

Lagerstabile, faserverstärkte Klebfilme

Der Wunsch nach leichten und zugleich starken Verbundwerkstoffen ertönt aus verschiedenen Branchen, die sich mit neuen, oft extremen Anforderungen konfrontiert sehen. Vor diesem Hintergrund hat Nolax faserverstärkte Klebfilme entwickelt, die sich durch Zähigkeit, hohe Zugfestigkeit in Kombination mit wenig Gewicht und eine sehr gute Flexibilität auszeichnen.

Claude Hosotte, Raphael Schaller

Das Segeln beinhaltet vielerlei physikalische Aspekte und beginnt mit der Kraft des Windes im Segel. Ein Segel in Aktion ist typischerweise gekrümmt, und es wird an beiden Seiten von Luft mit unterschiedlichen Strömungswegen umflossen, was zu ungleichen Druckverhältnissen führt. Dieses Phänomen, der sogenannte Bernoulli-Effekt, nutzen Segler aus, um außerhalb der Windrichtung oder auch schneller als der Wind zu segeln [1]. Je stärker der Bernoulli-Effekt genutzt wird, desto leistungsfähiger müssen Segel sein. Das Streben nach immer stärkeren und gleichzeitig immer leichteren Segeln brachte die aufsehenerregende Entwicklung der Membransegel (*Bild 1*) hervor [2]. Diese bestehen aus mehreren Lagen von extrem dünnen und unidirektionalen Filament-Pre-Pregs (auf Englisch: „thin-ply-prepregs“) respektive faserverstärkten Klebfilmen (*Bild 2*), die je nach Krafteintrag in bestimmten Richtungen abgelegt und unter Temperatur und Druck zusammenlaminiert werden.

Vom Gewebe zum Garn und Filament

Traditionell werden Fasern als Garne geliefert und maschinell verwoben. Aufgrund der Zickzackführung der Garne im Gewebe oder Stoff verringert sich deren Leistungsfähigkeit signifikant im



© Martin Viezzer

Bild 1 > Ein Membransegel in Aktion



Bild 2 > Faserverstärkte Klebfilme von Nolax. Unidirektional arrangierte Filamente sind in einem Klebstoff eingebettet und können unter Temperatur und Druck beispielsweise zu Membransegel verarbeitet werden.

© Nolax / KusterFrey

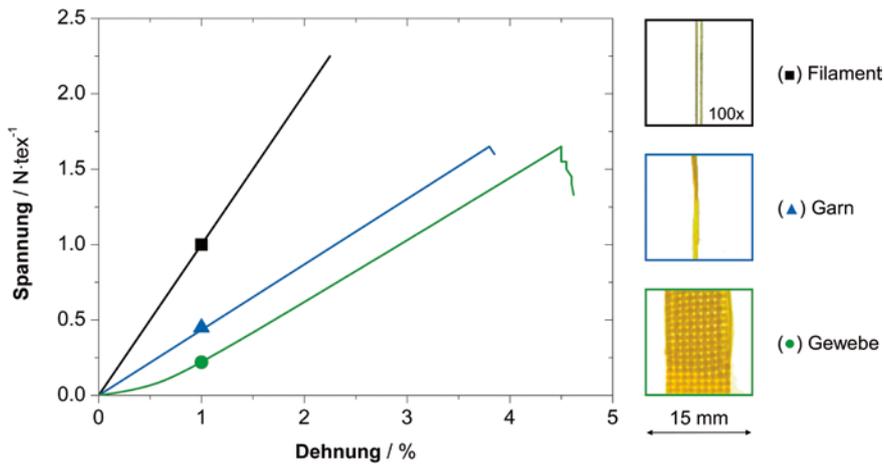


Bild 3 > Spannungs-Dehnungsdiagramm eines Filaments, Garns und Gewebes aus Aramid. Durch die Zickzackführung der Garne im Gewebe verringert sich deren Leistungsfähigkeit signifikant im Vergleich zum Filament.

