

Oberflächeneigenschaften endlosfaserverstärkter Thermo-plaste – Halbzeugmodifikation für den Einsatz im Sichtbereich

Referent: Dipl.-Ing. (FH) André Lück¹,
Prof. Dr.-Ing. Dietmar Drummer^{1,2},
Dr.-Ing. Leo Hoffmann¹,
¹Neue Materialien Fürth GmbH, Dr.-Mack-Straße 81, D-90762 Fürth
²Lehrstuhl für Kunststofftechnik, Universität Erlangen-Nürnberg, Am Wechselgarten 9, D-91058 Erlangen

Kurzfassung

Endlosfaserverstärkte Kunststoffe weisen aufgrund ihrer guten gewichtsspezifischen Eigenschaften, der Möglichkeit zur lastpfadgerechten Auslegung und der Funktionsintegration ein hohes Leichtbaupotential auf. Duroplastische Werkstoffverbunde mit modifizierten Harzsystemen bieten seit mehreren Jahren gute Oberflächenqualitäten, sind aber aufgrund der Reaktionszeiten der Harze für die Massenfertigung nur bedingt geeignet. Durch die Verwendung von thermoplastischen Matrices kann die Zykluszeit wegen der physikalisch basierten Verarbeitung verringert und die Stückzahlen deutlich erhöht werden. Die erzielbare Oberflächengüte dieses Werkstoffverbundes ist jedoch bedingt durch das stark unterschiedliche Verhalten beider Verbundpartner für eine anmutende Oberfläche unzureichend, so dass derzeit nur wenig neue Anwendungsfelder im Sichtbereich erschlossen werden. Durch Modifikation der thermoplastischen Matrix über Füllstoffe können die stark temperaturabhängigen Schwindungseigenschaften der polymerreichen Matrixzone außerhalb der textilen Verstärkung an das Verhalten der imprägnierten Faserbündel angepasst werden. Bei geeigneter Wahl von Partikelgröße, Mengenverhältnis und Ausdehnungsverhalten des Gemisches kann ein Filtereffekt des Textils genutzt und damit die lokalen Unterschiede angeglichen werden. Mit Hilfe eines Einheitszellenmodells wird eine theoretische Bewertung des Drei-Phasen-Systems geschaffen, um die notwendigen Volumenverhältnisse abschätzen zu können. Messungen der vorliegenden Werkstoffeigenschaften der Verbundpartner liefern charakteristische Kenngrößen als Berechnungsgrundlage. Über eine numerische Simulation kann die sich einstellende Oberflächengüte simuliert und in Abhängigkeit der Ausgangsmaterialien vorhergesagt werden. Reale Messungen der Oberflächengüte modifizierter Halbzeuge verifizieren die Technologie.

1 Einleitung und Motivation

Im Jahr 2013 wurde auf Initiative der Nationalen Plattform Elektromobilität das BMBF-Leuchtturmpunkt *FOREL* zur Entwicklung von Hightech-Leichtbau-Systemlösungen in Multi-Material-Design für E-Fahrzeuge der Zukunft eingerichtet. In einer 2015 durchgeföhrten Studie haben zwei Drittel der Befragten angegeben, dass die Anwendung von Werkstoffkombinationen zunehmen wird. Klar erkennbar sei es, dass es aus Sicht der Befragten nicht „den“ Werkstoff der Zukunft gäbe, sondern vielmehr eine Kombination unterschiedlicher Werkstoffe zum Einsatz kommen wird. Nach Einschätzung der Befragten steigt der Werkstoffeinsatz für strukturrelevante Leichtbauteile am deutlichsten bei faserverstärkten Thermoplasten [1].

Die grundlegende Entwicklungsaufgabe endlosfaserverstärkter Bauteile besteht demnach darin den konstruktiven und werkstofflichen Leichtbau voranzutreiben, um das Leichtbaupotential weiter zu erhöhen. Dies gelingt im Allgemeinen dadurch, dass durch geschickte Material- und Prozesskombination der Integrationsgrad erhöht und neue Funktionen in Faserverbundbauteile integriert werden. Die Einbindung elektrischer, optischer oder ästhetischer Eigenschaften bietet damit zusätzliches Potential zur Gewichtsreduktion (Abbildung 1). Im Bereich der Ästhetik stoßen Endlosfaserverbunde jedoch aufgrund der unterschiedlichen thermischen Eigenschaften der Verbundpartner derzeit auf Grenzen, so dass die äußere Gestalt vom Idealzustand deutlich abweicht. Fokus der vorliegenden Entwicklung ist es, diese Grenzen aufzubrechen, um weitere Anwendungsgebiete zu erschließen.

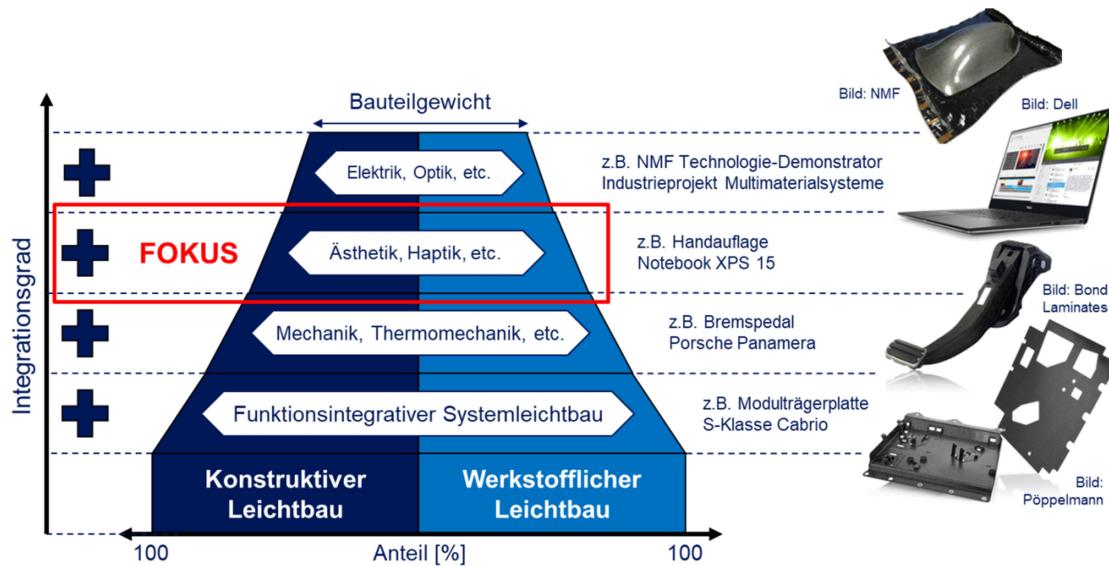


Abbildung 1: Optimierung des Leichtbaupotentials endlosfaserverstärkter thermoplastischer Faserverbundbauteile durch Erhöhung des Integrationsgrads

1.1 Problemstellung

Verbundwerkstoffe (VW) sind Werkstoffe, die aus zwei oder mehreren Komponenten (Phasen) bestehen, welche nicht ineinander löslich sind. Die Eigenschaften der einzelnen Phasen sind deutlich unterschiedlich, jedoch ist der Verbund makroskopisch gesehen quasihomogen [2]. Dabei ist der Verbund leistungsfähiger als die Einzelkomponenten selbst. Die Kombination von beiden Werkstoffen ermöglicht den Einsatz als hochbelastete Bauteile z.B. im Automobilbereich oder in der Luft- und Raumfahrt [3].

Das ursächliche Problem von Faserverbundkunststoffen (FVK) für ästhetische Anwendungen besteht in der Abzeichnung der textilen Struktur aufgrund des unterschiedlichen Werkstoffverhaltens beider Verbundpartner. Der sogenannte „Telegraphing Effekt“ (engl.: fiber print through phenomena – FPTP) tritt bei endlosglasfaserverstärkten thermoplastisch basierten Halbzeugen, sogenannten Organoblechen, immer auf und bezeichnet die regelmäßige Abzeichnung der textilen Struktur an der Oberfläche. Verursacht wird dieser Effekt durch das ungleiche Ausdehnungsverhalten von Faser und Matrix. Als Folge der stark temperaturabhängigen Matrixschwindung entstehen Einfallstellen, welche eine anmutende Oberflächengüte im Sichtbereich verhindern (Abbildung 2).

