

## Thermische Charakterisierung von Polymeren

Thermoplaste, thermoplastische Elastomere, Elastomere und Duromere



# Die Welt der Polymere

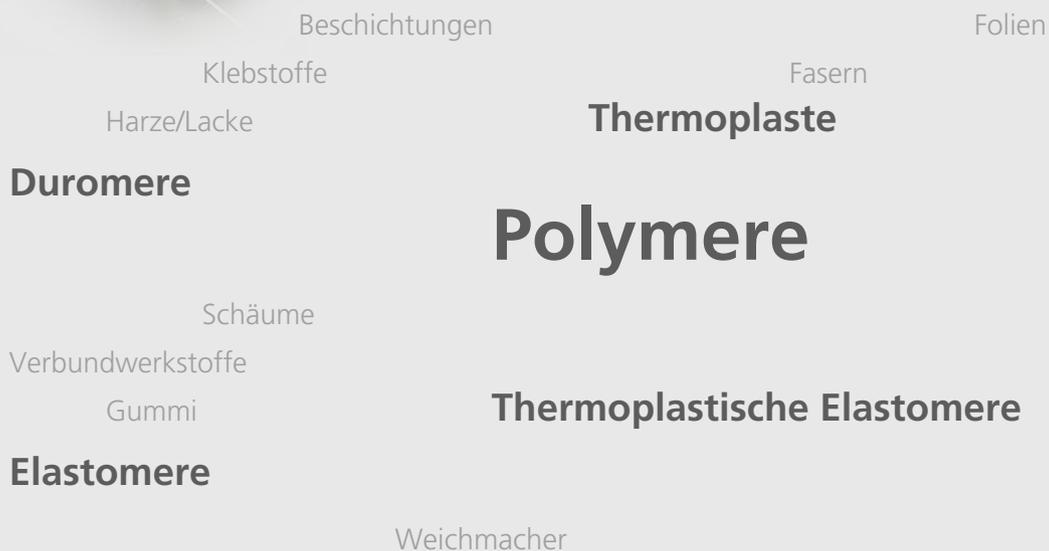
Polymermaterialien haben die Welt, in der wir leben, zu einem Großteil verändert; ohne sie wäre die Welt nicht so, wie wir sie heute kennen. Sie üben eine Faszination auf uns aus und haben eine beträchtliche Auswirkung auf unser tägliches Leben. Polymere dienen nicht nur zur Herstellung von Kunststoff- und Gummiteilen, sondern auch von Fasern, Folien, Klebstoffen, Farben und Lacken. Die Möglichkeit, sie zu recyceln, machen sie unter ökologischen und ökonomischen Aspekten noch interessanter.

Die Forschungsarbeit von Henri Braconnot um 1830 dürfte wohl das erste Beispiel für die moderne Polymerwissenschaft sein. In Zusammenarbeit mit weiteren Wissenschaftlern entwickelte er Derivate des natürlichen Polymers Zellulose, wodurch die Herstellung von neuen, halbsynthetischen Materialien, wie Zelluloid und Acetylzellulose, möglich wurde. Seitdem wurden acht Nobelpreise an die Polymerwissenschaft verliehen.

Vor 50 Jahren existierten noch nicht alle Materialien, die heute für uns selbstverständlich sind. Durch das fortschreitende Verständnis von Polymeren und hinzukommende neue Anwendungen gibt es keinen Grund zur Annahme, dass diese „Polymerrevolution“ in nächster Zeit zu Ende gehen wird.

**Die Bedeutung von Polymeren in unserem täglichen Leben kam nicht willkürlich, sondern resultiert aus den sich uns bietenden Vorteilen:**

- Geringes Gewicht
- Gutes thermisches und elektrisches Isoliervermögen
- Korrosionsbeständigkeit
- Chemisch inert
- Hohe Festigkeit und Formstabilität
- Abrasionsbeständigkeit
- Beständigkeit gegen Abnutzungseffekte
- Gute Einfärbbarkeit
- Potential für dekorative Oberflächeneffekte
- Geringe Herstellkosten



## Thermische Analyse

Während der Herstellung, Verarbeitung und Anwendung von Polymeren werden diese oftmals temperaturabhängigen Strukturänderungen ausgesetzt. Zur Charakterisierung von Polymeren ist heute die Thermische Analyse in Industrie und Forschung allgemein akzeptiert. Die verschiedenen Applikationen werden durch nationale und internationale Normen unterstützt (ISO, EN, ASTM, DIN, etc.) und weitere Normen zur Beschreibung von Polymeren entstehen zunehmend.

Mit thermoanalytischen Messmethoden werden thermische Umwandlungen (DSC, DMA, DIL, LFA), chemische Reaktionen und Zersetzungen (TG, DSC, DEA, Rheologie), viskoelastische Eigenschaften (DMA, Rheologie) und Temperatur- und Wärmeleitfähigkeiten (HFM, GHP, LFA) von Polymeren in Abhängigkeit von der Temperatur, Heizrate, Deformation und Atmosphäre gemessen. Neben der Bestimmung der thermischen Eigenschaften von Polymermaterialien und -produkten können sie auch zur Ermittlung der Zusammensetzung von Kunststoff- und Gummimischungen eingesetzt werden. Einen gesteigerten Informationsgewinn erhält man über die Produktionsbedingungen oder Verarbeitungsgeschichte spezifischer Proben im Vergleich zu Referenzproben.

## Thermoanalytische Messaufgaben

Die Vielseitigkeit thermoanalytischer Testmethoden eröffnet einen breiten Anwendungsbereich für Polymeruntersuchungen, wie z. B.:

- Spezifische Wärme
- Thermische Umwandlungen
- Schmelz-, Kristallisations- und Reaktionsenthalpien
- Glasübergangstemperaturen
- Kristallinitätsgrad
- Thermische Stabilität
- Oxidations-Induktions-Zeit/Temperatur OIT, OOT
- Viskoelastisches Verhalten
- Elastizitätsmodul
- Reaktionskinetik
- Analyse der Zusammensetzung
- Thermischer Längenausdehnungskoeffizient
- Füllstoffgehalt
- Wärme-/Temperaturleitfähigkeit usw.

Die Thermische Analyse ist prädestiniert für diese Messaufgaben. Qualitätskontrolle/-sicherung, Wareneingangskontrolle und Materialauswahl können sicher und einfach durchgeführt werden. Auch in der Forschung und Entwicklung neuer Materialien ist die Thermische Analyse ein zuverlässiges Werkzeug zur Untersuchung einer Vielzahl von Materialeigenschaften.

Das breite Produktportfolio und Applikationswissen von NETZSCH Analysieren & Prüfen zählen zu den Besten auf dem Markt, um den hohen Ansprüchen bei der Herstellung zuverlässiger und hochmoderner Technologien gerecht zu werden.

Unsere Lösungen bestehen aus bewährten Testmethoden für F&E und Qualitätskontrolle für nahezu alle Materialtypen, die in den verschiedensten Bereichen der Polymerindustrie eingesetzt werden.



# Dynamische Differenz-Kalorimetrie

## Dynamische Differenz-Kalorimetrie

Die Dynamische Differenz-Kalorimetrie (DDK, engl. Differential Scanning Calorimetry DSC) ist eine der am häufigsten eingesetzten Methoden der Thermischen Analyse. Sie ermöglicht die Analyse nahezu aller energetischen Effekte, die in einem Festkörper oder einer Flüssigkeit während der thermischen Behandlung auftreten. Die DSC-Analyse gemäß ISO 11357 liefert wertvolle Informationen für die Forschung und Qualitätskontrolle von Polymeren:

- **Thermophysikalische Eigenschaften**  
Spezifische Wärme

- **Produktidentifizierung und -charakterisierung**

- Schmelz-/Kristallisationstemperaturen
- Schmelz-/Kristallisationsenthalpien
- Vernetzungstemperaturen
- Vernetzungsenthalpien
- Glasübergangstemperaturen
- Kristallinitätsgrad

- **Erweiterte Materialanalyse**

- Zersetzungseffekte
- Oxidationsstabilität (OIT, OOT)
- Reaktionskinetik
- Aushärtegrad
- Reinheitsbestimmung von Additiven
- Aushärtung mittels UV-Strahlung
- Stabilität unter Druck
- Peak Separation

- **Produkt-/Verarbeitungs-  
informationen**

- Wareneingangskontrolle
- Thermomechanische Vorgeschichte
- Schadensanalyse
- Analyse von Wettbewerbsprodukten
- Prozessoptimierung

- **Thermokinetik**

- Reaktionsverhalten
- Vorhersagen
- Prozessoptimierung

Für Standardapplikationen eignen sich die DSC 214 *Poylma* und DSC 204 **F1 Phoenix**® bestens. Sie sind einfach zu bedienen und können von -180 °C bis 600/700 °C bzw. von -170 °C bis 600 °C betrieben werden.

Neben thermisch aktivierten Reaktionen, die mittels konventioneller DSC untersucht werden, lassen sich auch kationische Polyadditionen und radikalische Polymerisationen mittels UV-Strahlung mit ausreichend hoher Energie testen. Für diese Zwecke ist die Photo-DSC 204 **F1 Phoenix**® prädestiniert.



DSC 204 **F1 Phoenix**®



DSC 214 *Polyma*

Zahlreiche physische Prozesse und chemische Reaktionen werden vom Umgebungsgasdruck beeinflusst. Um in diesen Fällen Gegebenheiten in der Praxis zu erfüllen, müssen DSC-Messungen daher unter einem höheren, definierten Druck durchgeführt werden. Die Hochdruck-DSC 204 HP *Phoenix*<sup>®</sup> analysiert thermische Effekte im Druckbereich von Vakuum bis 15 MPa (150 bar) und – je nach Art des Gases – bei Temperaturen zwischen -150 °C und 600 °C. Die Atmosphäre im Probenraum kann statisch oder dynamisch gewählt werden. Die elektronische Drucküberwachung und -regelung sorgt zusammen mit der präzisen Regelung des Spülgasflusses für eine ausgezeichnete Genauigkeit und Reproduzierbarkeit der Messergebnisse.



DSC 204 HP *Phoenix*<sup>®</sup>



Photo-DSC 204 **F1** *Phoenix*<sup>®</sup>

Weiterführende Informationen

[www.netzsch.com/n19844](http://www.netzsch.com/n19844)

# Thermogravimetrische Analyse (TGA) und Simultane Thermische Analyse (STA)

## Thermogravimetrie

Die Thermogravimetrie (TG) oder Thermogravimetrische Analyse (TGA) ist eine etablierte thermoanalytische Messmethode zur Ermittlung von Masseänderungen als Funktion der Temperatur oder Zeit. Sie wird in der Forschung & Entwicklung für verschiedene Materialien und Werkstoffe – fest oder flüssig – eingesetzt, um Informationen über deren thermische Stabilität und Zusammensetzung zu erhalten.

Insbesondere in der polymerverarbeitenden Industrie wurde die TG in den letzten Jahrzehnten zunehmend in der Qualitätskontrolle und -sicherung von Rohmaterialien und in der Waren-

eingangskontrolle sowie in der Schadensanalyse von Fertigteilen eingesetzt.

Die thermogravimetrische Analyse ist eine sinnvolle Ergänzung zu der am häufigsten eingesetzten thermischen Analysetechnik DSC. Sie liefert zusätzliche Informationen und rundet somit die Polymercharakterisierung ab.

Verschiedene internationale Normen beschreiben die allgemeinen Prinzipien der Thermogravimetrie für Polymere (ISO 11358) oder beziehen sich auf spezifische Applikationen, wie z. B. die Analyse der Zusammensetzung von Gummimischungen (ASTM D6370).

Der vertikale Aufbau unserer Thermomikrowaagen mit oberschaliger Probenanordnung gewährleistet nicht nur eine einfache Bedienbarkeit, sondern auch eine Gasführung in Richtung der natürlichen Konvektion (Gase steigen mit zunehmender Temperatur nach oben). Dies und das zusätzlich geringe Kontaminationsrisiko eignen sich hervorragend für die Kopplung mit Emissionsgasanalyse, wie Massenspektrometrie, FT-IR-Spektroskopie und/oder GC-MS (Gaschromatografie-Massenspektrometrie).

Für Routinemessungen rund um die Uhr hilft Ihnen der automatische Probenwechsler (ASC).



TG 209 **F1** Libra®



TG 209 **F3** Tarsus®

## Simultane Thermische Analyse

Simultane Thermische Analyse bezeichnet die gleichzeitige Anwendung von Thermogravimetrie (TG) und Dynamischer Differenz-Kalorimetrie (DSC) auf ein und dieselbe Probe in ein und demselben Gerät. Die Vorteile liegen auf der Hand: Die Messbedingungen sind für beide Signale, TG und DSC, vollkommen identisch (gleiche Atmosphäre, Gasflussrate, Heizrate, Dampfdruck der Probe, thermischer Kontakt zum Probeniegel und Sensor, Strahlungseinflüsse etc.). Daraus resultiert, zusätzlich zum erhöhten Informationsgehalt, ein erhöhter Probendurchsatz.

Unsere DSC-, TG- und STA-Geräte arbeiten gemäß aller relevanten Geräte- und Applikationsnormen einschließlich ISO 11357, ISO 11358, ASTM E967, ASTM E968, ASTM E793, ASTM D3895, DIN 51004, DIN 51006, DIN 51007.



