



# Dynamisch-mechanische Analyse an Hochleistungs-Badmintonsaiten

Dr. Mitchell Ross, Mike Hsu und Brad Hammond; NIB Applications Laboratory

## Einleitung

Das Verständnis der viskoelastischen Eigenschaften von Polymeren ist für deren Einsatz in vielen Anwendungsbereichen – darunter auch bei Sportartikeln – von entscheidender Bedeutung. Hochleistungspolymere und Polymerverbundwerkstoffe haben die Sportindustrie revolutioniert, indem sie strapazierfähige, komfortable, präzise und langlebige Ausrüstungsgegenstände bieten. Polymere und Polymerverbundwerkstoffe sind aus unserem Alltag nicht mehr wegzudenken: Sie kommen als Bodenbelag in Sportanlagen im Innen- und Außenbereich, als Schuhsohlen, als Netzgewebe, als Saiten in Schlägern usw. zum Einsatz. Die Fähigkeit, die thermischen Eigenschaften und die physikalische Leistungsfähigkeit dieser Materialien zu bewerten, ist wichtig für deren Konstruktion, Herstellung und Verwendung.

Die dynamisch-mechanische Analyse (DMA) wird in erster Linie zur Untersuchung der viskoelastischen Eigenschaften von Polymerwerkstoffen eingesetzt, eignet sich aber auch zur Untersuchung von Metallen und Keramiken oder zur Simulation spezifischer mechanischer Bedingungen. Der NETZSCH DMA 303 *Eplexor*® ist ein vielseitiges Tischgerät, das in einem Temperaturbereich von -170 °C bis 800 °C (-274 °F bis 1472 °F) messen, Kräfte von 1 mN bis 50 N aufbringen und bei Frequenzen von 0,001 bis 150 Hz arbeiten kann.

In dieser Studie wurden drei verschiedene Hochleistungs-Badmintonsaiten mittels dynamisch-mechanischer Analyse (DMA) getestet. Das moderne Design von Badmintonsaiten umfasst mehrere Materialien, Schichten und Beschichtungen [2]. Alle drei getesteten Proben weisen die gleiche Grundstruktur auf: einen Nylon-Multifilamentkern, der von geflochtenen Nylonfasern umgeben ist. Probe 1 verfügt über eine Titanhydrid-Beschichtung, während die Proben 2 und 3 eine Beschichtung aus gestapelten, becherförmigen Kohlenstoffnanoröhren in einem Trägermaterial aufweisen. Aus Sicht der Leistungsfähigkeit stuft der Hersteller die verschiedenen Saiten wie in Tabelle 1 dargestellt ein.

Hauptziel dieser Studie ist es, die mittels DMA gemessenen viskoelastischen Eigenschaften mit den vom Hersteller in Tabelle 1 angegebenen Leistungskriterien in Beziehung zu setzen. Der Speichermodul ( $E'$ ) beschreibt die Fähigkeit des Materials, Energie zu speichern und wieder abzugeben (wie eine Feder). Dies steht in direktem Zusammenhang mit der angegebenen Rückstoßkraft. Der Verlustmodul ( $E''$ ) beschreibt die Energieabgabe des Materials (typischerweise durch innere Reibung), und schließlich ist der Dämpfungsfaktor ( $\tan \delta$ ) das Verhältnis von  $E''$  zu  $E'$  (was angibt, wie stark ein Material eine aufgebrachte Kraft dämpft). Daher hängen sowohl die Schlägergeräuschkämpfung als auch die Stoßdämpfung direkt mit den Eigenschaften von  $E''$  und  $\tan \delta$  zusammen. Darüber hinaus können Parameter wie die Lebensdauer durch Tests in Abhängigkeit der zunehmenden Kraft statt der Temperatur untersucht werden.

