

Im Kielwasser des Scheiterns

Erkenntnisse aus Rückschlägen in der Herstellung

von Hochleistungssegeln

Membransegel haben den Hochleistungssegelsport grundlegend verändert, indem sie durch präzise Ausrichtung und Verklebung von Filamenten eine signifikant gesteigerte Effizienz und Gewichtsreduktion gegenüber konventionell gewobenen Segeln ermöglichen. Im Rahmen dieses Projekts wurden wasserbasierte Klebstoffe entwickelt, die eine lagerstabile und verarbeitungsfreundliche Alternative zu herkömmlichen, lösemittelhaltigen Klebstoffen für die Filamentverklebung bieten. Während die Ergebnisse aus Labortests und Küstenregatten vielversprechend waren, traten bei der Hochseeregatta Transat Jacques Vabre 2019 unter realen klimatischen und mechanischen Belastungen unerwartete Delaminationen auf. Die Analysen zeigten, dass eine spezifische Komponente der Klebstoffformulierung als limitierender Faktor im Membransegel wirkte und maßgeblich zu den beobachteten Delaminationen beitrug. Basierend auf diesen Erkenntnissen wird die Formulierung gezielt weiterentwickelt und getestet, um eine praxistaugliche und effektive Lösung für den Segelmarkt bereitzustellen.

Im Jahr 2007 veröffentlichte die New York Times einen Artikel mit dem Titel „In Sailing, it Comes Down to the Sails“, der die grundlegende Bedeutung von Membranseglern auf Basis gespreizter und verklebter Filamente für das Wettkampfsegeln hervorhob. Besonders wurde betont, dass selbst ein Team aus einem Binnenland wie der Schweiz dank

Interessant für
Schifffahrt, Sport



Dr. Joshua Avossa,
R&D



Erik Roos,
Application



Ueli Wyss,
Business Development & Application



Ronny Ebling,
Business Development



Dr. Raphael Schaller,
CTO

Collano AG
www.collano.com

dieser neuartigen Technologie der Membransegel den America's Cup gewinnen konnte. [1] Der Beitrag unterstreicht die zentrale Rolle, die neue Materialien und technologische Fortschritte für die Leistungsfähigkeit und Dynamik im Hochleistungssport spielen. Die Entwicklung moderner Segelmaterialien und -konstruktionen ist geprägt vom Ziel, maximale Leistungsfähigkeit bei minimalem Gewicht zu erreichen. Leistungsfähigere Segel verbessern die Windausnutzung, während eine Reduktion der Masse des Segels sowohl den Tiefgang des Bootes verringert als damit auch den hydrodynamischen Widerstand zwischen Wasser und Rumpf reduziert. Dies führt insgesamt zu einer erhöhten Effizienz und verschafft einen signifikanten Wettbewerbsvorteil.

Traditionell werden Segel aus gezwirnten Multifilamentgarnen gefertigt und zu Geweben verarbeitet. Diese Bauweise limitiert jedoch die mechanischen Eigenschaften, da die Zwirnung und die zickzackförmige Anordnung der Multifilamentgarne eine optimale Kraftübertragung entlang der Orientierung der Polymerketten in den Filamenten verhindern. [2, 3] Um diese Einschränkungen zu überwinden, wurden Membransegel entwickelt, bei denen Filamente gezielt ausgerichtet und miteinander verklebt werden. [4, 5, 6, 7] Diese Technologie ermöglicht eine deutlich bessere Ausnutzung der Materialeigenschaften und führt zu einer Leistungssteigerung sowie einer Gewichtsreduktion von > 20% im Vergleich zu klassischen Segeln. [8] Beispiele dafür sind die ersten 3DL®- und heutigen 3Di®-Segel von North Sails sowie DFi®-Filamentmembranen von Incidence Sails sowie Tyra PLY®-Laminates von Dimension-Polyant. Zentrales Element dieser Innovation sind hochgradig unidirektional ausgerichtete Filamente in einem Klebefilm, die auch als Thin-Ply-Prepregs oder Spread-Filament-Tapes bezeichnet werden. [9, 10] Der Herstellungsprozess dieser Klebefilme umfasst das kontinuierliche Aufspreizen der Multifilamentgarne zur Ausrichtung der Einzelfilamente, die Imprägnierung mit einem lösungsmittelhaltigen oder in diesem Fall wässrigen Klebstoff und die anschließende Trocknung, wobei der Klebstoff die Filamente als Matrix umschließt. Die Matrix, verstanden als getrockneter Klebstoff, schützt die Filamente vor äußeren Einflüssen und stabilisiert die Struktur. Durch ihre Heiß-Siegelfähigkeit können die filamentverstärkten Klebefilme entsprechend der Belastungslinien im Segel mehrschichtig abgelegt und unter Druck und Temperatur zu Membransegeln laminiert werden. Während mehrtägiger Regatten sind diese Segel extremen Bedingungen wie intensiver Sonneneinstrahlung, Klimawechselzyklen und konstanten mechanischen Belastungen ausgesetzt, wodurch die Matrix eine entscheidende Rolle für die Funktionalität und Langlebigkeit der Segel einnimmt.

