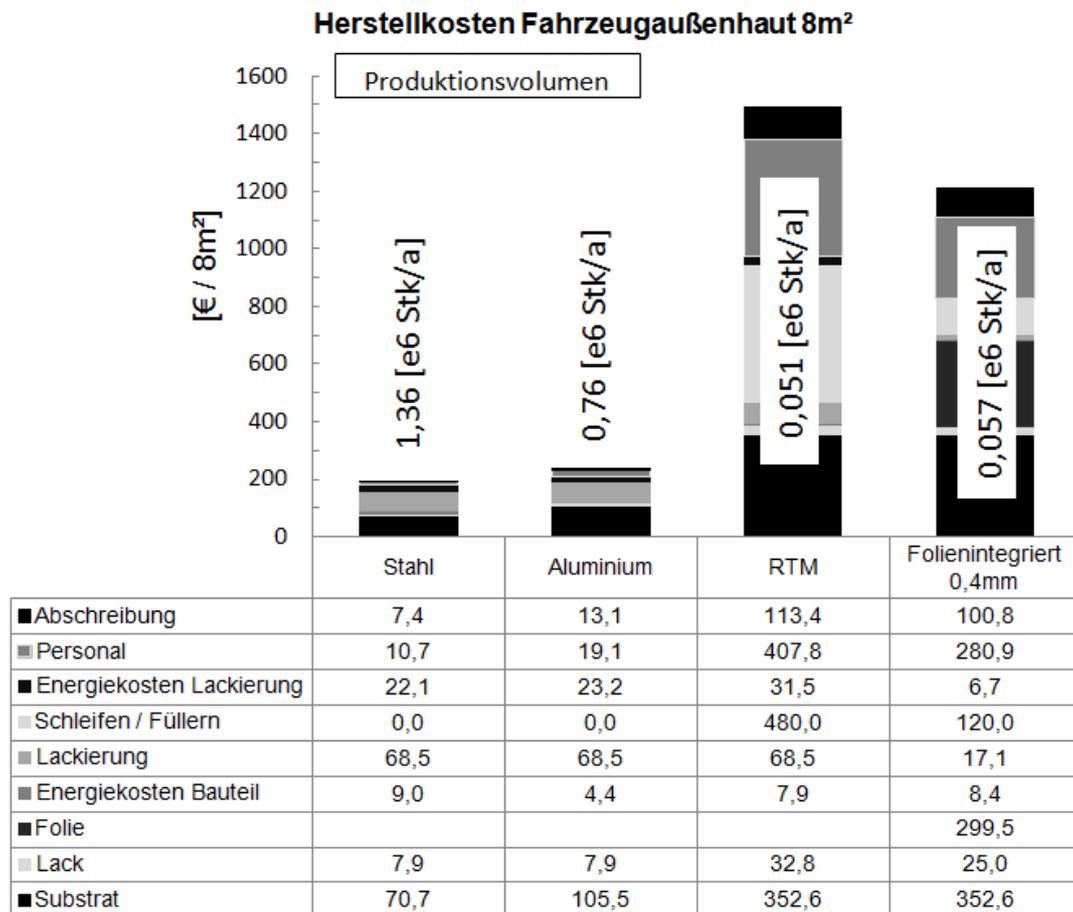


Abb. 95: Fertigungskosten oberflächenveredelter Fahrzeugaußenhaut bei maximalem Produktionsvolumen je Technologie

Während bei der konventionellen Fertigung von Kohlenstofffaserverbund-Sichtteilen unter mehrmaliger Lackierung mit Zwischenschliff die größten Kostenaufwendungen in der Oberflächenveredelung (~32% der Gesamtkosten) noch vor den Substratkosten (23%) zu finden sind, werden die Kosten der folienintegrierten Variante von Substratkosten (~28%) und Folienaufwendungen (~25%) dominiert.

Es ergibt sich durch die Integration der Folie ein errechneter Kostenvorteil von 18% bei einer errechneten Steigerung des Produktionsvolumens von ~11% gegenüber der konventionellen RTM-Variante. Dem gegenüber steht ein reduziertes Leichtbaupotential. Die RTM-Variante zeigt eine Gewichtsreduktion von ~67% gegenüber Stahl, die folienintegrierte Variante eine Gewichtsreduktion von ~60%.



Abb. 96: oben: Technologiedemonstrator; unten: Oberflächen des Technologiedemonstrators: formfallend, nach Abtrag und nach Auftrag einer Klarlackschicht

6. Zusammenfassung und Ausblick

6.1. Zusammenfassung

Das Ziel der Arbeit ist ein Verarbeitungsprozess für endlose und orientierte Kohlenstofffasern zu Schalenteilen hoher Oberflächenqualität. Der angestrebte Prozess ist automatisierbar, besteht aus einer kurzen Verarbeitungskette parallelisierter Verarbeitungsschritte mit transport- und lagerstabilen Zwischenprodukten.

Der Prozess berücksichtigt die Ausweitung des polymeren Werkstoffanteils bei Fahrzeugen und kombiniert die Vorteile

- thermoplastischer Anteile (zur Oberflächengestaltung und Handhabung) mit den
- Leichtbaupotentialen endloser Kohlenstofffasern.

Die Idee der Arbeit basiert auf einer Umhüllung trockener Verstärkungsfasern im ebenen Zustand mit thermoplastischen Folien. Hierzu wird ein Faserstapel zwischen zwei Folien eingeschweißt und der Innenraum evakuiert. Es entsteht ein lagerbares Zwischenprodukt, wobei nachfolgende Verarbeitungsschritte wie Drapierung und Tränkung der Fasern durch die geschlossene Folienumhüllung vollzogen werden. Im Vernetzungsvorgang der zwischen die Folie injizierten Duroplastmatrix bindet die Folie als Oberflächenschicht dauerhaft an.

Die Konzeption des Prozessablaufes umfasst eine symmetrische Schichtung aus Folie - Faser - Folie, eine Evakuierung des Folieninnenraum zur ebenen Faserfixierung, eine Anbindung des Folien-Faser-Zwischenproduktes vor der Formung in einen umlaufenden Spannrahmen sowie eine trennmittelfreie Konsolidierung der Fasern zwischen den Folien nach deren Drapierung. In der gewählten Definition der Prozesskette von Umformung, Injektion bis zur Oberflächenveredelung ist die Folie in den Ablauf frühzeitig integriert. Die Folie ist Teil der Faserhandhabung bei der ebenen Umhüllung des trockenen Faserstapels, sie überträgt Normal- und Tangentialkräfte zur Orientierung des Fasermaterials bei der Faserdrapierung, trennt die Reaktionsmasse vom Werkzeug und verbleibt auf dem Bauteil unter der Bedingung gesteigerter Gebrauchsfertigkeit (Optik/Schweißlot).

Die Gesamtkomplexität des Ansatzes wird in Teilprobleme gegliedert, numerisch oder experimentell in separaten Untersuchungen analysiert und anschließend zum Prozess superponiert. Teillösungen umfassen die Auslegung der Verarbeitungsparameter der Matrix (chemische Abstimmung des Reaktionsbeschleunigers auf Verarbeitungstemperatur und Zykluszeit, chemische Stabilität der Folie), die Anhaftung der Folie am Fasersubstrat, die Kontrolle der Effekte während der Folienerwärmung (Folienerweichung, Folienwelligkeit), die numerische Betrachtung thermischer Abkühlungsspannungen (Grenzflächenbelastung zur Substratschicht, Faserabzeichnung) und den Folieneinfluss auf mechanische Kennwerte des Schichtaufbaus (Leichtbaupotential). Auf Basis dieser Teillösungen wurde eine Versuchsanlage realisiert. Diese Versuchsanlage umfasst ein Modul zur automatisierten Fertigung folierter Zwischenprodukte und ein Modul zur automatisierten Formung – Konsolidierung – Entnahme.

In der technischen Umsetzung erfolgt die Drapierung und Tränkung des Fasermaterials im gleichen Gesenk. Hierfür ist ein Pressenhub notwendig. Die technische Lösung basiert auf einem teilbaren, der Werkzeugbewegung folgenden Spannrahmen zur flächigen Aufheizung und Umformung des folierten Zwischenproduktes innerhalb des Werkzeuges. Der mechanische Widerstand, der zur Überführung der Folie in die Geometrie des Bauteils aus der Ebene aufzubringen ist, wird zur Drapierung des Fasermaterials eingesetzt. Ort und Höhe der Drapierkräfte werden durch lokale Temperaturunterschiede in der Folie angepasst.

Die Formung erfolgt schichtweise. Es wird angenommen, dass die Reihenfolge, wann sich welche Materialschicht bewegt, Einfluss auf die Umformung hat. Hierzu werden drei Konzepte untersucht. Diese sind: Diaphragma-Formung, Doppel-Diaphragma-Formung und Press-Formung. Während der Umformung bleibt die mechanische Integrität des folierten Faseraufbaus gewahrt, Positionsverluste durch ein gleichzeitiges Erweichen aller Schichten werden vermieden.

Anhand eines automobilen Demonstrators konnte die Fertigung der Zwischenprodukte, ihre Umformung und Konsolidierung dargestellt werden. Einflüsse auf die Oberfläche wurden charakterisiert.

Ergebnis

Aus der numerischen Modellierung thermischer Spannungen ergibt sich ein Zusammenhang aus der Einfallstelle der Folie und der Dimension der Reinharzgebiete zwischen den Faserbündeln und der Fertigungstemperatur. Die Anhaftung der Folie wurde durch die Werkstoffkombination aus eingesetzter Matrix und Anbindungsschicht der Folie im prozessrelevanten Temperatur- und Zeitbereich realisiert. Eine Mischungszone im Grenzbe-
reich Thermoplast / Duroplastmatrix bildet sich aus, die auf das Lösungsverhalten des Thermoplasten im unvernetzten Härter zurückzuführen ist. Schälversuche zeigen in gewählter Werkstoffkombination ein Anbindungsverhalten, das zum Kohäsionsversagen innerhalb des Fasersubstrates führt.

Das dargestellte Leichtbaupotential folienintegrierter Faserverbundwerkstoffe kann zwischen jenem des unverstärkten (Thermoplasten) und des reinen Faserverbundssubstrats eingeordnet werden. Mit sinkender Folienstärke steigt das Leichtbaupotential, eine minimale Folienstärke ist anzustreben. Die minimale Folienstärke wird durch die Verarbeitungsstabilität, durch die Geschwindigkeit der Umformung und durch die Bauteilgeometrie beschränkt. Die spezifische Steifigkeit von Aluminium kann in der Versuchsanordnung für dünne Schalen nicht erreicht werden. Ab einer Folienstärke von weniger als 0,75mm wird in der untersuchten Werkstoffkombination die spezifische Festigkeit von Stahl/ Aluminium erreicht und mit weiter sinkender Folienstärke übertroffen.

Drei unterschiedliche Abläufe zur schichtweisen Formung des Aufbaus aus Folie-Faser-Folie werden untersucht. Anhand einer Demonstrator-Geometrie konnte eine Umformkinematik identifiziert werden, die zur faltenfreien Drapierung der Faseranteile führt (Pressformung). Sie basiert auf einem Ablauf in drei Stufen:

- Formen der Oberfolie
- Legephase des Fasermaterials auf Unterwerkzeug und Teilausformung der Unterfolie
- werkzeuggesteuerte Ausformung der Unterfolie und Drapierung enger Radien.

