

› **Messung des Wärmeausdehnungskoeffizienten von Polymeren**

Auslegung von Multi-Material-Bauteilen

Kleb- und Kunststoffe gewinnen in der heutigen Industrie zusehends an Bedeutung. Die Forderung nach klimafreundlicher Mobilität beispielsweise, führt dazu, dass die Transportmittel immer leichter gebaut werden. Aus diesem Grund setzen die Automobil- und Flugzeugindustrie vermehrt auf verklebte Strukturen, da diese ein hohes Leichtbaupotenzial aufweisen. Ebenso kommen auch vermehrt Multimaterialbauteile aus Metall und Kunststoff zum Einsatz.

› **Prof. Dr. Pierre Jousset, Stefan Rutzer¹**

Solche Bauteile sind im Einsatz oft wechselnden Temperaturen ausgesetzt. Da Metalle und Kleb- beziehungsweise Kunststoffe in den meisten Fällen unterschiedliche Wärmeausdehnungskoeffizienten besitzen, kann es zu unterschiedlichen Verformungen der Bauteile kommen. Ein Beispiel dafür ist der sogenannte Bimetall-Effekt, welcher zu einer Aufwölbung des Fügeteils führt. Ferner können unterschiedliche Wärmeausdehnungskoeffizienten zu Rissen im Klebstoff oder in den Substraten führen.

Dieser Artikel soll zeigen, wie diese Wärmeausdehnungseffekte in der Realität gemessen werden können. Es wird ausserdem eine Methode vorgeschlagen, um diese Effekte im Auslegungsprozess von Polymerbauteilen (Kunststoff, gemischte oder verklebte Konstruktion) vorherzusagen und zu verhindern. Dies sollte zu einem besseren Verständnis des mechanischen Verhaltens von Polymerbauteilen, sowie zu einer sicheren Auslegung beitragen.

Theoretische Grundlagen

Die Änderung der Temperatur eines Körpers führt zu einer Änderung seiner Abmessungen. Dieser Effekt wird Wärmeausdehnung genannt und durch den linearen Wärmeausdehnungskoeffizienten α be-

¹ Prof. Dr. Pierre Jousset, Fachbereichsleiter Verbindungstechnik, IWK, Stefan Rutzer, Wissenschaftlicher Mitarbeiter, Fachbereich Verbindungstechnik, IWK, an der HSR, Hochschule für Technik Rapperswil



Bild 1: Temperierkammer zur Messung des Wärmeausdehnungskoeffizienten [2]

schrieben. Der Wärmeausdehnungskoeffizient α , auch Wärmedehnzahl genannt, beschreibt die Längenänderung eines Körpers bei 1 K Temperaturerhöhung und besitzt die Einheit 1/K. Die Änderung des Volumens eines Körpers wird durch den kubischen Wärmeausdehnungskoeffizienten β beschrieben. Für isotrope Materialien gilt dabei folgender Zusammenhang:

$$\beta = 3 * \alpha$$

Mit dem Wärmeausdehnungskoeffizienten kann die Längenänderung, die durch eine Temperaturdifferenz hervorgerufen wird, wie folgt berechnet werden:

$$\Delta l = \alpha * l_0 * (T_1 - T_0)$$

wobei l_0 der Länge bei der Temperatur T_0 entspricht. Analog zur Längenänderung kann auch die Volumenänderung berechnet werden:

$$\Delta V = \beta * V_0 * (T_1 - T_0)$$

Der Wärmeausdehnungskoeffizient ist grundsätzlich keine konstante, sondern eine temperaturabhängige Grösse. Dies gilt insbesondere für Kunststoffe. Aus diesem Grund ist bei der Bestimmung des Wärmeausdehnungskoeffizienten mit nichtlinearen Abhängigkeiten zu rechnen. Daraus resultiert folgende Definition für den Wärmeausdehnungskoeffizienten:

$$\alpha(T) = \frac{1}{l_0} * \frac{dl}{dT}$$

beziehungsweise

$$\beta(T) = \frac{1}{V_0} * \frac{dV}{dT}$$

Die Nichtlinearität kommt durch die mit steigender Temperatur einsetzende lokale Bewegung kleiner Molekülgruppen (Nebenrelaxation) und der danach einsetzenden kooperativen Bewegung ganzer Molekülgruppen (Hauptrelaxation) zustande. Im Bereich der Glasübergangstemperatur tritt deshalb eine sprunghafte Änderung des Wärmeausdehnungskoeffizienten auf.