Konventionelle, lösemittelhaltige 2K-Klebstoffe für diese Anwendungen als Matrix für Filamente, wie z.B. ADCOTE™ 122-HV, erfordern eine Lagerung bei niedrigen Temperaturen (typischerweise -20 °C), um eine vorzeitige Vernetzung zu verhindern, was die

Handhabung erschwert. [11] Im Rahmen dieses Projekts wurden daher wässrige 1K-Klebstoffe entwickelt, welche nach dem Trocknen heiß-siegelfähig, flexibel, mindestens ein Jahr bei Raumtemperatur lagerstabil und ohne Kühllagerung einsetzbar sind. Dadurch werden Verarbeitung und Lagerung vereinfacht, die Arbeitssicherheit erhöht und eine große Anpassung an bestehende Anlagen überflüssig. Im Entwicklungsprozess traten jedoch auch Rückschläge auf.

Im Folgenden werden die Ergebnisse von Bestrahlungs-, Wechselklima- und Kriechtests an den Matrices, basierend auf wässrigen Klebstoffen der ersten Generation, vorgestellt, die den extremen Bedingungen während der Hochseeregatta Transat Jacques Vabre 2019 nicht standhielten und delaminierten. Die Analyse der Versagensmechanismen liefert wertvolle Erkenntnisse für die Optimierung zukünftiger Klebstoffformulierungen und deren Eignung für den Einsatz unter anspruchsvollen klimatischen und mechanischen Belastungen.

Materialien und Methoden

Während der Hochseeregatta Transat Jacques Vabre 2019 von Le Havre (Frankreich) nach Salvador de Bahia (Brasilien) kam es bei Membranseglern mit Matrixsystemen basierend auf neuentwickelten und wasserbasierten Klebstoffen – einer Formulierung aus Ethylen-Acrylsäure-Copolymer (EAA) und aliphatischem Polyether-Polyurethan (PEUR) – zu unerwartetem Materialversagen. Beobachtet wurde zwar kein katastrophales Versagen der Segel, sondern eine Delamination zwischen einzelnen Lagen der filamentverstärkten Klebefilme – insbesondere an den Rändern und Überlappungen der Segelsektionen. Obwohl die Betroffenen das Rennen beenden konnten, beeinträchtigte die Delamination die Leistungsfähigkeit der Segel und reduzierte somit die Geschwindigkeit der Boote. Das Auftreten der Delamination war insofern überraschend, als alle vorangegangenen Labortests und Küstenregatten unter kontrollierten Bedingungen erfolgreich verliefen. Auch frühere Hochseeregatten mit ähnlichen, aber auf EAA-basierenden Matrices hatten zu positiven Ergebnissen geführt. Daraus ergab sich die zentrale Fragestellung dieser Untersuchung: Weshalb versagten die neuen Matrices unter realen Hochseeregatta-Bedingungen?

Folgende Rohstoffe wurden eingesetzt:

- Als Formulierungsbasis wurde eine wässrige Dispersion eines Ethylen-Acrylsäure-Copolymers (EAA) mit einem Feststoffgehalt von 35% w/w und einer Viskosität von 1.500 mPa·s (Brookfield bei 20 °C, Spindel 5, 100 rpm) eingesetzt. Das EAA weist ein mittleres Molekulargewicht von etwa 30.000 g/mol sowie einen Acrylsäuregehalt von 20% w/w auf. Aufgrund seiner hohen Beständigkeit gegenüber Umwelteinflüssen

- sen, insbesondere Feuchtigkeit, ist EAA in verschiedenen Klebstoffanwendungen etabliert, wobei die vergleichsweise hohe Steifigkeit textile Anwendungen limitiert.
- Zur Erhöhung der Flexibilität als Matrix für die Filamente wurde eine aliphatische Polyether-Polyurethan-Dispersion (PEUR) mit einem Feststoffgehalt von 40% w/w und einer Viskosität von 500 mPa·s (Brookfield bei 20 °C, Spindel 3, 100 rpm) eingesetzt. Das PEUR besitzt (wahrscheinlich) keine weiteren funktionellen Gruppen, weist ein Molekulargewicht von mindestens 100.000 g/mol auf und zeichnet sich durch eine hohe Bruchdehnung von etwa 1.000% aus.
 - Die Einstellung der Applikationsviskosität auf 2.000 mPa·s erfolgte durch Zugabe eines polyacrylat-basierten Verdickers, um die Beschichtung der Filamente frei von Benetzungsstörungen zu halten.
 - Eine schwarze Pigmentpaste mit einem Pigmentgehalt von 20% w/w wurde zur Einfärbung der Klebstoffformulierungen eingesetzt und dient zusätzlich als UV-Schutz für die Filamente.