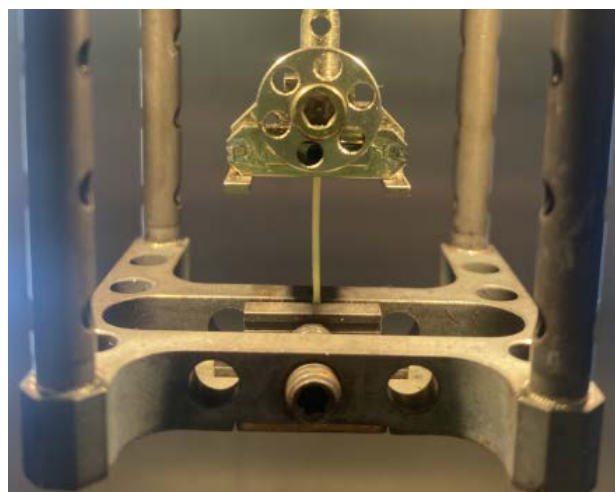
**Tabelle 1** Vom Hersteller angegebene Eigenschaften der drei Badmintonsaiten, Bewertung 1 bis 10 Punkte maximal

| Variable         | Probe 1 | Probe 2 | Probe 3 |
|------------------|---------|---------|---------|
| Rückstoßkraft    | 7       | 8       | 9       |
| Haltbarkeit      | 7       | 10      | 7       |
| Schlägergeräusch | 7       | 7       | 8       |
| Stoßdämpfung     | 6       | 6       | 8       |
| Kontrolle        | 6       | 6       | 10      |

## DMA-Untersuchung der viskoelastischen Eigenschaften und Applikationssimulation

Zur Bestimmung der viskoelastischen Eigenschaften der drei Badmintonsaiten wurde an jeder Probe ein Standard-Temperaturweep im Zugmodus (siehe Abbildung 2) mit dem NETZSCH DMA 303 *Eplexor*® von -150 bis 150 °C durchgeführt. aufgeheizt. Die DMA ist für die Detektion einer ganzen Reihe von thermischen Übergängen besonders empfindlich. Aus theoretischer Sicht tritt ein Übergang auf, wenn  $E'$  abnimmt und  $E''$  sowie  $\tan \delta$  jeweils ein Maximum (Peak) zeigen.

Tabelle 2 fasst die verschiedenen Übergangsbereiche der einzelnen Proben zusammen. Das viskoelastische Profil von Probe 1 in Abhängigkeit von der Temperatur ist in Abbildung 2 dargestellt, das von Probe 2 in Abbildung 3 und das von Probe 3 in Abbildung 4. Alle Proben wurden im Zugmodus gemessen. Aus den Abbildungen 2 bis 4 geht hervor, dass die Profile und Übergangsbereiche von Probe 2 und Probe 3 sehr ähnlich sind, im Gegensatz zu Probe 1, die sich deutlich unterscheidet (Probe 1 weist eine andere Beschichtung auf). Nylon ist ein aliphatisches Polyamid, das üblicherweise nach numerischen



1 Visuelle Darstellung einer der unter Zugspannung gemessenen Saiten.

Typen (6, 66, 11, 12) klassifiziert wird. Alle Typen weisen einen Glasübergang zwischen 40 und 95 °C auf. Es ist daher sehr interessant, die anderen Übergänge zu betrachten, die bei Temperaturen unterhalb der Umgebungstemperatur beobachtet werden.