© Nolax

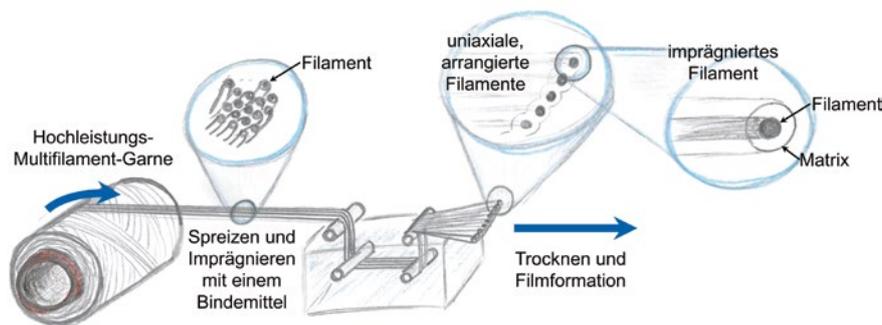


Bild 4 > Endlose Multifilament-Garne werden abgespult, aufgespreizt und imprägniert. Bei diesem Prozess entstehen faserverstärkte Klebfilme mit typischen Flächengewichten von $<100 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$.

© Nolax

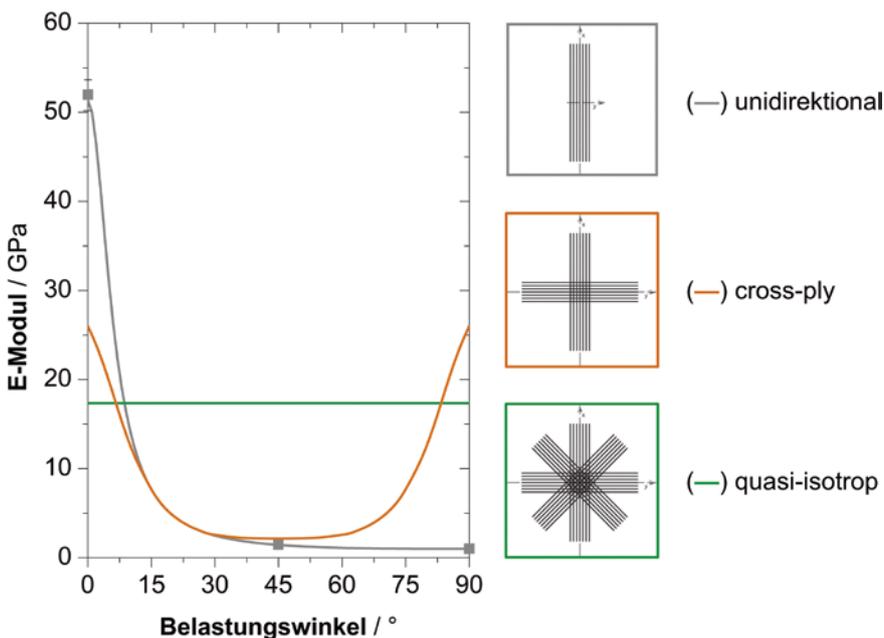


Bild 5 > Berechnete außeraxiale E-Module des faserverstärkten Klebfilms T52.5110 und der entsprechenden Laminat – unidirektional: eine Lage faserverstärkter Klebfilm, Cross-Ply-Laminat: zwei Lagen in Faserrichtungen $(0^\circ/90^\circ)$, quasi-isotropes Laminat: vier Lagen mit Faserrichtungen $(0^\circ/45^\circ/90^\circ/135^\circ)$, (■) Messungen der Steifigkeit in 0° , 45° und 90° zur Faserorientierung im T52.5110. Für die Berechnung der außeraxialen E-Module wurde das Tsai-Hill-Kriterium [5] verwendet.

© Nolax

Vergleich zu arrangierten Filamenten (Bild 3). Faserverstärkte Klebfilme und die daraus hergestellten Elemente, wie beispielsweise ein Membransegel, schöpfen das gesamte Potenzial einer Hochleistungsfaser aus. Bei der Herstellung der fa-

serverstärkten Klebfilme werden Multifilament-Garne soweit gespreizt, dass ihre einzelnen Filamente ohne Verdrehung und ohne Zickzack, Seite an Seite in einer Richtung (unidirektional) arrangiert und mit einem Bindemittel imprägniert wer-

den. Im Vergleich zum klassischen Imprägnieren von Textilien werden gespreizte Fasern ebenfalls besser benetzt, was zu einem höheren Faseranteil und damit zu einer höheren Leistungsfähigkeit im Verbund führt [3].