STA 449 **F1** Jupiter®

### Informationen aus TG-Kurven

- Massenänderung
- Temperaturstabilität
- Einschätzung der Produktlebensdauer
- Oxidations-/Reduktionsverhalten
- Füllstoffgehalt
- Gehalt an Feuchtigkeit und flüchtigen Substanzen
- Zersetzung
- Analyse der Zusammensetzung von Materialien, die aus mehreren Komponenten bestehen
- Thermokinetische Analyse

### Informationen aus DSC-Kurven

- Spezifische Wärme
- Schmelz-/Kristallisationsverhalten
- Fest-/Fest-Umwandlungen
- Polymorphe Umwandlungen
- Kristallinitätsgrad
- Glasübergangstemperaturen
- Vernetzungsreaktionen
- Oxidationsstabilität
- Reinheitsbestimmung von Additiven
- Thermokinetische Analyse



Vielzahl an STA-Probenhaltern

### Weiterführende Informationen

[www.netzsch.com/n19844](http://www.netzsch.com/n19844)  
[www.netzsch.com/n32638](http://www.netzsch.com/n32638)

# Thermische Analyse gekoppelt mit Emissionsgasanalyse (EGA) und Thermomechanische Analyse (TMA)/Dilatometrie (DIL)

## Thermische Analyse gekoppelt mit Emissionsgasanalyse (EGA)

Spitzenergebnisse in Polymerforschung und -charakterisierung werden durch die intelligente Kopplung von TG-, DSC-, STA- und TMA/DIL-Systemen an Massenspektrometer (MS), Gaschromatograf-Massenspektrometer (GC-MS) oder Fourier-Transform-Infrarot- (FT-IR) Spektrometer erreicht. Moderne Kopplungstechniken schließen außerdem die simultane Kopplung von MS und FT-IR oder GC-MS und FT-IR an das Thermoanalysegerät mit ein.

Der einzigartige Adapter gestattet selbst die gleichzeitige Verwendung des automatischen Probenwechslers (ASC).

### Kopplungsmöglichkeiten

- TG-, DSC-, oder STA-MS über Kapillarkopplung
- STA-MS über *Skimmer*®-Kopplung
- TG-, oder STA-GC-MS
- TG-, DSC- oder STA-FT-IR
- TMA-MS
- DIL-MS

Die freigesetzten Gase werden direkt in den Gasanalysator mittels beheizbarer Kapillare (MS) oder Transferleitung (FT-IR) überführt. Neben der Untersuchung der Zersetzung werden diese Systeme auch zur Analyse der Zusammensetzung, von Verdampfung und von Feststoff/Gas-Reaktionen herangezogen.

### Informationen aus der Kopplung mit der Gasanalyse

- **Analyse der Zusammensetzung**
  - Polymere
  - Weichmacher
  - Lösemittel
  - Additive
- **Verdampfung**
  - Dampfdruck
  - Sublimation
- **Zersetzung**
  - Entwässerung
  - Stabilität
  - Restlösemittel
  - Pyrolyse
- **Feststoff-Gas-Reaktionen**
  - Verbrennung
  - Oxidation
  - Adsorption/Desorption



TG-FT-IR-Kopplung über eine externe FT-IR-Gaszelle



STA-GC-MS-Kopplung

Weiterführende Informationen

[www.netzsch.com/n25434](http://www.netzsch.com/n25434)

## Thermomechanische Analyse und Dilatometrie

Thermomechanische Analyse (TMA) und Dilatometrie (DIL) sind zwei der wichtigsten Charakterisierungsmethoden im Bereich der Thermischen Analyse. Die Dilatometrie bestimmt die Längenänderung von Proben unter vernachlässigbarer Kraft (DIN 51045). Die eng verwandte TMA-Methode bestimmt Dimensionsänderungen von Feststoffen, Flüssigkeiten oder pastösen Materialien als Funktion der Temperatur und/oder Zeit unter definierter statischer Belastung (DIN 51 005, ASTM E831, ASTM D696, ASTM D3386, ISO 11359).

Mit der TMA 402 **F1 Hyperion**<sup>®</sup> können zusätzlich Messungen unter Biegung, Zug und Penetration unter Kraftmodulation durchgeführt werden.

Untersuchungen sind möglich an Kunststoffen und Elastomeren, Farben und Farbstoffen, Klebstoffen, Folien, Fasern und Verbundwerkstoffen.

Die Dilatometer und TMA-Systeme von NETZSCH für Polymere und Verbundwerkstoffe erfüllen die entsprechenden Gerätenormen und applikations-/materialbezogenen Prüfvorschriften für Dilatometrie und thermomechanische Analyse.

### Informationen aus TMA-/DIL-Kurven

- Thermische Ausdehnung
- Thermischer Längenausdehnungskoeffizient
- Volumenausdehnung
- Dichteänderung
- Schrumpfen
- Glasübergangstemperaturen
- Erweichungspunkte
- Penetrationsverhalten
- Phasenübergänge
- Kriechverhalten
- Anisotropisches Verhalten
- Elastizitätsmodul
- *Thermokinetik*



Auswahl an TMA 402-Probenhaltern



TMA 402 **F1 Hyperion**<sup>®</sup>



DIL 402 C

### Weiterführende Informationen

[www.netzsch.com/n30304](http://www.netzsch.com/n30304)

[www.netzsch.com/n86481](http://www.netzsch.com/n86481)

# Dynamisch-mechanische Analyse (DEA) und Dielektrische Analyse (DEA)

## Dynamisch-mechanische Analyse

Mit der Dynamisch-mechanischen Analyse (DMA oder DMTA) werden die mechanischen Eigenschaften einer Probe unter oszillierender Belastung quantitativ in Abhängigkeit von Temperatur, Zeit, Frequenz und Deformation bestimmt (DIN 53513, DIN EN ISO 6721, DIN 53440, DIN-IEC 1006, ASTM D4065, ASTM D4092, ASTM D4473, ASTM D5023, ASTM D5024, ASTM D5026, ASTM D5418). Die Ergebnisse spiegeln die viskoelastischen Eigenschaften des Probenmaterials wieder, indem typischerweise  $E'$  (Speichermodul),  $E''$  (Verlustmodul) und  $\tan\delta$  (Verlustfaktor) gegen die Temperatur aufgetragen werden. Die DMA identifiziert Übergangsbereiche, wie Glasübergänge in Kunststoffen und Harzen, und kann für die Produktentwicklung oder Qualitätskontrolle im Temperaturbereich von  $-180\text{ °C}$  bis  $600\text{ °C}$  eingesetzt werden.

### Dynamisch-mechanische Tests unterstützen die Forschung und Qualitätskontrolle von Polymeren

**R&D:** DMA ist eine sehr empfindliche Methode zur Erzeugung mechanischer Eigenschaftsdaten von Polymeren und Verbundwerkstoffen, vor allem im Rahmen der Produktentwicklung in der Industrie, wie z. B. in der Automobilbranche.

**Qualitätskontrolle:**  $\alpha$ - und  $\beta$ -Übergänge können als Kriterien für Vergleiche zwischen eigenen Erzeugnissen und Standard- bzw. Wettbewerbsprodukten herangezogen werden.

Unsere DMA-Experten helfen Ihnen, die richtige Herangehensweise an spezifische Applikationen zu finden und stehen Ihnen gerne beratend zur Seite.

### Informationen aus DMA-Kurven

- Daten hinsichtlich Steifigkeits- und Dämpfungsverhalten (Modulwerte und Dämpfungsfaktor unter den verschiedensten Bedingungen)
- Daten über die Zusammensetzung und Struktur von Polymerblends (Verträglichkeit)
- Glasübergangstemperaturen hoch vernetzter, amorpher oder teilkristalliner Polymere und Verbundwerkstoffe
- Aushärtung/Nachhärtung
- Alterung
- Kriechen und Relaxation
- Stress und Strain Sweeps
- Multifrequenztests
- Vorhersage des Materialverhaltens mittels Zeit-Temperatur-Superposition (TTS)-Experimenten
- Immersionstests



DMA 242 E Artemis



Spezieller Probenhalter mit kugelförmigem Fühlstempel für die Aushärtung niedrigviskoser Flüssigkeiten

### Weiterführende Informationen

[www.netzsch.com/n52473](http://www.netzsch.com/n52473)

## Dielektrische Analyse

Während des Aushärteprozesses reaktiver Harzsysteme können viele Fragen auftreten:

- Bei welcher Temperatur bzw. nach welcher Zeit beginnt das Harz auszuhärten?
- Wie hoch ist die Reaktivität?
- Wann ist die Aushärtung beendet?
- Ist das Aushärteprofil für jede Position im Werkzeug identisch?
- Wie kann der Aushärtezyklus optimiert werden, um Energie und Kosten zu sparen?
- Existiert Potential zur Nachhärtung?

Für die Untersuchung des Aushärteverhaltens reaktiver Duroplaste, Verbundwerkstoffe, Klebstoffe und Lacke hat sich die Dielektrische Analyse (DEA) nach ASTM E2038 oder E2039 bewährt.

Die DEA erlaubt die Messung von Änderungen der dielektrischen Eigenschaften während der Aushärtung. Die Flüssigkeit bzw. das pastöse Harz wird dabei in direkten Kontakt mit zwei Elektroden (dielektrischer Sensor) gebracht. Anschließend wird eine sinusförmige Spannung (Anregung) angelegt und der resultierende Stromfluss (Antwort) zusammen mit

der Phasenverschiebung zwischen Spannung und Stromfluss gemessen. Beide Größen, Stromfluss und Phasenverschiebung, werden zur Bestimmung der Ionenmobilität (Ionenleitfähigkeit) und der Ausrichtung der Dipole herangezogen. Außerdem dienen diese Effekte dazu, die dielektrischen Eigenschaften Permittivität  $E'$  und den Verlustfaktor  $E''$  zu berechnen. Für die Aushärtung ist die Ionenviskosität von besonderem Interesse. Sie ist der reziproke Wert der Ionenleitfähigkeit, der proportional zum Verlustfaktor verläuft.

Der Einsatz der DEA beschränkt sich nicht nur auf das Labor, sondern sie kann auch in-situ bei Aushärtungen im Werkzeug unter realen Prozessbedingungen angewendet werden. Für die Produktionsüberwachung und Fertigungskontrolle lässt sich z. B. ein bestimmter Ionenviskositätswert vorgeben, der die Presse öffnet, wenn das Formteil hinreichend ausgehärtet ist. Die dadurch bedingte geringere Zykluszeit und der damit höhere Durchsatz führen zu geringeren Produktionskosten, die eine Preisreduzierung des Endproduktes ermöglichen.

Das modulare Konzept der DEA 288 *Epsilon* ist bestens geeignet für die Untersuchung des Aushärteverhaltens von Duroplasten, Klebstoffen, Lacken und Beschichtungen in beinahe jedem Anwendungsfall. Die Laborversion mit bis zu acht Kanälen kann in Verbindung mit dem neu konstruierten Ofen mit Kühloptionen in Forschung & Entwicklung eingesetzt werden. Die Industrieversionen sind für die Produktionsüberwachung und Fertigungskontrolle vorgesehen und mit bis zu 16 Kanälen ausgestattet.

### DEA-Messaufgaben

- Ionenviskosität
- Reaktivität
- Aufzeichnung der Aushärtung
- Aushärtegrad
- Glasübergangstemperatur
- Prozessüberwachung und -optimierung
- Diffusionseigenschaften
- Alterungs- und Zersetzungseffekte



DEA 288 *Epsilon* – Laborversion mit bis zu acht Kanälen



DEA 288 *Epsilon* – Industrieversion mit zwei Kanälen

### Weiterführende Informationen

[www.netzsch.com/n54985](http://www.netzsch.com/n54985)

# Thermokinetics und Laserflash-Technik (LFA)

## Das Advanced Software-Modul *Thermokinetik*

Die Kenntnis des Verhaltens verschiedener Polymermaterialien unter unterschiedlichen Temperatur- und Druckbedingungen ist ausschlaggebend für deren Herstellung. Nur die Kenntnis des Materialverhaltens gewährleistet, dass kein Materialversagen im Anwendungsfall auftritt.

Heute kommen viele Polymertypen auf den Markt, die ein verbessertes Verhalten im Vergleich zu Vorgänger-Materialien versprechen oder neuen Applikationsanforderungen gerecht zu werden scheinen. Dennoch kann sich ihr thermisches Verhalten während des Herstellungsprozesses oder später als Endprodukt als kritisch erweisen. Zeit- und temperaturabhängige Aushärtereaktionen spielen hier eine wichtige Rolle. Zudem können Schwankungen im Härter-System auftreten, die besondere Aufmerksamkeit verlangen.

Das NETZSCH Advanced Software-Modul *Thermokinetics* ist in der Lage, für jeden chemischen Prozess mit temperatur- und zeitabhängigen Reaktionen (z. B. Vernetzung, Aushärtung, Zersetzung) kinetische Modelle aufzustellen. Die Software erlaubt es, Vorhersagen zum Reaktionsverhalten unter anwenderdefinierten Temperaturbedingungen zu treffen und somit den Prozess zu optimieren.

Mit Hilfe der Software kann man unterschiedlichste Arten von thermischen Messkurven analysieren, die die Änderung von Materialeigenschaften während eines Reaktionsprozesses aufzeigen. Dies schließt DSC-, TG-, DIL-, DMA-, DEA-, Rheologie-, FT-IR- und Massenspektrometer-Daten mit ein.