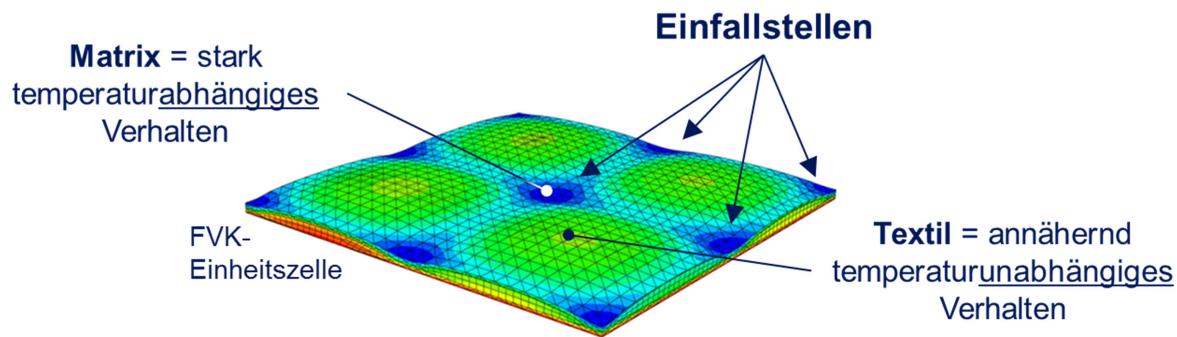


Abbildung 2: Abzeichnung der textilen Struktur aufgrund des unterschiedlichen Werkstoffverhaltens beider Verbundpartner am Beispiel einer FVK-Einheitszelle

1.2 Oberflächen thermoplastischer Faserverbunde

Die qualitative Charakterisierung einer Oberflächentopologie erfolgt normalerweise nach mehreren Kriterien: Glanz, Farbwahrnehmung, Rauheit, Topographie, Kratz-, Abrieb und Witterungsbeständigkeit, Haftung etc. Bei FVK mit Endlosverstärkung überwiegt jedoch aufgrund der textilen Topographie zunächst die Oberflächengeometrie, mit der sich Halbzeug und/oder Bauteil von seiner Umgebung trennt. Hildebrandt beschreibt das maximale Auflösungsvermögen des menschlichen Auges für Oberflächenstrukturen bei einem Betrachtungsabstand von 0,5 m mit einer minimalen Wellenlänge $\lambda_{\min} = 0,1\text{mm}$ [4]. Für die notwenige Charakterisierung der Rauigkeit und Welligkeit bei naher und ferner Betrachtung kann demnach eine Klassifizierung in kurzwellige und langwellige Bereiche vorgenommen werden ($0,1\text{ mm} < \lambda_{\text{kurz}} < 1\text{ mm} < \lambda_{\text{lang}} < 30\text{mm}$). Eine Spiegeloberfläche müsste demzufolge im Kurzwellenbereich noch unter dem genannten Wert liegen und eine Amplitude im unteren Mikrometerbereich besitzen.

Reale Werkstückoberflächen (Ist-Oberfläche) weichen von ihrer idealen Form (Soll-Oberfläche) ab. Nach DIN 4760:1982 bestehen unterschiedliche Formabweichungen, die in ihrer Gestalt jeweils unterschiedliche Oberflächen erzeugen [5]. Die betrachtete Organoblech-Oberfläche (Oberflächentextur) stellt das Primärprofil mit allen Abweichungen dar, die Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden. sich in Untergruppen einteilen lässt. Die Welligkeit wird als Abweichung 2. Ordnung beschrieben. Die periodisch von der Solloberfläche auftretende Abweichung wird bei Faserverbunden größtenteils auf die unterschiedliche Schwindung von Roving und Matrix zurückgeführt. Abbildung 3 stellt die Gestaltabweichungen in zweidimensionaler Form schematisch dar und stellt einen Bezug für den Anwendungsfall eines Organoblechs her.

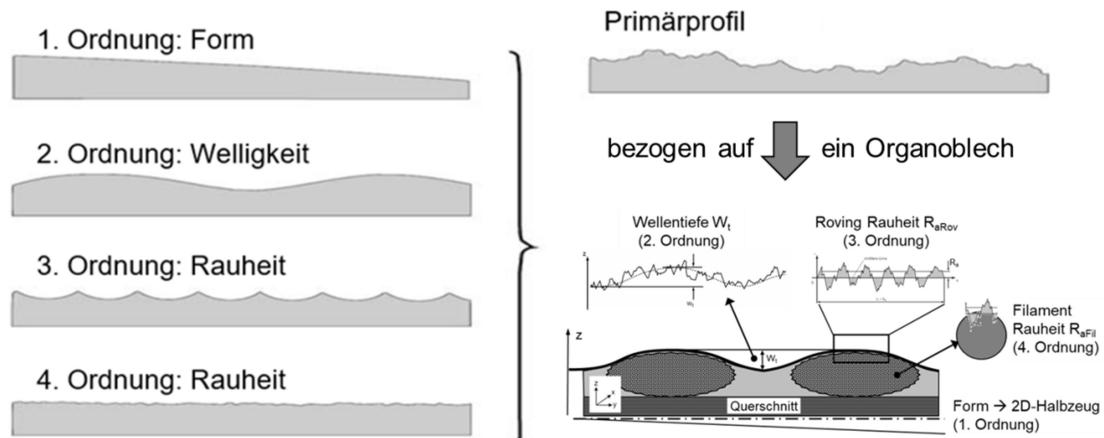


Abbildung 3: Schematische Darstellung der Gestaltabweichungen nach DIN 4760 und Bezug auf den Anwendungsfall eines thermoplastischen Endlosfaserverbundes

Ein gutes optisches Messinstrument zur Oberflächenbewertung stellt das konfokale Laser-Scanning-Mikroskop (LSM) dar. Während bei konventionellen Mikroskopen die Bilder von Oberflächen mit unterschiedlichem Höhenniveau häufig lokal unscharf werden, werden beim LSM durch die Anpassung der Fokuslage scharfe Bilder bei lateral hoher Auflösung ermöglicht. So wird die Oberfläche schichtweise erfasst und zu einem tiefenscharfen 3D-Oberflächenprofil zusammengefügt [6]. Abbildung 4 zeigt qualitativ und Tabelle 1 quantitativ die über LSM gemessene Oberfläche endlosfaserverstärkter Bauteile auf. Bei FVK-Strukturbauarten handelt es sich meist um teilkristallin basierte, axialverstärkte Grobgewebebestrukturen. Bei Sichtbauteilen aus FVK um amorph basierte, axialverstärkte Feingewebebestrukturen ohne (Mitte) und neuerdings mit Dekoration (rechts). Bei allen drei Verbundstrukturen ist die Abweichung zum unteren Grenzbereich ($\sim 1\mu\text{m}$) klar zu erkennen.

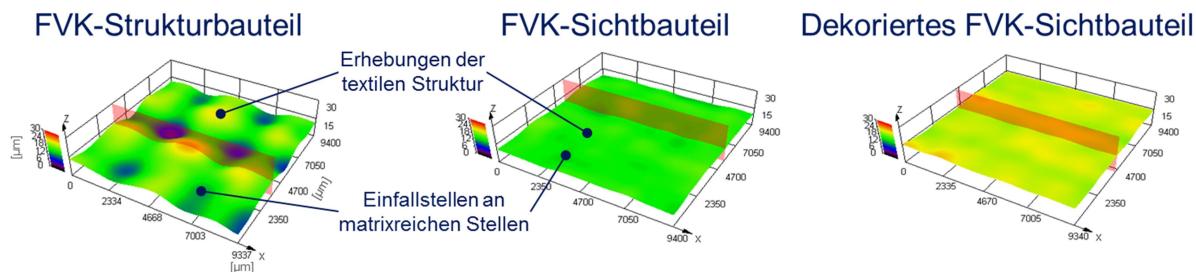


Abbildung 4: Qualitative Oberflächengüte endlosfaserverstärkter Bauteile

Tabelle 1: Quantitative Oberflächengüte endlosfaserverstärkter Bauteile

Oberflächengüte via LSM nach DIN EN ISO 25 178 Grenzwellenlänge $\lambda_c < 2,5\text{mm}$ und $\lambda_f > 8,0\text{mm}$			
Bauteil	FVK-Strukturbauteil	FVK-Sichtbauteil	Dekoriertes FVK-Sichtbauteil
Flächenwelligkeit $W_{Sz} [\mu\text{m}]$	20,872	6,712	5,783
Flächenrauheit $R_{Sa} [\mu\text{m}]$	3,518	0,871	0,838

1.3 Motivation

Die Abzeichnung der Faserstruktur soll behoben werden ohne dass andersartige Eigenschaften sich verschlechtern. Die Ursache für Faserabzeichnungen liegt in den unterschiedlichen Eigenschaften der Verbundpartner, vor allem in der starken Temperaturabhängigkeit der Matrix, begründet. Um teure Nacharbeit wie aufwendige Mehrfachlackierung zu vermeiden, muss ein Ansatz gefunden werden, der einen breiten Einsatz von Faserverbunden im Sichtbereich auch unter wechselnden Umgebungsbedingungen ermöglicht.

Potentiale zur Verbesserung der Oberflächengüte werden heutzutage bereits ausgenutzt. Neben der geeigneten Wahl der Ausgangswerkstoffe, amorphe Kunststoffe mit geringem Wärmeausdehnungskoeffizient und Feintextilien mit äußerst kleinen Fadenstärken und dementsprechend geringer Textur, werden vor allem auch die Weiterverarbeitungsverfahren, zum Beispiel durch Umformung bei variothermer Werkzeugtemperierung, optimiert. Die Integration zusätzlicher Prozessschritte, beispielsweise zur Erzeugung matrixreicher Deckschichten via Überflutungsverfahren, verhilft der Oberflächengüte zu weiterer Verbesserung.

Jedoch ist der eigentliche Kern des Problems, nämlich das deutlich unterschiedliche Verhalten der Verbundpartner zueinander dadurch nicht gelöst. Der für die Oberflächengüte vornehmlich hauptverantwortliche Wärmeausdehnungskoeffizient unterscheidet sich zwischen Matrix- und Faserwerkstoff meist um ein bis eineinhalb Zehnerpotenzen [2]. Die Folge ist eine Verschlechterung der ursprünglich so aufwendig erzeugten, anmutenden Oberfläche über der Temperatur und/oder der Zeit.