Die Press-Formung zeigt im Rahmen experimenteller Untersuchungen eine vollständige, wiederholgenaue und faltenfreie Ablage des Fasermaterials in die Werkzeugtopografie; der Toleranzbereich des Faserzuschnitts ist breit.

Die Faserarchitektur zeichnet sich durch die Folie an der Oberfläche des Bauteils ab. Einflussfaktoren wurden charakterisiert. Dabei zeigte sich ein reduzierender Effekt der Faserabzeichnung mit steigender Reaktionsrate, sinkender Verarbeitungstemperatur und glatter Werkzeugoberfläche. In der Übertragung ebener Laborergebnisse auf die reale Prozesskette ergab sich ein zusätzlicher Anstieg der Oberflächenwelligkeit mit scherungsbedingter Zunahme der Faserbündelabstände. Weiterhin zeigte sich eine großflächige Abformung kleiner Schmutzpartikel zwischen Werkzeugoberfläche und Folie. Um formfallende Bauteile hochwertiger Oberflächen zu erzeugen, müssen solche Partikel ausgeschlossen werden. Dies bedarf der Verarbeitung unter Reinraumbedingungen. Alternativ kann die Folie Schmutzpartikel und Defekte aufweisen, sofern ein Abtrag der obersten Folienschicht als Opferschicht erfolgt. Um hochwertige Oberflächen in Foliensfarbe ohne ein spezialisiertes Faserhalbzeug und ohne die Einschränkung der Scherwinkel/Faserbündelabstände gemäß dem dargestellten Prozess zu erzeugen, ist ein Schleif- und Lackierschritt erforderlich.

Die Kosten/ Nutzenanalyse zeigt einen errechneten Kostenvorteil der Folienintegration von ~18% bei einer errechneten Steigerung des Produktionsvolumens von ~11% gegenüber der RTM-Verarbeitung, bezogen auf automobile Exterieur Anwendungen.

Im Rahmen der Arbeit wurde eine Prozesskette umgesetzt, die Folien- mit Faserverbundtechnologie verbindet. Sie basiert auf zwei Modulen, die stofflich durch lager- und transportstabile Zwischenprodukte verbunden sind. Der realisierte Ablauf zeichnet sich durch eine durchgehende Automatisierbarkeit aus. Die Drapierung des Fasermaterials und Konsolidierung wurden in einem Werkzeug vereint.

6.2. Ausblick

Simulation

Die numerische Modellierung thermischer Deformation und Abkühlungsspannungen zeigt den kaschierenden Effekt der Folie für die Abzeichnung

der Faserarchitektur der ersten beiden Faserlagen. In einem zweidimensionalen Ansatz korrelieren Reinharzbreite, Reinharzhöhe, Temperaturdifferenz und Folienstärke mit thermisch bedingten Spannungen und Einfallhöhen. Chemische Einflussnahme, tieferliegende Reinharzstellen sowie dreidimensionale Interaktionen bleiben unberücksichtigt. In einer Erweiterung des Ansatzes durch ein dreidimensionales Modell, inhomogener Felddefinition der Temperatur und der Berücksichtigung chemischer Schrumpfungseffekte wird von einer genaueren Vorhersage der Oberflächendehformationen ausgegangen.

Leichtbaupotential

Der erreichte Entwicklungsstand basiert auf einer Folienstärke von 0,2-0,4mm im umgeformten Zustand. Zur weiteren Steigerung des Leichtbaupotentials und reduziertem Materialeinsatz werden dünnere Folien angestrebt. Der Zusammenhang aus geometrischer Komplexität und notwendiger Drapierkräfte ist im gemeinsamen Wirken mit der thermomechanischen Koppelung der Folienstärke nicht hinreichend verstanden. Die Möglichkeiten, Verbundwerkstoffe in kleinen Werkzeuggraden und mit geringen Auszugsschrägen zu drapieren ist auf Basis dünnerer Folien zu prüfen.

Folientechnologie

In der experimentellen Untersuchung des kombinierten Verarbeitungsansatzes kommt eine dreischichtige Folie, bestehend aus einer Anbindungsschicht, einer Trägerschicht und einer Deckschicht zum Einsatz. Durch die zeitgleiche Verarbeitung unterschiedlicher Thermoplaste in einem Prozess ermöglichen Fertigungstechnologien der Folienproduktion die effiziente Darstellung mehrschichtiger Aufbauten über diesen dreischichtigen Aufbau hinaus. Zusätzliche Schichten können somit ohne maßgebliche Abweichungen vom bestehenden Prozess eingebracht werden. In einem Ansatz nach [8] dient eine vierte Schicht zum Ausgleich der Faserabzeichnung. Das nach der Bauteilentnahme noch in der Folie befindliche Spannungsniveau wird durch weiteres Abkühlen gesteigert und in der Zusatzschicht zum Ausgleich der Faserabzeichnung gerichtet abgebaut.

Weitere Funktionsschichten zur Hemmung von Diffusionsvorgängen, der Integration von elektrischen Komponenten oder zur Fügung erweitern die Potentiale des Ansatzes.

A. Anhang

a. Betreute studentische Arbeiten

Arbeit	Bezeichnung	Name	Titel der Arbeit
DA	2011-0004	Bernd Zacherle	Analyse der Wirkung von Lagenaufbau / Prozessparameter auf Oberflächeneigenschaften folienintegrierter Verarbeitungsprozesse von Faserverbundwerkstoffen
DA	2012-0017	Jan Krollmann	Grundlegende Materialcharakterisierung von Film-RTM-Bauteilen nach mechanischen, ökologischen und ökonomischen Gesichtspunkten im Hinblick auf automobile Exterieur Anwendungen
DA	2013-0005	Rico Fischer	CFK-Außenhaut in Class-A: Untersuchung möglicher Material-Prozessparameter bezüglich der Oberflächengüte in Wagenfarbe
DA	2013-0014	Sebastian Klug	Experimentelle Untersuchung und konstruktive Auslegung für eine Fahrzeug-Frontstruktur aus FVK mit PU-Matrix
DA	2013-0043	Michael Holzer	Thermische Funktionsintegration in FVK-Strukturen
SA	2011-0002	Malte Janduda	Entwicklung eines Messinstruments zur Prozess- und Zustandsüberwachung von Faserverbundbauteilen
SA	2011-0007	Markus Kleineidam	Integration von Folien in den Herstellungsprozess textiler Vorformlinge für Faserverbundbauteile
SA	2011-0025	Thomas Kopp	Analyse zur Thermoformbarkeit folienintegrierter Faserverbundlagen
SA	2012-0021	Alexander Reinbold	Fertigung und Analyse folienintegrierter RTM-Versuchsplatten im Hinblick auf Prozessparameter und Oberflächencharakteristik für automobile Anwendungen
SA	2012-0042	Hannes Röpling	Analyse der Faserabzeichnungseffekte bei der Herstellung schalenförmiger Faserverbundbauteile im RTM-Verfahren

SA	2012-0044	Christoph Kracke	Effekte der Permeabilitätssteigerung durch Integration von Fließkanälen auf Oberflächeneigenschaften folienintegrierter RTM-Bauteile
SA	2012-0058	Quirin Tyroller	Analyse und Auswertung der Oberflächenveredelungseffekte bei folienintegrierten Faserverbundschalenteilen für automobiler Exterieur Anwendungen im RTM-Verfahren (resin transfer molding)

b. Anhang

Tab. 23: RTM-Prozessfaktoren: Einfluss und Auswirkungen [94], [105]

Einflussfaktor:	Einfluss und Auswirkungen auf:	Mögliche Fehler:
Faseranteil	Mech. Kennwerte, Permeabilität, Drapierfähigkeit, Verschnittmenge	Faltenwurf, Orientierungsabweichung, hohe Kosten durch Verschnitt, nicht anforderungsgerecht ausgelegt
An- & Abguss-Konzept	Fließlänge, Injektionszeit	schlechter Füllungsgrad, lange Injektionszeit wegen zu langen Fließwegen, Lufteinschlüsse, hoher Harzverlust
Gestaltung des Werkzeug	Bauteilgeometrie, Wärmeleitfähigkeit, Entformungsmechanismus, Bauteilradien, Oberflächenqualität	Fehlende Entformungsschragen, zu kleine Radien, schlechte Oberflächenqualität, kurze Lebensdauer
Kompaktierung	Faservolumengehalt, Permeabilität	fehlerhafte Tränkung
Harzsystem	Viskosität, Temperatur-Viskositäts-Verhalten, Temperatur-Aushärte-Verhalten, Schrumpf	hoher Schrumpf, geringe Fließgeschwindigkeit
Werkzeugtemperatur Injektionsdruck	Steuerung der Harztemperatur, -viskosität, -aushärtung Fließgeschwindigkeit	Unvollständige Tränkung, mangelnder Aushärtegrad Faserverzug, Poren

Tab. 24: PKW-Neuzulassungen alternativer Antriebe in Deutschland [77 S. 39]

Jahr	2005	2007	2009	2011	2012*)
Hybrid	3.100	7.700	8.500	13.000	18.200
Autogas	<500	5.600	11.700	5.300	10.500
Erdgas	10.400	14.100	21.100	8.050	6.800
Elektro	<500	<500	<500	2.200	3.400
Wasserstoff	<500	<500	1.000	<500	<500

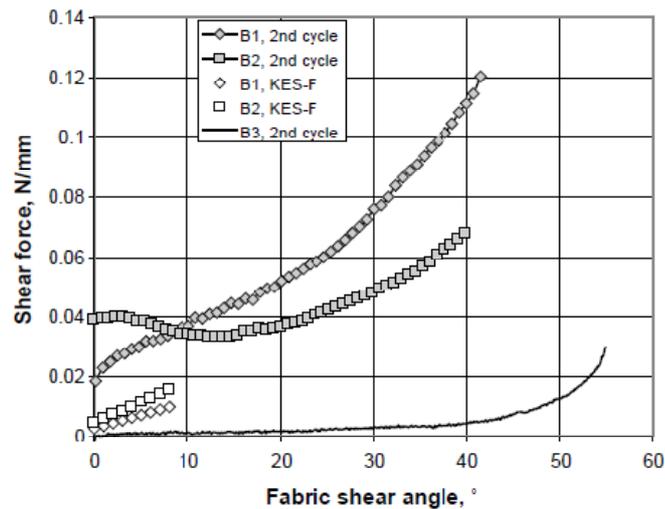
*) Beinhaltet Schätzung für 2. Halbjahr

Tab. 25: Entwicklung der Materialverteilung im PKW [%] [78 S. 4.3 K. Schmid]

Jahr	1975	1985	1995	2000	2005	2010
Stahl & Eisen	74	72	63	59	55	50
Aluminium	3	3	6	8	10	13
Sonst. NE-Metalle	3	4	4	5	6	6
Sonst.	13	13	13	14	14	14
Kunststoffe	6	8	13	14	15	17

Tab. 26: Energieaufkommen zur Materialproduktion

Material	Stahl	C-Faser (PAN)	Glasfaser	Epoxid	Polyurethan
Energie [MJ/kg]	32-33	280; 340; 800	35	76	72-118
Quelle	[79][81]	[79][106][107]	[106]	[79]	[108][109]

Abb. 97: Scherwiderstand verschiedener biaxialer Gelege (300g/m²) nach [17]