### Die zwei Hauptaufgaben der *Thermokinetik*:

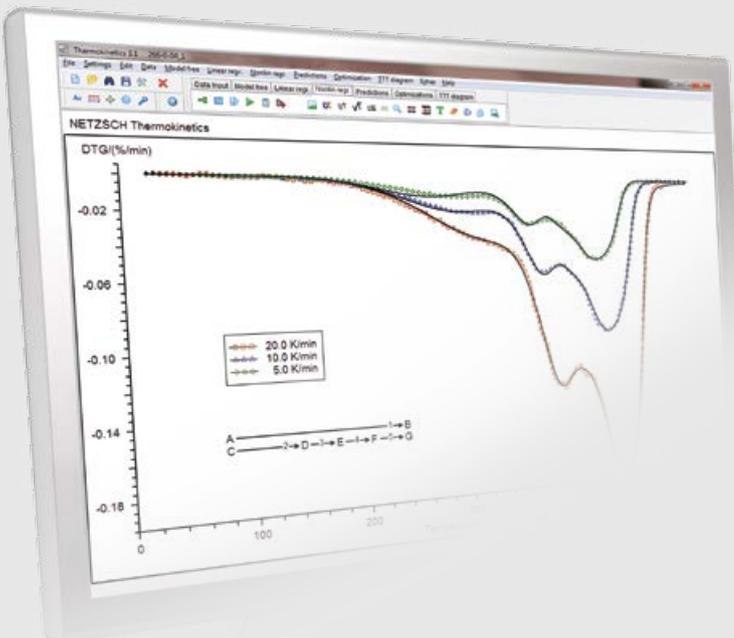
- Vorhersage → Verhalten der Polymerreaktion für ein neues Temperaturprogramm vorherzusagen
- Optimierung → das optimale Temperaturprogramm zu finden, um ein gegebenes Verhalten der Polymerreaktion zu erreichen

Die Software erlaubt die Analyse heterogener Reaktionen, einschließlich Phasengrenz-Reaktionen, Reaktionen mit Diffusion und Nukleierung sowie Reaktionen mit teilweiser Diffusionskontrolle, wie z. B. den Übergang vom Glaszustand in den erweichten Zustand. Die Analyse in *Thermokinetics* bestimmt die Anzahl an Reaktionsstufen, die zur formalen Beschreibung des Reaktionsfortgangs notwendig sind und außerdem für jede Stufe individuell:

- Reaktionstyp
- Aktivierungsenergie
- Reaktionsordnung
- Andere kinetische Parameter

### Verschiedene Methoden der kinetischen Analyse und Vorhersagen sind im Programm integriert

- Modellfreie kinetische Analyse (Friedman, Ozawa-Flynn-Wall und ASTM E698)
- Modellanpassung mittels multivariater nicht-linearer Regression (Modelldefinition; mehrstufige Reaktionen, 18 unterschiedliche Reaktionstypen, F-Test in Bezug auf die Anpassungsqualität und Signifikanz einer zusätzlichen Stufe, grafische Darstellung)
- Mehrstufige Reaktionen (bis zu sechs Stufen)
- Vorhersage für isotherme Bedingungen und Vorhersagen auf der Basis eines anwenderdefinierten Temperaturprogramms



## Laserflash-Technik (LFA)

Wärme- und Temperaturleitfähigkeit sind die wichtigsten thermophysikalischen Materialparameter für die Beschreibung der Wärmetransporteigenschaften eines Werkstoffes oder Bauteils. In der Entwicklung und Qualitätskontrolle wird die Leistungsfähigkeit der Materialien ständig hinterfragt. Einige der Fragen in diesem Zusammenhang sind:

- Wie verhält sich ein spezieller Werkstoff in einem thermisch belasteten System?
- Welches ist das ideale Beschichtungsmaterial?
- Wie kann der Wärmeaustausch einer elektronischen Komponente verbessert werden?
- Wie legt man ein Wärmeaustauschsystem aus, um die erforderliche Leistungsfähigkeit zu erreichen und welche Materialien verwendet man am besten?

Für die Beantwortung dieser Fragen, hat sich die Laserflash-Technik (LFA) als ein schnelles und zuverlässiges Werkzeug etabliert. Es handelt sich dabei um eine Absolute Methode zur Bestimmung thermophysikalischer Eigenschaften, einschließlich der spezifischen Wärme. Diese Daten können anschließend wie folgt verwendet werden:

- Zur Vorhersage des Wärmetransports und des Temperaturprofils als Ausgangspunkt für die Beschreibung des Prozessverhaltens
- Für die Temperatur- und Wärmeleitfähigkeit als Eingangsdaten für die numerische Simulation.

Die Optimierung des Produktions-/Formgebungsprozesses durch z. B. Finite-Element-Simulationen bedingt die Kenntnis thermophysikalischer Eigenschaften nicht nur im Festkörperbereich, sondern auch bei Temperaturen unter- und oberhalb des Glasübergangs.

Für Standard-Polymerapplikationen im Temperaturbereich von  $-100^{\circ}$  bis  $500^{\circ}\text{C}$  ist die kompakte LFA 467 *HyperFlash* erhältlich. Der integrierte Probenwechsler kann bis zu 16 Proben in einer Messserie testen. Mit der LFA

467 *HyperFlash* sind Untersuchungen von dünnen und hoch leitenden Materialien möglich, aber auch von 2- und 3-Schichtstrukturen und somit beispielsweise auch die Analyse des Einflusses von Beschichtungen auf die Wärmeübertragung unter realen Bedingungen.

Die LFA 467 *HyperFlash* erfüllt alle relevanten nationalen und internationalen Geräte- und Anwendungs-Normen (z. B. ASTM E1461, DIN EN 821).



LFA 467 *HyperFlash*



Große Auswahl an Probenträgern – auch für Flüssigkeiten, Pulver, Fasern und zur Untersuchung des anisotropen Verhaltens

Weiterführende Informationen

[www.netzsch.com/n23034](http://www.netzsch.com/n23034)

# Isolationsprüfung mit HFM und GHP

Materialien mit geringen Wärmeleitfähigkeiten, wie z. B. Isolationswerkstoffe, können mit dem Wärmeflussmesser (HFM, Heat Flow Meter) oder der geschützten Plattenapparatur (GHP, Guarded Hot Plate) untersucht werden.

HFM- und GHP-Apparaturen von NETZSCH basieren auf allen relevanten Applikations- und Industrienormen.

- ASTM C 177, ASTM C 335-05Ae1, ASTM C 1363-05, ASTM D 5470-06, ASTM E 1530-06, ASTM F 433-02(2009), ASTM C 1363-05
- DIN EN 12667/12939, DIN EN 13163
- ISO 8301, ISO 8302, ISO 8894-1 (EN 993-14), ISO 8894-2 (EN 993-15)
- JIS A 1412

## Wärmeflussmesser

Wärmeflussmesser sind präzise, schnell und einfach zu bedienende Geräte zur Messung der Wärmeleitfähigkeit von Dämmstoffen (z. B. Polystyrol- oder Polyurethanschäumen). Die Geräte der HFM 436 *Lambda*-Serie verdanken ihre Schnelligkeit und Genauigkeit einer patentierten Temperaturregelung und Wärmefluss-Messtechnik. Die hohe Stabilität über mehrere Tage hinweg führt zu einer ausgezeichneten Wiederholbarkeit der Messungen. Dies ist besonders wichtig zur Durchführung von Alterungstests oder für die Untersuchung der Langzeitbeständigkeit eines Produkts.

Die HFM 436 *Lambda* erlaubt dem Anwender, eine genaue Kraft auf die Probe aufzubringen, wodurch die Dicke und somit auch Dichte pressbarer Materialien eingestellt werden kann. Diese optionale Funktion sorgt für einen engen Kontakt der Platten mit den Proben über die gesamte Oberfläche, um einen minimalen und einheitlichen Kontaktwiderstand zu garantieren - zwei Voraussetzungen für reproduzierbare Wärmeleitfähigkeitsergebnisse.

Die HFM 436-Serie besteht aus vier Geräteversionen, die den Plattentemperaturbereich von -30 °C bis 100 °C abdecken. Die maximale Probengröße reicht von 305 mm x 305 mm x 100 mm bis 610 mm x 610 mm x 200 mm.



HFM 436 *Lambda*

Weiterführende Informationen

[www.netzsch.com/n17774](http://www.netzsch.com/n17774)

## Geschützte Plattenapparatur

Die GHP 456/476 *Titan*<sup>®</sup> ist das ideale Werkzeug für Forscher und Wissenschaftler im Bereich der Prüfung von Isolationsmaterialien. Das GHP-Prinzip basiert auf einer absoluten Messmethode und benötigt deshalb keine Kalibrierstandards.

Diese GHP bietet optimale Genauigkeit – unabhängig vom Temperaturbereich. Durch die Kombination von innovativer Technologie und den höchsten Qualitätsstandards hat NETZSCH eine robuste und anwenderfreundliche Apparatur konzipiert, die durch Verlässlichkeit und Genauigkeit im Temperaturbereich von -160 °C bis 250 °C besticht.

Zur Messung sind zwei Proben erforderlich, die in das vollständig symmetrische System eingeführt werden. Gemäß den entsprechenden Standardmaterialien kann eine maximale Genauigkeit der Messergebnisse von kleiner 2 % (für die meisten Materialien und Proben) erzielt werden.



GHP 456 *Titan*<sup>®</sup>

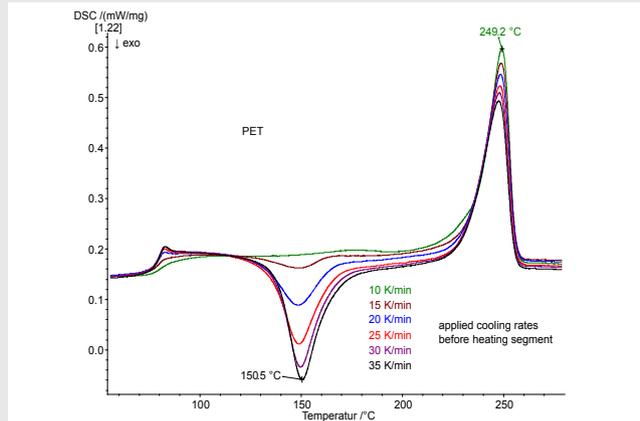
**Weiterführende Informationen**

[www.netzsch.com/n24871](http://www.netzsch.com/n24871)

# Thermoplaste

## Thermisches Verhalten von teilkristallinem PET

Polyethylen-Terephthalat (PET) ist ein teilkristalliner Thermoplast mit einer relativ langsamen Kristallisationsgeschwindigkeit. Hohe Kühlraten führen bei diesem Material zu hohen amorphen Anteilen, hohen Glasübergangsstufen und einer Nachkristallisation während der Aufheizung. Geringe Kühlraten dagegen führen zur verstärkten Ausbildung von kristallinen Anteilen, die während der Abkühlung entstehen. Dies hat kleinere Glasübergangsstufen und keine Nachkristallisation zur Folge. Das Material weist eine höhere Kristallinität auf und verliert somit seine Transparenz. Die DSC-Untersuchungen zeigen die verschiedenen Glasübergangsbereiche ( $T_g$  75 °C bis 85 °C), Kaltkristal-



Glasübergang, Kaltkristallisation und Schmelzen in Abhängigkeit von verschiedenen Kühlraten – Änderungen des Kristallinitätsgrads gemessen mit der DSC

lisation (151 °C) und Schmelzeffekte (249 °C) in Abhängigkeit der vor dem Aufheizen gewählten unterschiedlichen

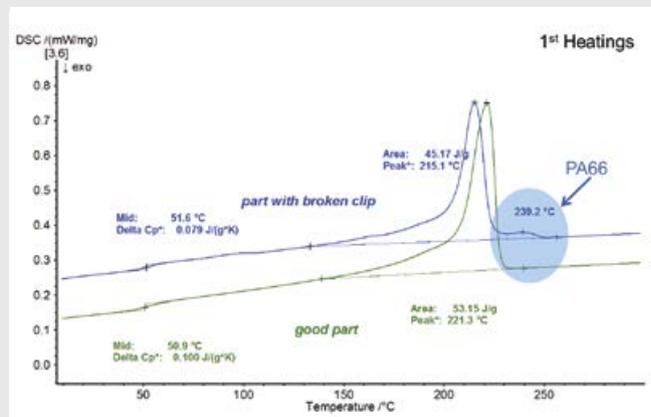
Kühlraten. Zur definierten Kühlung wurde hier der Intracooler der DSC 204 **F1 Phoenix**® eingesetzt.

## Schadensanalyse eines PA6-Clips

Gelegentlich treten Fehler in thermoplastischen Teilen auf, die die Materialeigenschaften erheblich beeinflussen können. Das Versagen kann viele verschiedene Ursachen haben, so z. B. die Wahl des für die geplante Anwendung falschen Materials, Herstellungsfehler im Kunststoffrohmaterial, Fehler während der Produktion des Formteils oder Degradation des Kunststoffs durch Kontakt mit aggressiven Chemikalien, Verunreinigungen, UV-Bestrahlung etc. Die DSC ist eine geeignete Methode, um Gutteile mit schlechten Ausfallteilen zu vergleichen. In diesem Beispiel zeigen

bereits die ersten Aufheizungen von zwei PA6-Clips, dass der gebrochene Clip (blaue Kurve) einen zusätzlichen Schmelzpeak bei 239 °C aufweist. Dies deutet auf eine zweite Phase hin; die

Peaktemperatur stimmt gut mit der Schmelztemperatur von PA66 überein. PA66 wird oft mit PA6 geblendet. Die Anwesenheit der zweiten Phase wurde in der zweiten Aufheizung bestätigt.