Wässrige Klebstoffformulierungen

Tab. 1 zeigt eine Übersicht der getesteten Formulierungen A1, A2 und A3. Formulierungen A2 und A3 waren als Matrix für Hochleistungssegel an der Hochseeregatta Transat Jacques Vabre 2019 im Einsatz. Klebstoff A1 wurde erfolgreich in vergangenen Küsten- und Hochseeregatten eingesetzt.

Herstellung filamentverstärkter Klebefilme

Die filamentverstärkten Klebefilme wurden kontinuierlich auf einer Labor-Spreizanlage hergestellt. Zunächst wurden 20 Spulen Multifilamentgarne aus Aramid mit einer

#	Zusammensetzung / % w/w	Bemerkungen
A1	99.5 EAA 0.5 Verdicker	• Robuste Matrix • Steifigkeit begünstigt Rissbildung • Erfolgreich während Küsten- und Hochseeregatten
A2	49.5 EAA 49.5 PEUR 1.0 Verdicker	• Flexible Matrix • Einfache Manipulation der Segel wegen der erhöhten Flexibilität • Erfolgreich während Küstenregatten getestet • Delamination während Hochseeregatta (Transat Jacques Vabre 2019)
A3	48.5 EAA 48.5 PEUR 2.0 Pigmentpaste 1.0 Verdicker	• Flexible Matrix • Schwarze Einfärbung dient zusätzlich als UV-Schutz für die Filamente • Erfolgreich während Küstenregatten getestet • Delamination während Hochseeregatta (Transat Jacques Vabre 2019)

Tab. 1: Zusammensetzung der Formulierungen (Quelle: Collano AG)

linearen Dichte von 1.610 dtex auf eine Breite von etwa 20 cm aufgespreizt und jeweils mit den wässrigen Klebstoffformulierungen A1, A2 und A3 in einem Bad imprägniert. Anschließend wurden die aufgespreizten und imprägnierten Garne auf einem biaxial orientierten Polyesterträger (BOPET) abgelegt. Die Herstellgeschwindigkeit betrug ca. 2 m/min, und die Trocknung erfolgte über den Kontakt mit einer 50 °C warmen Oberfläche. In einem zweiten Durchgang wurde auf den getrockneten Klebefilm eine zweite Schicht aus 20 Spulen Multifilamentgarnen aus ultrahochmolekularem Polyethylen (UHMWPE) mit einer linearen Dichte von 1.760 dtex aufgespreizt. Diese Schicht wurde ebenfalls mit den jeweiligen wässrigen Klebstoffformulierungen A1, A2 und A3 imprägniert und bei 50 °C getrocknet. Dabei entstanden zweilagige, filamentverstärkte Klebefilme bestehend aus je einer Schicht Aramid und UHMWPE mit einem Flächengewicht von 100 bis 150 g/m², einem Filamentanteil von 65% w/w und Längen zwischen 75 und 100 m.

Herstellung von Membranen und Prüfkörpern

Die Membranen mit Matrices basierend auf A1, A2 und A3 wurden in einer Größe von etwa 30 × 30 cm² aus vier Lagen filamentverstärktem Klebefilm gefertigt. Die Lagen wurden in den Orientierungen 0° / 60° / -60° / 0° angeordnet. Vor dem Laminieren wurde der BOPET-Träger entfernt, wobei die Abfolge von Aramid- und UHMWPE-Schichten konstant beibehalten wurde. Das Laminieren erfolgte bei 110 °C, einem Druck von mindestens 1 bar und einer Haltezeit von 10 min. Aus den hergestellten Membranen wurden Prüfkörper in Form von Zugscherprüfkörpern angefertigt. Diese wiesen eine Länge von mindestens 180 mm und eine Breite von 25 mm auf. Der Überlappungsbereich der Prüfkörper betrug 25 × 25 mm². Die Überlappung wurde mit dem entsprechenden Klebefilm (Flächengewicht 50 – 65 g/m²) bei 110 °C, 1 bar und 10 min Siegelzeit hergestellt. Im Überlappungsbereich wurden jeweils die UHMWPE-Schichten aufeinander gesiegelt. Es wurde darauf geachtet, dass die 0°-Ausrichtung der Filamente in Richtung der Zugbelastung liegen.