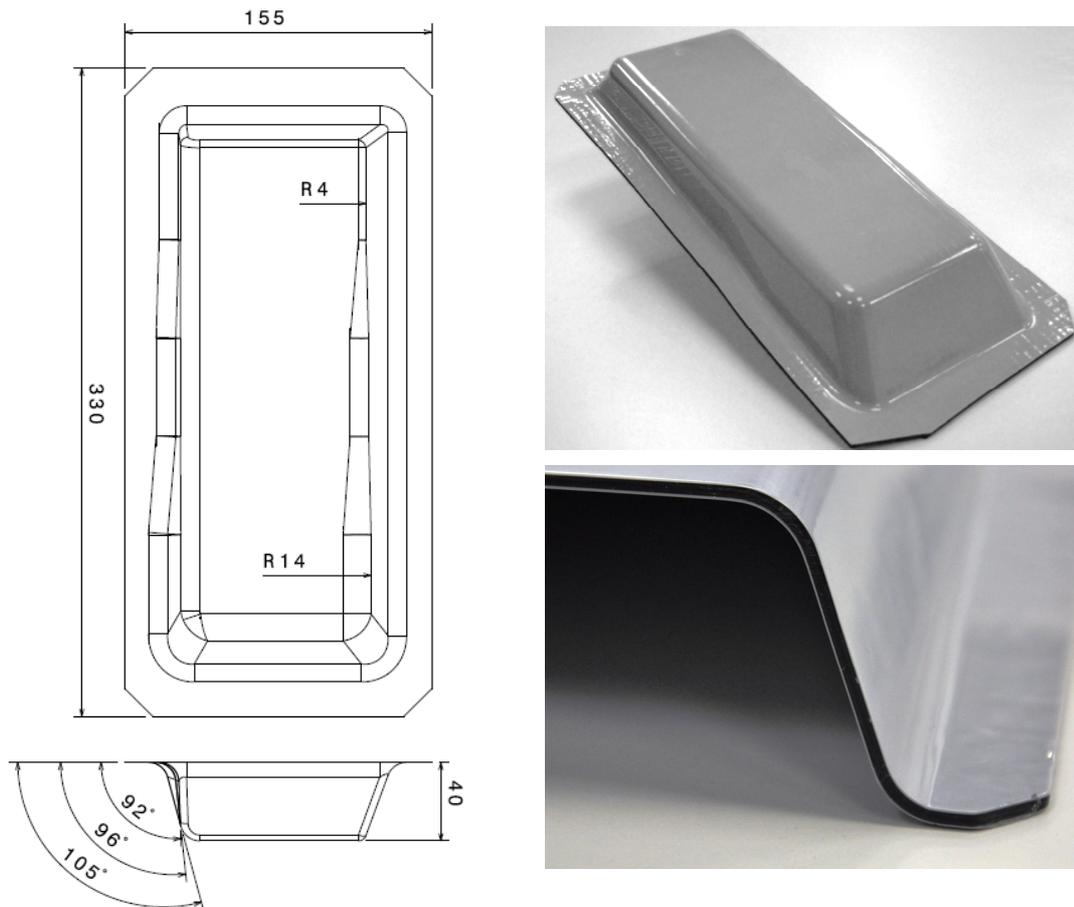


Abb. 98: Voruntersuchung zum Verfahren an generischer Geometrie, Geometrieauslegung durch Fa. Roding Automobile GmbH

Tab. 27: Biaxiales Kohlenstofffasergelege Hacotech C300BX

Art	Flächengewicht [g/m ²]	Toleranz +/- [%]	Material	tex
-45°	150	5	Tenax STS	24K
+45°	150	5	Tenax STS	24K
Nähfaden	6	5	PES 76 dtex hf	

Tab. 28: Herstellerangaben des Matrixsystem Momentive™ 05475/05443

Art	Wert	Einheit	Testmethode
Zugmodul	2775	N/mm ²	DIN EN ISO 527-1
Zugfestigkeit	78	N/mm ²	DIN EN ISO 527-1
Bruchdehnung	6-7	%	DIN EN ISO 527-1
Dichte	1,15-1,19	g/cm ³	ISO 2811

Tab. 29: Prozessparameter der Versuchskörperfertigung in RTM

Parameter	Wert	Einheit
Prozesstemperatur	50	°C
Härtetemperatur	80	°C
Mischungstemperatur Matrix	28	°C
Injektionsdruck	5	bar
Nachdruck	2	bar
Vakuum	0,02	bar
Reaktionszeit	15	min
Entformungstemperatur	40	°C

Tab. 30: Folie der Probekörper, Angaben nach [110]

Folie	Stärke	E-Modul	Dichte
A50_033	0,33 [mm]	1850 [N/mm ²]	1,03-1,04 [g/cm ³]
A50_050	0,5 [mm]	1850 [N/mm ²]	1,03-1,04 [g/cm ³]
A50_075	0,75 [mm]	1850 [N/mm ²]	1,03-1,04 [g/cm ³]

Tab. 31: Randbedingung der Plattenfertigung zur Haftungsuntersuchung

Parameter	Wert
Verarbeitungsprozess	RTM, beidseitig foliert
Faseraufbau	4 Lagen Biaxialgelege CBX300, qi, 1200g/m ²
Matrixsystem	Loctite® Max2, 0,5% Part C (m%(Part A))
Reaktionszeit	11min, 75°C
Setzwegsteuerung	Nachdruck durch Presse um Gelpunkt, resultierender Setzweg zw. 35-50µm
Nachvernetzung	60 min bei 90°C, 10K/h auf 110°C, 120 min bei 110°C, Abkühlung mit -10K/h bis Raumtemperatur

Tab. 32: Thermische Kennpunkte nach DIN EN ISO 6721-5 A3 für Senoplast VM 1E C96-12-023

Messrichtung (Abb. 12)	Ansatzpunkt Speichermodul	Ansatzpunkt Verlustmodul	Tan Delta =1	Peak tan DEL- TA
längs	143,93+-	147,21+-	148,175+-	150,88+-
	0,544°C	0,56°C	0,15°C	0,431°C
quer	144,88+-	147,91+-	147,99+-	150,39+-
	0,15°C	0,18°C	0,148°C	0,014°C

Tab. 33: Kostenakzeptanz für Gewichtsersparnis in Automobilindustrie [3]

Antriebsstrang	Zusatzgewicht durch Effizienzsteigerung	Kostenakzeptanz für eingespartes Gewicht
Verbrennungsmotor	50 kg	3-10 [€/kg]
Batterieelektrisch	250 kg	10 [€/kg]
Hybrid	100-150kg	2-4 [€/kg]

Tab. 34: Strompreise in Deutschland nach [77 S. 39]

Jahr	2005	2007	2009	2011	2012
Industrie [€/MWh]	86	104	103	126	124
Haushalte [€/MWh]	187	205	231	251	258

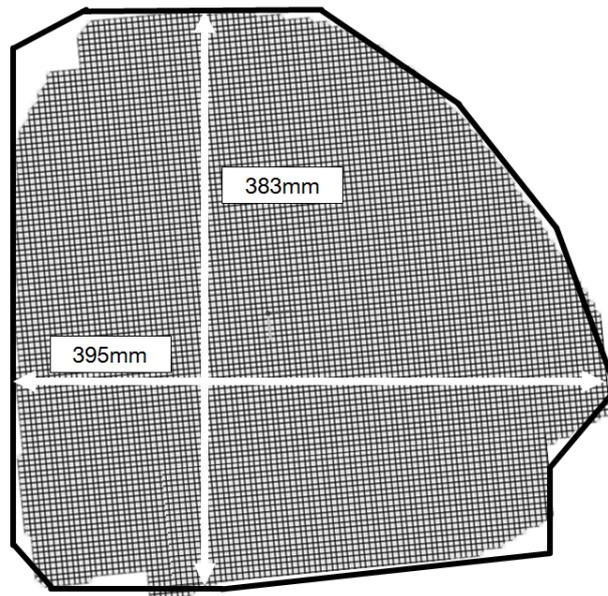


Abb. 99: Geometrieabwicklung aus kinematischer Drapier-Simulation und Vereinfachung durch Geradenzug

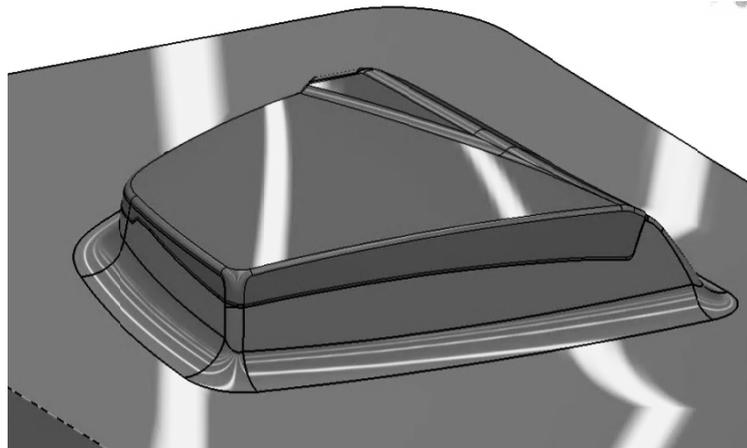


Abb. 100: Bauteil, Beschnittlinie und Auslaufflächen der Drapierung

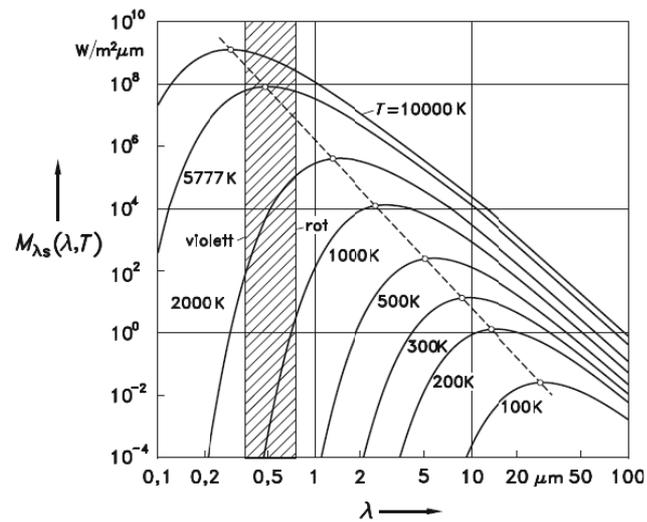


Abb. 101: spezifische Ausstrahlung (logarithmisch) des schwarzen Körpers in Abhängigkeit seiner Temperatur aus [95 S. 650], schraffierter Wellenlängenbereich entspricht sichtbarem Licht

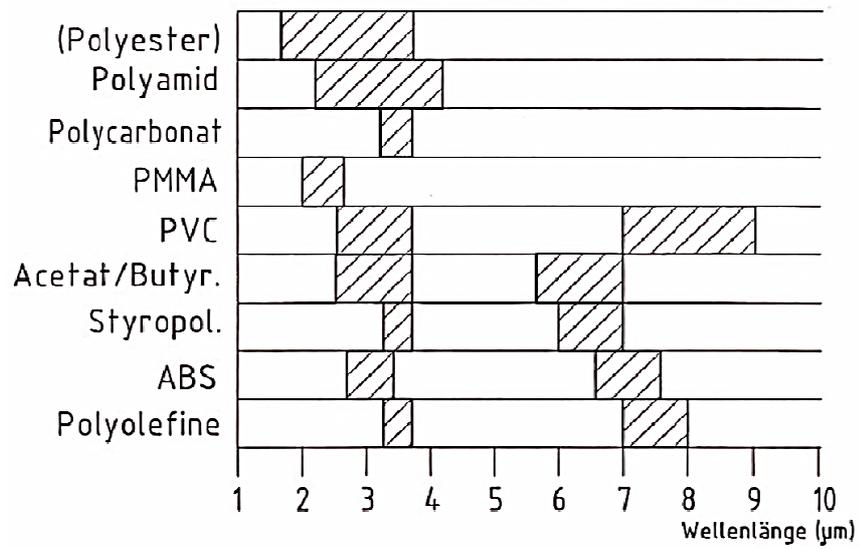


Abb. 102: wellenlängenabhängiger Absorptionsbereich verschiedener Thermoplaste aus [111]