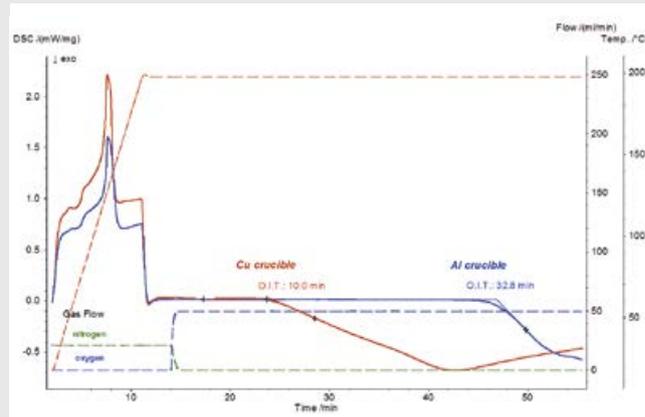


DSC-Vergleich der ersten Aufheizungen von zwei Glasfaser-verstärkten PA6-Clips; Probeneinwaagen: 12,98 mg und 13,13 mg; Heizrate: 10 K/min

## Oxidations-Induktionszeit (OIT)

Die Oxidations-Induktionszeit (OIT) ist eine äußerst nützliche Prüfmethode zur Abschätzung des Polymerabbaus unter Sauerstoffeinfluss. OIT-Einflussfaktoren sind u.a. Probentemperatur, Probenvorbereitung, Probengeometrie, Probenmasse, Partikelgröße oder Tiegelmaterial. Die Oxidations-Induktionszeit (OIT) kann in offenen Standard-Aluminium- oder Kupfertiegeln gemäß ASTM D3895 bestimmt werden.

Der Plot zeigt OIT-Messungen an High-Density Polyethylen (HDPE), die mit einem Kupfer- bzw. einem Aluminiumtiegel (rote bzw. blaue Kurve) durchgeführt wurden. Es ist



Einfluss des Tiegelmaterials auf die Oxidations-Induktionszeit (OIT) von HDPE, gemessen mit DSC; Probeneinwaagen: 12,21 mg und 12,11 mg

klar ersichtlich, dass unter isothermen Bedingungen bei 250 °C unter Sauerstoffatmosphäre die Oxidation im

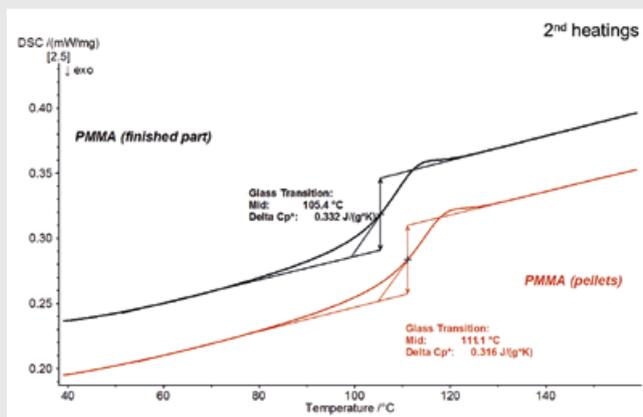
Kupfertiegel ca. 23 min früher als im Aluminiumtiegel einsetzt. Der Kupfertiegel wirkt hier als Katalysator.

## Einfluss der thermomechanischen Vorgeschichte auf amorphes PMMA

Die thermischen und mechanischen Eigenschaften eines Polymermaterials können in Abhängigkeit der thermomechanischen Vorgeschichte des Materials sehr unterschiedlich ausfallen.

Der DSC-Plot zeigt die zweiten Aufheizungen von Polymethyl-Methacrylat-(PMMA) Pellets und einem fertigen PMMA-Bauteil. Es ist deutlich zu erkennen, dass die für die Pellets

beobachtete Glasübergangstemperatur (Midpoint 111 °C, rote Kurve) im fertigen Bauteil zu niedrigeren Temperaturen verschoben ist (Midpoint 105 °C, schwarze Kurve). Jeder Schritt im Herstellprozess vom Pellet zum fertigen Bauteil beeinflusst die Materialeigenschaften.



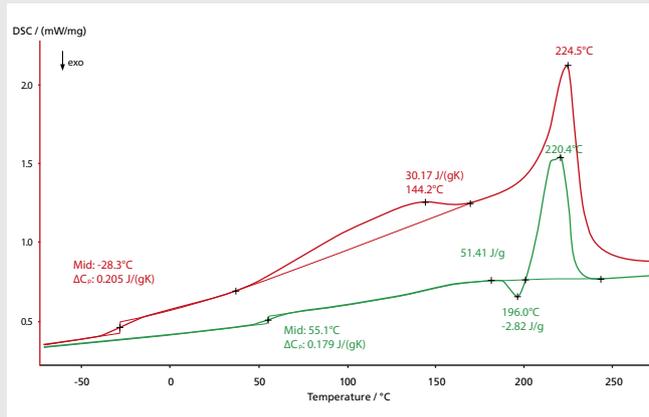
DSC-Messung: Verschiebung der Glasübergangstemperatur zu niedrigeren Werten mit zunehmenden Produktionsschritten; Probeneinwaagen: 11,54 mg und 12,5 mg; Heizrate: 10 K/min

# Thermoplaste

## Einfluss der Luftfeuchtigkeit in PA6

PA6 gehört zu den wichtigsten Polyamiden und ist in der Kunststofftechnik ein sehr bedeutendes Faser-bildendes Polymer. Polyamide absorbieren Luftfeuchtigkeit, was sich auf deren mechanische Eigenschaften auswirkt.

Die endotherme Stufe bei  $-28\text{ °C}$  in der ersten Aufheizung (rote Kurve) zeigt den Glasübergang von feuchtem PA6. Der endotherme Effekt zwischen  $20\text{ °C}$  und  $180\text{ °C}$  ist auf das Verdampfen von Wasser aus der Probe zurückzuführen. In der zweiten Aufheizung ist die Probe trocken und die Glasübergangstemperatur verschiebt sich auf den reellen Wert von  $55\text{ °C}$ . Wasser



1. und 2. Aufheizung der DSC-Messung an feuchtem PA6; Probeneinwaage: 9,4 mg; Heizrate: 20 K/min

wirkt als Weichmacher und erniedrigt die Glasübergangstemperatur. Die Peaktemperaturen bei  $225\text{ °C}$  in der 1. Aufheizung und bei  $220\text{ °C}$  in der

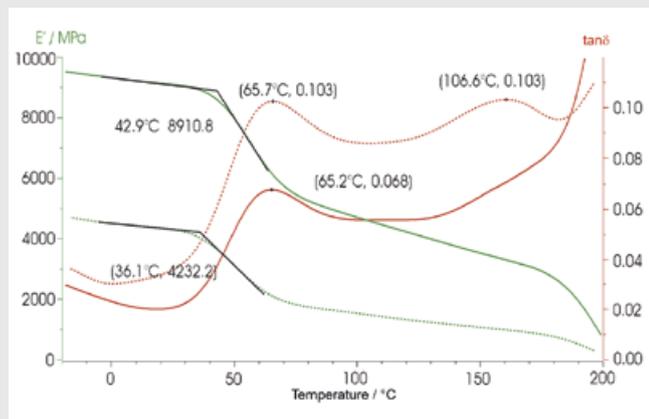
2. Aufheizung repräsentieren das Schmelzen der Probe. Die 2. Aufheizung zeigt zudem eine vorgelagerte Kaltkristallisation bei  $196\text{ °C}$ .

## Anisotropisches Verhalten von Glasfaser-verstärktem Polybutylen-terephthalat (PBT)

Eine Glasfaserverstärkung von PBT bewirkt eine hohe mechanische Festigkeit und thermische Stabilität.

In diesem Beispiel wurden die viskoelastischen Eigenschaften eines fertigen Bauteils aus Glasfaser-verstärktem PBT

mit der DMA 242 E untersucht. Um das anisotrope Verhalten untersuchen zu können, wurden die Messungen parallel und senkrecht zur Faserrichtung durchgeführt.

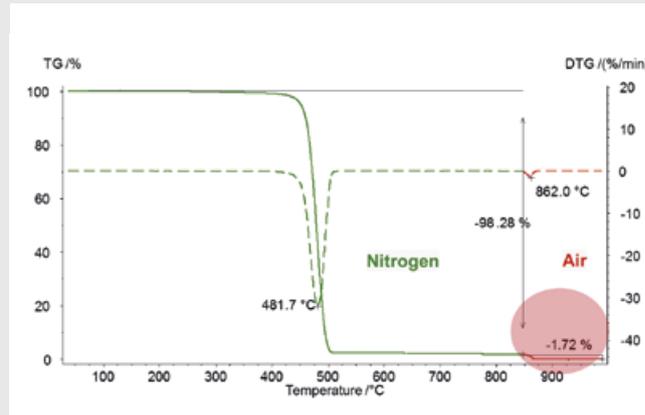


DMA-Messungen an PBT/30%GF parallel zur Faserrichtung (durchgezogene Linien) und senkrecht dazu (gestrichelte Linien); 3-Punkt-Biegung; Heizrate: 2 K/min; Frequenz: 1 Hz

Die viskoelastischen Eigenschaften parallel zur Faserrichtung (durchgezogene Linien) weisen auf eine deutliche Steifigkeit ( $E'$ ) und eine geringe Dämpfung ( $\tan\delta$ -Niveau) hin. Andererseits ist senkrecht zur Faserrichtung (gestrichelte Linien) die Dämpfung höher und die Steifigkeit entsprechend geringer.

## Detektion von zugesetztem Ruß in PE mittels TG

Polyethylen (PE) ist eines der am häufigsten verwendeten Materialien im täglichen Leben. Werden jedoch keine Additive verwendet, kann sich Polyethylen stark aufladen. PE wird auch durch UV-Licht abgebaut und verbrennt sofort, wenn keine Brandschutzmittel eingesetzt werden. Ruß zählt zu einem der besten und kostengünstigsten Stabilisatoren. Wird Ruß in PE-Komponenten, wie z. B. Rohren, homogen verteilt, kann es den UV-Abbau – selbst bei Lagerung im Sonnenlicht – für mehrere Jahre verzögern.



TG-Messung an Polyethylen mit zugesetztem Ruß; Probeneinwaage: 17,38 mg; Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Tiegel; Heizrate: 10 K/min

Der Anteil des zugesetzten Rußes in PE kann mittels TG-Messungen einfach bestimmt werden. Voraussetzung dafür

ist ein vakuumdichtes TG-System. Nach der vollständigen Zersetzung von PE in hoch reiner Stickstoffatmosphäre

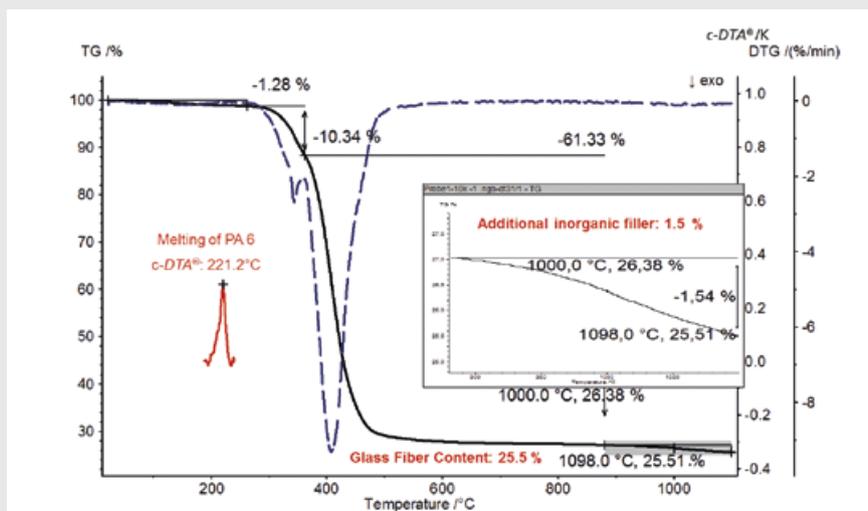
lässt sich die Verbrennung von selbst kleinsten Rußanteilen in oxidierender Luftatmosphäre beobachten.

## Bestimmung verschiedener Füllstoffgehalte in PA6 mittels TG

Füllstoffe sind sehr wichtige Rohmaterialien, die in vielen Artikeln unseres täglichen Lebens enthalten sind.

Während Füllstoffe in der Vergangenheit meist zur Kostenreduktion der Endprodukte verwendet wurden, werden

sie heutzutage hauptsächlich zur Verbesserung der technischen Merkmale eingesetzt.



Bestimmung der Schmelztemperatur (Identifikation) und des Füllstoffgehalts mittels TG mit c-DTA®; Probeneinwaage: 12,45 mg, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Tiegel; Heizrate: 10 K/min

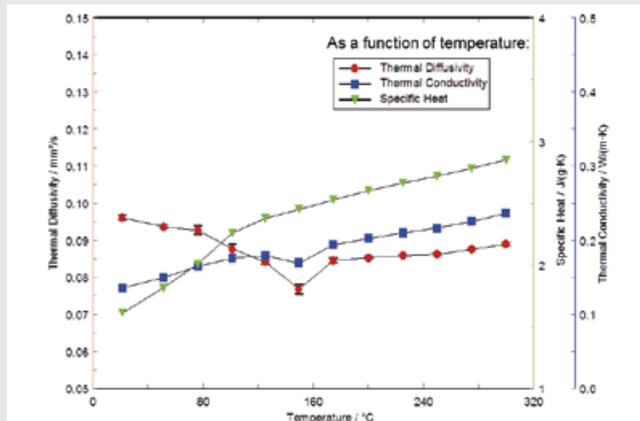
Die Bestimmung von anorganischen Füllstoffen ist mittels TG in Stickstoffatmosphäre möglich. Die PA6-Probe war im vorliegenden Fall mit 25,5 % Glasfaser gefüllt. Die Zersetzung eines anorganischen Füllstoffs kann zwischen 900 °C und 1100 °C (siehe vergrößert dargestellter Bereich in nebenstehender Grafik) beobachtet werden. Durch zusätzliche Anwendung der c-DTA®-Funktion der TG 209 **F1 Libra**® vor Beginn der Polymerzerersetzung lässt sich ein endothermer Peak bei 221 °C detektieren, der den Schmelzpeak von PA6 präsentiert.