Der Entwicklung liegt demnach die Aufgabe zugrunde, das ursprünglich stark temperaturabhängige Werkstoffverhalten der Matrix durch Modifikation anzupassen. Um nicht einen gegenläufigen Effekt innerhalb der imprägnierten Faserbündel (innere Raumzone) zu erzielen, muss die Modifikation Ihren Fokus auf regionale Gebiete in matrixreichen Zonen außerhalb der Endlosfasern (äußere Raumzone) haben. Die ästhetische Optimierung der Oberflächengestalt endlosfaserverstärkter, thermoplastischer Faserverbunde ist somit hauptsächlich ein werkstoffliches Thema. Als Folge davon können Zusatzkosten für aufwendige Sonderverfahren (variothermes Formen, Überflutungstechnik, Mehrfachlackierung etc.) eingespart und eine Standard-Prozesskette verwendet werden.

2 Zielsetzung und Stand der Technik

2.1 Zielsetzung

Die Optimierung von thermoplastischen FVK-Oberflächen mit Class-A Anforderungen soll in erster Linie durch *Werkstoffmodifikation* erfolgen. Der Ansatz ist, eine lokale Anpassung der temperaturabhängigen Matrixeigenschaften an die vorherrschenden Eigenschaften der imprägnierten Endlosfasern zu erzielen. Die Idee ist, das verwendete Textil als eine Art Filter zu gebrauchen, um die faserumgebende Matrix so mit Füllstoffen anzureichern, dass das entstehende Verhalten äquivalent zum Verhalten der inneren Raumzone (imprägnierte Faserbündel) ist. Um die gewünschte, lokale Erhöhung des Füllstoffgehaltes der äußeren Raumzone zu erzielen, müssen zur funktionierenden Umsetzung die gewählten Modifikationen (Füllstoffe) eine Kombination aus ausreichend geringem Ausdehnungsverhalten, optimaler Partikelgröße und idealer Füllstoffmenge besitzen. Abbildung 5 verdeutlicht die Funktionsweise der Filterwirkung des Textils nach der Halbzeugherstellung am Beispiel eines zweilagig, imprägnierten Organoblechs.

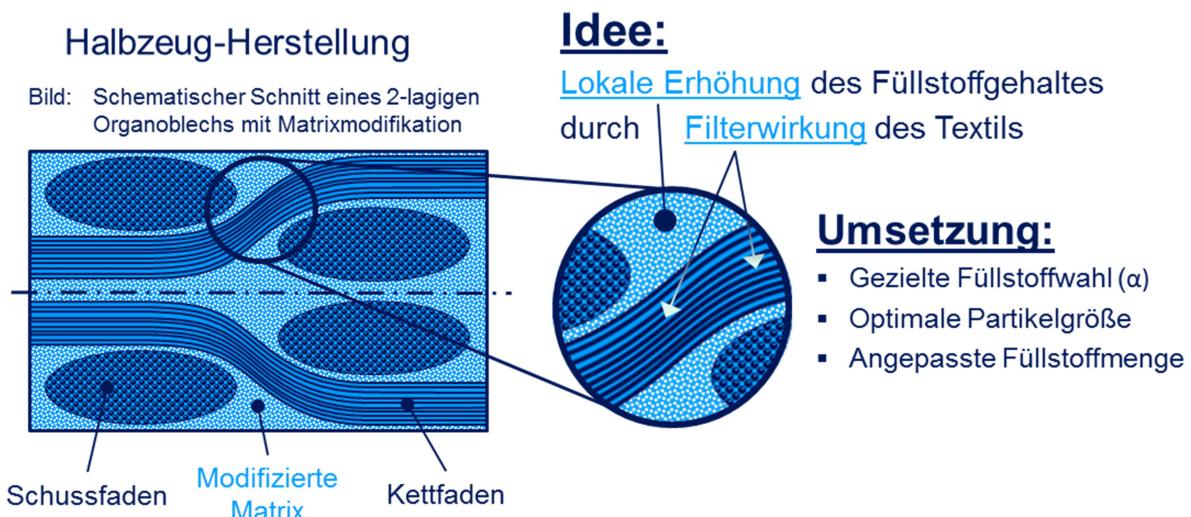


Abbildung 5 Schematische Darstellung der lokalen Erhöhung des Füllstoffgehalts in matrixreichen Gebieten durch Filterwirkung des Textils nach Abschluss der Herstellung

Sind in Abhängigkeit der gewählten Textilverstärkung die Anforderungen klar, kann eine Bewertung der benötigten Modifikationsart im Vorfeld der Herstellung erfolgen. Ist die Modifikationsart bekannt, kann durch rechnerische Analyse das sich einstellende Verhalten vorhergesagt und die notwendige Füllstoffmenge bestimmt werden. Werden die Einzelwerkstoffe modifiziert und deren Verhalten füllstoffabhängig bestimmt, kann mit Hilfe einer Simulation die zu erwartende Oberflächengüte für verschiedene Aufbauten numerisch simuliert werden. Somit steht final ein Werkzeug zur Verfügung, welches ohne aufwendige Evaluierung und Vermessung die quantitative Güte eines Drei-Phasen-Gemisches in Abhängigkeit der Werkstoffkombination, deren geometrischen Verhältnissen und den gewählten Mengenanteilen vorhersagen kann.

2.2 Stand der Technik

2.2.1 Duroplastische Faserverbunde im Sichtbereich

Die individuelle Anpassung der Ausdehnungskoeffizienten ist schon seit längerer Zeit aus der SMC-Verarbeitung bekannt. Unter SMC (engl. sheet molding compound) versteht man nach DIN EN 14598-1:2005 verarbeitungsfähige, fließfähige, flächige Formmassen aus vernetzungsfähigen Harzen mit Textilfasern definierter Länge, mineralischen Füllstoffen und notwenigen Zusatzstoffen [7]. Bereits Anfang der 60er Jahre gelang es den linearen Schrumpf durch den Zusatz von Polyethylenpulver bei SMC zu vermindern und die Oberflächenqualität zu steigern.

In einem Forschungsvorhaben wurden am Lehrstuhl für Kunststofftechnik in den 90er Jahren bewitterungsfeste Oberflächen von Verbundbauteilen mit Class-A Anforderungen mit textiler Endlosverstärkung untersucht. Zu diesem Zweck wurden verschiedene Epoxidharze mit Füllstoffen modifiziert und mit Fasergeweben zu Platten verpresst. Als Ergebnis zeigte sich, dass vor allem mit Glashohlkugeln gefüllte Harzproben eine vergleichsweise hohe Reduzierung der Wärmeausdehnung (Abbildung 6 links) bei gleichzeitig niedriger Verarbeitungsviskosität (Abbildung 6 rechts) ermöglichen [9].

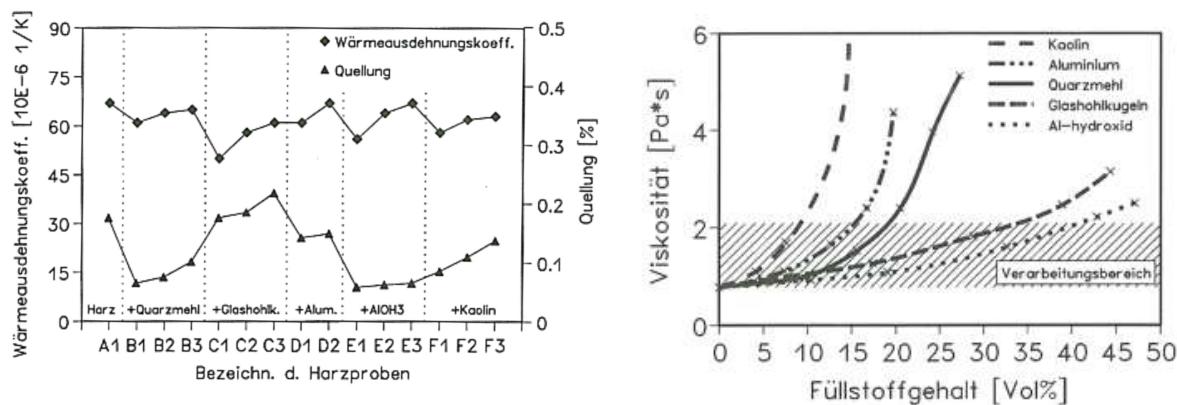


Abbildung 6 Bewitterungsfeste Oberflächenbeschichtungen von Faserverbundteilen mit Class-A Anforderungen durch Verwendung gefüllter Harzproben
Links: Reduktion der Wärmeausdehnung bei Verwendung verschiedener Füllstoffe
Rechts: Viskosität modifizierter Harzproben in Abhängigkeit des Füllstoffgehalts

Die Reduktion des Telegraphingeffekts über nanoskalige Füllstoffe stellt eine weitere Möglichkeit zur Verbesserung der Oberfläche bei duroplastischen Verbunden dar. Schubel et al. vergleichen 2006 ein LPA (Polyvinylacetat) mit Kalziumcarbonat-

Nanopartikeln verschiedener Mischgrade in styrolbasiertem, ungesättigten Polyesterharz zur Imprägnierung von E-Glas-Preforms via RTM [11]. Als Ergebnis konnte ein positiver Synergieeffekt zwischen den verwendeten Lehmerden und konventionellen Additiven zur Schwindungsreduktion der Matrix erarbeitet werden. Kunze et al. untersuchten 2016 Material- und Prozessparameter von endloskohlenstofffaserverstärkten Verbunden mit Nanomodifikation ohne Deckschicht [12]. Die Zugabe von 15, 25 und 35 Gew.-% Siliziumdioxid führt zu einer annähernd linearen Reduktion des Ausdehnungsverhaltens und damit der Volumenschwundung von über 75% bei maximalem Füllstoffanteil. Sie fanden heraus, dass die Modifikation der duroplastischen Matrix zur Reduktion der chemischen und thermischen Schwindung beiträgt und damit die Oberflächenwelligkeit verbessert werden kann.