Zugversuche

Die Bruchkraft der Zugscherprüfkörper wurde mit einer Universalprüfmaschine bei einer Prüfgeschwindigkeit von 10 mm/min, einer Umgebungstemperatur von 20 °C und einer relativen Luftfeuchtigkeit von 65% ermittelt. Es wurde eine 30 kN-Messzelle verwendet. Zur Untersuchung temperaturabhängiger Eigenschaften kam eine integrierte Umluftheizkammer zum Einsatz. Es wurde bewusst keine klassische Zugscherfestigkeit (in N/mm² = MPa) ermittelt, da das beobachtete Versagensverhalten nicht dem typischen Bruch entlang der Klebfläche entsprach. Stattdessen zeigten die Proben eine komplexe Delamination und Versagensmechanismen ausserhalb der

idealen Scherfläche. Daher wird im Folgenden die gemessene Bruchkraft bezogen auf die Probenbreite in N/mm angegeben, um die Unterschiede zwischen den Klebstoffsystemen darzustellen.

Infrarotbestrahlung

Die Temperaturentwicklung an Membranen mit den Matrizes A1, A2 und A3 wurde gemessen. Ein Temperaturfühler wurde zwischen der zweiten und dritten Lage der Membran eingebettet. Die Temperaturdaten wurden mit einem Temperatur-Datenlogger ab der Starttemperatur von 20 °C über einen Zeitraum von 10 min aufgezeichnet. Die Bestrahlung erfolgte mit Infrarotstrahlungsintensitäten von 900 W/m² und 1.200 W/m². Die Strahlungsintensität von 900 W/m² entspricht der typischen solaren Einstrahlung auf Meereshöhe am Äquator an einem wolkenlosen Tag, wobei 1.200 W/m² eine ungewöhnlich hohe Intensität darstellt. [12]

Ultraviolettbestrahlung

Mit einem Bewitterungsgerät wurden Zugscherprüfkörper über einen Zeitraum von zehn Tagen (240 h) kontinuierlich einer UV-A-Strahlungsquelle (Wellenlängenbereich 315 – 400 nm) mit einer Bestrahlungsstärke von 0.68 W/m² bei 45 °C ausgesetzt.

Klimawechselbelastung

Um die extremen Feuchtigkeits- und Temperaturbelastungen von Segeln zu simulieren und deren Einfluss zu analysieren, wurden die Zugscherprüfkörper einem Klimawechseltest gemäß der Konzernnorm Volkswagen VW PV 1200 unterzogen. Die Prüfkörper wurden dazu in einem Klimaschrank über 20 Zyklen wechselnden Temperatur- und Luftfeuchtigkeitsbedingungen ausgesetzt. Jeder Zyklus bestand aus 12 h und umfasste eine Minimalphase bei - 40 °C und ~10% r.F. sowie eine Maximalphase bei 80 °C und 80 % r.F. Diese Prüfparameter sind nicht typisch für maritime Bedingungen und daher nicht repräsentativ für den realen Einsatz. Die Erfahrungen zeigen jedoch, dass eine erfolgreiche Bewältigung dieser Extrembedingungen ein Hinweis auf die hohe Robustheit des Klebstoffes respektive in dieser Anwendung der Matrix ist.

Kriechversuche

Das Kriechverhalten der Zugscherprüfkörper wurde mit einer Universalprüfmaschine bei 20 °C und 65% r.F. untersucht. Während typische Kriechversuche bei Zugkräften von 30 – 70% der maximalen Bruchkraft durchgeführt werden, wurden die Proben bewusst mit einer konstanten Last von 90% ihrer maximalen Zugkraft belastet. Diese extreme Belastung wurde gewählt, um das Versagen im Überlappungsbereich der Prüf-

körper von $25 \times 25 \text{ mm}^2$ relativ rasch zu provozieren. Die Dehnungsentwicklung wurde kontinuierlich bis zum Probenbruch aufgezeichnet.

Ergebnisse

Segel auf Hochseeregatten sind extremen Bedingungen ausgesetzt – intensive UV-Strahlung, starke Temperaturschwankungen und kontinuierliche Zugbelastungen. Um die Ursachen für das Versagen der neuen Matrix unter realen Hochseebedingungen zu identifizieren, wurden Membranen mit den Matrices basierend auf den wässrigen Klebstoffen A1, A2 und A3 (Tab. 1) untersucht. Diese Membranen bestanden aus vier Lagen filamentverstärkter Klebefilme in den Orientierungen $0^\circ/60^\circ/-60^\circ/0^\circ$, aus denen Zugscherproben mit einer Überlappung von $25 \times 25 \text{ mm}^2$ gefertigt wurden.