# Thermoplaste

## Thermophysikalisches Verhalten von PP – sogar bis in die Schmelze

Die Bestimmung der thermophysikalischen Eigenschaften beruht auf der direkten Messung der physikalischen Eigenschaften eines Materials, während dem es Temperaturänderungen ausgesetzt ist. In diesem Beispiel wurden die thermophysikalischen Eigenschaften eines Polypropylens (PP) zwischen 20 °C und 300 °C mit den LFA Systemen bestimmt.

Von Raumtemperatur bis zum Onset des Schmelzens bei 150 °C (extrapolierter Onset des Schmelzpeaks ermittelt aus einem DSC-Test) nimmt die Temperaturleitfähigkeit von 0,098 mm<sup>2</sup>/s auf 0,075 mm<sup>2</sup>/s deutlich ab. Nach dem Schmelzen erreicht sie bei 250 °C einen nahezu konstanten Wert von



LFA-Messungen an PP zwischen 20 °C und 300 °C; Probendicke: 1,05 mm; Durchmesser: 11,0 mm

0,085 mm<sup>2</sup>/s. Erwartungsgemäß nimmt die spezifische Wärme beim Aufheizen zu: von 1,5 J/g·K bei RT auf 2,2 J/g·K bei 90 °C und nach dem Erweichen und

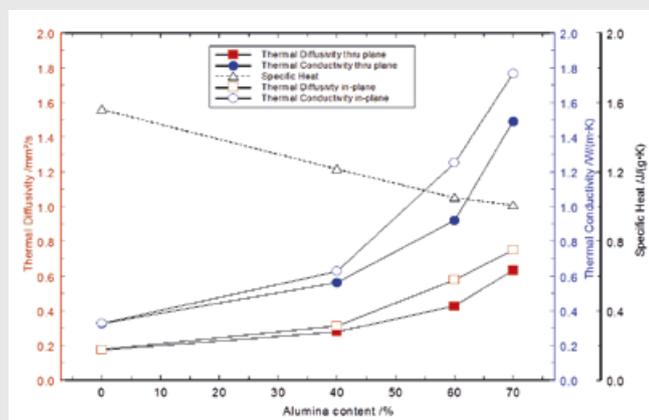
Schmelzen von 2,3 J/g·K auf 2,8 J/g·K bei 250 °C. Vor und nach dem Schmelzen zeigt die resultierende Wärmeleitfähigkeit einen Anstieg von 0,14 W/m·K auf 0,2 W/m·K (250 °C).

## Temperatur- und Wärmeleitfähigkeit von mit Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> gefülltem PA46

Die kristalline Natur von Polyamid (PA) hat einen großen Einfluss auf seine physikalischen und mechanischen Eigenschaften. Hochkristalline Typen

können steif und hart sein. Glasfasern und andere Verstärkungen, wie z. B. Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, können die mechanischen Eigenschaften (Modul, Festigkeit)

verbessern. Die Füllstoffe wirken sich auch auf die thermophysikalischen Eigenschaften (Temperatur-/Wärmeleitfähigkeit) aus. Getestet werden kann dieser Einfluss von Füllstoffen auf die thermophysikalischen Eigenschaften mit der LFA Systeme. Untersuchungen sind in „thru-plane“- und „in-plane“-Richtung möglich. Für die „in-plane-Tests“ steht ein spezieller Probenhalter für Lamine zur Verfügung.



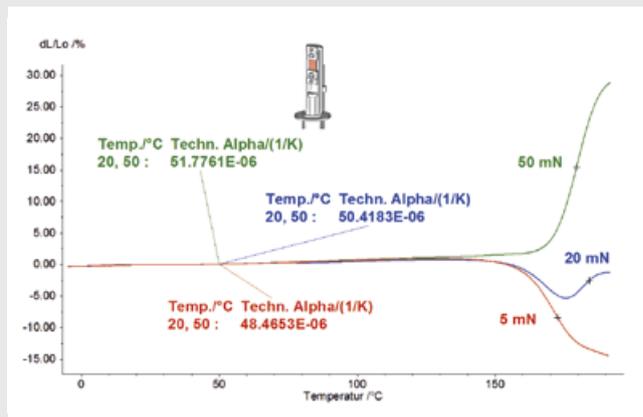
Thermophysikalische Eigenschaften von gefülltem PA46, abhängig vom Aluminiumoxidgehalt bei Raumtemperatur

Im Fall von Polyamiden hat nur PA46 eine sehr geringe Wärmeleitfähigkeit. Mit steigendem Füllstoffgehalt (hier Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) nimmt die spezifische Wärme ab, während die Temperatur- und Wärmeleitfähigkeit zunehmen.



## Zugtest an einer PC-Schrumpffolie

Viele physikalische Eigenschaften von amorphen Kunststoffen oder amorphen Bereichen teilkristalliner Thermoplaste unterliegen beim Glasübergang schrittweisen Veränderungen. Das Gleiche trifft auch auf den linearen Ausdehnungskoeffizienten ( $\alpha$ ) zu. Orientierungseffekte, Ausdehnung und Schrumpfen von Folien können mit der TMA 402 **F1 Hyperion**® unter Belastung untersucht werden. In diesem Beispiel wurden Ausdehnung und Kontraktion einer 40  $\mu\text{m}$  dicken Folie aus Polycarbonat (PC) unter Zugbelastung gemessen. Die Ergebnisse hängen deutlich von der angelegten Zugkraft ab. Bei höherer Zugbelastung (50 mN) dehnt sie sich aus; unter geringer Zugbelastung (5 mN) zieht sie sich jedoch bei höheren Temperaturen zusammen.



Orientierungseffekte einer PC-Schrumpffolie, gemessen mit der TMA 402 **F1 Hyperion**®; Probendicke: 40  $\mu\text{m}$ ; Länge: ca. 5 mm; Heizrate: 5 K/min

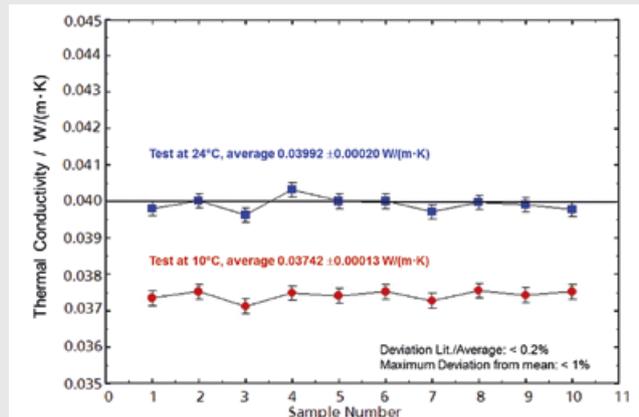
# Thermoplaste und Thermoplastische Elastomere

## Expandierter Polystyrolschaum (EPS)

EPS weist viele nützliche Eigenschaften auf. Er kann als Isolierung gegen Hitze und Kälte eingesetzt werden. Er eignet sich daneben hervorragend zur Absorbierung von Erschütterungen und zum Schutz zerbrechlicher Gegenstände.

Die hier gezeigten Untersuchungen entsprechen dem typischen Vorgehen im Rahmen einer typischen Qualitätskontrolle. Die Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit gemäß DIN EN12667 wurde bei 10 °C und 24 °C an zehn EPS-Proben (Dicke 50 mm), die aus einem Batch entnommen wurden, durchgeführt.

Es zeigt sich, dass keine signifikante Schwankungen in der Wärmeleitfähigkeit von Probe zu Probe auftreten. Die gemessenen Werte liegen bei ca. 0,04 W/(m·K), was genau dem für Dämmstoffe ange-



Qualitätskontrolle von 10 EPS-Proben der gleichen Charge zwischen 10 °C und 24 °C; HFM 436 *Lambda*-Messungen, NIST 1450c-Standard

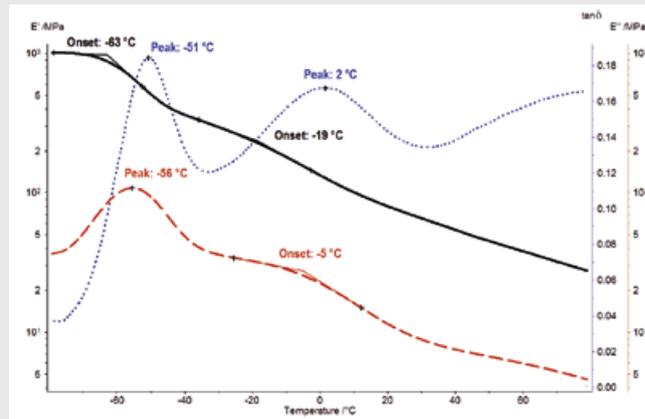
gebenen Wert entspricht. Die hohe Prüfgeschwindigkeit mit dem HFM 436 erlaubt die Untersuchung eines großen Probendurchsatzes. Dies ist wichtig für die Analyse von

Isolierschäumen gemäß DIN EN13163. Bei diesem Vorgang beeinflusst die Anzahl der Probestests den  $\lambda_{90/90}$ -Wert, der aus den Testergebnissen bestimmt wird.

## Viskoelastische Eigenschaften von TPE

Thermoplastische Elastomere (TPEs) besitzen sowohl die Eigenschaften von Elastomeren hinsichtlich des mechanischen Verhaltens als auch von Thermoplasten hinsichtlich der Verarbeitbarkeit. Zur Bestimmung der viskoelastischen Eigenschaften von TPE bietet sich die Dynamisch-mechanische Analyse (DMA) als ein wertvolles Werkzeug an.

Der Plot zeigt eine DMA-Messung an Santoprene®. Dieses TPE ist ein Polymerblend, bestehend aus einer EPDM-Gummikomponente und teilkristallinem Polypropylen (PP). Die DMA-Messung wurde zwischen -80 °C und 80 °C bei einer Frequenz von 1 Hz durchgeführt. Im Plot sind der



DMA-Messung des thermoplastischen Elastomers EPDM+PP

Speichermodul ( $E'$ ), der Verlustmodul ( $E''$ ) und der Verlustfaktor ( $\tan\delta$ ) dargestellt. Der Glasübergang der EPDM-Komponente liegt bei -63 °C ( $E'$ , Onset), -56 °C ( $E''$ -Peak) und -51 °C ( $\tan\delta$ -Peak). Nach diesen Effekten folgt der Glasübergang der PP-Komponente

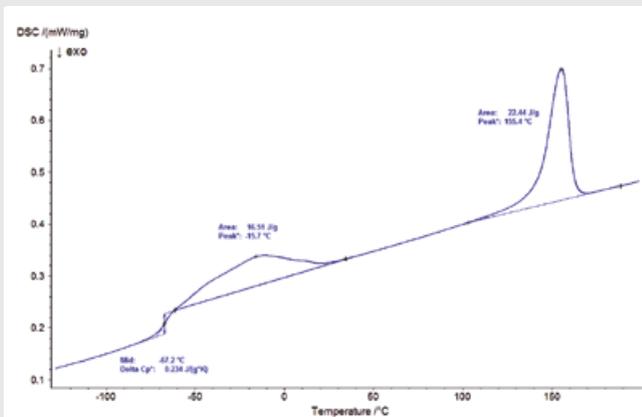
bei -19 °C ( $E'$ , Onset), -5 °C ( $E''$ , Onset) und 2 °C ( $\tan\delta$ -Peak). Das Schmelzen der PP-Komponente (ca. 160 °C) liegt außerhalb des gewählten Temperaturbereichs und kann einfach und sicher mit der DSC-Methode gemessen werden.

## Phasenumwandlungen eines TPE-Blends

Das Styrol-Ethylen-Butylen-Styrol-Block-Copolymer (SEBS) gehört zur Gruppe der thermoplastischen Elastomere,

die eine ausgezeichnete dynamische Ermüdungsfestigkeit und bessere Lösemittelbeständigkeit im Vergleich zu SBS aufweist. SEBS ist lackierbar

und recyclingfähig. Der zusätzliche Einsatz von Stabilisatoren sorgt für eine höhere UV-Beständigkeit sowie für ein verbessertes Alterungsverhalten, wie sie für Innen- und Außenteile in der Automobilindustrie gefordert werden.



DSC-Messung des thermoplastischen Elastomers SEBS+PP

Die DSC-Messung an einer SEBS+PP-Probe wurde bei einer Heizrate von 10 K/min durchgeführt. Die SEBS-Komponente zeigt die Glasübergangstemperatur des Weichsegments bei -67 °C; das Schmelzen der Hartsegmente tritt bei -16 °C auf. Das Schmelzen der PP-Komponente folgt bei 155 °C. Die Glasübergangstemperatur korreliert mit dem von der Automobilindustrie geforderten Kälterichtwert (DIN EN ISO 11357).

# Elastomere



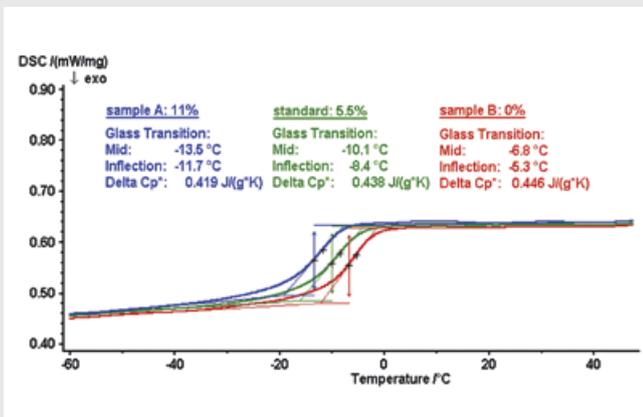
## Einfluss des Weichmachers auf den Glasübergang von Gummi

Weichmacher oder Dispergiertmittel sind Additive, die die Plastizität oder das Fließvermögen eines Materials erhöhen. Beim Kühlen unterhalb der Glasübergangstemperatur „frieren“ die

quasi-flüssigen Kettensegmente zu festen Geometrien, und der Gummi verliert schlagartig seine elastischen Eigenschaften; dieser Prozess ist reversibel.