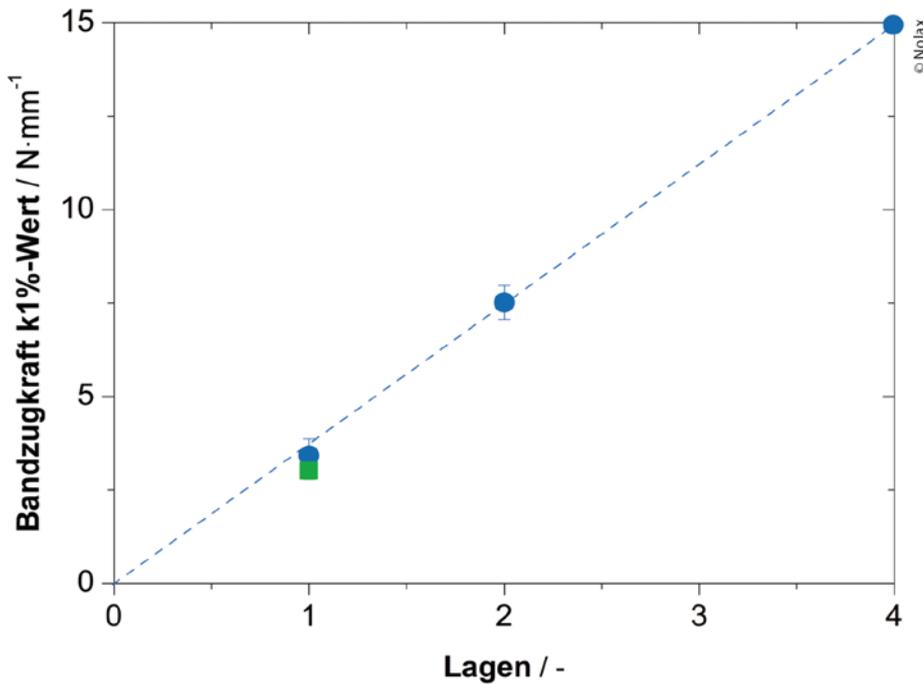


Bild 6 > Bandzugkraft (k1%-Wert: Kraftaufnahme bei 1 % Dehnung) gegen Anzahl der Lagen von (●) T51.5000 mit 15 g·m⁻² im Vergleich zu einem (■) Standard-Polyestergewebe (450 g·m⁻², einlagig)

Das Prinzip der Herstellung dieser unidirektionalen faserverstärkten Klebfilme ist in *Bild 4* skizziert. Endlose Multifilament-Garne werden abgespult und entweder über Metall- oder Keramikstäbe aufgespreizt. Die Imprägnierung erfolgt über einen Walzenauftrag mit einem Bindemittel. Das Spreizen und Imprägnieren kann ebenfalls in einem von Bindemittel gefüllten Walzenspalt durchgeführt werden [4]. Je nach Chemie erstarrt oder trocknet das Bindemittel, umhüllt dabei die einzelnen Filamente und bettet diese als Matrix ein. Mit dieser Methode entstehen leichte, unidirektionale Hochleistungsklebfilme mit typischen Flächengewichten von <100 g·m⁻², die bei erhöhten Temperaturen und Drücken zu Verbund-

oder Hybridkomponenten weiterverarbeitet werden können.

Die mechanische Leistungsfähigkeit dieser Klebfilme ist wegen der unidirektionalen Anordnung der Filamente ausgeprägt anisotrop: in Orientierungsrichtung der Filamente (0°-Richtung) ist die mechanische Leistung hoch; in Querrichtung der Filamente (90°-Richtung) ist sie tief. *Bild 5* zeigt die Winkelabhängigkeit des E-Moduls des Klebfilms T52.5110 von Nolax. Um diese Anisotropie zu reduzieren, werden solche Klebfilme in verschiedenen Richtungen aufgeschichtet und zusammenlaminiert. Weiterhin sieht man die winkelabhängige Leistungsfähigkeit von einem Laminat mit zwei Lagen mit Faserrichtungen (0°/90°) und einem Laminat mit vier Lagen mit Faserrichtungen

(0°/45°/90°/135°), die beide mit dem Klebfilm T52.5110 hergestellt wurden.