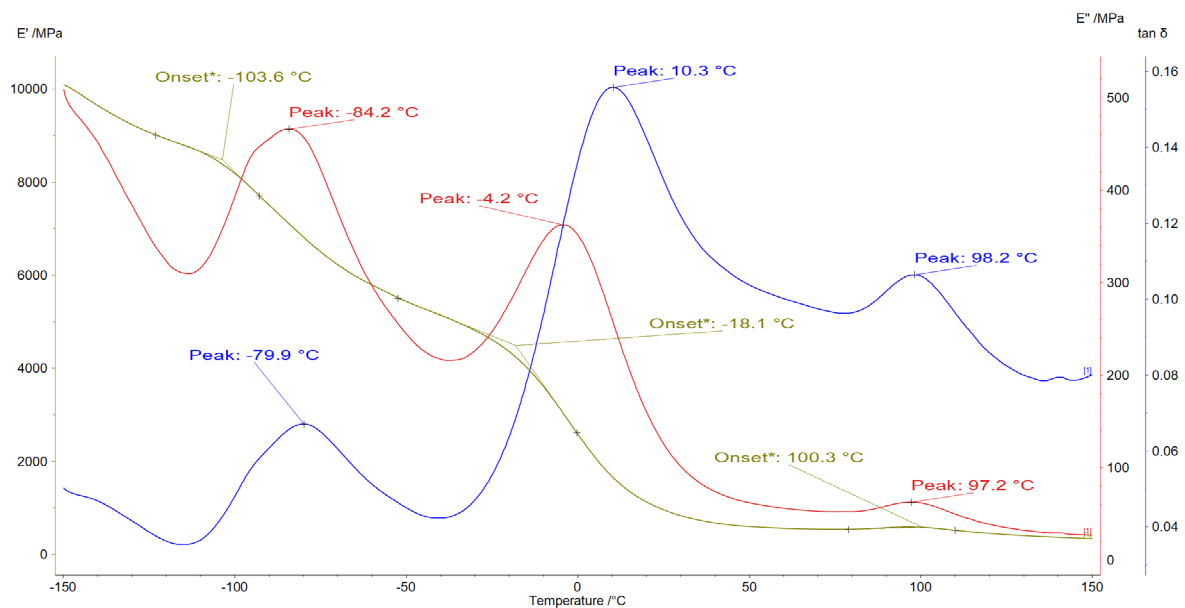
**Tabelle 2** Thermische Übergänge der Proben 1, 2, und 3, aufgezeichnet für  $E'$ ,  $E''$  und  $\tan \delta$ . Alle Proben wurden im Zugmodus mit einer dynamischen Deformation von 10  $\mu\text{m}$ , einem Proportionalfaktor von 1.3 und einer Heizrate von 2 °C/min gemessen..

| Übergang       | $E'$ -Onset           | $E''$ -Peak         | $\tan \delta$     |
|----------------|-----------------------|---------------------|-------------------|
| <b>Probe 1</b> |                       |                     |                   |
| 1              | -103,6 °C<br>8382 MPa | -84,2 °C<br>467 MPa | -79,9 °C<br>0,067 |
| 2              | -18,1 °C<br>4242 MPa  | -4,2 °C<br>363 MPa  | 10,3 °C<br>0,56   |
| 3              | 100,3 °C<br>580 MPa   | 97,2 °C<br>62 MPa   | 98,2 °C<br>0,136  |
| <b>Probe 2</b> |                       |                     |                   |
| 1              | -90,7 °C<br>7001 MPa  | -74,1 °C<br>381 MPa | -71,9 °C<br>0,061 |
| 2              | 22,0 °C<br>3813 MPa   | 49,4 °C<br>220 MPa  | 65,1 °C<br>0,136  |
| <b>Probe 3</b> |                       |                     |                   |
| 1              | -87,5 °C<br>5722 MPa  | -71,9 °C<br>309 MPa | -70,7 °C<br>0,060 |
| 2              | 26,2 °C<br>3018 MPa   | 51,7 °C<br>187 MPa  | 68,1 °C<br>0,138  |