2.2.2 Thermoplastische Faserverbunde im Sichtbereich

Der Gedanke endlosfaserverstärkte Verbundkunststoffe auf Basis thermoplastischer Matrixsysteme im Sichtbereich einzusetzen ist ebenfalls nicht neu. Bereits Mitte der 90er Jahre zeigten Nowacki und Neitzel am Beispiel einer Busladeklappe auf, dass über Stempelumformverfahren hergestellte Fahrzeug-Außenteile aus Organoblechen durchaus Potentiale zur Kosten- und Gewichtsreduktion bei Stückzahlen größer 2600 Einheiten pro Jahr aufweisen.

Im Vergleich zu duroplastischen Verbundmaterialien existieren bei thermoplastischen Verbunden mit Endlosfaserverstärkung weit weniger wissenschaftlich fundierte Untersuchungen. Meyer, Wöginger und Christmann untersuchten in Ihren Arbeiten die Herstellung von Organoblechen durch quasi- bzw. kontinuierliche Fertigung genauer [13, 14, 15]. So stellt der Halbzeug-Herstellungsprozess eine wichtige Voraussetzung für die spätere Oberflächengüte der Organobleche dar, da in diesem Schritt durch Verarbeitung der Rohstoffe die grundlegenden Eigenschaften des Laminates erzeugt werden.

Blinzler untersuchte in seinen Arbeiten unterschiedliche amorphe und teilkristalline Thermoplaste in Kombination mit unterschiedlichen, endlosfaserverstärkten Textilien und wies eine deutlich quantitative Abhängigkeit der Oberflächenwelligkeit von der Matrixart nach [16]. Niedrige Kristallisationsgrade, geringe thermische Ausdehnung und kleine Temperaturspannen zwischen Erstarren und Gebrauch der Matrices bieten Potenzial zur Verminderung der Oberflächenwelligkeit.

Den Einfluss des Lagenversatzes bewertete Hildebrandt in seiner Untersuchung zu den Oberflächeneinflussgrößen [4]. Je nach Versatz der Verstärkungslagen zueinander erhöhen oder reduzieren sich die Volumina der matrix- bzw. faserreichen Gebiete. Dies kann bei optimaler Anordnung zu einer Reduktion der Oberflächenwelligkeit von bis zu 40 % führen, was somit eine nicht zu vernachlässigende Einflussgröße darstellt. Hildebrandt bewertete anhand der schwindungsarmen, amorphen Matrix Polycarbonat den Einfluss der Gewebegründarchitektur und die oberflächennahe Laminatzusammensetzung auf die Oberflächegüte von Organoblechen näher. Mit Hilfe von Stahldrahtgeweben konnte er nachweisen, dass zwischen Oberflächenwelligkeit und Faserdurchmesser bzw. Maschenweite eine direkte Proportionalität besteht.

3 Grundlagen und Vorgehensweise

3.1 Thermoplastische Kunststoffmatrix

Thermoplastische Kunststoffe sind bis zur Zersetzungstemperatur nicht vernetzte, polymere Werkstoffe und deshalb mehrfach thermisch formbar. Diese grundlegende Eigenschaft macht diesen Werkstofftypus für Serienanwendungen in der Massenproduktion für viele Verfahren (Urformen, Umformen, Blasformen, Tiefziehen etc.) äußerst interessant, so auch für Faserverbundbauteile.

In der einfachsten Form sind Thermoplaste kettenförmig aneinander gereihte Moleküle (Monomere), welche nach der Herstellung lineare Makromoleküle (Polymere) bilden. Physikalische Sekundärbindungen sowie Verschlaufungen und/oder Verhakungen einzelner Polymerketten halten die Makromoleküle untereinander im Verbund zusammen. Aufgrund ihrer molekularen Anordnung werden Thermoplaste in amorphe und teilkristalline Polymere unterteilt, was sich in Ihrem Verhalten widerspiegelt [2, 17].

Im Gegensatz zu anderen Materialgruppen sind die meisten Werkstoffkennwerte durch diesen besonderen molekularen Aufbau im Anwendungsbereich stark temperaturabhängig. Abbildung 7 verdeutlicht die Temperaturabhängigkeit von einigen teilkristallinen Polymeren am linearen Wärmeausdehnungskoeffizienten α im Vergleich zu Glasfasern. Für den Verbund bedeutet dies ein grundsätzlich anisotropes Werkstoffverhalten.

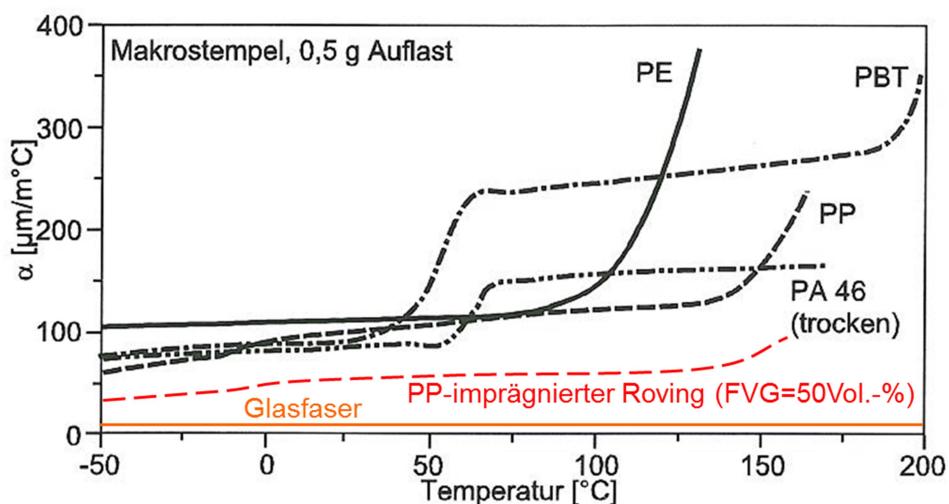


Abbildung 7: Verhalten der Wärmeausdehnungskoeffizienten α teilkristalliner Verbundpartner in Abhängigkeit der Temperatur in Anlehnung an [18]

3.2 Textile Halbzeuge aus Endlosfaserverstärkung

Unter der Verstärkung eines Faserverbundkunststoffs wird die Steigerung von Festigkeit und Steifigkeit durch Einbettung von gerichteten Verstärkungsfasern in eine Matrix verstanden. Dies ergibt sich vor allem dann, wenn die Eigenschaften der Verstärkungsfaser deutlich größer sind als die der Matrix. In Kombination mit Kunststoffen lassen sich so bezogen auf die Dichte vor allem gewichtsspezifische Vorteile erzielen. Für unidirektional kohlenstofffaserverstärkte Kunststoffe (CFK) führt dies im Vergleich zu isotropen Werkstoffen wie beispielsweise Metallen zu einem deutlich besseren Leistungsbild. Glasfaserverstärkte Kunststoffe (GFK) schneiden gegenüber Metallen bestenfalls in puncto Festigkeit besser ab. Hingegen sind Glasfasern deutlich preiswerter als Kohlenstofffasern, was diese für den

Massenmarkt von thermoplastischen FVK im mittleren Eigenschaftssegment überaus interessant macht [17].

Um die Kosten zusätzlich gering zu halten, ist das Ziel dieser Entwicklung, Verstärkungstextilien aus Glasfaser mit hoher Fadendichte ($\geq 1200\text{tex}$) und mittlerem Flächengewicht ($\sim 1200\text{g/m}^2$) zu verwenden. Zudem sollen herstellungsbedingte Qualitätsvariationen, wie beispielsweise Fadenverzug oder -verschiebung, ebenso berücksichtigt werden wie die spätere Fadenscherung beim Umformvorgang. Ziel ist es, den Verbund so zu modifizieren, dass ein möglichst breites Einsatzfeld abgedeckt wird.

3.3 Vorgehensweise

Zur Verbesserung der Oberflächengüte setzt die konventionelle Prozesskette zunächst bei der Halbzeug-Herstellung an. Neben den bereits erwähnten amorphen Matrices werden deshalb häufig sogenannte Feingewebe oder Gelege, in Sonderfällen auch Vliesdeckenschichten, verwendet. Gerade der Einsatz von diesen textilen Gebilden kann den Preis eines Halbzeugs deutlich erhöhen. Aber auch die Verwendung schwindungsschwerer Matrices beeinflusst die Kosten nicht unwesentlich.

Meist wird eine anmutende FVK-Oberfläche im Weiterverarbeitungsschritt erzeugt. Eine äußerst bekannte Methode stellt die nicht-isotherme, im allgemeinen Sprachgebrauch auch unter dem Begriff „variotherm“ bekannte, Umformung der Halbzeuge dar. Durch die längere Fließfähigkeit der Matrixkomponente wird eine überaus gute Abformung der Solloberfläche erzielt. FVK-Oberflächen können aber auch mit einer zweiten, meist zähen Komponente überflutet werden, um den Telegraphing-Effekt zu kaschieren. Neben der Dekoration und dem Lackieren als nachgeschaltete Prozessschritte gibt es noch weitere Methoden, auf die hier nicht näher eingegangen werden soll.