Die starke Winkelabhängigkeit der mechanischen Eigenschaften hat somit Konsequenzen für die Gestaltung des Endbauteils. Dies ist aber auch ein Vorteil, denn oft sind (quasi-)isotrope Verstärkungen nicht nötig, und durch ein selektives Verstärken in Richtung des Kräfteintrages können wiederum Gewicht und Kosten im Endbauteil eingespart werden.

Die Nolax-Matrix: lösungsmittelfrei und lagerstabil

Die Fasern sind zuständig für die mechanische Leistungsfähigkeit eines Verbundwerkstoffmaterials. Eine noch wichtigere Funktion übernimmt aber die Matrix, die bewirkt, dass die Fasern in einem Bauteil zusammenhalten, sodass die Kräfte auf die Fasern übertragen werden. Zudem wird durch die Matrix die Dauerhaftigkeit ermöglicht, denn sie stützt und schützt die Fasern vor äußeren mechanischen und chemischen Einflüssen. Darüber hinaus beeinflusst sie maßgeblich die Herstellung und die Weiterverarbeitbarkeit der faserverstärkten Klebfilme.

Bindemittel, die zur Herstellung von herkömmlichen Filament-Pre-Pregs verwendet werden, sind lösemittelhaltig (ein typisches Lösungsmittel ist Butanon) und/oder besitzen eine Topfzeit, wenn es sich um Zweikomponenten-Systeme aus Härter

Bezeichnung	Matrix	Faser	Mechanische Eigenschaften			Dichte	Fügetemperatur
			E / GPa	σ / GPa	ε / %		
nolax T51.5000	LRPU	LCP	30	1,0	3,0	1,4	100-140
nolax T52.5110	EAA	UHMWPE	50	1,5	3,0	1,0	100-120
nolax T53.5000	LRPU	Aramid	50	1,5	1,5	1,4	100-140

© Nolax

Tabelle 1 > Übersicht der mechanischen Eigenschaften (in Faserrichtung), Dichte und Applikationstemperatur von drei unterschiedlichen faserverstärkten Klebfilmen. Die Filme besitzen einen Faseranteil von etwa 55-60 Vol.-% und können aktuell zu Flächengewichten von 15-75 g·m⁻² und 600 mm Breite hergestellt werden.

(LRPU: latent-reaktives Polyurethan / EAA: Ethylen-Acrylsäure-Copolymer / LCP: flüssigkristallines Polymer / UHMWPE: ultra-hochmolekulares Polyethylen / E: E-Modul / σ: Zugfestigkeit / ε: Bruchdehnung / ρ: Dichte / T: Temperatur)

Flexible elektrische Heiztechnik

- Hot-Melt Heizschläuche
- Dosierschläuche
- 2K-Heizschläuche
- Fassheizungen
- Heizplatten
- Sonderlösungen