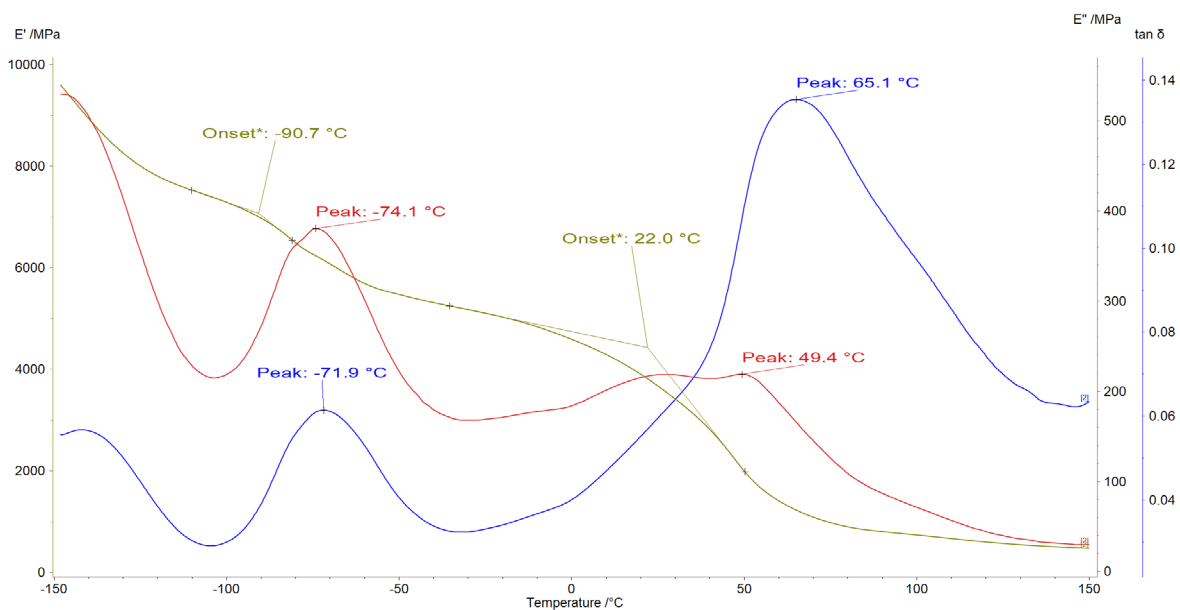
Wie aus den Abbildungen 2 bis 4 zu sehen ist, ist es auch wichtig, den Einfluss der Temperatur auf das viskoelastische Verhalten der Saiten zu betrachten. Badminton wird in der Regel in der Halle gespielt, aber wie verhält es sich beim Spiel im Freien?

Abbildung 5 zeigt das Temperaturprofil von Probe 1 im Bereich von Probe im Bereich von 0 bis 50 °C. An einem kühlen Herbsttag bei 4 °C wären die Saiten somit 2,3 mal