Allen konventionellen Vorgehensweisen ist gleich, dass sie das ursächliche Problem des unterschiedlichen Werkstoffverhaltens (vgl. Kapitel 1.3) nicht beheben. Demzufolge verändert sich die Oberflächengüte in Abhängigkeit der Werkstoffe unter wechselnden Umgebungsbedingungen zum Negativen. Aus diesem Grund setzt die hier vorgestellte Vorgehensweise bereits bei den eingesetzten Werkstoffen bzw. deren Modifikation an. Zunächst werden drei Ausgangswerkstoffe über ein Mischphasenmodell an einer Einheitszelle bewertet. Ausgehend von der textilen Gestalt wird der notwendige Volumengehalt berechnet und mögliche Füllstoffe nach thermischen und mechanischen Kriterien ausgewählt. Sind die Mischpartner bekannt, erfolgt die Herstellung eines Compounds im entsprechenden Mengenverhältnis. Zur Berücksichtigung der neuen Verbundeigenschaften werden in der Simulation die Werkstoffeigenschaften des Gemisches charakterisiert. Eine Imprägnierstudie ermittelt anschließend die idealen Halbzeug-Herstellungsparameter und der Drei-Phasen-Verbund kann produziert werden. Abschließend erfolgt die Weiterverarbeitung nach den klassischen Verfahrenstechniken. Abbildung 8 vergleicht die konventionelle (oben) und die angepasste Vorgehensweise (unten) zur Herstellung oberflächenoptimierter, endlosfaserverstärkter FVK-Halbzeuge.

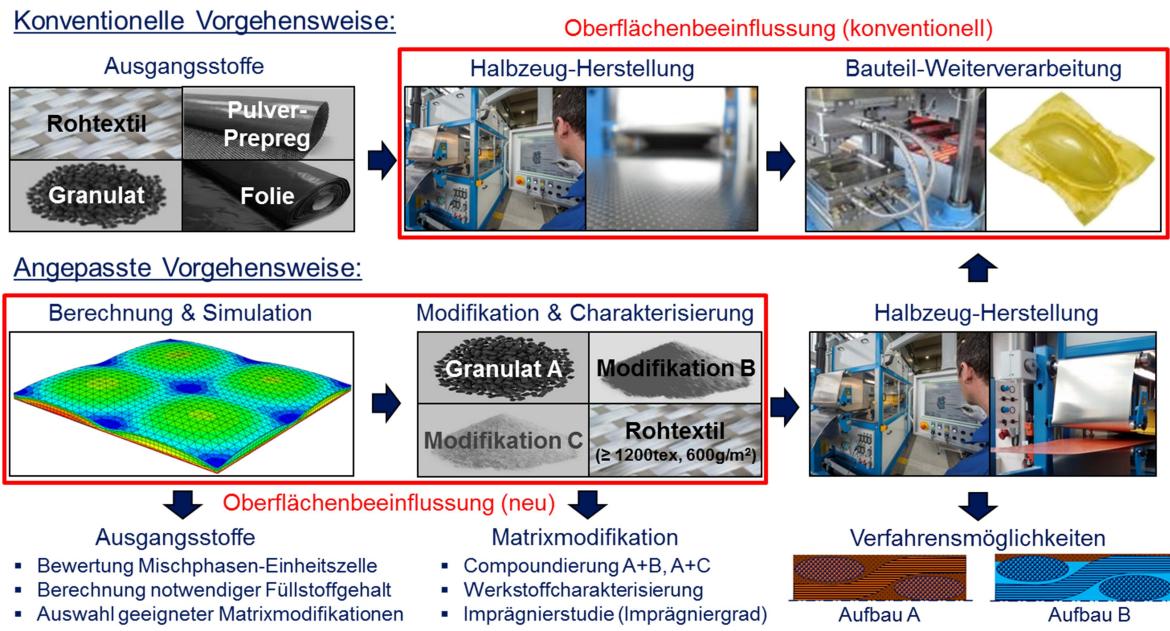


Abbildung 8 Konventionelle (oben) und angepasste (unten) Vorgehensweise zur Herstellung oberflächenoptimierter, endlosfaserverstärkter FVK-Halbzeuge

4 Werkstoffe, Probekörper und Anlagentechnik

Um die angepasste Vorgehensweise zu überprüfen und das Potential zur Verbesserung der Oberflächengüte durch Entmischung von Füllstoffen während der Halbzeug-Herstellung experimentell zu bewerten, werden modifizierte Lamine hergestellt. Eine teilkristalline Matrix (PP, Typ BJ100HP, Fa. Borealis) und ein amorpher Matrixwerkstoff (haftmodifiziertes SAN, Basistyp Luran 358N, Fa. INEOS Styrolution) werden mit verschiedenen Füllstoffen (Glashohlkugeln, Typ iM16k, Fa. 3M, Calciumcarbonate, Typen Omyacarb[®]2T-AV, 15-GU, Calibrite OG, Omya) in unterschiedlichen Mengenverhältnissen durch Compoundieren über einen Doppelschnecken-Extruder (Typ ZSE HP 27, Fa. Leistritz Extrusionstechnik) homogen vermischt. Anschließend wird das Gemisch mit zwei Arten von Glasfaser-Köpergewebe 2/2 (Flächengewicht 290 und 580g/m², Hersteller PD Glasseide Oschatz) über eine Intervall-Heißpresse (Typ HP 007, Fa. Teubert Maschinenbau) im quasi-kontinuierlichen Pressprozess zu Organoblechen verpresst.

Um den Einfluss des Herstellverfahrens auf die molekulare Struktur der modifizierten Polymere zu bewerten, werden zusätzlich Proben ohne Endlosfaserverstärkung unter analogen Prozessbedingungen hergestellt. Unmodifizierte Proben des ursprünglichen Polymers sowie modifizierte Proben des hergestellten Compounds werden mit verschiedenen Charakterisierungsmethoden bewertet. Es wird nachfolgendes Werkstoffverhalten ermittelt und dazu folgende Charakterisierungsmethoden angewendet:

- Phasenübergänge (DSC)
- Spezifisches Volumen (pVT)
- Fließverhalten (HKR, RotVis)
- Ausdehnungsverhalten (TMA)
- Mechanisches Verhalten (DMA, Zug, 3-Punkt-Biegung)
- Imprägniergrad (Dichte, Mikroskop)
- Oberflächengüte (LSM)

5 Simulationsmodel und Berechnungsgrundlagen

5.1 Simulationsmodel

Um die sich einstellende Oberflächengüte in Abhängigkeit der gewählten Ausgangswerkstoffe zu bewerten, ist es sinnvoll ein Simulationsmodell zu erstellen. Durch die rechnergestützte Vorhersage ist es möglich unbekannte Werkstoffkombinationen in Abhängigkeit Ihres Basisverhaltens im Drei-Phasen-Verbund in kurzer Zeit zu bewerten.

Mit Hilfe von marktüblichen Softwarelösungen können unter verschiedenen Modellannahmen die benötigten Mengenanteile der Verbundpartner berechnet werden. Um Rechenzeit zu sparen und die Rechenmethode mit konventionellen Methoden durchführen zu können, wird im Simulationsmodell eine Einheitszelle der kleinsten Textileinheit betrachtet. Die Berechnung erfolgt auf Basis eines vollständig imprägnierten Textils mit quer zur Faserrichtung homogenen Verhalten nach VDI-Richtlinie 2014. Das modifizierte Matrixmaterial ist gleichmäßig gefüllt und hat einen definierten Kristallisationsgrad. Zudem erfolgen keine Betrachtungen von Fließvorgängen und die sich einstellende Schwindung wird lediglich von Erstarrungsbis Entformungstemperatur ermittelt.



Abbildung 9 Schematischer Modellaufbau der FVK-Oberflächensimulation

5.2 Berechnungsgrundlagen

Damit die Simulation zu realistischen Ergebnissen führt, müssen verschiedene Berechnungsebenen berücksichtigt werden (Abbildung 10). Zunächst müssen die Werkstoffeigenschaften der einzelnen Phasen berücksichtigt werden. Dies erfolgt in der sogenannten Mikro- oder Filamentebene, in welcher die werkstofflichen und mengenmäßigen Verhältnisse vorgegeben werden. Um die textile Gestalt und daraus ableitend die äußere Raumzone mit modifizierter Matrix zu berücksichtigen wird in der Meso- oder Schichtebene hauptsächlich die geometrische Gestalt definiert. Auf Basis dieser beiden Ebenen kann nun anhand der Einheitszelle das grundlegende Verhalten des Drei-Phasen-Verbundes berechnet werden. Will man die sich einstellende Oberflächengüte eines mehrlagigen Laminates oder komplexen, dreidimensionalen Bauteils berechnen, muss eine Übergabe der Eigenschaften der Einheitszelle an die Marko- oder Laminatebene erfolgen. Da die Verbesserung der Oberflächengüte durch Matrixmodifikation bereits an einer Einheitszelle gut veranschaulicht werden kann, soll an dieser Stelle auf eine weitere Beschreibung der Makroebene verzichtet werden.