Die DSC ist eine schnelle und zuverlässige Methode zur Untersuchung des Einflusses des Weichmachergehalts auf den Glasübergang von Gummi.

Diese Messungen wurden an drei NBR-Proben mit unterschiedlichen Weichmachergehalten durchgeführt. Es ist ersichtlich, dass die Änderung des Weichmachergehalts verschiedene Glasübergangstemperaturen zur Folge hat. Bei reinem NBR – ohne Weichmacher – liegt die Glasübergangstemperatur bei -7 °C (Midpoint). Mit steigendem Weichmachergehalt über 5,5 % auf 11 % verschiebt sich die Glasübergangstemperatur von -10 °C auf -14 °C. Die Kälteflexibilität kann also mit Erhöhung des Weichmachergehalts verbessert werden.

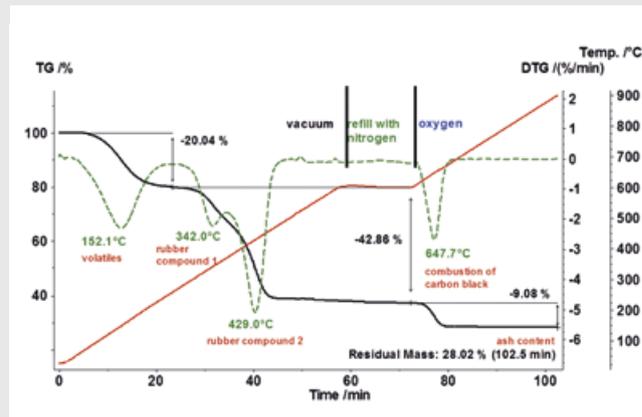


DSC-Messungen an NBR mit unterschiedlichen Weichmachergehalten; Probeneinwaagen: ca. 10 mg; Heizrate: 20 K/min

## Umfassende Gummi-Analyse

Eine klare Auftrennung und genaue Identifizierung der Komponenten einer Gummimischung werden durch eine Messung im Vakuum mit der TG 209 **F1 Libra**® ermöglicht. Unter reduziertem Druck wird der Siedepunkt flüchtiger Anteile erniedrigt, was zu deren Freisetzung bei niedrigeren Temperaturen führt. Die Zersetzung der Gummikomponenten dagegen bleibt davon weitgehend unbeeinflusst.

Im ersten Segment dieser TG-Messung unter Vakuum ist das Verdampfen des Weichmachers (152 °C, DTG-Peak) deutlich von der Zersetzung der beiden Gummikomponenten bei 342 °C und 429 °C (DTG-Peaktemperaturen) getrennt. Nach der Zersetzung der



TG-Messergebnis an einer Gummi-Mischung unter Vakuum: Bestimmung des realen Weichmachergehalts; Wiederbefüllen mit inerter Atmosphäre und Verbrennung des Rußes in oxidierender Atmosphäre; Probeneinwaage: 10,05 mg, Heizrate: 10 K/min; Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Tiegel

Gummikomponenten wird das TG-System wieder unter isothermen Bedingungen bei 600 °C mit Stickstoff befüllt. Im folgenden Schritt wird

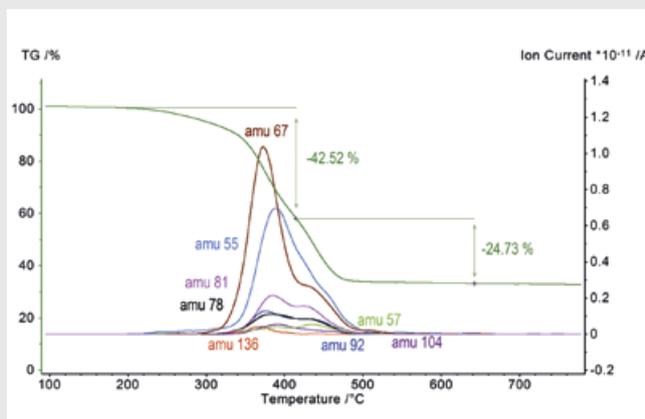
bei erneutem Temperaturanstieg auf Sauerstoff umgeschaltet. Dies führt zu einer sofortigen Verbrennung des Rußes (9 %). Der im Tiegel verbleibende Aschegehalt errechnet sich zu 28 %.

## Klassifizierung der entweichenden Gase während der Gummizersetzung: Weichmacher und PAH

Thermische Analyse (TA) von Elastomeren dient üblicherweise der Untersuchung von Temperaturstabilität und Zersetzung. Die Beantwortung der Frage, wieviel und welcher Weichmacher verdampft

spielt dabei eine bedeutende Rolle. Die Kopplung von TA-Methoden an einen Gasanalysator, wie z. B. ein Massenspektrometer (MS), erlaubt eine chemische Identifizierung der frei-

gesetzten Gase. Damit kann beispielsweise die Frage, ob während der Aufheizung möglicherweise krebserregende polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAHs) entstehen, beantwortet werden.



Die mittels STA-MS-Messung detektierten Gase während der Zersetzung einer Reifenprobe

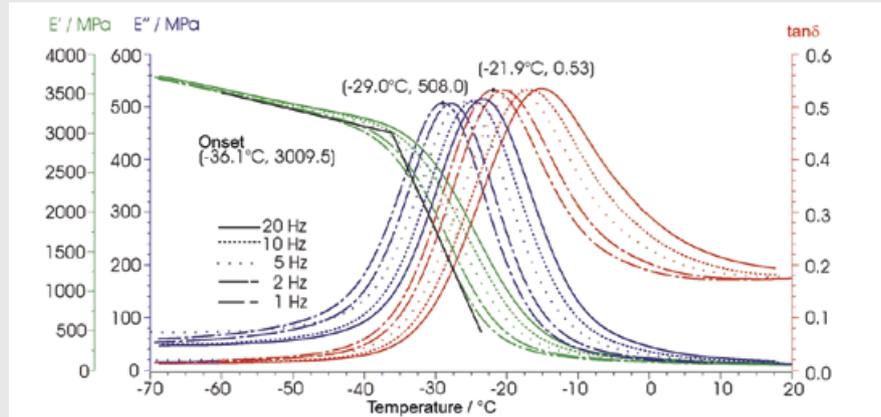
In diesem Beispiel wird die pyrolytische Zersetzung einer Gummiprobe in einer simultanen TG-MS Messung untersucht. Während der Aufheizung der Probe bis 800 °C können zwei Massenverluststufen von 42,5 % und 24,7 % beobachtet werden. Die dargestellten MS-Signale (hier nur einige exemplarische Massenzahlen) lassen Rückschlüsse zu, bei welcher Temperatur welche organischen Moleküle entweichen. So deutet z. B. die Massenzahl 67 (vermutlich C<sub>5</sub>H<sub>7</sub>) bei 350 °C auf die Freisetzung des Weichmachers hin. PAHs wurden nicht detektiert.

# Elastomere

## Einfluss der Frequenz auf die Glasübergangstemperatur einer SBR-Gummimischung

Der Modul und der Dämpfungsfaktor sind die wichtigsten viskoelastischen Polymereigenschaften, die mittels DMA gemessen werden. Der Speichermodul,  $E'$ , ist temperaturabhängig und ein Maß für die Steifigkeit. Die mechanische Dämpfung ( $\tan\delta$ , innere Reibung) gefüllter Gummimaterialien ist von erheblicher Bedeutung für das Nassrutschverhalten eines Reifens oder das Dichtungsverhalten eines O-Rings.

Dieses Beispiel einer SBR- (Styrol-Butadien-Kautschuk) Mischung zeigt, dass die  $\tan\delta$ -Werte bei niedrigen Temperaturen (-70 °C bis -45 °C) auch sehr niedrig sind. Dies ist auf das kleine vorhandene freie Volumen im Polymer zurückzuführen, das eine Bewegung der Polymersegmente ver-



DMA-Messung der viskoelastischen Eigenschaften einer SBR-Gummimischung: Frequenzabhängigkeit des Speichermoduls ( $E'$ , grün), Verlustmoduls ( $E''$ , blau) und Dämpfungsfaktor  $\tan\delta$  (rot); Heizrate: 2 K/min

hindert. Damit verbunden ist eine geringe Energiedissipation (Umwandlung in Wärme) und ein glasartiger Zustand, erkennbar am hohen Speichermodul (hohe Elastizität und hohe Steifigkeit). Mit dem Ansteigen der Temperatur nimmt die Bewegung der Polymersegmente zu, was hohe Werte für

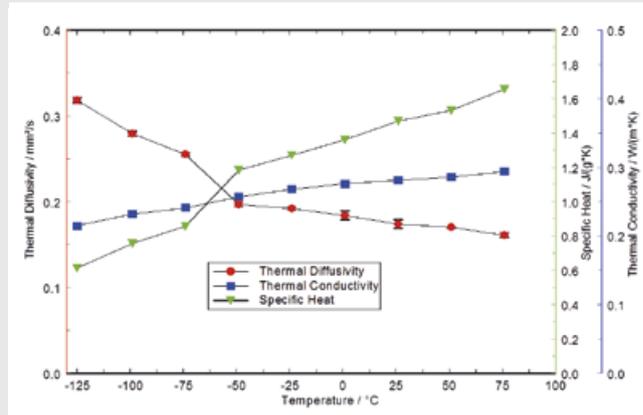
den Verlustmodul ( $E''$ ) und  $\tan\delta$ , den Verlustfaktor, mit einem Maximum beim Glasübergang zur Folge hat. Zunehmende Frequenzen verschieben diese Peak-Maxima, die mit der Glasumwandlung verknüpft sind, zu höheren Temperaturen. Auch werden mit steigender Frequenz höhere  $E'$ -Werte erhalten.



## Thermophysikalische Eigenschaften eines NR/NBR-Gummis bei niedrigsten Temperaturen

Das LFA-System ermöglicht die Bestimmung der thermophysikalischen Eigenschaften (TPP) von Gummimischungen – sogar bei Temperaturen unterhalb des Glasübergangs.

Dieses Beispiel zeigt die Messung eines dünnen, gefüllten NR/NBR-Gummimaterials (Dicke: 1,512 mm, Durchmesser: 12,7 mm) im Temperaturbereich zwischen -125 °C und 80 °C. Die Wärmeleitfähigkeit nimmt mit steigender Temperatur zu, obwohl im Bereich der Glasübergänge der beiden Komponenten zwischen -70 °C und -45 °C die spezifische Wärme rapide ansteigt, während die



LFA-Messung: Thermophysikalische Eigenschaften einer NR/NBR-Gummimischung vor, während und nach den Glasübergängen; Probendurchmesser: 12,7 mm; Probendicke: 1,512 mm

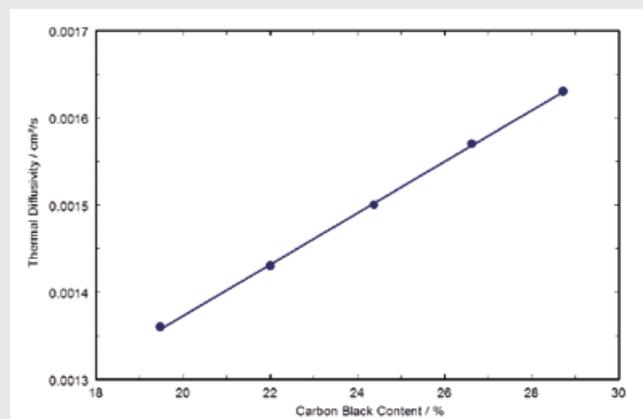
Temperaturleitfähigkeit abnimmt. Die Abnahme in der Temperaturleitfähigkeit und die Zunahme der spezifischen

Wärme heben sich gegenseitig auf, sodass keine signifikante Änderung der Wärmeleitfähigkeit auftritt.

## Einfluss von Ruß auf die Temperaturleitfähigkeit in einer Gummimischung

Die Flash-Methode bietet sich als eine schnelle Lösung an, um die Auswirkung des Füllstoffgehalts auf die Wärmeleitfähigkeit eines Polymers zu bestimmen.

Dieses bei Raumtemperatur gemessene Beispiel zeigt den Zusammenhang zwischen Temperaturleitfähigkeit und Rußanteil einer Gummimischung. Mit zunehmendem Rußgehalt steigt die Temperaturleitfähigkeit linear an.



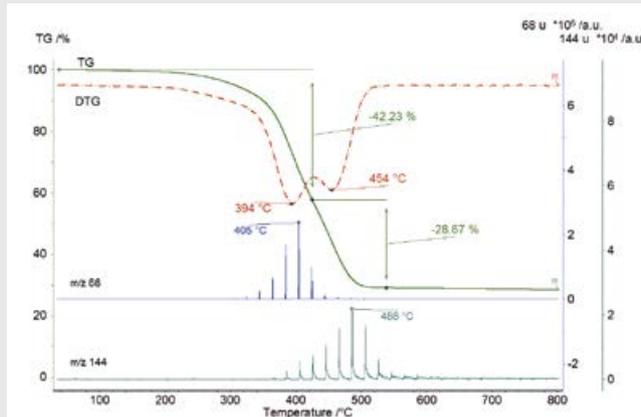
LFA-Messung: Temperaturleitfähigkeit von unterschiedlich mit Ruß gefüllten Gummimischungen bei Raumtemperatur

# Elastomere und Duromere

## TG-GC-MS-Messung an einem NR/SBR-Gummi

Die hochempfindliche TG-GC-MS-Kopplung liefert Informationen über die Zusammensetzung (Massenzahlen der Elemente und Moleküle) der freigesetzten Gase. Die Auftrennung der flüchtigen Anteile ist durch den Einsatz der GC-Säule möglich. Dies erlaubt eine beträchtlich verbesserte Interpretation organischer Gasmischungen.