Tab. 35: allgemeiner, voll-faktorieller (3x2x4)³ Versuchsplan zu 24 Experimenten, 3 Replikationen

Faktor 1	Faktor 2	Faktor 3	Repl 1	Repl 2	Repl 3
Diaphragma	Material 1	Zusatzrand 0mm			
		Zusatzrand 10mm			
		Zusatzrand 20mm			
		Zusatzrand 40mm			
	Material 2	Zusatzrand 0mm			
		Zusatzrand 10mm			
		Zusatzrand 20mm			
		Zusatzrand 40mm			
Doppeldiaphragma	Material 1	Zusatzrand 0mm			
		Zusatzrand 10mm			
		Zusatzrand 20mm			
		Zusatzrand 40mm			
	Material 2	Zusatzrand 0mm			
		Zusatzrand 10mm			
		Zusatzrand 20mm			
		Zusatzrand 40mm			
Pressformung	Material 1	Zusatzrand 0mm			
		Zusatzrand 10mm			
		Zusatzrand 20mm			
		Zusatzrand 40mm			
	Material 2	Zusatzrand 0mm			
		Zusatzrand 10mm			
		Zusatzrand 20mm			
		Zusatzrand 40mm			

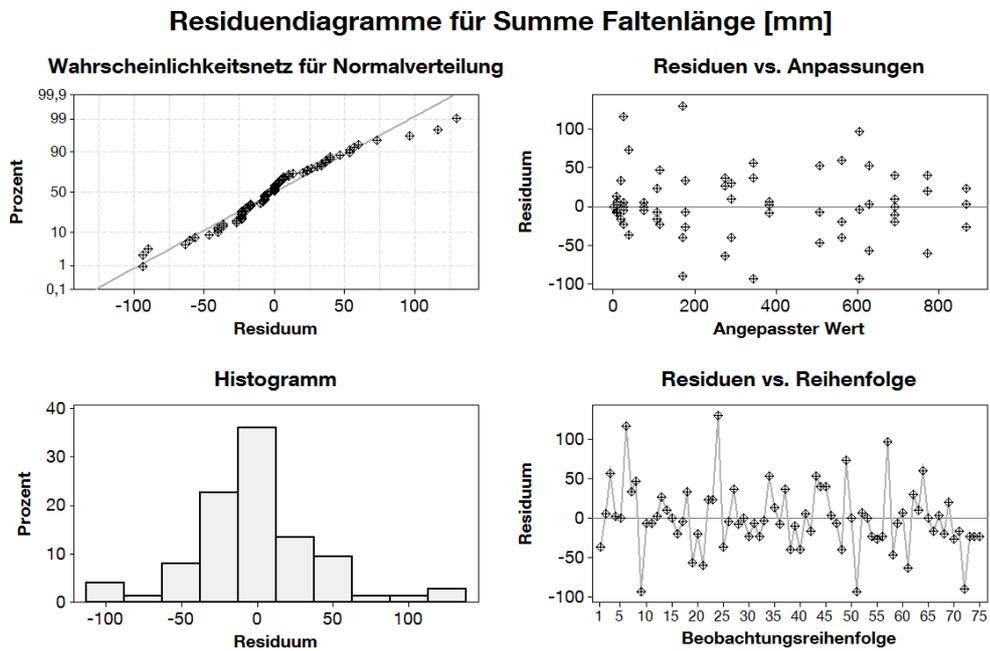


Abb. 103: Residuen der summierten Faltenlänge

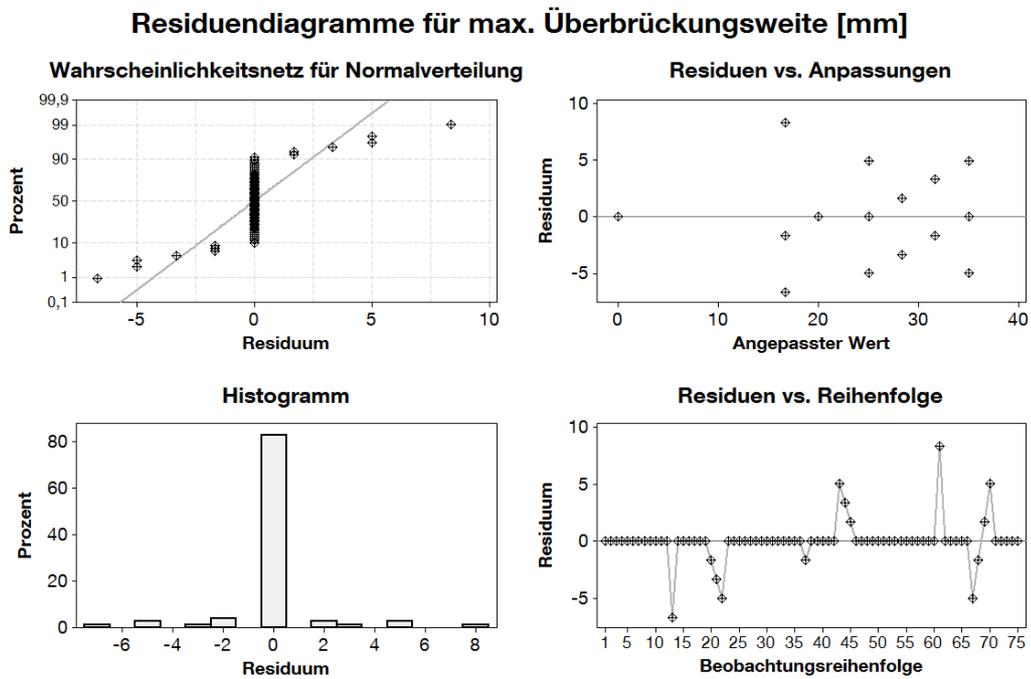


Abb. 104: Residuen der maximalen Überbrückungsweite

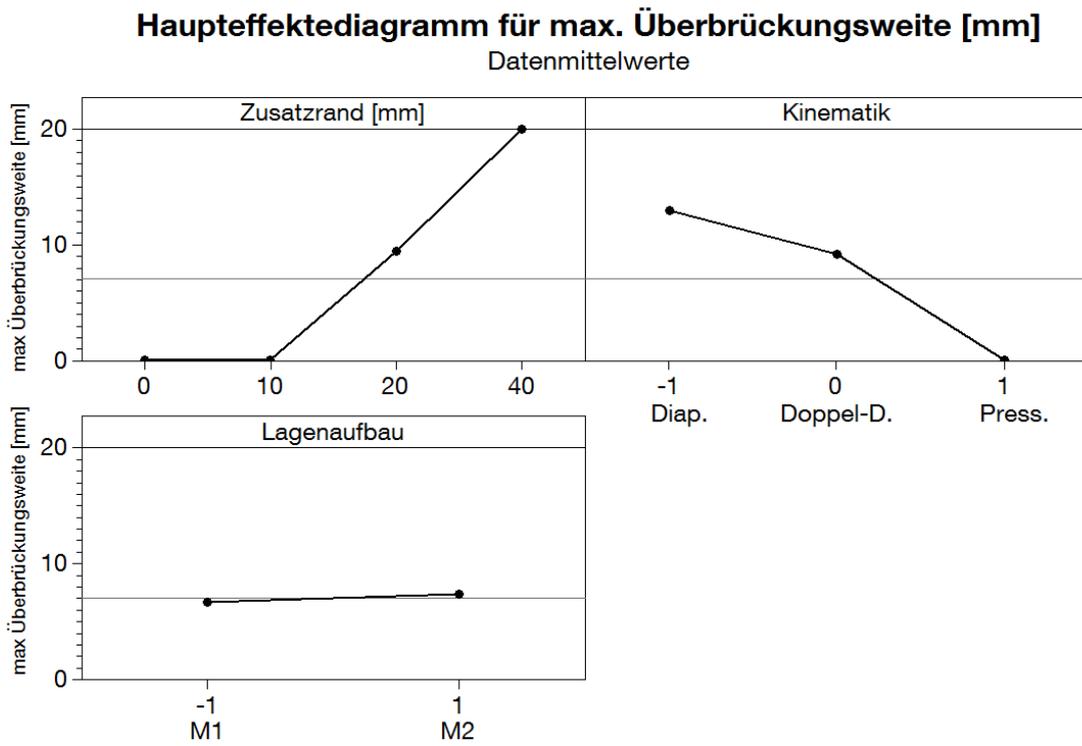


Abb. 105: Haupteffekte: Ausformung vs. Zusatzrand vs. Kinematik vs. Lagenaufbau

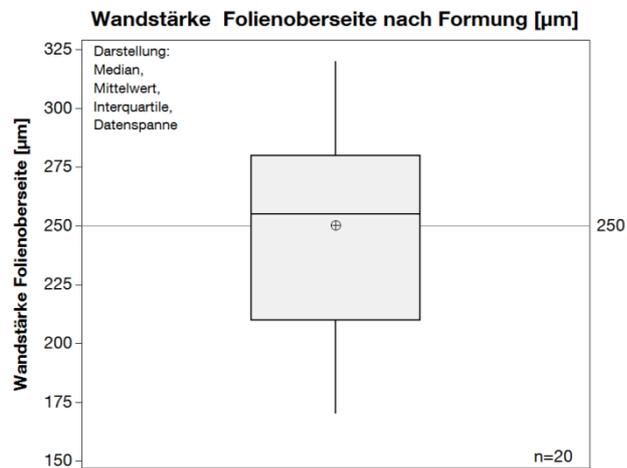
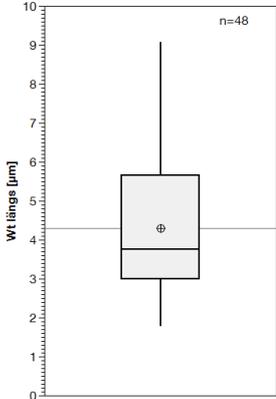
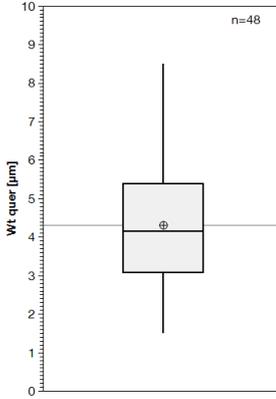
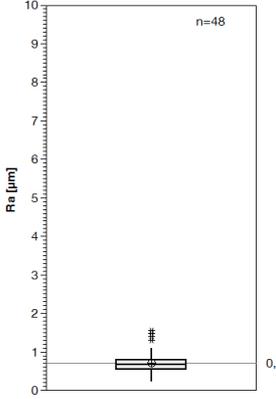


Abb. 106: Wandstärke der oberen Folie nach Formung zum generischen Demonstrators (Abb. 107)

Tab. 36: Gesamtdurchschnitt Welligkeit und Rauheit der Stichprobe

Art	Wt längs	Wt quer	Ra
Darstellung			
arith. Mittel	4,29 µm	4,31 µm	0,71 µm
Q1-Q3	2,99-5,65 µm	3,08-5,37 µm	0,53-0,79 µm
Median	3,76 µm	4,15 µm	0,67 µm
Min-Max	1,77-9,07 µm	1,49-8,51 µm	0,23-1,55 µm