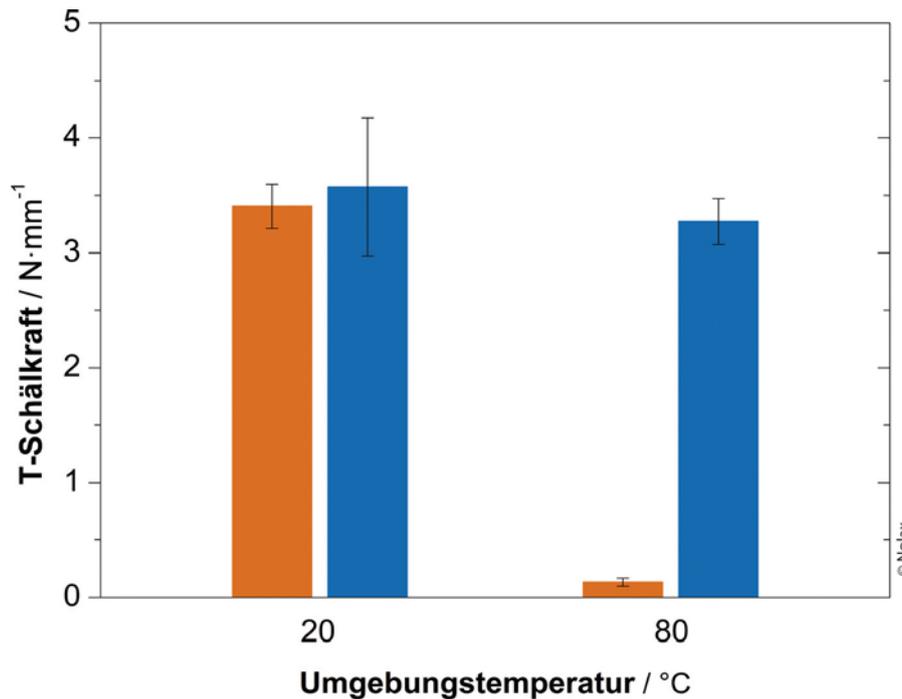
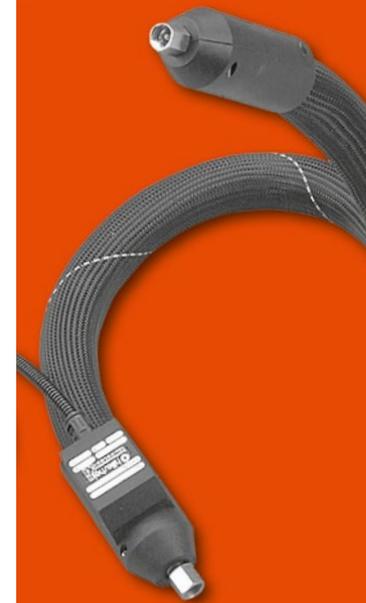


Bild 7 > T-Schälkraft bei 20°C und 80°C von Laminaten mit zwei Lagen faserverstärkter Filme – (■) Film (Flächengewicht 25 g·m⁻²) mit einer thermoplastischer PU-Matrix, (■) T51.5000 von Nolax (Flächengewicht 25 g·m⁻²) mit einer latent-reaktiv vernetzten PU-Matrix

und Polymer (z. B. ein Polyester wie das Adcote 122-HV) handelt [6]. Im Halbfertigprodukt sind diese bei Raumtemperatur nicht lagerstabil. Um eine vorzeitige Vernetzung zu vermeiden, müssen solche reaktiven Systeme bei tiefen Temperaturen (bei ca. -20 °C) gelagert und vor der Weiterverarbeitung angetaut werden.

Nolax schlägt einen neuen Weg ein, um den Arbeitsschutz bei der Herstellung der Filme zu erhöhen, indem ausschließlich wässrige Dispersionsklebstoffe zum Imprägnieren der gespreizten Fasern verwendet werden. Diese Klebstoff-Zusammensetzungen sind im Wesentlichen frei von Lösungsmitteln. Außerdem werden Systeme eingesetzt, die thermoplastisch oder latent-reaktiv (der Vernetzer kann z. B. verkapselt vorliegen) sind und ein sehr breites Zeitfenster während der Ver-

arbeitung bieten. Zudem sind diese Klebstoffsysteme, selbst wenn ein Vernetzer vorliegt, nach einem sorgfältigen Trocknen bei Raumtemperatur über einen langen Zeitraum (von >12 Monaten) ohne größeren Aufwand lagerfähig [7].