Die klassische Zugscherfestigkeit (in N/mm^2 bzw. MPa) wurde in dieser Untersuchung bewusst nicht bestimmt, da das beobachtete Bruchverhalten nicht dem idealisierten Scherversagen entlang der Klebefuge entsprach. Stattdessen zeigten die Proben komplexe Schädigungsmechanismen, darunter intra- und interlaminae Delaminationen und kohäsive Brüche der Segelmembranen ausserhalb der vorgesehenen Scherfläche. Zur Vergleichbarkeit der Klebstoffsysteme wurde daher die gemessene maximale Bruchkraft auf die Probenbreite in N/mm bezogen angegeben.

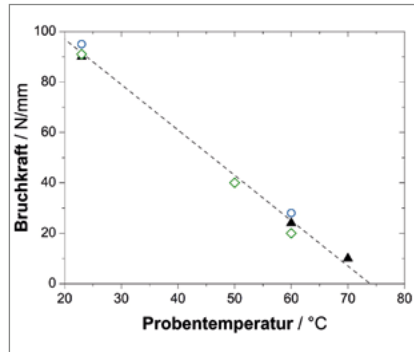


Bild 1: Abhängigkeit der Bruchkraft von der Probestemperatur mit verschiedenen Matrices basierend auf Klebstoff: $\circ$ A1 (EAA), $\diamond$ A2 (EAA:PEUR 1:1) und $\blacktriangle$ A3 (EAA:PEUR 1:1 schwarz). Oberhalb der gestrichelten Linie versagen die Zugscherproben (Bild: Collano AG)

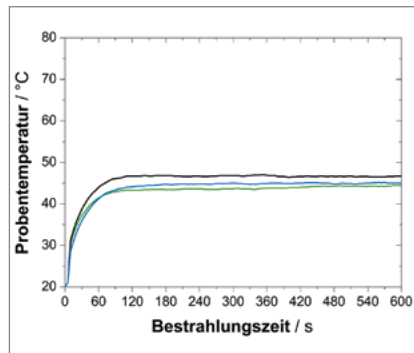


Bild 2: Infrarotbestrahlungsinduzierte Temperaturänderungen von Membranen, hergestellt mit verschiedenen Klebstoffen – A1 (EAA), – A2 (EAA:PEUR 1:1) und – A3 (EAA:PEUR 1:1 schwarz) bei einer Bestrahlungsstärke von 900 W/m^2 und einer Umgebungstemperatur von 35°C . Alle Proben erreichten nach 10 min eine Temperatur von $45 \pm 2^\circ\text{C}$ (Bild: Collano AG)

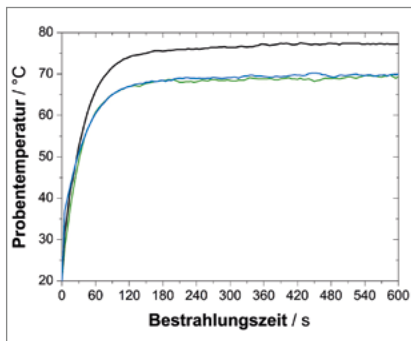


Bild 3: Temperaturverlauf verschiedener Membranen unter Infrarotbestrahlung (1.200 W/m², Umgebungstemperatur 45 °C): Membran, hergestellt mit dem schwarzen Klebstoff – A3 erreicht eine um etwa 10 °C höhere Temperatur als die ungefärbten Membranen (– A1 und – A2), unabhängig von der Klebstoffzusammensetzung (Bild: Collano AG)

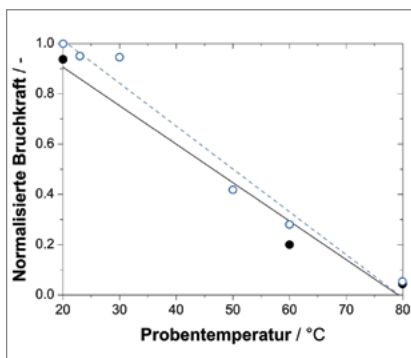


Bild 4: Temperaturabhängigkeit der normalisierten Bruchkraft von Proben basiert auf A1 (EAA) vor (o) und nach (•) UV-Bestrahlung. Die Linien sind die dazugehörigen Ausgleichsgeraden. Die Bestrahlung zeigt keinen signifikanten Einfluss auf die Bruchkraft. Die Werte sind auf die Bruchkraft bei 20 °C vor UV-Bestrahlung normalisiert (entspricht ~100 N/mm) (Bild: Collano AG)

Die Ergebnisse der Zugscherprüfungen zeigen eine deutliche lineare Abhängigkeit der mechanischen Integrität von der Umgebungstemperatur (**Bild 1**). Die Versagensgrenze folgt oberhalb der Funktion:

$$F(T) = -1.8T + 133$$

wobei

F = Bruchkraft in N/mm (maximale Bruchkraft bezogen auf die Probenbreite) und

T = Prüfkörpertemperatur in °C.

