

Laser Flash Analyse macht die Wärmeleitung in anisotropen Materialien messbar

Fabia Beckstein, Applications Laboratory, und Nico Dilsch, Software Department

Einleitung

Grafitfolien werden in vielen technischen Anwendungen eingesetzt, bei denen eine effiziente Wärmeabfuhr bei geringer Materialdicke erforderlich ist, beispielsweise in der Elektronik, Energietechnik und im Maschinenbau. Neben ihrer hohen thermischen und chemischen Beständigkeit zeichnet sie insbesondere ihre ausgeprägte anisotrope Wärmeleitfähigkeit aus.

Während die Wärmeleitfähigkeit senkrecht zur Folienebene (*through-plane*) vergleichsweise gering ist, besitzen Grafitfolien in der Ebene (*in-plane*) eine sehr hohe Wärmeleitfähigkeit. Diese Eigenschaften werden größtenteils produktionsbedingt hervorgerufen, z.B. durch Walzen. Die *in-plane*-Wärmeleitfähigkeit ermöglicht eine schnelle laterale Verteilung der Wärme über die Foliensfläche. Sie ist insbesondere für die Reduktion lokaler Hotspots von großer Bedeutung, da punktuelle Wärmequellen effizient entlastet werden. Grafitfolien wirken dadurch als Wärmeverteiler und leisten einen wichtigen Beitrag zur thermischen Stabilität und Zuverlässigkeit moderner technischer Systeme.

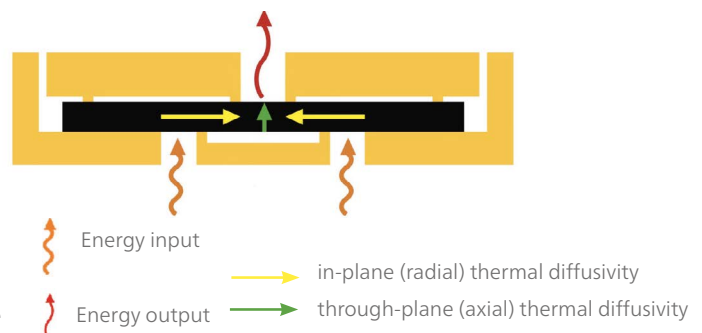
Through-plane vs. in-plane

Die akkurate Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit *through-plane* und *in-plane* ist von zentraler Bedeutung für die Auslegung vieler technischer Anwendungen. Die LFA (Laser Flash Analyse) meistert mit geeigneten Probenhaltern und Modellen diese Aufgabe leicht und benutzerfreundlich. *Through-plane*-Messungen werden mit dem Folienprobenhalter, optimiert für die Messung von dünnen Proben, durchgeführt, siehe Abbildung 1 links. Für *in-plane* Messungen dagegen wird der *in-plane*-Probenhalter (Heat Flow inward) verwendet, siehe Abbildung 1 rechts.

Die *through-plane*-Messungen werden senkrecht zur Probenoberfläche ausgeführt. Bei *in-plane*-Messungen ist aufgrund der ringförmigen Beleuchtung der Probe und der davon entfernten Detektion des Temperaturanstiegs in der Mitte der Probe das Messsignal charakteristisch für die Wärmeleitung in der Ebene. Eine Skizze dazu ist in Abbildung 2 dargestellt.



1 Probenhalter für *through-plane* (links) und *in-plane* Messungen (rechts) von dünnen Folien



2 Skizze Wärmeleitung während einer *in-plane* Messung (Heat Flow inwards)

Messbedingungen

Die Messbedingungen sind in Tabelle 1 zusammengefasst.

Das orthotrope Modell

Um der ausgeprägten Anisotropie von Grafitfolien bei der Auswertung gerecht zu werden, beschreibt das orthotrope Modell die Temperaturleitfähigkeit als richtungsabhängige Größe mit zwei unabhängigen Komponenten: einer senkrecht zur Probenebene (α_{\perp}) und einer in der Ebene (α_{\parallel}). Dies spiegelt sich direkt in der zugrundeliegenden Wärmeleitungsgleichung wider:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\alpha_{\parallel}}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \alpha_{\perp} \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}$$

Hierbei bezeichnet z die Richtung senkrecht zur Probenoberfläche (*through-plane*) und r die radiale Richtung in der Ebene (*in-plane*). Anstatt eine einheitliche

Diffusivität für alle Richtungen vorauszusetzen, erlaubt das Modell für α_{\parallel} und α_{\perp} unabhängige Parameterwerte und kann so der realen Wärmeausbreitung in anisotropen Materialien gerecht werden. Bei der Auswertung einer *in-plane*-Messung fließt die *through-plane*-Diffusivität α_{\perp} – die zuvor in einer separaten Messung bestimmt wurde – als bekannte Eingangsgröße in die Berechnung ein, sodass α_{\parallel} präzise ermittelt werden kann.