Vernetzung auf Befehl

Neben einer thermoplastischen Matrix können latent-reaktive Systeme eingesetzt werden, wenn besonders hohe Beanspruchungen erwartet werden, wie etwa bei einem hohen Wärmestand oder einem abrupten Klimawechsel. Eine Lagerstabilität bei reaktiven Systemen kann durch eine räumliche Trennung vom Reaktivharz und Vernetzungsmittel nach der Trocknung erzielt werden [8]. Die latent-reaktive Zusammensetzung der

Bezeichnung	Matrix	SAFT initial / °C	SAFT nach Klimawechsel / °C
nolax T51.5000	LRPU	>150	>150
nolax T52.5110	EAA	80	80
nolax T53.5000	LRPU	>150	>150

Tabelle 2 > SAFT-Werte vor und nach dem Klimawechseltest (LRPU: latent-reaktives Polyurethan / EAA: Ethylen-Acrylsäure-Copolymer)

© Nolax

Hillesheim GmbH

Am Haltepunkt 12
D-68753 Waghäusel
Tel.: 0 72 54 / 92 56-0
E-Mail: info@hillesheim-gmbh.de
www.hillesheim-gmbh.de

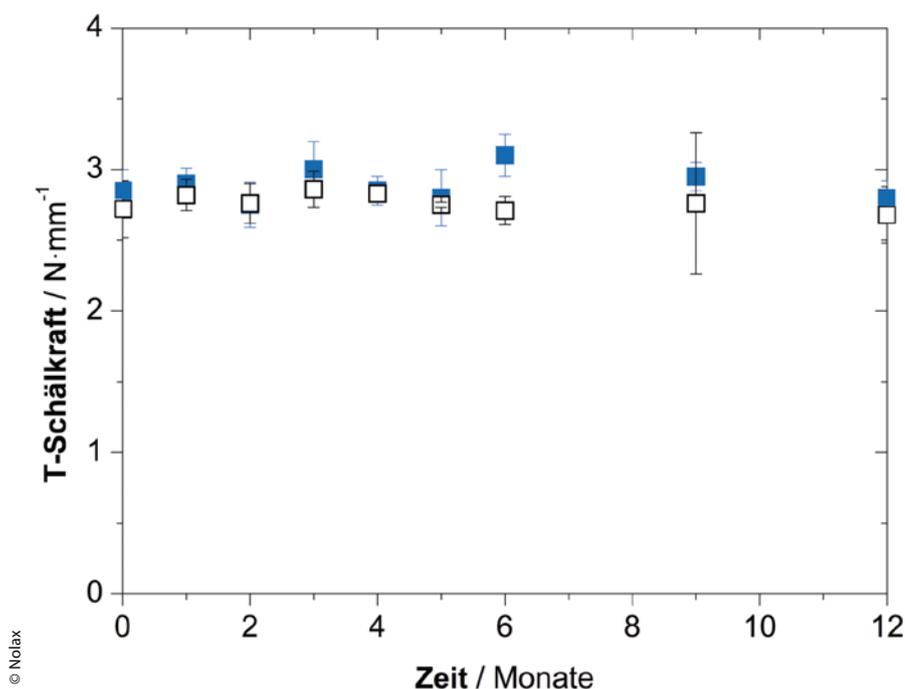


Bild 8 > Auftrag der T-Schälkraft von Laminaten gegen die Lagerungszeit der faserverstärkten Klebfilme: Die unidirektionalen Laminare bestehen aus 10 Lagen T51.5000 (Flächengewicht 15 g·m⁻²), die bei (■) 50 °C und (□) 60 °C getrocknet wurden – mit einer Anlagengeschwindigkeit von 8 m·min⁻¹ und einer Trocknungsstrecke von ca. 25 m

Nolax-Matrix kann nach der Herstellung des Klebfilms bzw. nach dem Trocknen feinverteilte, verkapselte oder oberflächen deaktivierte, latent-reaktive (Poly-)Isocyanat-Partikel in einer Polyurethanmatrix aufweisen [9].

Der Vernetzer ist zwar in der Matrix vorhanden, jedoch ist die Vernetzung nicht eingetreten. Erst durch ein kurzes Anstoßen bei relativ tiefen Temperaturen (>90 °C) beim Fügeprozess erfolgt die Vernetzung zwischen den Isocyanat-Gruppen und den freien OH-Gruppen des Polyurethans: also eine Vernetzung auf Befehl. Es können zum Teil um den Faktor zehn kürzere Zykluszeiten gefahren werden, und interessanterweise besitzt eine solches Matrixsystem Heißsiegeligenschaften. Wegen der geringen Vernetzungstemperatur ist es darüber hinaus möglich, tiefschmelzende Faserarten, beispielsweise ultra-hochmolekulares Polyethylen, zu verwenden.