Bei 20 °C beträgt die Bruchkraft etwa 100 N/mm, während sie bei 45 °C – einer für Segel typischen Temperatur unter starker Sonneneinstrahlung – auf etwa 50 N/mm absinkt. Es war naheliegend zu vermuten, dass die durch Sonneneinstrahlung induzierte Temperaturerhöhung der Segel die thermoplastischen Matrices schwächte und weiter zu Delaminationen führen könnte. Weitere systematische Versuche widerlegten die Hypothese, dass allein die Sonneneinstrahlung die Ursache für die Delamination war. Bei einer Infrarotstrahlungsintensität von 900 W/m², entsprechend der typischen solaren Einstrahlung am Äquator, erwärmten sich alle drei Membranen auf 45 ± 2 °C (**Bild 2**), während die Lufttemperatur 35 °C erreichte. Hier wurde eine Bruchkraft von 50 - 60 N/mm an allen Zugscherproben ermittelt. Erst bei unrealistisch hohen Strahlungsintensitäten von 1.200 W/m² (Intensitäten außerhalb der Erdatmosphäre) zeigten die

schwarz pigmentierten Membranen (Matrix mit Klebstoff A3) mit 75 °C eine um 10 °C deutlich höhere Temperatur als die nicht eingefärbten Membranen (Bild 3). In diesem Temperaturbereich (65 - 75 °C) sank die Bruchkraft signifikant – selbst bei dem robusten EAA-basierten Klebstoff A1, der auf früheren Hochseeregatten keine Delamination zeigte.

Ein weiteres aufschlussreiches Bild ergaben die Alterungstests unter künstlicher UV-Belastung (Bild 4 und 5). Selbst nach 240 h intensiver Exposition zeigten die Proben kaum Anzeichen eines Festigkeitsverlustes. Die Matrix basierend auf EAA (A1) behielt nahezu ihre gesamte Ausgangsfestigkeit bei – konkret lag die Festigkeit bei 90% des Initialwertes. Auch die schwarz eingefärbte Matrix basierend auf A3, welche eine Mischung aus EAA und PEUR im Verhältnis 1:1 enthält, zeigte mit 95% Restfestigkeit eine bemerkenswerte Widerstandsfähigkeit. Die in A3 enthaltenen schwarzen Pigmente erwiesen sich dabei als effektiver UV-Schutz, der die lichtinduzierten Schädigungsmechanismen deutlich abschwächte. Diese Resultate unterstreichen, dass UV-Strahlung – zumindest wie hier simuliert mit UV-A-Belastung – keinen kritischen Einfluss auf die untersuchten Klebstoffe hatte.

Jedoch zeigten die Proben, welche über mehrere Zyklen hinweg wechselnden Feuchte- und Temperaturbedingungen

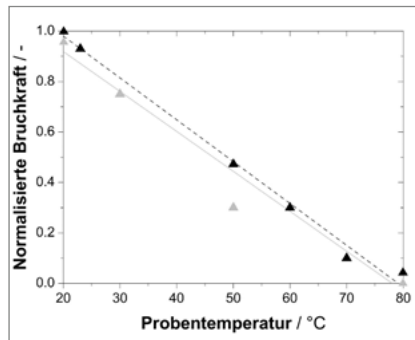


Bild 5: Temperaturabhängigkeit der normalisierten Bruchkraft von Proben auf Basis von A3 (EAA:PE-PU 1:1 schwarz) vor (▲) und nach (▲) UV-Bestrahlung. Die Werte sind auf die Bruchkraft bei 20 °C vor UV-Bestrahlung normalisiert (entspricht ~100 N/mm)

(Bild: Collano AG)

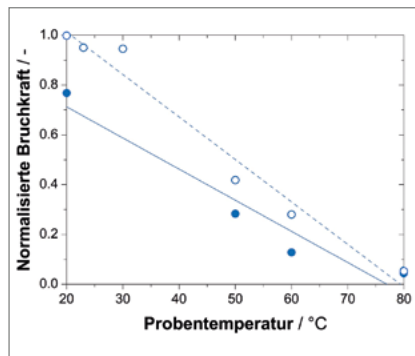


Bild 6: Temperaturabhängigkeit der normalisierten Bruchkraft von Proben auf Basis von A1 (EAA) vor (○) und nach (●) Alterung im Klimawechsel. Die Werte sind auf die Bruchkraft bei 20 °C vor Alterung normalisiert (entspricht ~100 N/mm)

(Bild: Collano AG)