Dieses Beispiel stellt die TG-GC-MS-Messung an einem NR/SBR-Gummi dar. Das GC-MS wurde bei einer konstanten Säulentemperatur von 250 °C und kurzen Injektionsintervallen von 1 min betrieben. Die TG- und DTG-Kurven zeigen eine überlappende Zersetzung der einzelnen Gummikomponenten. Trotzdem können die freigesetzten Gase



Identifizierung der freigesetzten Gase während der Zersetzung einer Gummimischung; Probeneinwaagen: 5,28 mg; Heizrate: 20 K/min; Injektionsintervalle: 1 min

in einer guten Temperatur- und Zeitkorrelation mit den TG- und DTG-Ergebnissen identifiziert werden. Der erste DTG-Peak bei 394 °C ist auf die Freisetzung von Isopren (1,3 Butadien, 2-Methyl, m/z 68)

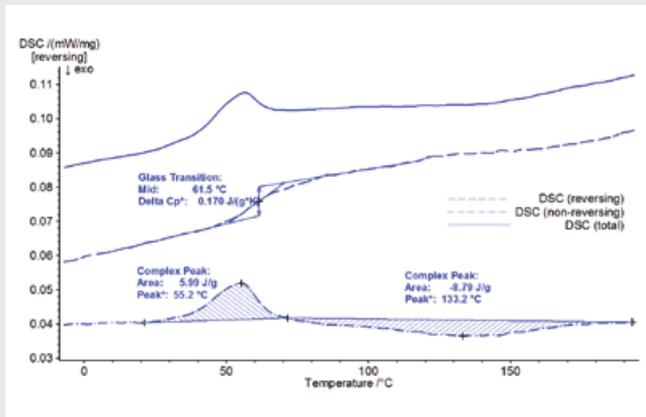
zurückzuführen, was typisch für NR ist. Der zweite DTG-Peak bei 454 °C entspricht der Freisetzung von C<sub>11</sub>H<sub>12</sub> (1-Cyclopentan-1-yl-Benzol, m/z 144) und repräsentiert die SBR-Komponente.

## Glasübergang und Aushärtung an einem Polyurethan-Harzsystem

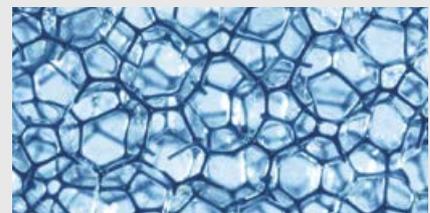
Die temperaturmodulierte Dynamische Differenzkalorimetrie (TM-DSC\*) ist eine DSC-Methode, bei der die Probe einer Überlagerung eines linearen und eines periodischen Temperaturprogramms ausgesetzt wird. Mittels TM-DSC ist es

möglich, überlappende DSC-Signale durch Berechnung des reversierenden und des nicht-reversierenden Anteils aufzutrennen. Glasübergänge können daher sehr gut von anderen Effekten, wie z. B. Relaxation, Aushärtung,

Zersetzung, Verdampfung oder Kaltkristallisation, getrennt werden. Diese TM-DSC-Messung zeigt den Glasübergang, die Relaxation und die Aushärtung einer Polyurethan (PUR)-Probe. Die überlappende Relaxation im Gesamtwärmestrom kann von dem endothermen Glasübergang (reversierend) und der exothermen Aushärtung (nicht-reversierend) in einem einzigen TM-DSC-Testlauf getrennt werden.

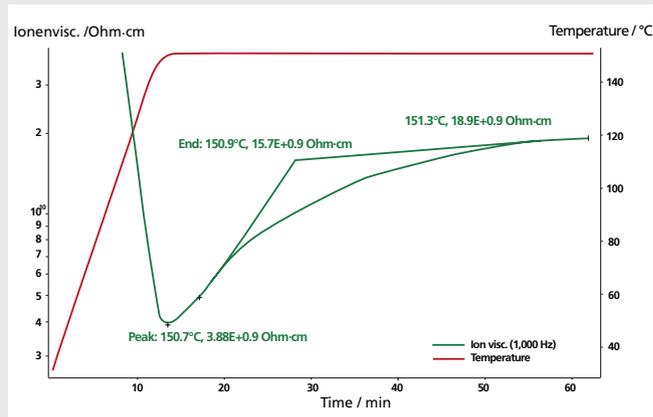


TM-DSC-Messung an einem Polyurethan-Harzsystem



## Vernetzungskontrolle von EVA

Das Copolymer EVA (Ethylvinylacetat) ist eines der am häufigsten verwendeten Verkapselungsmaterialien. Da die Polymerisationsreaktion irreversibel ist, ist die thermische Behandlung für den Verkapselungsprozess ausschlaggebend. Die Qualität und Lebensdauer von Verkapselungsmaterialien werden durch den Herstellungsprozess bestimmt. Die Aufzeichnung der Ionenviskosität ( $\Omega\text{cm}$ ) dieser EVA-Probe fand durch einen Multi-frequenz-Test bei Frequenzen zwischen 1 Hz und 10000 Hz statt. Dargestellt ist hier das Verhalten der Ionenviskosität bei 1 Hz. Unter isothermen Bedingungen (150 °C) wurde die peroxidische Vernetzungsreaktion verfolgt.



DEA-Messung für die Vernetzung von EVA bei 50 °C und 1 Hz

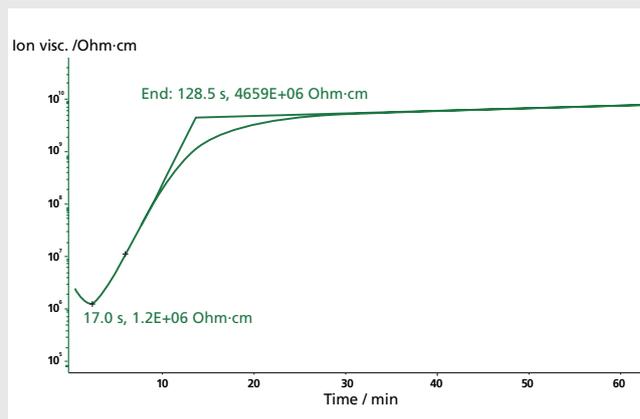
Der Anstieg der Ionenviskosität entspricht dem Anstieg des Aushärtegrads. Nach 60 min bleibt die Ionenviskosität

nahezu konstant, was auf eine abgeschlossene Vernetzungsreaktion hinweist.

## Schnelle UV-Härtung eines Epoxidharzes

Um eine lange Lebensdauer garantieren zu können, wurden spezielle UV-härtende Dichtmassen entwickelt, die zusätzlich zur ausgezeichneten Haftung eine hohe Wasserundurchlässigkeit aufweisen.

Das hier untersuchte Epoxidharz Katiobond LP655 (Fa. DELO) zeichnet sich durch eine geringe Wasserdampfeindringung und kurze Aushärtezeiten aus. Die schnelle Aushärtung kann mit der DEA 288 *Epsilon* durch Anwendung von IDEX-Sensoren und einer Frequenz von 1000 Hz bei Raumtemperatur beobachtet werden. Hier wurde eine ca. 200  $\mu\text{m}$  dicke Probenschicht für 60 s der UV-Strahlung (Intensität



UV-Härtung eines kationischen Epoxidharzes bei Raumtemperatur mit der DEA bei 1000 Hz

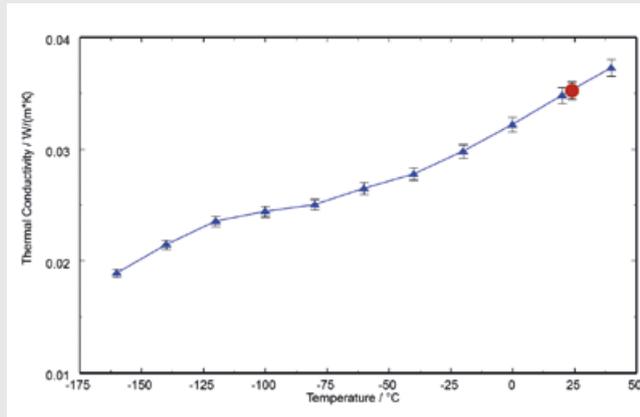
55  $\text{mW}/\text{cm}^2$  bis 60  $\text{mW}/\text{cm}^2$ ) ausgesetzt. Nach einer Belichtung von 17 s begann die Aushärtung, was am

Anstieg der Ionenviskosität erkennbar ist. Der Klebstoff war nach ca. 350 s vollkommen ausgehärtet.

# Duromere und Verbundwerkstoffe

## Wärmeleitfähigkeit eines PUR-Schaums

Polyurethan (PUR)-Schäume stellen die größte Kategorie der zellularen Polymermaterialien dar. Sie werden größtenteils entweder in steifer oder flexibler Form hergestellt. Innerhalb dieser Hauptgruppe variieren die Dichte und andere Eigenschaften je nach Endverwendungszweck. PUR-Schäume bieten ein attraktives Gleichgewicht zwischen Performance (Alterungseigenschaften, mechanische Festigkeit, elastische Eigenschaften, chemische Beständigkeit, Dämmeigenschaften) und Kosten.



Tieftemperatur-GHP-Messung an einem PUR-Schaum und Vergleich des HFM-Messergebnisses bei 25 °C; Probendicke: 25 mm

Hier ist ein Vergleich eines HFM-Tests bei Raumtemperatur und einer GHP-Untersuchung bis zu -160 °C dargestellt. Die Ergebnisse stimmen

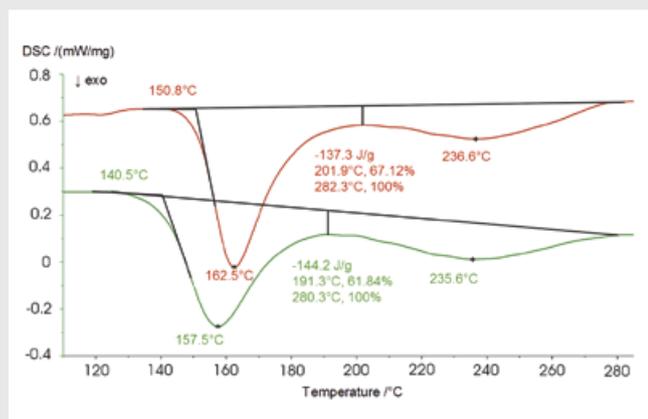
perfekt überein. Zusätzlich zeigt das GHP-Ergebnis die Auswirkungen der Kondensation der Gaszellen zwischen -125 °C und -50 °C.

## Hochdruck-DSC-Messungen an Phenolharzen

Phenolharze kommen in zahlreichen Industrieprodukten vor. Phenollamine werden durch Imprägnieren einer oder mehrerer Schichten auf das Basismaterial – wie z. B. Papier, Glasfaser oder

Baumwolle – mit Phenolharz hergestellt; danach erfolgt die Laminierung des harzgetränkten Basismaterials unter Hitze und Druck. Das Harz härtet während dieses Prozesses vollkommen aus.

Die Aushärtereaktion von Phenolharzen wird durch Polykondensation verursacht. Die endotherme Freisetzung der Polykondensationsprodukte überlagert die exotherme Aushärtereaktion. Aus diesem Grund kann die Aushärtung in der Standard-DSC nur unter Verwendung von Autoklavtiegeln oder alternativ mittels Hochdruck-DSC durchgeführt werden.



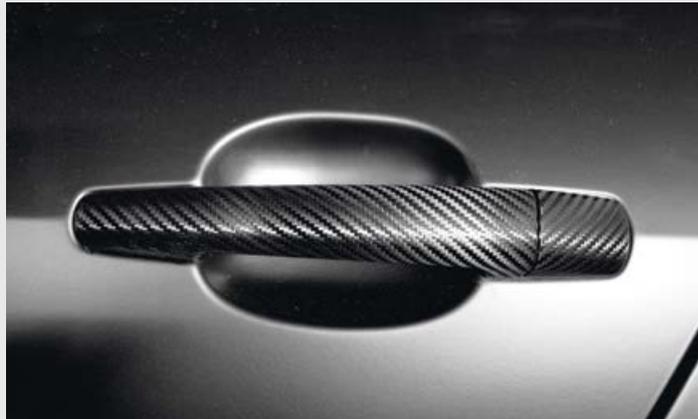
DSC 204 HP: Exothermes Aushärteverhalten von zwei Phenolharzen unter hohem Druck; Probeneinwaage: 10,5 mg; Heizrate: 10 K/min, Druck: 9 MPa; Atmosphäre: inert

Dieses Beispiel zeigt zwei Phenolharze, gemessen mit der DSC 204 HP *Phoenix*® unter einem praxisrelevanten Druck von 9 MPa (90 bar). Die Unterschiede zwischen diesen Harzen liegen im unterschiedlichen Beginn der Aushärtung bei 141 °C bzw. 151 °C (extrapolierte Onsets) sowie an den unterschiedlichen Reaktionswärmern (Teilflächenauswertungen).

## Charakterisierung hochsteifer Verbundwerkstoffe

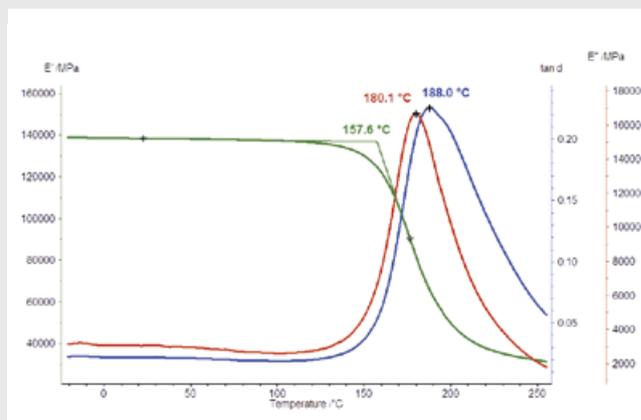
Die Trends in der aktuellen Forschung – speziell in der Automobilindustrie – gehen in Richtung leichtere Materialien, jedoch ohne Kompromisse hinsichtlich der erforderlichen Steifigkeit über einen weiten Temperaturbereich. Der Schlüssel zu leichteren Fahrzeugen liegt in der Verwendung Kohlefaser-verstärkter Polymere.