Maßgeschneiderte Eigenschaften

Für die faserverstärkten Filme von Nolax können verschiedene Matrixsysteme und Hochleistungsfasern miteinander kombiniert werden, um individuelle Anforderungen und Bedürfnisse zu erfüllen. Durch dieses Baukastenprinzip lassen sich die Eigenschaften maßgeschneidert an den geplanten Verwendungszweck anpassen. *Tabelle 1* bietet

eine Übersicht über mögliche Zusammensetzungen, deren mechanische Leistungsfähigkeiten, Dichten und typischen Füge temperatures. Die Hochleistungsfasern aus flüssigkristallinem Polymer (LCP), ultra-hochmolekulares Polyethylen (UHMWPE) und Aramid sind in zwei unterschiedliche Basis-Matrixsysteme eingebettet: latent-reaktives Polyurethan (LRPU) oder Ethylen-Acrylsäure-Copolymer (EAA) [7].

Die faserverstärkten Klebfilme sind einfach zu verarbeiten. Mittels Heiß- und Doppelbandpressen, simplen Laminatoren, im Vakuumsack oder über Föhn- und Handrollenapplikation können unter anderem Verbund- oder Hybrid-Komponenten hergestellt werden. Durch die Heißsiegeligenschaften entsteht der Verbund bereits innerhalb weniger Minuten.

Vorteil: bei gleicher Stärke um den Faktor 30 leichter

Neben Segelmembranen bieten sich viele weitere Anwendung für den faserverstärkten Nolax-Klebfilm T51.5000 an. Die Einsatzgebiete sind typischerweise dort, wo Elemente leicht, belastbar und langlebig sein müssen. Ein Beispiel ist die selektive Verstärkung in Bändern. Hier kann der faserverstärkte Klebfilm die Funktion eines Zugträgers übernehmen und somit schweres Gewebe ersetzen. In *Bild 6* ist die Bandzugkraft (k1%-Wert: Kraftauf-

nahme bei 1 % Dehnung) gegen die Anzahl der Lagen aufgetragen. Dabei zeigt sich, dass eine Lage des Klebfilms mit einem Flächengewicht von etwa 15 g·m⁻² (in der Richtung der Fasern) ein Polyestergerewebe mit einem Gewicht von 450 g·m⁻² ersetzen kann. Sowohl das Polyestergerewebe als auch der faserverstärkte Film weisen einen k1%-Wert von ~3,5 N·mm⁻¹ auf. Werden zwei bzw. vier Lagen des Klebfilms eingesetzt, so erhöht sich die Bandzugkraft linear.

Wärmestand und Klimawechsel

Die latent-reaktive Matrix, die für die Klebfilme T51.5000 und T53.5000 eingesetzt wird, verfügt über einen hohen Wärmestand. *Bild 7* zeigt die T-Schälkraft von unidirektionalen Laminaten (2 Lagen; konsolidiert bei 110 °C während 10 min und 4 bar) bei 20 °C und 80 °C. Ein Laminat wurde mit dem T51.5000 und das andere Laminat mit der verwandten, aber thermoplastischen Matrix hergestellt. Bei 20 °C ist die Schälkraft bei beiden Laminaten auf dem Niveau von etwa 3,5 N·mm⁻¹. Wird die Temperatur auf 80 °C erhöht, kann das Laminat mit der thermoplastischen Matrix ohne merklichen Krafteintrag mühelos abgeschält werden. Die latent-reaktive Matrix bleibt bei einer Schälkraft von etwa 3,4 N·mm⁻¹. In vielen Außenanwendungen von Materialien spielt die Resistenz gegen Tempe-