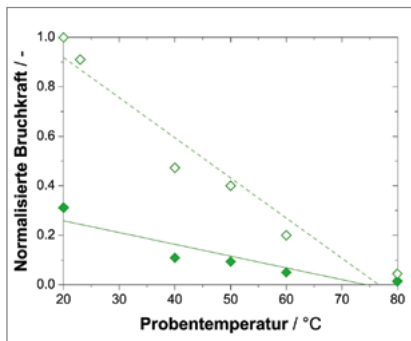


Bild 7: Temperaturabhängigkeit der normalisierten Bruchkraft von Membranen auf Basis von A2 (EAA:PEUR 1:1) vor (◇) und nach (◆) Klimawechsel. Nach Alterung ist die Bruchkraft im gesamten Temperaturbereich deutlich reduziert, was auf einen erheblichen Leistungsverlust hinweist. Die Werte sind auf die Bruchkraft bei 20 °C vor der Alterung normalisiert (entspricht ~100 N/mm)

(Bild: Collano AG)

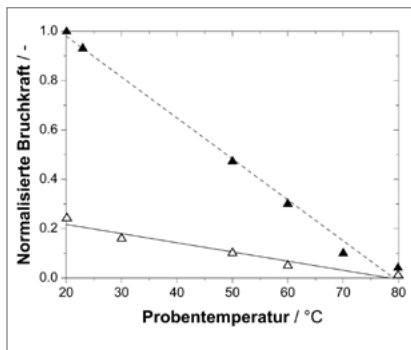


Bild 8: Temperaturabhängigkeit der normalisierten Bruchkraft von Prüfkörpern mit Matrix basierend auf A3 (EAA:PEUR 1:1 schwarz) vor (▲) und nach (△). Auch hier zeigt die Alterung im alternierenden Klima eine signifikante Erniedrigung der Leistungsfähigkeit (Bild: Collano AG)

ausgesetzt waren, klare Unterschiede (**Bild 6, 7 und 8**). Hier offenbarte sich die entscheidende Schwachstelle der PEUR-Komponente: Die Matrices basierend auf A2 und A3, beide mit PE-PU-Anteil, büßten über 80% ihrer ursprünglichen Festigkeit ein (**Bild 7 und 8**). Im Gegensatz dazu zeigte die EAA-basierte Matrix mit A1 nur eine Reduktion von etwa 20% gegenüber der ursprünglichen Leistungsfähigkeit (**Bild 6**). Diese drastischen Unterschiede deuten darauf hin, dass die Kombination aus Feuchtigkeit und Temperaturwechsel die PEUR-Komponente destabilisiert und damit die Integrität der Verklebung massiv beeinträchtigt.

Während der Kriechversuche wurde den Proben eine konstante Kraft angelegt, die 90% ihrer maximalen Zugkraft entspricht. Diese Versuche lieferten nach Alterung im Klimawechsel ebenfalls ein konsistentes Bild (**Bild 9**). Während Proben mit der A3 Matrix bereits nach weniger als einer Minute unter konstanter Last versagten, hielten die mit A1 hergestellten Proben der Belastung über 500 h stand. Diese außergewöhnliche Stabilität des EAA-Klebstoffes unterstreicht dessen Eignung für den Einsatz unter anspruchsvollen Bedingungen.

Zusammenfassend zeigen diese Ergebnisse eindrucksvoll, dass die Robustheit der Klebstoffe für Segel nicht allein durch UV-Beständigkeit oder Temperaturtoleranz bestimmt wird. Vielmehr ist es das komplexe Zusammenspiel aus Feuchtigkeit, Temperaturwechsel und konstanter

mechanischer Belastung, das die Lebensdauer und Zuverlässigkeit der Verklebung maßgeblich beeinflusst. Während die EAA-Komponente als ausgesprochen widerstandsfähig gegenüber allen getesteten Belastungen hervortritt, erweist sich die PEUR-Komponente trotz ihrer Flexibilitätsvorteile als Achillesferse im Langzeiteinsatz auf Hochseeregatten.

Ausblick

Zur Flexibilisierung der Matrixsysteme (basierend auf wässrigen Klebstoffen der ersten Generation) wurde aliphatisches Polyether-Polyurethan (PEUR) eingesetzt. Dies sollte die Segel geschmeidiger machen, die Handhabung erleichtern und beim Rollen und Falten der Segel Faserbrüche verhindern. Unter zyklischer Feuchte- und Temperaturbelastung und Kriechbeanspruchung zeigte die PEUR-Komponente jedoch einen signifikanten Abbau der Leistungsfähigkeit, welcher unter realen Einsatzbedingungen auf hoher See Delamination in den Segeln verursachte.