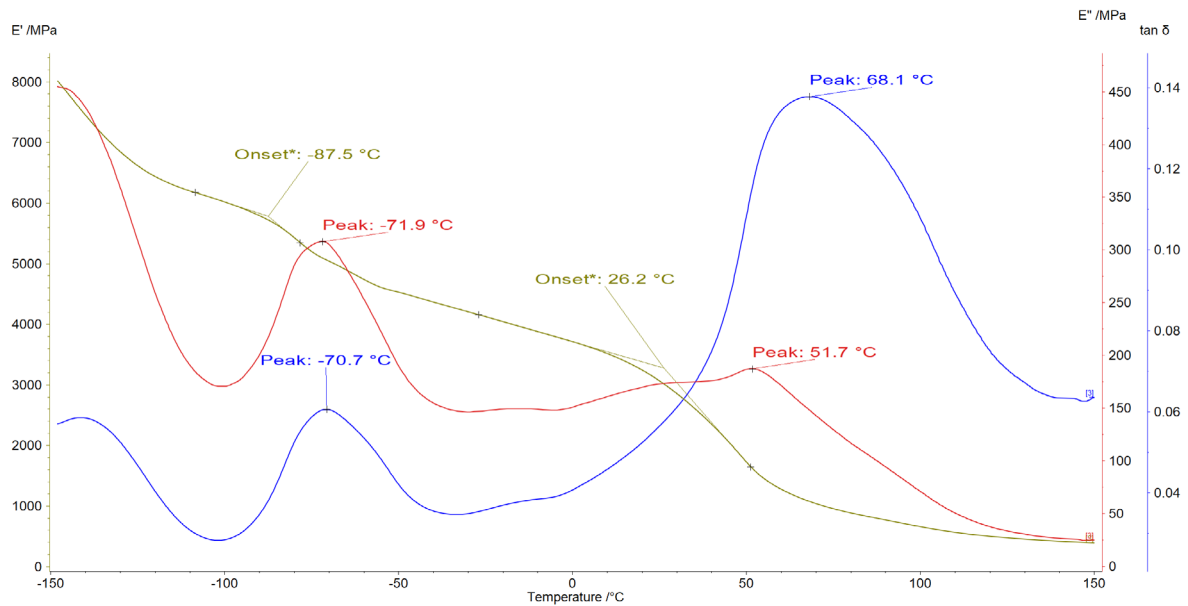
steifer als bei Raumtemperatur (25 °C) und 3,0 mal steifer als an einem heißen Sommertag bei 35 °C ( $E'$ ). Der Dämpfungsfaktor folgt jedoch nicht genau demselben Trend: Er ist bei 4 °C nur 1,1-mal höher als bei 25 °C und nur 1,3-mal höher als bei 35 °C. Daher würde, obwohl die Saiten steifer wären und beim Schlagen des Federballs weniger nachgeben würden, die von den Saiten absorbierte und nicht in den Schlag übertragene Energiemenge ähnlich bleiben.



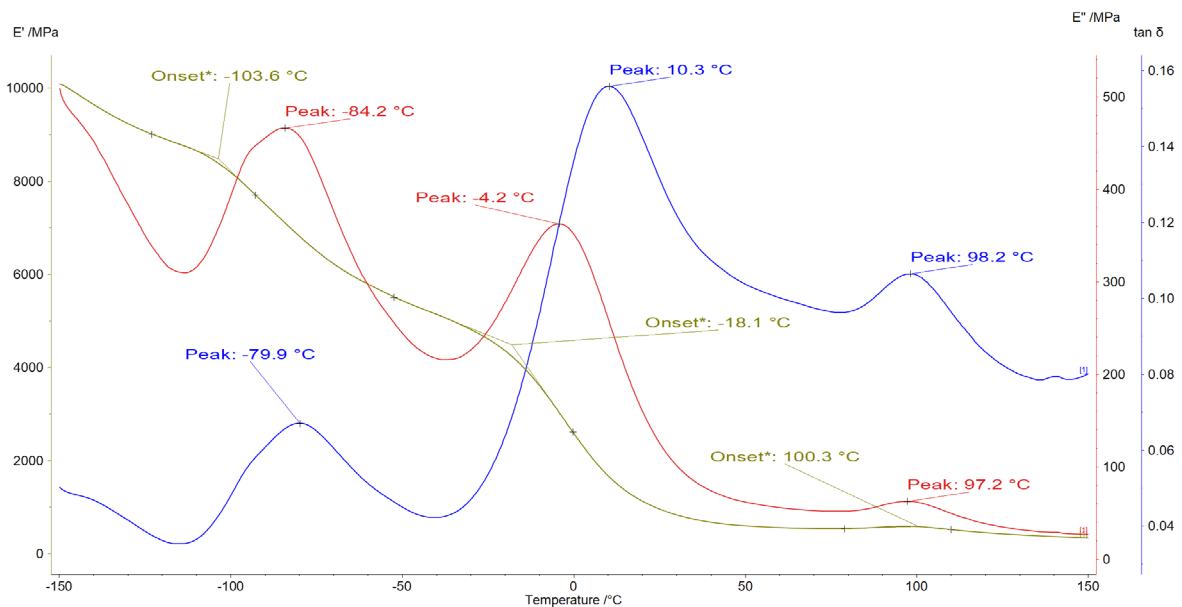
**2** Das ausgewertete Temperaturprofil von Probe 2, das unter Verwendung einer dynamischen Verformung von 10 µm, eines Proportionalfaktors von 1,3 und einer Aufheizrate von 2 °C/min gemessen wurde.