Viele kommerzielle LFA-Systeme verwenden für die Auswertung von *in-plane*-Messungen ausschließlich eindimensionale Modelle. Da diese die Wärmeausbreitung nur entlang einer einzigen Raumrichtung beschreiben, ist eine Unterscheidung zwischen *in-plane*- und *through-plane*-Diffusivität von vornherein nicht möglich. Für Materialien mit ausgeprägter Anisotropie wie Grafitfolien führt dies zwangsläufig zur Unterschätzung der Temperaturleitfähigkeit.

Tabelle 1 Messbedingungen

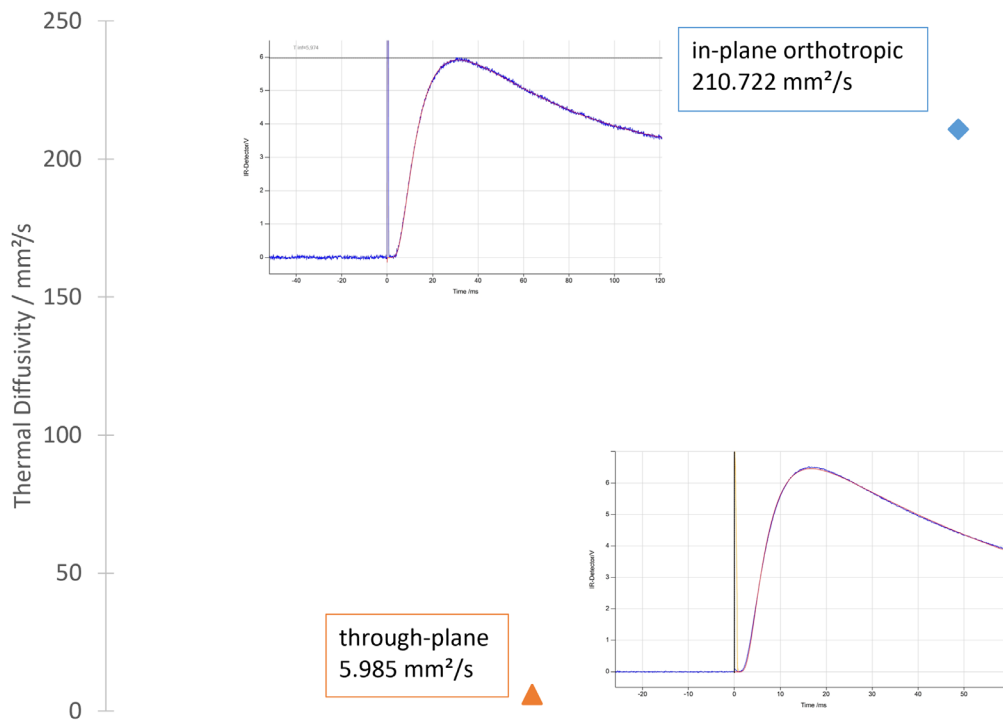
LFA-System	LFA 717 HyperFlash®
Probe	Grafitfolie
Probendicke	500 µm
Dichte	~ 1 g/cm ³ aus Datenblatt
Spezifische Wärmekapazität	Literaturwerte aus POCO Graphite [2]
Temperaturprogramm	25 bis 500 °C
Atmosphäre	Stickstoff
Messrichtung	<i>through-plane</i> und <i>in-plane</i>
Probenhalter	<i>through-plane</i> → Folienprobenhalter <i>in-plane</i> → Heat Flow inward
Auswertemodelle	<i>through-plane</i> → Standardmodell basierend auf Cape Lehman <i>in-plane</i> → orthotropes Modell

Einfluss der Modellwahl auf das Messergebnis

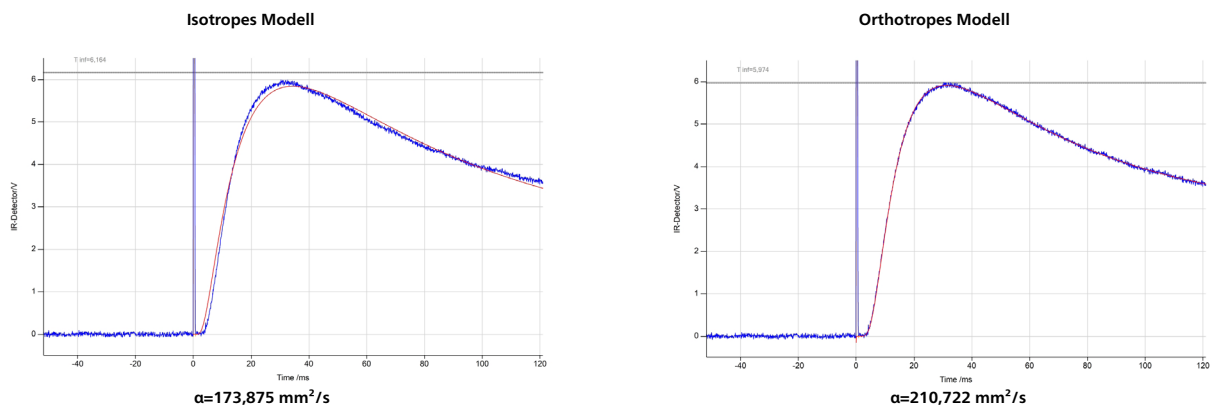
Abbildung 3 zeigt die Temperaturleitfähigkeit der Graphitfolie bei Raumtemperatur in *through-plane*- und *in-plane*-Richtung. Die Temperaturleitfähigkeit senkrecht zur Oberfläche (*through-plane*) wird nach dem Standardmodell basierend auf Cape-Lehman ausgewertet [1]. Sie ist um zwei Größenordnungen niedriger als die Temperaturleitfähigkeit in der Ebene (*in-plane*). Zur Auswertung der *in-plane*-Messung wird demnach das