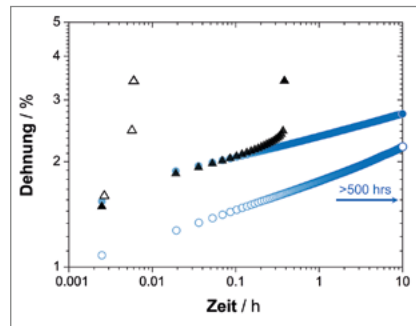


Bild 9: Kriechverhalten von Proben auf Klebstoffbasis A1 (EAA) vor (o) und nach (●) Alterung im Klimawechsel und A3 (EAA:PEUR 1:1 schwarz) vor (▲) und nach (△) Alterung. Proben hergestellt mit EAA:PEUR zeigen bereits nach kurzer Zeit deutlich höhere Dehnungen und eine geringere Kriechbeständigkeit im Vergleich zu EAA. Die EAA-basierten Proben halten der Belastung mindestens weitere 500 h stand (Bild: Collano AG)

Die gewonnenen Erkenntnisse aus unseren Untersuchungen bilden das Fundament für die nächste Generation Membransegel-Klebstoffe. Auch wenn das Versagen der ersten Generation kurzfristig unser Ansehen belastet hat, sehen wir darin vor allem einen Ansporn zur Weiterentwicklung und zur konsequenten Umsetzung unserer Vision. Aufbauend auf den Erfahrungen, die wir nach der Transat Jacques Vabre 2019 gesammelt haben, arbeiten man derzeit an reaktiven, wässrigen Klebstoffen auf PU-Basis, die speziell für den Einsatz in Hochleistungs-Membransegeln entwickelt werden. [13] Diese neuen Matrices zeichnen sich durch eine außergewöhnliche Robustheit gegen Wechselklima und mechanische Belastung aus, besitzen eine Lagerstabilität von über zwölf Monaten bei Raumtemperatur und befinden sich aktuell in Feldtests unter realen Einsatzbedingungen. Erste Rückmeldungen deuten darauf hin, dass die Formulierungen nicht nur robust und langlebig, sondern für die Anwendung auch hochflexibel sind – Eigenschaften, die für die anspruchsvollen Hochseeregatten unerlässlich sind.

Die Vision geht jedoch über reine Leistungsparameter hinaus: Mit den wasserbasierten Klebstoffen setzen wir neue Maßstäbe in puncto Arbeitssicherheit. Durch die drastische Reduktion flüchtiger organischer Verbindungen (VOC) wird ein aktiver Beitrag zum Gesundheitsschutz am Arbeitsplatz geleistet. Gleichzeitig ermöglichen die lagerstabilen Formulierungen eine Vereinfachung der Logistik und lassen sich nahtlos in bestehende Produktionsprozesse integrieren – ganz ohne aufwändige Anpassungen der Anlagen für die Segelherstellung.

Die zweite Generation wässriger Klebstoffe auf Basis von reaktivem PU wird den Sprung vom Feldtest in die Praxis erfolgreich meistern und einen nachhaltigen Beitrag zur Weiterentwicklung des Segelsports leisten. Das Ziel bleibt es, neuartige Lösungen zu schaffen, die nicht nur den technischen Anforderungen der Gegenwart genügen, sondern auch den Herausforderungen der Zukunft gerecht werden.

Literatur

- [1] Christopher Clarey, In sails, it comes down to the sails, *The New York Times*, Ausgabe 29. Juni 2007, 2007.
- [2] Rodney Hill, *The mathematical theory of plasticity*, Oxford Classic Texts in the Physical Science, Oxford Press, 1950.
- [3] Jérôme Lefèvre, Ultra-high-performance polymer foils, PhD Thesis No. 17728, ETH Zürich, 2008.
- [4] Jean-Pierre Baudet, Sail of one piece three dimensional laminated fabric having uninterrupted load bearing yarns, US Patent 5,097,784, 1992.
- [5] Heiner Meldner & Roland J. Downs, Composite material for fabrication of sails and other articles, US Patent 5,470,632, 1995.
- [6] Gérard Gautier & Edouard Kessi, Method for producing reinforced, formed fabrics, US Patent 8,709,186, 2014.
- [7] Stéphane Fauve, Pierre-Antoine Morvan & Brice Turban, Manufacturing method for manufacturing a composite strip and corresponding production facility for the production of a ship sail, EU Patent 3 170 650 B1, 2016.
- [8] <https://www.northsails.com/de-dach/page/3di> (15. Juni 2025).
- [9] Joel Galos, Thin-ply composites laminates: a review, *Composite Structures*, 236, 2020.
- [10] Albertino J.C. Arteiro, Carolina Furtado, Giuseppe Catalanotti, Peter Linde & Pedro P. Camanho, Thin-ply polymer composite materials: a review. *Composites Part A*, 132, 2020.
- [11] Heiner Meldner & Roland J. Downs, Material for the fabrication of sails, US Patent 5,333,568, 1994.
- [12] <https://www.newport.com/t/introduction-to-solar-radiation> (accessed January 2025).
- [13] Thomas Wolf, Claude Hosotte, Philipp Frei, Raphael Schaller & Beat Bruderer, Sheetlike semifinished product having a plastic matrix, US Patent 11,124,616 B2, 2021.