**3** Das ausgewertete Temperaturprofil von Probe 3, das unter Verwendung einer dynamischen Verformung von 10 µm, eines Proportionalfaktors von 1,3 und einer Aufheizrate von 2 °C/min gemessen wurde.

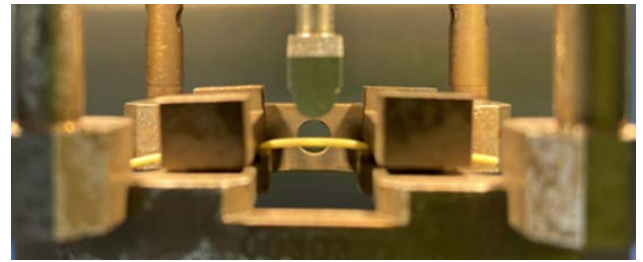


**4** Ausgewertetes Temperaturprofil von Probe 3, gemessen unter dynamischer Deformation von 10  $\mu\text{m}$ , einer Proportionalfaktora proportional factor of 1,3, and a heating rate of 2  $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ .



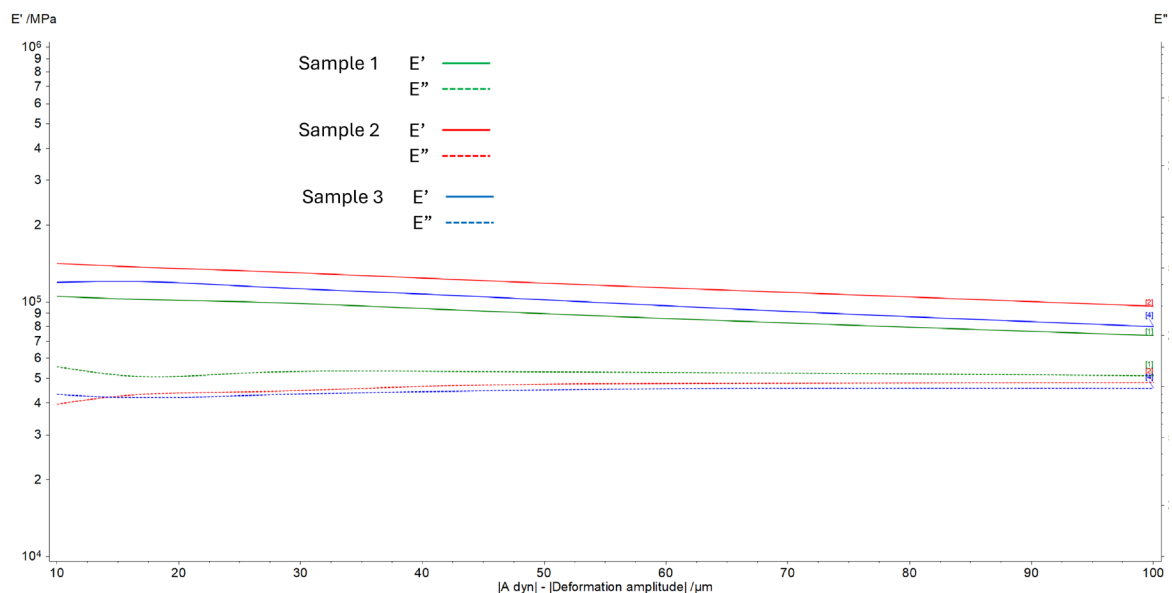
**5** Das viskoelastische Profil der Badmintonseile von Probe 1, das von 0 bis 50  $^{\circ}\text{C}$  gemessen wurde. Die Probe wurde unter Verwendung einer dynamischen Verformung von 10  $\mu\text{m}$ , eines Proportionalfaktors von 1,3 und einer Aufheizrate von 2  $^{\circ}\text{C}/\text{min}$  gemessen.