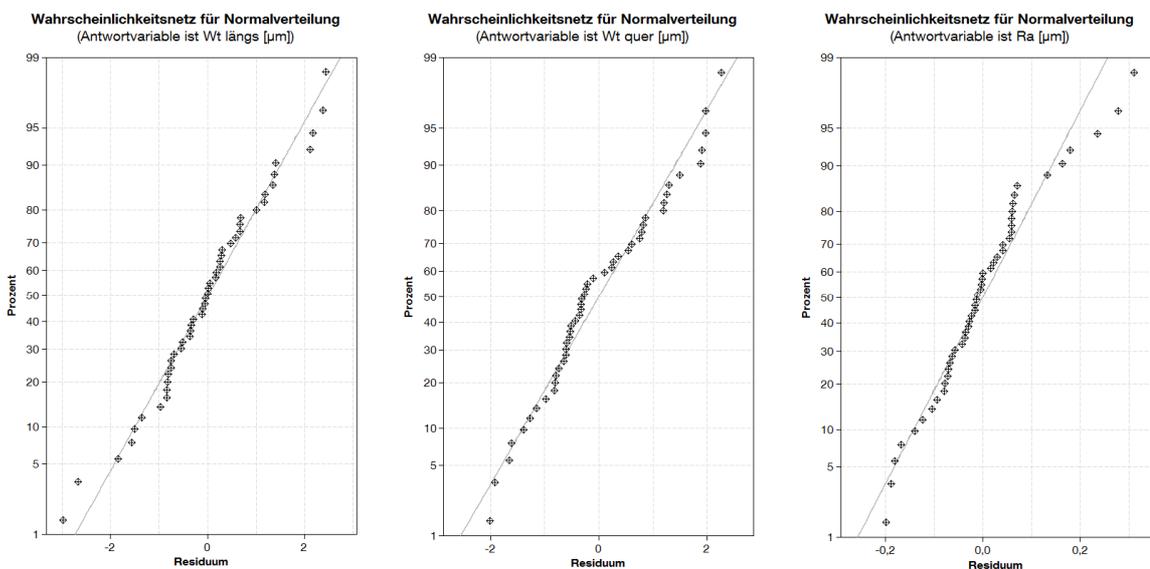


Abb. 108: Wahrscheinlichkeitsnetz für Normalverteilung der Beobachtungen zur Welligkeit und Rauheit

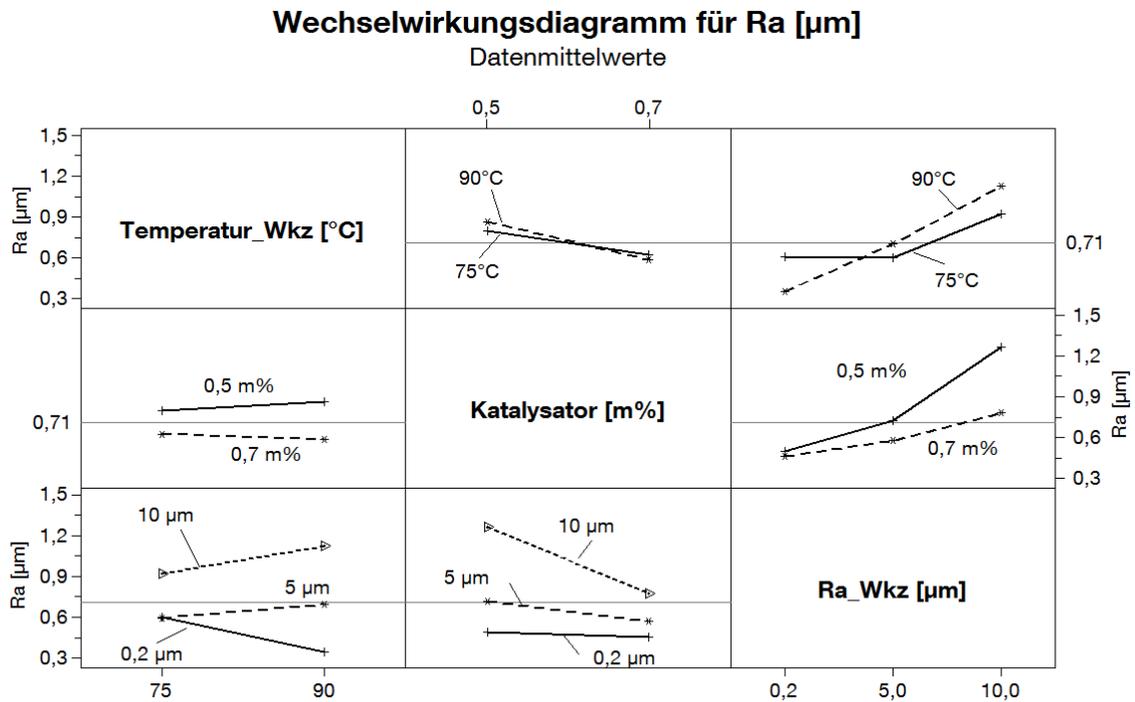


Abb. 109: Interaktion auf mittlere Rautiefe am Bauteil durch Werkzeugtemperatur, Katalysator und Werkzeugoberfläche

Tab. 37: Annahmen zum Modellfahrzeug der Bilanzierung

Angabe	Wert	Einheit
Karosseriefläche	8	m ²
Bauteilanzahl	11	St.
CO ₂ Pro MJ	137,9	g/MJ
Strompreis Industrie	0,025	€/MJ
Brennwert Kraftstoff	32,45	MJ/L
KFZ Lebensdauer	150000	Km
Treibstoffpreis	1,35	€/l
Fahrzeuggewicht	1379	Kg
Spez. CO ₂ -Ausstoß	0,093	g/(kg*km)

Tab. 38: Annahmen der Bilanzierung zu Stahl

Angabe	Wert	Einheit
Kosten pro Kg	0,8	€/Kg
Bauteilstärke Stahl	0,85	mm
Dichte Stahl	7,8	g/cm ³

Verschnitt	40	%
Lackschichtdicke	100	µm
Dichte Lack	1,4	g/cm ³
Lackkosten pro kg	6	€/Kg
Lacküberschuss	15	%
Anzahl Lackschichten	4	1

Tab. 39: Annahmen der Bilanzierung zu Aluminium

Angabe	Wert	Einheit
Kosten pro Kg	2,65	€/Kg
Bauteilstärke Alu	1,18	mm
Dichte Alu	2,7	g/cm ³
Habzeugverschnitt	40	%
Lackschichtdicke	100	µm
Dichte Lack:	1,4	g/cm ³
Lackkosten pro kg	6	€/Kg
Lacküberschuss	15	%
Bauteil-Verschnitt	25	%
Anteil Primäraluminium	20	%
Preisfaktor Primär- zu Sekunderal.	0,9	1
Anzahl Lackschichten	4	1

Tab. 40: Annahmen der Bilanzierung zu C-Faserverbundbauteil nach dem RTM-Verfahren

Angabe	Wert	Einheit
Faservolumengehalt	45	%
Bauteilstärke CFK	1,4	mm
Dichte Faser	1,77	g/cm ³
Dichte Matrix	1,15	g/cm ³
Trockenfaser-Verschnitt	30	%
Matrixverlust über Prozessierung	10	%
Kosten Faserhalbzeug	22	€/kg
Kosten Matrix	4,7	€/kg
Lackschichtstärke	171	µm
Bauteil-Beschnitt	10	%
Anzahl Lackschichten	4	1
Anzahl Schleif-/ Füllervorgänge	2	1
Lacküberschuss	65	%

Tab. 41: Annahmen der Bilanzierung zum folienintegrierten Verbundbauteil mit 0,4mm Folienverbund

Angabe	Wert	Einheit
Mittlere Folienstärke nach Umformen	0,28	mm
Dichte Folienaufbau	1,15	g/cm ³
Halbzeug-Verschnitt	30	%
Lackschichtdicke	44	µm
Kosten Folie	33,61	€/kg
Bauteil-Verschnitt	20	%
Kosten Folie	12	€/qm
Anzahl Lackschichten	1	1
Anzahl Schleifvorgänge	1	1

Tab. 42: Annahmen der Bilanzierung zur Verbundverarbeitung

Angabe	Wert	Einheit
Durchschnittliche Bauteilfläche	0,72	m ²
Zykluszeit RTM	4,5	min
Zykluszeit folienintegriertes RTM	4	min
Arbeitstage	220	d/a
Laufzeit	7	a
Ausschuss	8	%
Produktion Außenhäute/d RTM	232	St.
Produktion Außenhäute/d Folieninteg.-RTM	261	St.
Personalkosten/d (3 Schicht) pro 1 Arbeitsplatz	1075	€/(d*Pers.)
Stückzahl pro Jahr RTM	51040	St.
Stückzahl pro Jahr Folieninteg.-RTM	57420	St.
Stückzahl über Laufzeit RTM	357280	St.
Stückzahl über Laufzeit Folieninteg.-RTM	401940	St.
Investitionskosten / Anlage RTM/ Folieninteg.	3682600,00	€
Pauschalzuschlag Nebenkosten	1,50	1
Investitionskosten Produktionstechnik RTM-Bauteile/ FZG	40508604,00	€

Tab. 43: Annahmen der Bilanzierung zur Metallverarbeitung

Angabe	Wert	Einheit
Durchschnittliche Bauteilfläche	0,72	m ²
Zykluszeit Alu	0,32	min
Zykluszeit Stahl	0,18	min
Arbeitstage	220,00	d/Jahr
Laufzeit	7,00	Jahre
Arbeitszeit/d	1260,00	min
Auslastung	90,00	%

Verfügbarkeit	1134,00	min
Ausschuss	2,00	%
Produktion Außenhäute/d Alu	3473,00	St.
Produktion Außenhäute/d Stahl	6174,00	St
Stückzahl pro Jahr Stahl	1358280,00	St.
Stückzahl pro Jahr Alu	764060,00	St.
Stückzahl aller Bauteile über Laufzeit Alu	5348420,00	St.
Stückzahl aller Bauteile über Laufzeit Stahl	9507960,00	St.
Investitionskosten/ Fzg	6359850,00	€

Tab. 44: Annahmen der Bilanzierung Rohstoffkosten für Fzg-Außenhaut (8m²)

	Stahl	Kg/Fzg	€/Fzg	Al	Kg/Fzg	€/Fzg	RTM	Kg/Fzg	€/Fzg	Folienintegr.	RTM	Kg/Fzg	€/Fzg
Material (kg, €)	Stahl	88,4	70,72	Al	43,26	105,48	Harzsystem	8,74	41,10	Harzsystem	8,74	41,10	
	Lack	1,31	7,90	Lack	1,31	7,90	Fasehalbzeug	14,16	311,52	Fasehalbzeug	14,16	311,52	
							Lack	5,47	32,832	Folie 0,4mm	8,17	299,52	
							Bindemittel	-	-	Lack	1,14	24,99	
Summe:		89,71	78,62		44,58	113,39		28,37	385,45		32,22	677,14	

Tab. 45: Annahmen der Bilanzierung Produktionskosten für Fzg-Außenhaut 8m²

Produktionskosten/8m ²	Stahl [€/8m ²]	Al [€/8m ²]	RTM [€/8m ²]	Folienintegr. [€/8m ²]
Personalkosten	10,7	19,1	407,8	280,9
Energiekosten Bauteil	9,0	4,4	7,9	8,4
Lackierung	68,5	68,5	68,5	17,1
Schleifen/ Füllern	0,0	0,0	480,0	120,0
Energiekosten Lackierung	22,1	23,2	31,5	6,7
Abschreibung Produktionsanlagen	7,4	13,1	113,4	100,80
Summe [€]	117,70	128,3	1109,1	533,90