Diese hochsteifen Verbundwerkstoffe haben ihre Leistungsfähigkeit in der Luft- und Raumfahrtindustrie bereits bewiesen. Jedoch sind die Durchlaufzeiten während der Herstellung von Automobilteilen wesentlich kürzer und die Duromere müssen deshalb bereits innerhalb weniger Minuten, und nicht Stunden, ausgehärtet sein.



Dieses Beispiel zeigt den Speichermodul  $E'$  (grün), den Verlustmodul  $E''$  (rot) und den Verlustfaktor  $\tan\delta$  (blau) eines Kohlefaser-verstärkten Epoxidharzes. Die lamellenförmige Probe wurde im Biegemodus bei einer Frequenz von 10 Hz und einer Heizrate von 3 K/min mit der DMA untersucht. Bis zu einer Temperatur von 120 °C liegt der  $E'$ -Modulwert bei 140.000 MPa. Das Material ist damit steifer als Titan.

Bei 158 °C (extrapolierte Onsettemperatur von  $E'$ ) sinkt der Modul aufgrund des Glasübergangs der Epoxidmatrix ab. Die entsprechenden Peaks für  $E''$  und  $\tan\delta$  treten bei 180 °C bzw. 188 °C auf.



DMA-Messung an einem hochsteifen, Kohlefaser-verstärkten Epoxidharz

# Verbundwerkstoffe und Thermokinetik



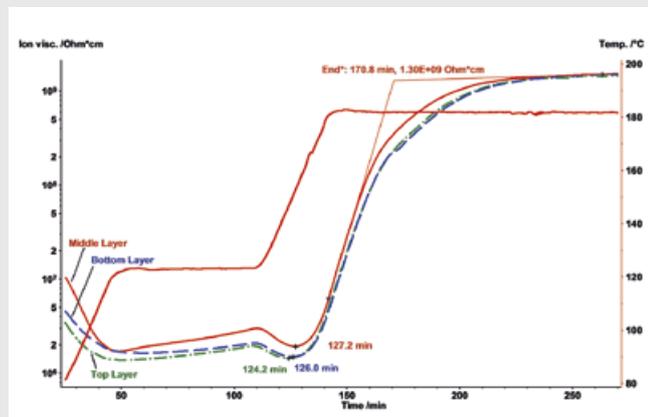
## Kontrolle des Aushärteverhaltens eines CF-verstärkten Epoxidharzes

Nach welcher Zeit oder bei welcher Temperatur beginnt die Aushärtereaktion? Ist das Duomer bereits vollkommen ausgehärtet? Auf diese oder ähnliche Fragen möchten Hersteller von Harzen und Duomerverarbeiter umfassende Antworten erhalten. Mit Hilfe der Thermischen Analyse (TA) ist die Beantwortung dieser Fragen möglich. Jedoch können die klassischen TA-Methoden hier nur beschränkt zum Einsatz kommen, da z. B. die Aushärtung und die Lösemittelfreisetzung überlagert sein können oder die Aushärtereaktion schnell

stattfindet als das Mischen und Wiegen der Probe. Solche Probleme werden durch den Einsatz der dielektrischen Analyse (DEA) vermieden. Die DEA kann selbst in-situ angewendet werden, d.h. während des eigentlichen Prozesses in der Anlage.

Der Plot zeigt das Aushärten eines Kohlefaser-verstärkten Epoxidharzes während des Harzinjektionsverfahrens (Resin Transfer Molding, RTM) für Anwendungen in der Luftfahrt. Während des zweistufigen Temperaturprogramms fällt die Ionen-

viskosität zunächst aufgrund der steigenden Temperatur ab. Sie nimmt dann im ersten isothermen Segment wieder zu – bedingt durch den Beginn der Aushärtung. Beim anschließenden Aufheizen bis 180 °C wirkt der Temperaturanstieg zunächst der Aushärtung entgegen, was in der Abnahme der Ionenviskosität deutlich wird. Erst im weiteren Temperaturverlauf beginnt die Aushärtung zu dominieren. Danach wird die Ionenviskosität mit steigendem Aushärtegrad aufgezeichnet. Insgesamt nimmt sie um drei Größenordnungen zu und erreicht nach Beenden der Aushärtung einen konstanten Wert (hier als extrapolierter Onset bei  $1,3 \times 10^9 \Omega\text{cm}$  ausgewertet).



Dielektrische Analyse (DEA) mit unterschiedlichen Positionen der IDEX-Sensoren

Mit der mehrkanaligen DEA kann der Aushärteprozess an mehreren Stellen im Werkzeug aufgezeichnet werden. Im vorliegenden Fall wurden drei IDEX-Sensoren zwischen verschiedene Kohlenfaser-schichten platziert, die die gesamte Dicke des Teils repräsentieren. Die Ionenviskositätskurve für die mittlere Schichtlage (rot) zeigt die schnellste Aushärtung (höchste Reaktivität) in kürzester Aushärtezeit.

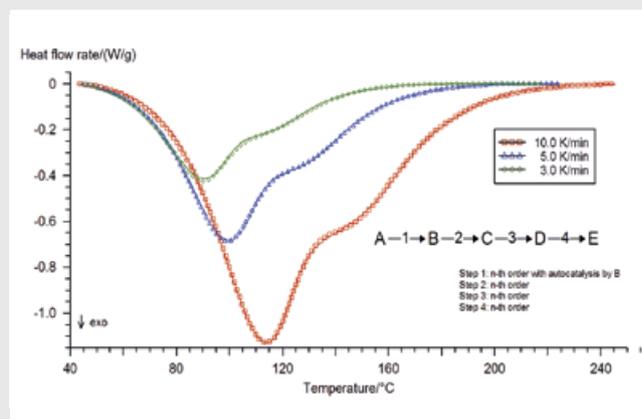
## Thermokinetics: Auswertung des Aushärteverhaltens eines Epoxidharzes

Die kinetische Analyse erlaubt die Ermittlung einer Reihe von kinetischen Parametern, wie z. B. die Anzahl der Reaktionsstufen, der Beitrag jeder Stufe zum Gesamtprozess, den Reaktionstyp, die Aktivierungsenergie und die Reaktionsordnung für jede Stufe. Diese

Informationen dienen zur Vorhersage von neuen Temperatur-/Zeitprogrammen oder zur Optimierung des Verhaltens von vorgegebenen Systemen. Epoxidharze finden eine breite industrielle Anwendung. Fragen über die Dauer ihrer Aushärtung oder nach

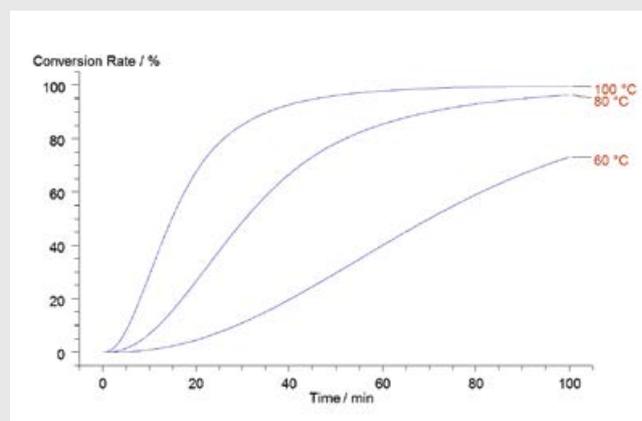
den Bedingungen, unter denen ein bestimmter Aushärtegrad erreicht wird, können mit Hilfe der Reaktionskinetik beantwortet werden. Jedoch kann in diesen Fällen die modellfreie Kinetik nicht eingesetzt werden, da diese strengen Einschränkungen unterliegt.

In diesem Beispiel wurde mit der DSC 204 **F1 Phoenix**® ein ungehärtetes Epoxidharz mit Heizraten von 3 K/min, 5 K/min und 10 K/min aufgeheizt. Anschließend wurde mit dem Softwareprogramm *Thermokinetics* die exotherme Aushärtung simuliert. Die nahezu perfekte Kurvenanpassung wurde durch eine 4-stufige Reaktion  $n^{\text{ter}}$  Ordnung erreicht. Der Anfang der Aushärtung wird durch eine Reaktion erster Ordnung mit Autokatalyse gut beschrieben.



Aushärtung eines Epoxidharzes bei unterschiedlichen Aufheizraten

Dieser Plot zeigt die Vorhersage des Aushärteverhaltens basierend auf der obigen Simulation. Für verschiedene isotherme Temperaturen ist die Umwandlungsrate gegen die Zeit aufgetragen. Bei z. B. 100 °C ist das hier untersuchte Material nach 65 min vollkommen ausgehärtet (Aushärtegrad von 100 %).



Vorhersage des Aushärteverhaltens bei unterschiedlichen isothermen Temperaturen

# Kompetenz in Service



## Unsere Kompetenz – Service

Der Name NETZSCH steht überall auf der Welt für umfassende Betreuung und kompetenten, zuverlässigen Service – vor und nach dem Gerätekauf. Unsere qualifizierten Mitarbeiter aus den Bereichen Technischer Service und Applikation stehen Ihnen jederzeit gerne für eine Beratung zur Verfügung.

In speziellen, auf Sie und Ihre Mitarbeiter zugeschnittenen Trainingsprogrammen lernen Sie, die Möglichkeiten Ihres Geräts voll auszuschöpfen.

Zur Erhaltung Ihrer Investition begleitet Sie unser kompetentes Serviceteam über Jahrzehnte hinweg zur Sicherstellung gleichbleibend hoher Performance.

## Unsere Dienstleistungen für Sie

- Aufstellung und Inbetriebnahme
- Hotline-Service
- Wartungsvereinbarungen
- Kalibrierservice
- IQ/OQ/PQ
- Vor-Ort-Reparaturen mit Notfall-Service für NETZSCH-Komponenten
- Umzugs-/Austauschservice
- Technischer Informationsservice
- Definition und Lieferung von Ersatzteilen

## Unsere Kompetenz – Applikationslabore

Die Applikationslabore von NETZSCH Analysieren & Prüfen sind ein kompetenter Partner bei annähernd allen Fragestellungen in der thermischen Analyse. Das beinhaltet sorgfältigste Probenvorbereitung sowie die Prüfung und die Interpretation Ihrer Messergebnisse. Unsere unterschiedlichen Messverfahren und über 30 verschiedene Messstationen entsprechen dem neuesten Stand der Technik. Auch für spezielle Fragestellungen haben wir Lösungen parat.

Im Rahmen der thermischen Analyse und der Messung thermophysikalischer Eigenschaften bieten wir Ihnen ein umfassendes Programm verschiedenster Analyseverfahren zur Charakterisierung von Werkstoffen (Festkörper, Pulver und Flüssigkeiten). Es sind Messungen an

unterschiedlichsten Geometrien und Konfigurationen möglich. Sie erhalten von uns Messergebnisse mit hoher Genauigkeit und weiterführende Interpretationen. Dadurch ist es Ihnen möglich, neue Werkstoffe und Bauteile vor dem eigentlichen Einsatz genau zu spezifizieren, Ausfallrisiken zu minimieren oder entscheidende Vorteile gegenüber ihren Mitbewerbern zu erarbeiten.

Bei Produktionsproblemen können wir die Ursachen analysieren und mit Ihnen Lösungskonzepte erarbeiten. Die vergleichsweise geringen Investitionen in unsere Auftragsmessungen und Dienstleistungen reduzieren bei Ihnen Ausfallzeiten und Ausschussraten. Zudem ermöglichen sie Ihnen, die Zufriedenheit Ihrer Kunden zu erhöhen und neue zu gewinnen.



Die NETZSCH-Gruppe ist ein deutsches mittelständisches Unternehmen des Maschinen- und Gerätebaus in Familienbesitz mit weltweiten Produktions-, Vertriebs- und Servicegesellschaften.

Die Geschäftsbereiche Analysieren & Prüfen, Mahlen & Dispergieren sowie Pumpen & Systeme stehen für individuelle Lösungen auf höchstem Niveau. Mehr als 3.000 Mitarbeiter in weltweit 163 Vertriebs- und Produktionszentren in 28 Ländern gewährleisten Kundennähe und kompetenten Service.

NETZSCH-Technologie ist weltweit führend im Bereich der thermischen Charakterisierung von annähernd allen Werkstoffen. Wir bieten Komplettlösungen für die Thermische Analyse, die adiabatische Reaktionskalorimetrie und die Bestimmung thermophysikalischer Eigenschaften. Basierend auf mehr als 50 Jahren Applikationserfahrung, einer breiten Produktpalette auf dem neuesten Stand der Technik und umfassenden Serviceleistungen erarbeiten wir für Sie Lösungen und Gerätekonfigurationen, die Ihren täglichen Anforderungen mehr als gerecht werden.

[www.netzsch.com/n78812](http://www.netzsch.com/n78812)



NETZSCH-Gerätebau GmbH  
Wittelsbacherstraße 42  
95100 Selb  
Deutschland  
Tel.: +49 9287 881-0  
Fax: +49 9287 881 505  
[at@netzsch.com](mailto:at@netzsch.com)

[www.netzsch.com](http://www.netzsch.com)