Ein wesentlicher Aspekt dieser Tests ist es, das Verhalten der Badmintonsaiten bei ihrer vorgesehenen Anwendung zu verstehen. Daher wurden dieselben drei Proben in Dreipunkt-Biegung geprüft (Biegelänge: 20 mm, zur Analyse eines begrenzten Ausschnitts des gesamten Schläger-Gittermusters). Dabei wurde simuliert, wie sie sich verhalten würden, wenn sie auf den Schläger aufgespannt und zum Schlagen des Federballs verwendet werden. Der Testaufbau mit der im Biegeprobenhalter eingespannten Saite ist in Abbildung 6 dargestellt.

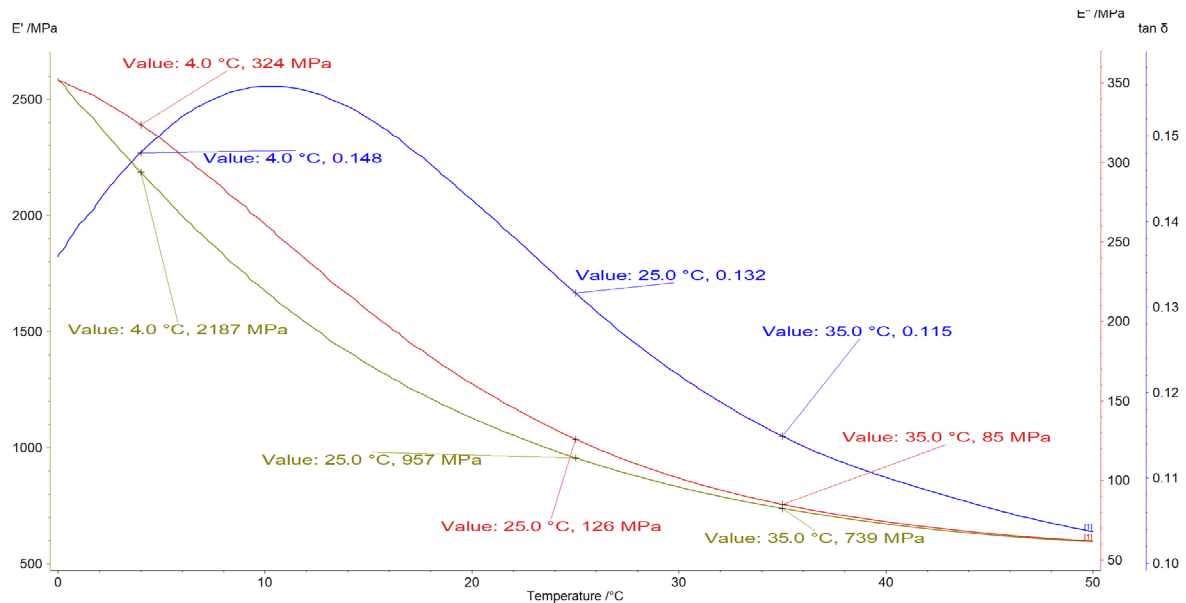


6 Ein Beispielbild einer Badmintonsaite, die einer Dreipunkt-Biegebelastung ausgesetzt ist, um eine Kraft zu simulieren, die senkrecht zu ihrer Ausrichtung wirkt, wie es auf dem Schläger der Fall wäre.

Um die Performance im Dreipunktbiegetest zu prüfen, wurden bei Raumtemperatur zwei verschiedene Belastungsdurchläufe durchgeführt. Abbildung 7 zeigt den Effekt einer zunehmenden dynamischen Verformung, die unter 0,7 N blieb.