B. Literaturverzeichnis

1. **Bundesministerium für Bildung und Forschung.** *Bundesbericht Forschung und Innovation.* Berlin : W. Bertelsmann Verlag GmbH & Co.KG, 2012.
2. **Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS).** *DIE MOBILITÄTS- UND KRAFTSTOFFSTRATEGIE DER BUNDESREGIERUNG (MKS).* Berlin : abcdruck GmbH Heidelberg, 06/2013.
3. **Heuss, R. et al.** *LIGHTWEIGHT, HEAVY IMPACT.* Berlin : McKinsey&Company, 2012.
4. **Lässig R. et alii.** *SERIENPRODUKTION VON HOCHFESTEN FASERVERBUNDBAUTEILEN.* s.l. : Roland Berger Strategy Consultants, Nov. 2012.
5. **Biermann, D., Hufenbach, W. und Seliger, G.** *SERIENTAUGLICHE BEARBEITUNG UND HANDHABUNG MODERNER FASERVERSTÄRKTER HOCHLEISTUNGSWERKSTOFFE.* Dresden : Technische Universität Dresden, 2008. Untersuchungsbericht zum Forschungs- und Handlungsbedarf.
6. *WO LIEGT DER BEDARF FÜR CFK IM AUTOMOBILBAU?* **Timm, H.** Neckarsulm : CCeV_Automotive Forum (24.06.2010), 2010.
7. **Häffelin und Zaremba.** *Verfahren zum Herstellen eines Bauteils aus einem Faserverbundwerkstoff, Vorformling dafür sowie Bauteil.* DE102010031886A1 Deutschland, 21. Juli 2011. Verfahren und Bauteil.
8. **Häffelin, Zacherle und Zaremba.** *Thermoplastische Multimaterialfolie.* DE 102011122233 A1 Deutschland, 23. Dezember 2011. Verfahren und Bauteil.
9. **Häffelin et alii.** *Folienintegrierter RTM-Prozess (resin transfer molding) für endlosfaserversträrkte Schalenbauteile (Film-RTM).* München : VDI-Verlag GmbH, 2014. ISBN 978-3-18-375405-2.
10. **Michaeli, W.** *Einführung in die Kunststoffverarbeitung.* [Hrsg.] Treindl, Laaber Immel. München : Carl Hanser Verlag München Wien, 2006. ISBN-10: 3-446-4058-1.

11. **Baur et al.** *Saechtling Kunststoff Taschenbuch*. Frankfurt am Main : Hanser Verlag, 2007. ISBN 978-3-446-40352-9.
12. **Flemming, Ziegmann, Roth.** *Faserverbundbauweisen*. Berlin : Springer Verlag, 1996. ISBN 3-540-60616-5.
13. **S. Advani und K. Hsiao.** *MANUFACTURING TECHNIQUES FOR POLYMER MATRIX COMPOSITES (PMCS)*. Camebridge, UK : Woodhead Publishing Limited, 2012. ISBN 978-0-85709-067-6.
14. **Reuter, W.** *HOCHLEISTUNGS-FASER-KUNSTSTOFF-VERBUNDE MIT CLASS-A-OBERFLÄCHENQUALITÄT FÜR DEN EINSATZ IN DER FAHRZEUGAUßENHAUT*. Kaiserslautern : Institut für Verbundwerkstoffe GmbH, 2001. ISBN-3-934930-15-8.
15. **Gereke et al.** EXPERIMENTAL AND COMPUTATIONAL COMPOSITE TEXTILE REINFORCEMENT FORMING: A REVIEW. *Composites: Part A*. Volume 46, 2013, Bde. Page 1-10.
16. **Galliot, C. und Luchsinger, R.** THE SHEAR RAMP: A NEW TEST METHOD FOR THE INVESTIGATION OF COATED FABRIC SHEAR BEHAVIOUR - PART1: Theory. *Composites: Part A*. Volume 41, 2010, Bd. Issue 12, P. 1743-1749.
17. **Lomov, S. et al.** CARBON COMPOSITES BASED ON MULTIAXIAL MULTIPLY STICED PREFORMS: PART 3: BIAXIAL TENSION, PICTURE FRAME AND COMPRESSION TESTS OF THE PREFORMS. *Composites: Part A*. Volume 36, 2005, Bd. Issue 9, P. 1188-1206.
18. **Cornelissen, B. et al.** DRY FRICTION CHARACTERISATION OF CARBON FIBER TOW AND SATIN WEAVE FABRIC FOR COMPOSITE APPLICATIONS. *Composites: Part A*. Volume 56, 2014, Bde. P. 127-135.
19. **Lomov, S. et al.** CARBON COMPOSITES BASED ON MULTIAXIAL MULTIPLY STICED PREFORMS. PART 2. KES-F CHARACTERISATION OF THE DEFORMABILITY OF THE PREFORMS AT LOW LOADS. *Composites: Part A*. Volume 34, 2003, Bd. Issue 4, P. 359-370.

-
20. **Flemming, T. et al.** *Verfahren zur Herstellung eines Kunststoffformteils.* DE 19922799A1 Bayrische Motoren Werke AG München, 18. 05 1999. Verfahrenspatent.
21. **Ebert, C. et al.** *Drapier- und Formpresswerkzeug und Verfahren zur Herstellung einer Preform und eines Faserkunststoffverbundbauteils.* DE 102011116119A1 Daimler AG Stuttgart, 15. 10 2011.
22. **Graf, M.** *METHOD AND DEVICE FOR PRODUCING A THREE-DIMENSIONAL PREFORM FROM A LAID FIBER FABRIC IN THE COURSE OF THE PRODUCTION OF FIBER-REINFORCED MOLDED PARTS.* WO 2013/107848 A2 Dieffenbacher GmbH Eppingen, 18. 01 2013.
23. **Astigarraga, E. et al.** *DEVICE FOR THE PREPARATION OF PREFORMS OF CARBON FIBER-REINFORCED COMPONENTS.* EP 2511080A1 FUNDACION TECNALIA RESEARCH & INNOVATION (ES), 12. 04 2011.
24. **Hubert, P.** *ASPECTS OF FLOW AND COMPACTION OF LAMINATED COMPOSITE SHAPES DURING CURE.* Vancouver, Canada : UNIVERSITY OF BRITISH COLUMBIA, Department of Metals and Material Engineering, 1996.
25. **Chang, Chih-Yuan et al.** EFFECT OF PROCESS VARIABLES ON THE QUALITY OF COMPRESSION RESIN TRANSFER MOLDING. *Journal of Reinforced Plastics & Composites.* Vol. 25, 2006, Bd. 10, S. 1027-1037.
26. **Buntain, M.J. und Bickerton, S.** MODELING FORCES GENERATED WITHIN RIGID LIQUID COMPOSITE MOLDING TOOLS PART A: EXPERIMENTAL STUDY. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing.* Volume 38, 2007, Bd. Issue 7, S. 1729-1741.
27. **Wen-Bin, Young.** A TWO-LAYER MODEL FOR THE SIMULATION OF THE VARTM PROCESS WITH RESIN DISTRIBUTION LAYER. *Applied Composite Materials.* Volume 20, 2013, Bd. Issue 6, Seite 1305-1320.

-
28. **Leclerc, J. und Ruiz, E.** POROSITY REDUCTION USING OPTIMIZED FLOW VELOCITY IN RESIN TRANSFER MOULDING. *Composites: Part A*. Volume 39, 2008, p. 1859-1868.
29. **Ruiz et al.** OPTIMIZATION OF INJECTION FLOW RATE TO MINIMIZE MICRO/MACRO-VOID FORMATION IN RESIN TRANSFER MOLDED COMPOISTES. *Composites Science and Technology*. Volume 66, 2006, Bde. Issue 3-4^, Seite 475-486.
30. **Leclerc, J. und Ruiz, E.** POROSITY REDUCTION USING OPTIMIZED FLOW VOLOCITY IN RESIN TRANSFER MOLDING. *Composites Part A*. Volume 39, 2008, Bd. Issue 12, Seite 1859-1868.
31. **Gourichon, B., Binetruy, C. und Krawczak, P.** EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF HIGH FIBER TOW COUNT FABRIC UNSATURATION DURING RTM. *Composties Science and Technology* . Volume 66, 2006, p. 976-982.
32. **Li, Jing et al.** STATISTICAL CHARACTERIZATION AND ROBUST DESIGN OF RTM PROCESSES. *Composites: Part A*. Volume 36, 2005, Bd. Issue 5, p. 564-580.
33. **Devillard, M. et al.** FLOW SENING AND CONTROL STRATEGIES TO ADRESS RACE-TRACKING DISTURBANCES IN RESIN TRANSFER MOULDING - PART II: AUTOMATION AND VALIDATION. *Composites: Part A*. Volume 36, 2005, p. 1581-1589.
34. **Nielsen, D. und Pitchumani, R.** CONTROL FLOW IN RESIN TRANSFER MOLDING WITH REAL-TIME PREFORM PERMEABILITY ESTIMATION. *pOLYMER cOMPOSITES*. Volume 23, 2004, Bd. Issue 6, p. 1087-1110.
35. **Johnson, R.J. und Pitchumani, R.** ENHANCEMENT OF FLOW IN VARTM USING LOCALIZED INDUCTION HEATING. *Composites Science and Technology*. Volume 63, 2003, Bd. Issue 15, p 2201-2215.
36. **Deutsches Institut für Normung e.V.** *FERTIGUNGSVERFAHREN*. Berlin : Beuth Verlag GmbH, 2003. DIN 8580:2003-09.
37. **Schubel et al.** CHARACTERISATION OF THERMOSET LANIATES FOR COSMETIC AUTOMOTIVE APPLICATIONS: PART I

- SURFACE CHARACTERISATION. *Composites Part A*. Volume 37, 2006, Bd. Issue 10, Seite 1734-1746.
38. **Bayrisches Landesamt für Umwelt.** *KLIMA SCHÜTZEN - KOSTEN SENKEN, ENERGIEEINSPARUNG IN LACKIERBETRIEBEN - LANGFASSUNG*. Augsburg : Bayrisches Landesamt für Umwelt, 2006.
39. **Hoppe, T.** *BEARBEITUNGS- UND LACKIERKONZEPT FÜR CFK - AUTOMOBILBAUTEILE IM SICHTBEREICH*. Appenweier : Weiss Automotive GmbH, 2012.
40. **MARCO CHEMICALS INC.** *IMPROVEMENTS IN OR RELATING TO METHOD OF PRODUCING FIBER-REINFORCED RESINOUS PARTS AND THE PRODUCT RESULTING THEREFROM*. GB00000654925A GB, 31. 05 1946. Verfahrenspatent.
41. **Lin, Huei-Jeng et al.** DISCUSSION ON THE CAUSE OF PRINT-THROUGH PHENOMENON OF FRP AND SEVERAL IMPROVEMENT METHODS. *Journal of Composite Materials*. Volume 44, 2010, Bde. Seite 2111-2126.
42. **Becke, J.** *MOULDING CARBON FIBER REINFORCED THERMOPLASTIC COMPONENTS WITH A PAINTED FINISH*. DE000019755111A1 Wolfsburg, 11. 12 1997. Verfahrenspatent.
43. **Cobbedick, D. et. al.** *IN-MOLD COATING WITH EPOXY ACRYLATE AND OH OR AMIDE-CONTAINING MONOMER*. US005391399 U.S., 09. 06 1994. Verfahrenspatent.
44. **Mattke, A.** *VERFAHREN UND ABLAGE ZUR HERSTELLUNG VON FORMTEILEN MIT VEREDELTER SICHTFLÄCHE AUS FASERVERBUNDWERKSTOFFEN*. DE102008009438A1 Deutschland, Berlin, 14. 02 2008. Verfahrenspatent.
45. **Stanley, J. und Reddish, W.** *IMPROVEMENTS IN AND RELATING TO COATING PROCESSES*. GB000000823706A GB, 29. 03 1956. Verfahrenspatent.
46. **Braess, H. und Seiffert, U.** *Vieweg Handbuch Kraftfahrzeugtechnik*. Braunschweig : Springer Vieweg, 2013. ISBN 978-3-658-01690-6.
47. **MatWeb LLC.** MatWeb.com. *MATERIAL PROPERTY DATA*. [Online] 01. April 2014. <http://www.matweb.com>.