raturschwankungen und sich verändernde Luftfeuchtigkeit eine wichtige Rolle. Bei großen Temperaturunterschieden (Membranen können bei direkter Sonneneinstrahlung eine Oberflächentemperatur von 70-80 °C erreichen) und hoher Feuchtigkeit können die Matrixsysteme dieser weichen Verbundwerkstoffe stark altern. Als Folge kommt es zur Unterwanderung von Wasser, zu Delamination und schließlich zu frühem Versagen des Bauteils. Eine gute Indikation, ob eine Matrix eine hohe Resistenz gegen alternierendes Klima besitzt, ist die Kombination aus dem Ermitteln der Schertemperatur SAFT (shear adhesion failure temperature) vor und nach einem Klimawechseltest, zum Beispiel PV 1200 (Konzernnorm der Volkswagen AG mit 20 Zyklen; ein Zyklus 12 h, T = 25 °C / 80 °C / -40 °C / 25 °C, RH = 40 % / 80 % / 0 % / 40 %).

Tabelle 2 enthält die SAFT-Werte vor und nach dem Klimawechseltest von Laminaten (Scherproben mit je 5 Lagen und einer Orientierung 0°/90°/0°/90°/0°; konsolidiert bei 110 °C während 10 min und 4 bar) aus T51.5000, T52.5110 und T53.5000. In allen Fällen weisen die Werte keine Verschlechterung auf.

Über 12 Monate lagerstabil

Gegenüber vielen anderen reaktiven Klebstoffsystemen sind die faserverstärkten Klebfilme von Nolax für mindestens ein Jahr bei Raumtemperatur lagerstabil. In Bild 8 ist die T-Schälkraft von Laminaten aus dem latent-reaktiven T51.5000 gegen die Lagerzeit bei Raumtemperatur der faserverstärkten Klebfilme (Laminat bestehen aus 10 Lagen; konsolidiert bei 110 °C während 10 min und 4 bar) aufgetragen. Im Verlauf von 12 Monaten bleibt die Reaktivität auf einem Niveau, bei dem die gleiche Schälkraft von etwa 3 N·mm⁻¹ erzielt wird. Solange die latent-reaktiven, faserverstärkten Klebfilme keine Temperaturen von über 50 °C erreichen, bleibt der Klebfilm reaktiv.

Fazit

Dieser Beitrag gibt einen Einblick in das Thema faserverstärkter Klebfilme sowie deren möglichen Anwendungen als leichtgewichtige Hochleistungskomponente, wie ein Membransegel, oder als selektive Verstärkung von Komponenten, wie beispielsweise von Bändern. Bei den faserverstärkten Klebfilmen von Nolax

werden Hochleistungsfasern mit innovativen wässrigen Klebstoffen imprägniert, wobei Eigenschaftsprofile maßgeschneidert werden können. Die neuen, wässrigen thermoplastischen sowie reaktiven Matrixsysteme sind bei Raumtemperatur bis zu einem Jahr lagerfähig und verfügen über Heißsiegelungs-eigenschaften. So können leichte und starke Verbund- oder Hybrid-Komponenten in wenigen Minuten hergestellt werden. Hierbei ist eine Zeiteinsparung bis zu einem Faktor zehn möglich. //

- [7] Wolf et al.: WO 2018/234423 A1 (2018)
- [8] Niepel et al.: WO 2015/097097 A1 (2015)
- [9] Abend: WO 99/29755 A1 (1999)

Die Autoren

Dr. Claude Hosotte

Gruppenleiterin Research and Development

Dr. Raphael Schaller

Chief Technology Officer

– korrespondierender Autor –

(raphael.schaller@nolax.com)

Nolax AG, Sempach Station, Schweiz

Literaturverzeichnis

- [1] Anderson: Physics Today (2008) 38-43
- [2] Baudet: WO 01/17848 A1 (2001)
- [3] Shin et al.: Composite Science and Technology 101 (2007) 996-1008
- [4] Fauve et al.: EP 3 170 650 B1 (2016)
- [5] Hill: The Mathematical Theory of Plasticity (1950)
- [6] Meldner et al.: US 5,333,568 A (1994)

ANZEIGE

www.dopag.de
+49 621 3705 - 500



METER · MIX · DISPENSE

IHR PARTNER FÜR
DOSIER-UND MISCH-
TECHNIK

Unsere Leidenschaft:
Individuelle Systeme
für das Kleben und
Dichten.



HILGER&KERNGROUP