7 Amplitudensweep bei Raumtemperatur von 10 bis 100 µm unter Verwendung eines Proportionalfaktors von 1,3 zur Bestimmung der viskoelastischen Eigenschaften.



**8** Dynamischer Kraft-Sweep von 0,01 bis 5 N bei Raumtemperatur unter Verwendung eines Proportionalfaktors von 1,3 zur Bestimmung der Streckgrenze anhand der Längenänderung.

Abbildung 8 zeigt die Längenänderung der Proben in Abhängigkeit von der zunehmenden Kraft.

Wie aus Abbildung 7 ersichtlich wird, unterscheiden sich die mechanischen Eigenschaften der drei Saiten bei Raumtemperatur deutlich voneinander. Bei einer exemplarischen Amplitude von 50 µm weist Probe 1 die niedrigsten Elastizitätsmodulwerte ( $E' = 89,6$  GPa,  $E'' = 12,2$  GPa) auf, Probe 2 die höchsten ( $E' = 118,1$  GPa,  $E'' = 10,3$  GPa) und Probe 3 liegt mit Werten von  $E' = 101,6$  GPa und  $E'' = 9,5$  GPa dazwischen. Da der Dämpfungsfaktor das Verhältnis des Verlustmoduls zum Speichermodul ist, bedeutet dies, dass Probe 1 mit einem Wert von 0,14 die höchsten Dämpfungseigenschaften aufweist, gefolgt von Probe 3 mit einem Wert von 0,09 und Probe 2 mit einem Wert von ebenfalls 0,09. Diese Werte stimmen nicht direkt mit den vom Hersteller in Tabelle 1 angegebenen Werten überein. Es ist jedoch sehr wichtig, zu berücksichtigen, wie sich alle drei viskoelastischen Parameter auf die Leistung auswirken und welche Bedeutung die Temperatur hat, bei denen sie untersucht wurden, hat wie aus Abbildung 5 hervorgeht.

Aus Abbildung 8 ist schließlich die Änderung der Probenlänge bei zunehmender dynamischer Kraft erkennbar. Dies ist ein wichtiger Aspekt für die Frage, wie viel Kraft ein einzelnes Saitenelement ohne nennenswerte Verformung aushalten kann. Probe 3 weist die größte Verformung auf. Dies deutet darauf hin, dass sie aufgrund ihrer Verformungsneigung die am wenigsten haltbare der drei Proben ist. Zu beachten ist, dass diese Proben in

3-Punkt-Biegung von Hand straffgezogen wurden. Dies kann die Abweichungen zwischen den absoluten Messwerten erhöhen.

## Zusammenfassung

Die Entwicklung von Hochleistungspolymeren und Polymerverbundwerkstoffen hat die Welt der Sportartikel revolutioniert. In diesem Beitrag zeigen wir, wie sich der NETZSCH DMA 303 *Eplexor*® einsetzen lässt, um die Performance von drei verschiedenen Badmintonsaiten unter verschiedenen Gesichtspunkten zu bewerten, zu vergleichen und zu simulieren. Mithilfe von Temperaturrampen wurden die Übergangstemperaturen der drei Proben bestimmt und ihre Leistung bei verschiedenen Temperaturen beurteilt, denen sie im Freien ausgesetzt sein könnten. Darüber hinaus wurden Belastungstests durchgeführt, um die mechanischen Eigenschaften der Saiten bei Raumtemperatur zu bewerten und ihr Verhalten unter Belastung zu verstehen, wie es beim Treffen eines Federballs der Fall wäre.

## Referenzen

- [1] Li, Qingyao, et al. "Contemporary advances in polymer applications for sporting goods: fundamentals, properties, and applications." RSC advances 14.50 (2024): 37445-37469.
- [2] Suwannachote, Narakorn, et al. "Experimental and computer simulation studies on badminton racquet strings." Sensors 23.13 (2023): 5957.