-
48. **Schwarzmann, P.** *THERMOFORMEN IN DER PRAXIS*. München : Carl-Hanser-Verlag, 2008. ISBN 978-3-446-70794-7.
49. **Wirtsch und al., et.** UNTERSUCHUNGEN ZUR EIGNUNG HEIßGEPRÄGTER FOLIEN FÜR DIE INTEGRATION VON ANTENNEN IN AUTOMOTIVE-EXTERIEURBAUTEILEN. *Journal of Plastics Technology*. 05/2009, 2009.
50. **VDI-Gesellschaft Entwicklung Konstruktion Vertrieb.** *METHODIK ZUM ENTWICKELN UND KONSTRUIEREN TECHNISCHER SYSTEME UND PRODUKTE*. Düsseldorf : Beuth Verlag GmbH, Mai 1993. VDI 2221.
51. **Koltze, K. und Souchkov, V.** *SYSTEMATISCHE INNOVATION; TRIZ-ANWENDUNG IN DER PRODUKT- UND PROZESSENTWICKLUNG*. München : Karl Hanser Verlag, 2010. ISBN: 978-3-446-42132-5.
52. **Altschuller, G.S.** *ERFINDEN - WEGE ZUR LÖSUNG TECHNISCHER PROBLEME*. Berlin : VEB Verlag Technik Berlin, 1984 (Nachdruck 1998). ISBN 3-00-002700-9.
53. **Normenausschuss Kunststoffe (FNK) im DIN.** *KUNSTSTOFFE - DYNAMISCHE DIFFERENZ-THERMOANALYSE (DSC) - TEIL1: ALLGEMEINE GRUNDLAGEN*. Berlin : Deutsches Institut für Normung, 2010. DIN EN ISO 11357-1:1997-11.
54. **Deutsches Institut für Normung e.V.** *DYNAMISCHE DIFFERENZ-THERMOANALYSE (DSC): TEIL2: BESTIMMUNG DER GLASÜBERGANGSTEMPERATUR UND DER GLASÜBERGANGSSTUFEN*. Berlin : Beuth Verlag GmbH, 2013. DIN EN ISO 11357-2.
55. **Normenstelle Luftfahrt (NL) im DIN.** *PRÜFUNG VON REAKTIONSHARZSYSTEMEN MIT UND OHNE VERSTÄRKUNG DSC VERFAHREN*. Berlin : Deutsches Institut für Normung, 1999. DIN 65467.
56. **Dykeman, D.** *MINIMIZING UNCERTAINTY IN CURE MODELING FOR COMPOSITES MANUFACTURING*. Vancouver : University of British Columbia, 2008.

57. **Wacker, M., Trawiel, P. und Ehrenstein, G.** *HÄRTUNG VON REAKTIONSHARZEN TIME-TEMPERATURE-TRANSITION-DIAGRAMM*. Am Weichselgarten 9, D-91058 Erlangen-Tennenlohe : Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Lehrstuhl für Kunststofftechnik, 2002. www.lkt.uni-erlangen.de.
58. **Deutsches Institut für Normung e.V.** *KUNSTSTOFFE - BESTIMMUNG DYNAMISCH-MECHANISCHER EIGENSCHAFTEN - TEIL 5: BIEGESCHWINGUNG - ERZWUNGENE SCHWINGUNGEN*. Berlin : Beuth Verlag GmbH, 1996. ISO 6721-5:1996-05 A3.
59. —. *LUFT- UND RAUMFAHRT - FASERVERSTÄRKTE KUNSTSTOFFE - BESTIMMUNG DES GLASÜBERGANGS VON FASERVERBUNDKUNSTSTOFFEN UNTER DYNAMISCHER BELASTUNG*. Berlin : Beuth Verlag GmbH, 1999. DIN 65583:1999-04.
60. —. *LUFT- UND RAUMFAHRT - FASERVERSTÄRKTE KUNSTSTOFFE - BESTIMMUNG DES GLASÜBERGANGS VON FASERVERBUNDKUNSTSTOFFEN UNTER DYNAMISCHER BELASTUNG*. Berlin : Beuth Verlag GmbH, 1999. DIN 65583:1999-04.
61. —. *BESTIMMUNG DER ZUGEIGENSCHAFTEN TEIL 4: PRÜFBEDINGUNGEN FÜR ISOTROP UND ANISOTROP FASERVERSTÄRKTE KUNSTSTOFFVERBUNDWERKSTOFFE*. Berlin : Beuth Verlag, 1997. DIN EN ISO 527-4.
62. **Normenausschuß Kunststoffe im DIN und Deutsches Institut für Normung e.V.** *BESTIMMUNG DER BIEGEEIGENSCHAFTEN*. Berlin : Beuth Verlag, 1998. DIN EN ISO 14125:1998-06.
63. **Deutsches Institut für Normung e.V.** *KLEBSTOFFE - BESTIMMUNG DES SCHÄLWIDERSTANDES VON KLEBUNGEN - ROLLENSCHÄLVERSUCH*. 10722 Berlin : Beuth Verlag GmbH, Juni 2010. DIN EN 1464:2010-06.
64. **Fankhauser, P.** *UNTERSUCHUNGSBERICHT DES TECHNISCHEN LABORS ZU ROLLENSCHÄLVERSUCHEN VON DIVERSEN AUFBAUTEN*. Wilhelm-Klepsch-Straße 1, A - 5721 Piesendorf : Senco Research & Development, 09:07:2013. UB-13-020.

-
65. **MINSKY, M.** *Microscopy apparatus. US000003013467A* USA, 19. 12 1961. Hauptklasse ICM.
66. **NanoFocus AG.** *Nanofocus μ Surf.* Oberhausen, Germany : NanoFocus AG Oberhausen, 2003.
67. **Deutsches Institut für Normung e.V.** *Gestaltsabweichung, Begriffe Ordnungssystem.* 1982. DK 62-408:001.4.
68. —. *Oberflächenbeschaffenheit: Tastschnittverfahren; Meßtechnische Eigenschaften von phasenkorrekten Filtern.* s.l. : Deutsches Institut für Normung e.V., 1998. DIN EN ISO 11562:1998-09.
69. —. Geometrische Produktspezifikation (GPS) Oberflächenbeschaffenheit: Tastschnittverfahren-Benennung, Definitionen und Kenngrößen der Oberflächenbeschaffenheit. *Deutsches Institut für Normung e.V.* 2010, 2010-07.
70. —. *KUNSTSTOFFE - BESTIMMUNG DER BESTÄNDIGKEIT GEGEN UMGEBUNGSBEDINGTE SPANNUNGSRISSBILDUNG (ESC) - TEIL 3: BIEGESTREIFENVERFAHREN(ISO 2208-3:2006); DEUTSCHE FASSUNG EN ISO 22088-3:2006.* 10772 Berlin : Beuth Verlag GmbH, November 2006. DIN EN ISO 22088-3.
71. —. *KUNSTSTOFFE - BESTIMMUNG DER ZUGEIGENSCHAFTEN - TEIL "": PRÜFBEDINGUNGEN FÜR FORM- UND EXTRUSIONSMASSEN (ISO 527-2:2012); DEUTSCHE FASSUNG EN ISO 527-2:2012.* 10772 Berlin : Beuth Verlag GmbH, Juni 2012. DIN EN ISO 527-2.
72. **Van der Weeën, F.** ALGORITHMS FOR DRAPING FABRICS ON DOUBLY-CURVED SURFACES. *International Journal for Numerical Methods in Engineering.* Volume 31, 1991, Bd. Issue 7, p. 1415-1426.
73. **ABAQUS, Inc.** *ABAQUS, Shell Elements in ABAQUS/Explicit.* ABAQUS 6.11 Documentation : s.n., 2005. A2.9.
74. **Schweizer, P.** *SYSTEMATISCH LÖSUNGEN FINDEN.* Zürich : vdf Hochschulverlag an der ETH, 2008. ISBN 978-3-7281-3087-7.
75. **Lindemann, U.** *METHODISCHE ENTWICKLUNG TECHNISCHER PRODUKTE.* München : Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2009. ISBN 978-3-642-01422-2.

-
76. **Feldhusen, J. et al.** *GRUNDLAGEN TECHNISCHER SYSTEME UND DES METHODISCHEN VORGEHENS*. Magdeburg : Springer Berlin Heidelberg, 2011. ISBN 978-3-642-17305-9.
77. **Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie.** *ENERGIE IN DEUTSCHLAND, TRENDS UND HINTERGRÜNDE*. Berlin : Bonifatius GmbH, Paderborn, 2013.
78. **Tomforde und Eckstein.** *MOBILITÄT DER ZUKUNFT - DIE ROLLE DER KUNSTSTOFFE*. Würzburg : SKZ ConSem GmbH, 2011. Ausgabe November 2011/swo.
79. **Suzuki und Takahashi.** PREDICTION OF ENERGY INTENSITY OF CARBON FIBER REINFORCED PLASTICS FOR MASS-PRODUCED PASSENGER CARS. *Ninth Japan international SAMPE symposium*. 2005.
80. **Suzuki, Tetsuya und Takahashi, Jun.** *LCA OF LIGHTWEIGHT VEHICLES BY USING CFRP FOR MASS-PRODUCED VEHICLES*. Durban, South Africa : 15th international conference on composite materials, 2005.
81. **Ahmad T. Mayyas et al.** LIFE CYCLE ASSESSMENT-BASED SELECTION FOR A SUSTAINABLE LIGHTWEIGHT BODY-IN-WHITE. *ENERGY*. Volume 39, 2012, Bd. Issue 1, S. 412-425.
82. **Sullivan, J.L., Burnham, A. und Wang, M.** *ENERGY-CONSUMPTION AND CARBON-EMISSION ANALYSIS OF VEHICLE AND COMPONENT MANUFACTURING*. Chicago, U.S. : Center for Transportation Research, Energy Systems Division, Argonne National Laboratory, Sept. 2010. ANL/ESD/10-6.
83. **H. Mohsan et al.** AN EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF CLASS A SURFACE FINISH OF COMPOSITES MADE BY THE RESIN TRANSFER MOLDING PROCESS. *Composites Science and Technology*. Volume 67, 2007, Bde. Issue 15-16, Seite 3176-3186.
84. **Palardy, G. et al.** OPTIMIZATION OF RTM PROCESSING PARAMETERS FOR CLASS-A SURFACE FINISH. *Composites Part B*. Volume 39, 2008, Bde. Issue 7-8, Seite 1280-1286.