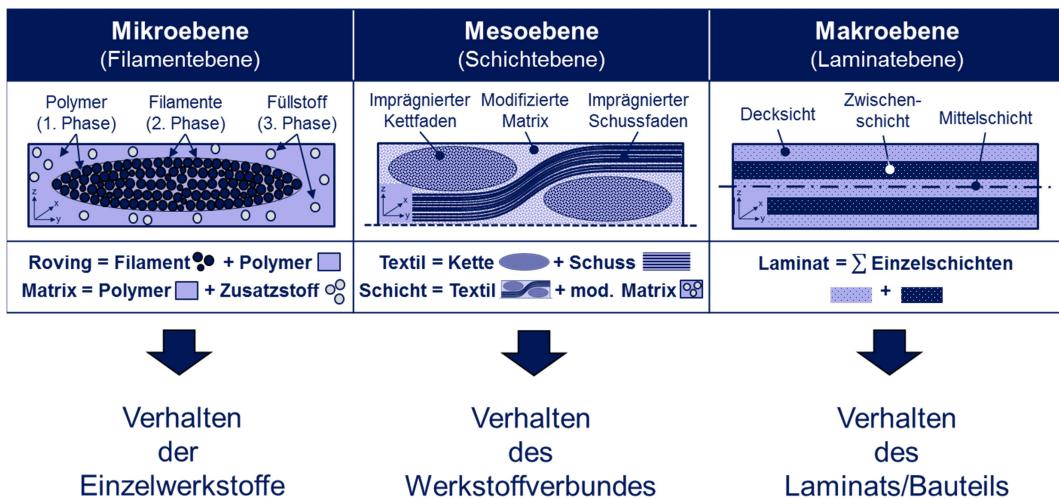


Abbildung 10 Beschreibung der Berechnungsebenen im Simulationsmodell

Um die vorherrschenden Werkstoffeigenschaften der einzelnen Phasen in der Simulation in Bezug auf die Oberfläche abbilden zu können, muss in Abhängigkeit des Werkstoffs folgendes Verhalten berücksichtigt werden: Die lokalen Volumenverhältnisse, das Ausdehnungsverhalten sowie die mechanischen und thermischen Verhaltensweisen. Je nach Werkstoff sind die Kennwerte temperatur- bzw. richtungsabhängig zu erfassen. Tabelle 2 gibt einen Überblick über die in der Simulation berücksichtigten Eigenschaften der Werkstoffe.

Tabelle 2 In der Simulation berücksichtigte Eigenschaften in Abhängigkeit des Werkstoffs

Berücksichtigte Eigenschaften	Werkstoff		
	Polymer	Faser	Füllstoff
Volumengehalt	Φ_{Matrix} , $\Phi_{\text{PoVG-primär}}$, $\Phi_{\text{PoVG-sekundär}}$	Φ_{Faser} , $\Phi_{\text{FVG-sekundär}}$	$\Phi_{\text{Füll}}$, $\Phi_{\text{FüVG-primär}}$
Ausdehnungsverhalten	$\alpha_{x,y,z}(T)$, $\rho(T)$	$\alpha_{x,y,z}$, ρ	α , ρ
Mechanisches Verhalten (einachsige Zugbeanspruchung)	$E_{x,y,z}(T, t)$, $G_{x,y,z}(T, t)$, $K_{x,y,z}(T, t)$, U	$E_{x,y,z}$, $G_{x,y,z}$, $K_{x,y,z}$, U	E , G , K , U
Thermisches Verhalten	$c_p(T)$, λ	c_p , λ	c_p , λ

6 Ergebnisse und Ergebnisbewertung

6.1 Schwindungsverhalten

Wesentlichen Einfluss auf die Gestalt wie Maßhaltigkeit, Verzug und Oberfläche von Kunststoffbauteilen hat das Schwindungsverhalten des verwendeten Polymers. Bei endlosfaserverstärkten Bauteilen werden Maßhaltigkeit und Verzug maßgeblich von der Faserlage beeinflusst. Da die verwendeten Halbzeug-Strukturen überwiegend in 0° und 90°-Richtung verstärkt sind, spricht man von orthotropem Materialverhalten. Für FVK-Oberflächen spielt die polymere Ausdehnung senkrecht zur Faserlage (z-Richtung) eine hauptbeeinflussende Rolle.

Wird das Matrixpolymer durch Zusatzstoffe modifiziert, verändert sich das Gesamtverhalten entsprechend der Mengen- und Ausdehnungsverhältnisse sowie

der mechanischen Eigenschaften der Verbundpartner. Im Falle des untersuchten PP mit Glashohlkugeln (GHK) kann das temperaturabhängige Schwindungsverhalten bei einem Volumengehalt von 50 Vol.-% GHK deutlich gesenkt und damit an das Niveau der imprägnierten Faserbündel angenähert werden (Abbildung 11).

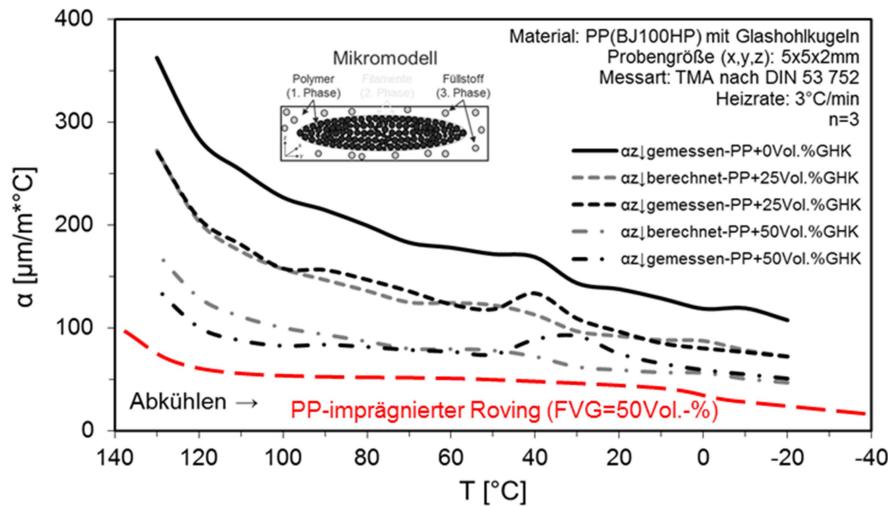


Abbildung 11 Ausdehnungskoeffizient eines mit Glashohlkugeln modifizierten Polypropylens im Vergleich zur Vorhersage durch Berechnung

Es ist ersichtlich, dass der Ausdehnungskoeffizient des compoundierten Gemischs sich deutlich reduziert und über eine Berechnung gut vorhergesagt werden kann. Jedoch ist ebenso erkennbar, dass der maximal gewählte Volumengehalt (hier: 50 Vol.-%) noch nicht ausreicht, um das annähernd temperaturunabhängige Ausdehnungsverhalten eines imprägnierten Faserbündels zu erreichen.

6.2 Verbundausdehnung

Um die Verbundausdehnung des Drei-Phasen-Systems anzugeleichen, muss die benötigte Schwindung der modifizierten, äußeren Matrixzone reduziert und möglichst exakt an die Schwindung der imprägnierten, inneren Faserzone angepasst werden. Hierzu kann ein Vergleich der Ausdehnungskoeffizienten senkrecht zur Faserachse helfen. Die berechneten Ausdehnungsverhältnisse werden in Abhängigkeit der Volumenverhältnisse von modifizierter Matrix und transversal imprägniertem Faserbündel in einem Diagramm dargestellt und der reale Messwert des Filamentvolumengehalts (FiVG) aus gemessenen Laminatproben als horizontaler Grenzwert aufgetragen (Abbildung 12). Als Ergebnis kann der benötigte Füllstoffvolumengehalt (FüVG) zur Schwindungsäquivalenz abgeleitet werden. Im Falle des schwindungsreichen PP wäre ein relativ hoher Volumengehalt von etwa 70 Vol.-% an GHK in der äußeren Matrixzone notwendig.

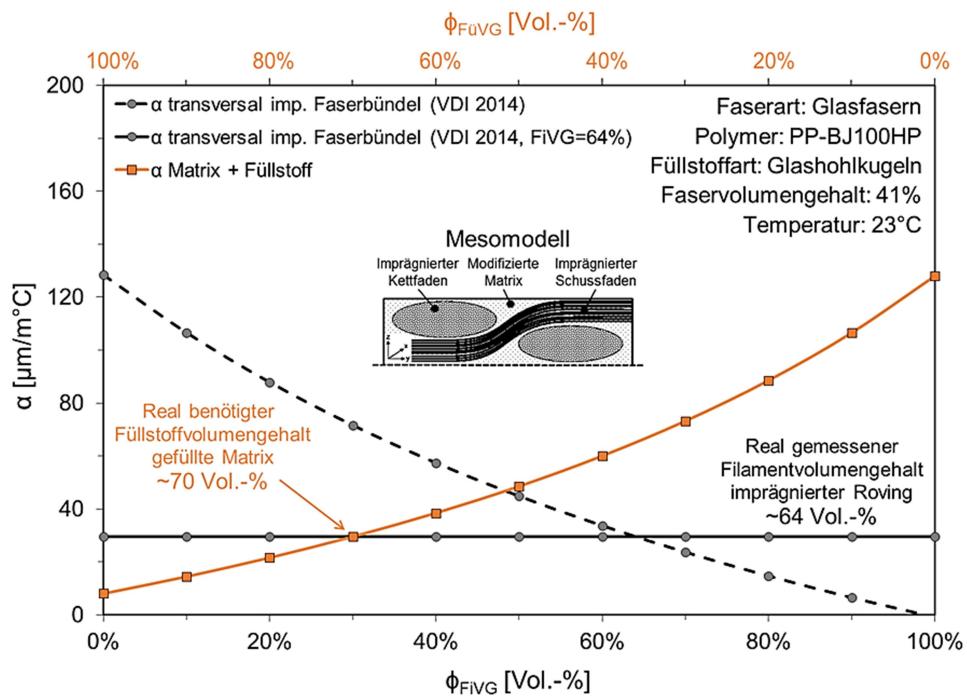


Abbildung 12 Theoretisch benötigtes Mischverhältnis eines Drei-Phasen-Verbundes mit Glashohlkugeln zur Angleichung der Ausdehnungskoeffizienten senkrecht zur Faserachse