orthotrope Modell verwendet. Die Unterscheidung zwischen isotropen und anisotropen Verhalten bei *in-plane*-Messungen ist bei genauerer Betrachtung signifikant.

Abbildung 4 macht dies deutlich. Hier ist die Messung der Graphitfolie mit dem isotropen und dem orthotropen Modell ausgewertet. Die isotrope Auswertung ergibt signifikant niedrigere Werte (ca. -18%) und zeigt zusätzlich einen wesentlich schlechteren Kurvenfit.

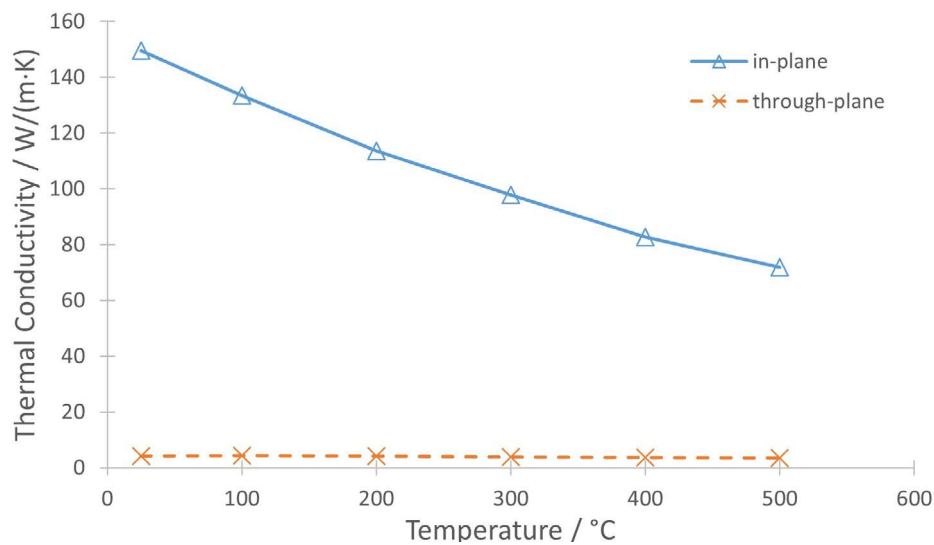


3 Temperaturleitfähigkeit der Graphitfolie bei Raumtemperatur *through-plane* und *in-plane*



4 Temperaturleitfähigkeit der Graphitfolie bei Raumtemperatur, ausgewertet mit verschiedenen Modellen

APPLICATIONNOTE Laser Flash Analyse macht die Wärmeleitung in anisotropen Materialien messbar



5 Wärmeleitfähigkeit der Grafitfolie bei Raumtemperatur *through-plane* und *in-plane*

Wärmeleitfähigkeit in Abhängigkeit der Temperatur und Messrichtung

Abbildung 5 stellt die Wärmeleitfähigkeit der Grafitfolie in *through-plane*- und *in-plane*-Richtung von Raumtemperatur bis 500 °C dar. Für die Berechnung der Wärmeleitfähigkeit wurde die spezifische Wärmekapazität von POCO Graphite [2] und die Dichte bei Raumtemperatur verwendet. Die Wärmeleitfähigkeit nimmt mit höherer Temperatur für beide Richtungen ab. Die Wärmeleitfähigkeit *in-plane* ist dabei deutlich höher als *through-plane*.

Zusammenfassung

Die Laser-Flash-Analyse ermöglicht mit geeigneten Probenhaltern die zuverlässige Bestimmung der stark anisotropen Wärmeleitfähigkeit von Grafitfolien sowohl in *through-plane*- als auch in *in-plane*-Richtung. Dabei zeigt sich eine um Größenordnungen höhere Wärmeleitfähigkeit in der Ebene, die für die effiziente Verteilung von Wärme und die Reduktion von Hotspots entscheidend ist. Für eine korrekte Auswertung ist die Verwendung eines geeigneten, Anisotropie berücksichtigenden Modells essenziell, da isotrope Ansätze die Eigenschaften nicht berücksichtigen.

Literatur

- [1] J. A. Cape and G. W. Lehman: Temperature and finite pulse-time effects in the flash method for measuring thermal diffusivity; Journal of Applied Physics; 34(7):1909–1913; July 1963
- [2] R.E. Taylor, H. Groot: Thermophysical properties of POCO Graphite; HTHP; 12(2): 147-160; 1980