-
85. **Herring, M. et al.** THE EFFECT OF MATERIAL SELECTION AND MANUFACTURING PROCESS ON THE SURFACE FINISH OF CARBON FIBRE COMPOITES. *Journal of Material Processing Technology*. Volume 210, 2010, Bde. Issue 6-7, Seite 926-940.
86. **Palmer, S. und Hall, W.** SURFACE EVALUATION OF CARBON FIBER COMPOSITES USING WAVELET TXTURE ANALYSIS. *Composites Part B*. Volume 43, 2012, Bd. Issue 2, Seite 621-626.
87. **Hildebrandt, K., Schulte-Hubbart, F. und Mitschang, P.** INFLUENCE OF TEXTILE PARAMETERS AND LAMINATE BUILD-UP ON SURFACE QUALITY OF THERMOPLASTIC FIBER REINFORCED COMPOSITES. Kaiserslautern, Germany : 19th International conference on composite materials, 2013. ICCM 19 S.5114-5122.
88. **Yiqiang, Zhao und Schiraldi, D.** THERMAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF POLYHEDRAL OLIGOMERIC SILSESQUIOXANE (POSS9/POLYCARBONATE COMPOSITES. *Polymer*. Volume 46, 2005, Bd. Issue 15, S. 4167-4176.
89. **Nachtigall, W.** *Vorbild Natur*. Saarbrücken : Springer-Verlag Berlind Heidelberg NewYork, 1997. ISBN 3-540-63245.
90. **Ruggy, K. und Cox, B.** DEFORMATION MECHANISM OF DRY TEXTILE UNDER MIXED COMPRESSIVE AND SHEAR LOADING. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*. 23, 2004, Bde. p. 1425-1442.
91. **M. Koch et al.** *MECHANISCHE EIGENSCHAFTEN VON KUNSTSTOFFEN*. Ilmenau : TU Ilmenau, Institut für Werkstofftechnik, Fachgebiet Kunststofftechnik, 2011. GLW 19;WM XI.
92. **Fankhauser, P.** *UNTERSUCHUNGSBERICHT DES TECHNISCHEN LABORS ZUR CHEMIKALIENBESTÄNDIGKEIT VON SENOTOP C96 GEGENÜBER DEM HENKEL HARZSYSTEM (LOCTITE MAX 2-100 UND LOCTITE MAX 2-200)*. Wilhelm-Klepsch-Straße 1, A-5721 Piesendorf : Senco Research and Development GmbH, 2013. UB--13--006.
93. **Henkel HSA- Corporate Scientific Services, Oberflächenanalytik / Elektronenmikroskopie.** *INFO-REM; RASTERELEKTRONENMIKROSKOPISCHE*

QUERSCHNITTS-AUFNAHME VM IL C60C-12-007 PC/ABS IN ANBINDUNGSSCHICHT. Düsseldorf : Henkel AG & Co. KGaA, 09/2013.

94. **Krollmann, J.** *GRUNDLEGENDE MATERIALCHARAKTERISIERUNG VON FILM-RTM BAUTEILEN NACH MECHANISCHEN, ÖKOLOGISCHEN UND ÖKONOMISCHEN GESICHTSPUNKTEN IM HINBLICK AUF AUTOMOBILE EXTERIEURANWENDUNGEN.* München : Technische Universität München, Fakultät für Maschinenwesen, Abt. LCC, 2012. DA 2012-0017.

95. **Baehr, H. und Karl, S.** *WÄRME- UND STOFFÜBERTRAGUNG.* Stuttgart : Springer Vieweg, 2013. ISBN 978-3-642-36557-7.

96. **Normenausschuß Einheiten und Formelgrößen im DIN.** *TEMPERATURSTRAHLUNG VON VOLUMENSTRAHLERN.* Berlin : Beuth Verlag, 1991. DIN 5496.

97. **Leupin, A., Vetsch, H. und Kneubühl, F.** INVESTIGATION, COMPARISON AND IMPROVEMENT OF TECHNICAL INFRARED RADIATORS. *Infrared Physics.* Vol. 30, 1990, Bd. No. 3, S. 199-258.

98. **Krelus AG.** *Technisches Datenblatt KRELUS IR-Strahler G11-12 SM5.* CH-5036 Oberentfelden : Krelus AG, 2014. KRE 15243/010.

99. **Hartung, J. und Elpelt, B.** *MULTIVARIATE STATISTIK.* München : Oldenbourg Wissenschaftsverlag GmbH, 2007. ISBN 978-3-486-58234-5.

100. **Raffelt, Häffelin und Drechsler.** LOWER PRESSURE IN THE RTM-PROCESS. *Kunststoffe international.* 2014, Bd. Carl Hanser Verlag, 9/2014.

101. **Kessler, W.** *MULTIVARIATE DATENANALYSE FÜR DIE PHARMA-, BIO- UND PROZESSANALYTIK.* Reutlingen : Wiley-VCH Verlag GmbH, 2007. ISBN: 978-3-527-31262-7.

102. **Montgomery, D.** *DESIGN AND ANALYSIS OF EXPERIMENTS.* Danvers U.S.A. : John Wiley & Sons, Inc., 2009. ISBN: 978-0-470-39882-1.

103. **Kreis, W.** WEGE ZUR KAROSSERIEBESCHICHTUNG VON MORGEN. *ATZproduktion.* 02/2009.

-
104. *PROJEKT INFO MIR DH RTM PROZESS KOSTENABSCHÄTZUNG*. **Knoblich, F.** Garching : Voith Composites GmbH, 16.Nov.2011.
105. **Neitzel, M. und Mitschang, P.** *HANDBUCH VERBUNDWERKSTOFFE*. Kaiserslautern : Carl Hanser Verlag, 2004. ISBN 3-446-22041-0.
106. **Stiller, H.** Material Intensity of Advanced Composite Materials. Verbundwerkstofflabor Bremen e.V., 1999, Bd. NO. 90, S. 10.
107. **Landesagentur für Elektromobilität und Brennstoffzellentechnologie Baden-Württemberg.** *LEICHTBAU IN MOBILITÄT UND FERTIGUNG*. Stuttgart : Fraunhofer Informationszentrum, 2012.
108. **Geoff H., Craig J.** *INVENTORY OF CARBON & Energy*. UK : University of Bath, 2008.
109. **IVPU – Industrieverband.** *Ökobilanz von PUR-Hartschaum-Wärmedämmstoffen*. Stuttgart : Polyurethan-Hartschaum e.V., 2002. ISBN 3-932500-07-5.
110. **Senoplast Klepsch & Co. GmbH.** *TECHNISCHES DATENBLATT SENOTOP A50*. A-5721 Piesendorf : Senco Europe GmbH, 2009. A50.
111. **Jordi, H.** *MITTELWELIGE IR-STRAHLER FÜR DIE SCHNELLE UND SCHONENDE ERWÄRMUNG VON VERSCHIEDENEN PRODUKTEN*. CH-5036 Oberfelden : Krelus AG, 2013.
112. **Mineralölwirtschaftsverband e.V.** *MWV-Jahresbericht 2012 / Mineralöl-Zahlen*. Braunschweig : oeding print GmbH, 2012.
113. **E. Witten, B. Jahn.** *Composites-Marktbericht 2013*. s.l. : Carbon Composites, Industrievereinigung verstärkte Kunststoffe, 2013.
114. **Edgreen, Frederik und Leif, E.** APPROXIMATE ANALYTICAL CONSTITUTIVE MODEL FOR NON-CRIMP FABRIC COMPOSITES. *Composites: Part A*. Volume 36, 2005, Bd. Issue 2, Page 173-181.
115. **Flemming, M., Ziegmann, G. und Roth, S.** *FASERVERBUNDBAUWEISEN*. Berlin : Springer Verlag Berlin Heidelberg, 1995. ISBN 3-540-58645-8.

116. **Hourston et al.** MODULATED-TEMPERATURE DIFFERENTIAL SCANNING CALORIMETRY: 15. CROSSLINKING IN POLYURETHANE-POLY(ETHYL METHACRYLATE) INTERPENETRATING POLYMER NETWORKS. *Polymer*. Volume 40, 1999, Bd. Issue 17, p. 4769-4775.
117. **Normenausschuss Kunststoffe (FNK) im DIN.** *DYNAMISCHE DIFFERENZ-THERMOANALYSE (DSC): TEIL2: BESTIMMUNG DER GLASÜBERGANGSTEMPERATUR UND DER GLASÜBERGANGSSTUFEN*. Berlin : Deutsches Institut für Normung, 2013. DIN EN ISO 11357-2.
118. **D.J. Butler et al.** CONFOCAL PROFILOMETER WITH NANOMETRIC VERTICAL RESOLUTION. *Optics Communications*. Volume 100, 1992, Bde. Issues 1-4, S. 87-92.
119. **Ziere, M. Heide und Zierer, K.** *Eine multiperspektivische Analyse des Verkehrs zu Beginn des 21. Jahrhunderts*. [Hrsg.] Springer Fachmedien Wiesbaden. s.l. : VS Verlag für Sozialwissenschaften, 2010. Bd. 1. Auflage. ISBN 978-3-531-17705-2.
120. **Lienkamp, M.** *ELEKTROMOBILITÄT, HYPE ODER REVOLUTION*. München : Springer Vieweg Verlag, 2012. ISBN 978-3-642-28548-6.
121. **Bel, S. et al.** FINITE ELEMENT MODEL FOR NCF COMPOSITE REINFORCEMENT PREFORMING: IMPORTANCE OF INTER-PLY SLIDING. *Composites: Part A*. Volume 43, 2012, Bd. Issue 12, p. 2269-2277.
122. **Virto, L. und Naik, A.** FRICTIONAL BEHAVIOR OF TEXTILE FABRICS PARTI: SLIDING PHENOMENA OF FABRICS ON METALLIC AND POLYMERIC SOLID SURFACES. *Textile research Journal*. Volume 67, 1997, Bd. No. 11.
123. **Parton, H. und Ignaas, V.** IN SITU POLYMERIZATION OF THERMOPLASTIC COMPOSITES BASED ON CYCLIC OLIGOMERS. *Polymer Composites*. Volume 26, 2004, Bd. Issue 1, p.60-65.
124. **Gupta, N. und Srivastava, A.** INTERPENETRATING POLYMER NETWORKS: A REVIEW ON SYNTHESIS AND PROPERTIES. *Polymer International*. Volume 35, 1994, Bd. Issue 2, p. 109-118.

-
125. **Kelley, S. et al.** MULTIPHASE MATERIALS WITH LIGNIN. VIII. INTERPENETRATING POLYMER NETWORKS FROM POLYURETHANES AND POLYMETHYL METHACRYLATE. *Applied Polymer Science*. Volume 41, 1990, Bde. Issues 11-12, p. 2813-2828.
126. **Schindler J. und Held, M. .** *POSTFOSSILE MOBILITÄT*. 61348 Bad Homburg : Südost Verlags Service GmbH, 2009. ISBN 978-3-88864-422-1.
127. **Terninko J. et al.** *Systematic Innovation*. Florida, U.S. : CRC Press LLC, 1998. ISBN 1-57444-111-6.
128. **Van Rijswijk, K. et al.** TEXTILE FIBER-REINFORCED ANIONIC POLYAMIDE-6 COMPOSITES PART II: INVESTIGATION ON INTERFACIAL BOND FORMATION BY SHORT BEAM SHEAR. *Composites: Part A*. Volume 40, 2009, Bd. Issue 8, p. 1033-1043.