Für teilkristalline Polymere mit hohem Schwindungsverhalten bietet es sich also an, Modifikationen zu verwenden, die ein möglichst geringes bzw. negatives Ausdehnungsverhalten haben. Solche Additive sind zwar verfügbar, meist aber sehr teuer und vor allem druckempfindlich. Dementsprechend kann der hohe Füllstoffgehalt also nicht über den polymeren Modifikationsträger von Beginn an erfolgen, sondern muss während des Herstellprozesses erzeugt werden. Um das notwenige Verarbeitungsverhalten zu sichern, muss bei der Halbzeug-Herstellung für eine vollständige Imprägnierung zunächst die Fließfähigkeit des Polymers betrachtet werden. Maßgebliches Kriterium für die benötigte Fließfähigkeit ist die Phase der Mikroimprägnierung, also der Vorgang des Tränkens der Faserbündel. Hingegen kann die Nullviskosität in der Phase der Makroimprägnierung aufgrund der geringen Fließwiderstände vergleichsweise hoch sein, so dass ein hoher Füllstoffgehalt des Polymers durchaus prozesssicher verarbeitet werden kann. Als Folge des Entmischungsvorgangs sinkt die Viskosität während der Mikroimprägnierung bei gleichzeitiger Erhöhung des Füllstoffanteils in der äußeren Matrixzone.

6.3 Simulationsergebnis

Die sich einstellende Oberflächengüte eines Drei-Phasen-Verbundes, bestehend aus Polymer, Endlosfasern und Füllstoff, kann anhand einer FVK-Einheitszelle gut simuliert werden. Die Simulationsergebnisse können anschließend sowohl mit analytischen Berechnungsmethoden als auch mit experimentell hergestellten Laminatproben verglichen werden.

Für den häufigen Anwendungsfall eines PP-basierten Organoblechs wurde die sich einstellende Flächenwelligkeit W_{Sz} unter Zunahme des Füllstoffgehalts $\phi_{\text{Füll}}$ von 0 bis 50 Vol.-% quer zur Faserrichtung (z-Richtung) untersucht (Abbildung 12). Als Simulationsergebnis kann unter idealen Bedingungen die Welligkeit auf etwa $\frac{1}{4}$ des Ausgangswertes bei 50 Vol.-% GHK in der äußeren Raumzone reduziert werden. Die Werte der analytischen Berechnung zeigen nur unwesentliche Abweichungen zu den

Simulationsergebnissen, so dass die Annahme der in x- und y-Richtung stark behinderten Ausdehnung aufgrund der Fasern bestätigt wird. Die Messwerte der optischen LSM-Messung zeigen eine analoge Tendenz der Welligkeitsabnahme, weichen aber leicht zu niedrigeren Niveaus ab, was im Lagerversatz aufgrund des zweilagigen Aufbaus der untersuchten Halbzeuge begründet liegen kann.

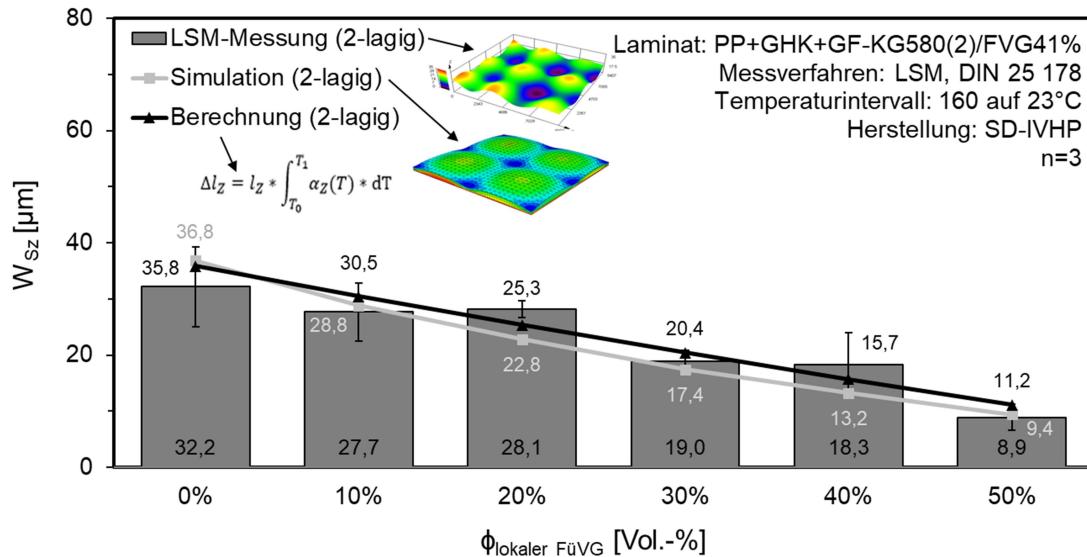


Abbildung 13 Vergleich der Flächenwelligkeit von Realmessung, Simulation und Berechnung am Beispiel eines zweilagig modifizierten PP-Halbzeugs

Mit dem vorgestellten Modell kann eine Reduktion der Flächenwelligkeit und damit eine Verbesserung der Oberflächengüte von endlosfaserverstärkten Halbzeugen vorhergesagt und nachgewiesen werden. Die sich einstellende Güte kann unter Verwendung gängiger Polymere mit Standard-Verstärkungstextilien maßgeblich verbessert und gleichzeitig die bekannte Prozesskette verwendet werden.

6.4 Mikroskopie

Der maßgebliche Effekt der Filterwirkung und die sich einstellende Verteilung der Füllstoffe in der äußeren Raumzone lässt sich über Auflicht-Mikroskopie von Schliffproben modifizierter Halbzeuge gut aufzeigen. Zur Erzielung eines besseren Kontrastverhältnisses wird das verwendete, opake Basispolymer PP mit orangem Farbbatch eingefärbt. Die Bilder werden mit einem Mikroskop vom Typ Axioskop 2 MAT der Firma Zeiss im Dunkelfeld unter Verwendung eines Weißabgleichs aufgenommen.

Zunächst wird eine zusammengesetzte Mehrfachaufnahme in 5-facher Vergrößerung erstellt (Abbildung 14). Es können die vollständig imprägnierten Kett- und Schussfäden sowie die mit Glashohlkugeln gefüllte Polymermatrix am Beispiel eines zweilagigen PP-Organoblechs mit Glasfaser-Köpergewebe 2/2 und 50Vol.-% GHK Ausgangsfüllstoffgehalt gezeigt werden.

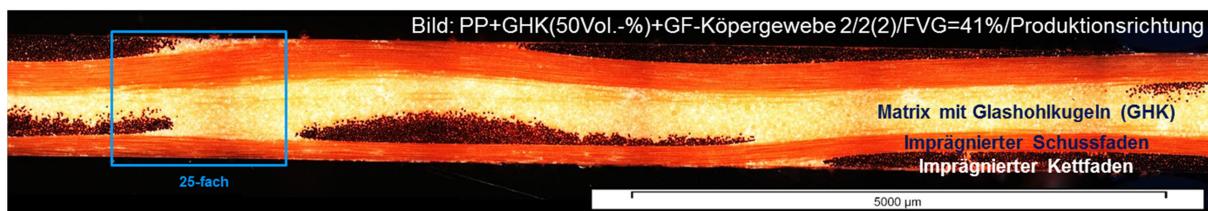


Abbildung 14 Mehrfachaufnahme eines zweilagigen PP-Organoblechs mit Glasfaser-Köpergewebe 2/2 und 50Vol.-% GHK Ausgangsfüllstoffgehalt in 5-facher Vergrößerung

Mit Hilfe einer 25-fachen Vergrößerung kann die Verteilung der GHK in der äußeren Randzone mit Fokus auf matrixreiche Randgebiete an der Oberfläche des Halbzeugs bewertet werden. Es zu erkennen, dass sich der sphärische Füllstoff außerhalb der imprägnierten Faserbündel homogen verteilt, somit also keine Vorzugsrichtung bei der Herstellung entsteht. Die hauptbeeinflussende, matrixreiche Zone im oberen Randbereich der Probe wird vollständig mit Füllstoff versorgt (Abbildung 15 links). Bei 200-facher Vergrößerung kann zusätzlich der vollständige Entmischungsvorgang im Inneren der Probe gut veranschaulicht werden. Sowohl Kett-, als auch Schussfäden zeigen bei abgeschlossener Imprägnierung innerhalb der Faserbündel keine GHK, so dass davon auszugehen ist, dass das Ausdehnungsverhalten dieser Zone unverändert bleibt.

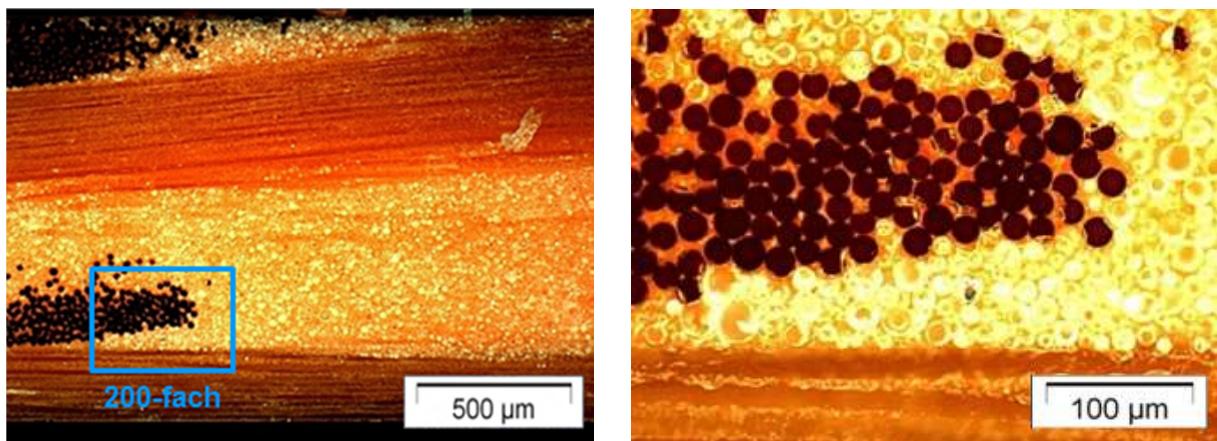


Abbildung 15 Links: Füllstoffanhäufung im oberen Randbereich am Beispiel des modifizierten PP-Organoblechs unter 25-facher Vergrößerung
Rechts: Entmischungsvorgang der Glashohlkugeln am Beispiel eines imprägnierten Kett- und Schussfadens unter 200-facher Vergrößerung

6.5 Ergebnisbewertung

Die Untersuchungsergebnisse zeigen, dass eine Anpassung des stark temperaturabhängigen Ausdehnungsverhaltens der thermoplastischen Matrix an das thermische Verhalten der imprägnierten Faserbündel über Füllstoffe in der äußeren Raumzone möglich ist. Die dafür notwenigen Mengenverhältnisse sind in Abhängigkeit der verwendeten Polymere und Additive teilweise sehr hoch, so dass eine lokale Konzentration benötigt wird. Dies kann durch geeignete Wahl der Füllstoffe geschehen, um einen Entmischungsvorgang durch die textile Verstärkung auszunutzen.

Die Verwendung von sphärischen Partikeln in der Matrix zeigt bei der Verarbeitung eine gute Dispergierung und ermöglicht so eine gute Anpassung der lokalen Ausdehnungskoeffizienten. Das Funktionieren des Entmischungsvorgangs während der Halbzeug-Herstellung konnte an einem Polypropylen-Glashohlkugel-Glasfaser-Gemisch nachgewiesen werden. Die hergestellten Lamine zeigen eine gute Imprägnierung bei einer homogenen Verteilung der Füllstoffe.

Durch Charakterisierung des Verhaltens der modifizierten Einzelwerkstoffe und durch Implementierung der Mengenverhältnisse in ein Simulationsmodell kann die entstehende Oberfläche eines Drei-Phasen-Verbundes in Abhängigkeit der Verbundpartner und der textilen Geometrie vorhergesagt werden. Damit steht ein Werkzeug zur Verfügung, mit welchem unbekannte Materialkombinationen bewertet und die notwendigen Modifikationsmengen berechnet werden können. Experimentelle Versuche zeigen tendenziell eine gute Übereinstimmung der

simulierten Oberflächengüte und deren Verbesserungspotential. Zur exakten Vorhersage von dreidimensionalen FVK-Bauteilen muss aber die vorherrschende geometrische Textilgestalt nach der Weiterverarbeitung berücksichtigt werden.

7 Zusammenfassung und Ausblick

Das Ausdehnungsverhalten der einzelnen Verbundpartner (Thermoplastmatrix, Faserbündel und Füllstoff) endlosfaserverstärkter Halbzeuge unterscheidet sich deutlich. Während das imprägnierte Faserbündel ein annähernd temperaturunabhängiges Verhalten zeigt, ist die umgebende Matrix stark temperaturabhängig. Die Folge ist eine Abzeichnung der textilen Faserarchitektur an der Oberfläche, welche im Fachjargon als „Telegraphing-Effekt“ bezeichnet wird. Eine Angleichung der Ausdehnungskoeffizienten ist durch eine Modifikation der Matrix über sphärische Füllstoffe gut möglich. Bei geeigneter Wahl der Additive kann eine Filterwirkung durch das Textil erzielt und somit eine lokale Erhöhung des Volumengehaltes in der äußeren Raumzone bei gleichzeitig abgeschlossener Imprägnierung erreicht werden. Analytische Messungen bestätigen die gute Übereinstimmung von Berechnungsgrundlage und Werkstoffkennwerten. Über ein Mischphasen-Simulationsmodell kann die entstehende Oberflächengüte unbekannter Materialkombinationen tendenziell gut vorhergesagt werden.

Um den Einfluss der Weiterverarbeitung modifizierter Halbzeuge und das Potential der isothermen gegenüber der nicht-isothermen Ab- oder Umformung zu ermitteln, sollte der Einfluss der Nachkonsolidierung auf die entstehende Faserverbund-Oberfläche bewertet werden. Für eine dauerhafte Anwendung eines Drei-Phasen-Verbundes im Sichtbereich ist es wichtig das Langzeitverhalten der Oberfläche zu untersuchen. Hierzu muss zunächst der Einfluss des viskoelastischen Verhaltens der thermoplastischen Matrix in unmodifizierten Faserverbunden untersucht werden. Anschließend sollte darauf aufbauend die Veränderung der Viskoelastizität durch Matrixmodifikation bewertet werden. Die Erweiterung des Misch-Phasen-Simulationsmodells in ein Single-Phasen-Modell ermöglicht schließlich die Vorhersage der FVK-Oberflächengüte unter Temperwechselbelastung in Abhängigkeit der Zeit.

Literatur

- [1] M. Gude, H. Lieberwirth, G. Meschut und M. F. Zäh: Chancen und Herausforderungen im ressourceneffizienten Leichtbau für die Elektromobilität, Dresden, Freiberg, Paderborn, München, 2015.
- [2] H. Domininghaus, P. Elsner und P. H. T. Eyerer: Kunststoffe. Eigenschaften und Anwendungen, Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2004, 2008.
- [3] G. Ehrenstein: Faserverbund-Kunststoffe: Werkstoffe - Verarbeitung - Eigenschaften, 2. Aufl. München: Carl Hanser Verlag, 2006.
- [4] K. Hildebrandt: „Material- und prozessspezifische Einflüsse auf die Oberflächeneigenschaften von endlosfaserverstärkten Thermoplasten,“ Dissertation, TU Kaiserslautern, 2015.
- [5] Deutsches Institut für Normung e.V.: DIN 4760:1982-06: Gestaltabweichungen; Begriffe, Ordnungssystem, München: Beuth-Verlag, 1982.
- [6] L. Sawyer, D. Grubb und G. Meyers: Polymer microscopy, New York: Springer New York, 2008.
- [7] Deutsches Institut für Normung e.V.: DIN EN 14598-1:2005-07: Verstärkte

- härtbare Formmassen - Spezifikation für Harzmatten (SMC) und faserverstärkte Pressmassen (BMC) - Teil 1: Bezeichnung, München: Beuth-Verlag, 2005.
- [8] G. W. Ehrenstein, L. Hoffmann, A. Tome, J. Wolfrum und D. Drummer: „2. Ergebnisbericht: Bewitterungsfeste Oberflächenbeschichtungen von Faserverbundteilen mit Class-A Anforderungen,“ Bayerischer Forschungsverbund für Oberflächen-, Schicht- und Trocknungstechnik, Erlangen, 1996.
 - [9] P. Schubel, M. Johnson, N. Warrior und C. Rudd: „Characterisation of thermoset laminates for cosmetic automotive applications: Part III – Shrinkage control via nanoscale reinforcement,“ *Composites Part A*, Bd. 37, Nr. 10, pp. 1757-1772, Oktober 2006.
 - [10] J. Kunze, T. Mahrholz und M. Sinapius: „Identification and quantitation of processing parameters controlling the surface quality of carbon fibre-reinforced composites,“ *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, Bd. 35, Nr. 8, pp. 638-654, 2016.
 - [11] C. Mayer: „Prozeßanalyse und Modellbildung bei der Herstellung gewebeverstärkter, thermoplastischer Halbzeuge,“ Dissertation, TU Kaiserslautern, 1999.
 - [12] A. Wöginger: „Prozesstechnologien zur Herstellung kontinuierlich faserverstärkter thermoplastischer Halbzeuge,“ Dissertation, TU Kaiserslautern, 2003.
 - [13] M. Christmann: „Optimierung der 2D-Imprägnierung von thermoplastischen Halbzeuge,“ Dissertation, TU Kaiserslautern, 2015.
 - [14] M. Blinzler: „Werkstoff- und prozesseeitige Einflussmöglichkeiten zur Optimierung der Oberflächenqualität endlosfaserverstärkter Thermoplaste,“ Dissertation, TU Kaiserslautern, 2002.
 - [15] W. Michaeli: Einführung in die Kunststoffverarbeitung, München: Carl Hanser Verlag, 2010.
 - [16] G. W. Ehrenstein: Polymer Werkstoffe. Struktur - Eigenschaften - Anwendung, München: Carl Hanser Verlag, 3. Auflage, 2011.
 - [17] M. Flemming, G. Ziegmann und S. Roth: Faserverbundbauweisen. Halbzeuge und Bauweisen, Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 1996.