Messung des Wärmeausdehnungskoeffizienten

Aufgrund des hohen Leichtbaupotenzials werden in der Industrie zunehmend Klebstoffverbindungen und hybride Bauteile entwickelt und eingesetzt. Die unterschiedlichen Wärmeausdehnungskoeffizienten der beiden Werkstoffe und des Klebstoffs können dabei zu inneren Spannungen und zum Versagen der Bauteile führen. Das mechanische Verhalten dieser Bauteile unter thermischer Belastung kann mittels einer Finite Elemente (FE)-Analyse

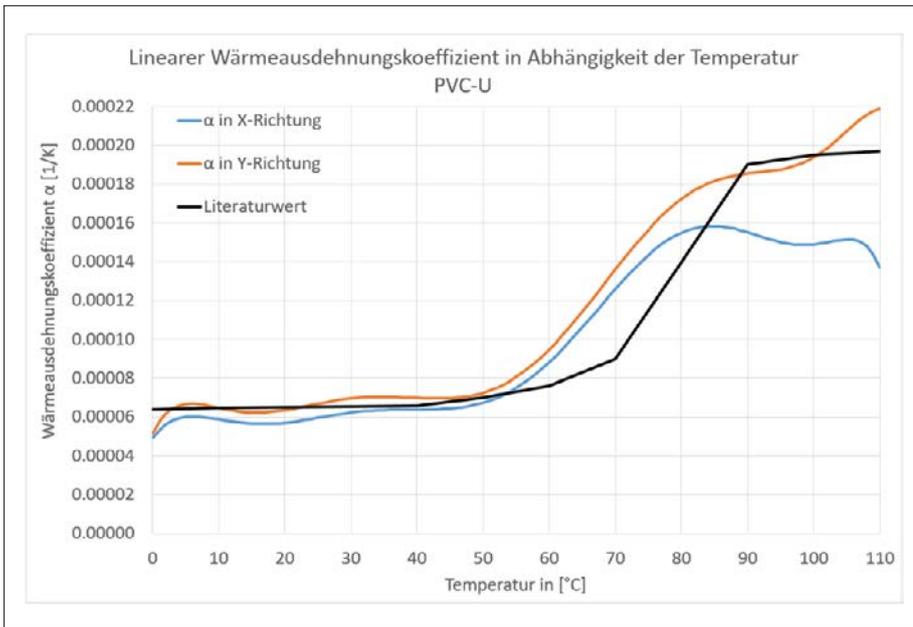


Bild 2: Linearer Wärmeausdehnungskoeffizient in Abhängigkeit der Temperatur von PVC-U [2] und [3]

simuliert werden. Oftmals werden die benötigten Werkstoffparameter der Substrate oder der Klebstoffe von den Herstellern nicht angegeben. Aus diesem Grund wurde am IWK im Rahmen von zwei Studienarbeiten ([1] und [2]) ein Messaufbau entwickelt, welcher es erlaubt, den Wärmeausdehnungskoeffizienten von Polymeren in einem Bereich von 0°C bis 110°C zu ermitteln.

Der entwickelte Messaufbau (Bild 1) setzt sich aus einer Temperierkammer mit Regler und einem optischen 3D-Messsystem zusammen. In der Temperierkammer kann mithilfe von Peltierelementen ein vorgegebenes Temperaturprofil abgefahren werden. Mithilfe des optischen Messsystems «Aramis GOM» kann das Dehnungsfeld des Prüfkörpers in Abhängigkeit der Temperatur gemessen werden. Daraus kann wiederum der temperaturabhängige Wärmeausdehnungskoeffizient der Probe ermittelt werden.

Ergebnisse des Versuchsaufbaus

Im Diagramm (Bild 2) ist der ermittelte Wärmeausdehnungskoeffizient einer PVC-U-Probe in Abhängigkeit der Temperatur aufgezeichnet. Es ist zu erkennen, dass es – einmal in der Längsrichtung X und einmal in der Querrichtung Y der Probe – einen sprunghaften Anstieg des Wärmeausdehn-

koeffizienten im Bereich von 60 °C bis 90 °C gibt. Dieser Sprung liegt im Bereich der Glasübergangstemperatur vom PVC-U. Wird diese überschritten, setzt eine kooperative Bewegung der ganzen Molekülgruppen ein. Da das geprüfte Material mittels Plattenextrusion hergestellt wurde, kann auch der anisotrope Wärmeausdehnungskoeffizient in der X und in der Y Rich-

tung nach dem Überschreiten der Glasübergangstemperatur erklärt werden.

FE-Simulation zur Auslegung unter thermischen Belastungen

Die mithilfe des Messaufbaus ermittelten Wärmeausdehnungskoeffizienten können für vielfältige FE-Simulationen eingesetzt werden. Mithilfe dieser Simulationen kann beispielweise die Klebeverbindung eines Bauteils in einer frühen Entwicklungsphase ausgelegt werden.

In nachfolgendem Beispiel wird ein Stahl mit einem Aluminiumbauteil verklebt. Die Aushärtung des Klebstoffs findet bei 180°C statt. Das Aluminium- und das Stahlbauteil dehnen sich beim Erwärmen aus und der Klebstoff härtet im erwärmten Zustand aus. So entstehen beim Abkühlen, aufgrund der unterschiedlichen Wärmeausdehnungskoeffizienten, Spannungen in der Verbindung. Diese Spannungen können zu einer Verformung der Fügepartner nach dem Aushärten führen und die Verbindung schwächen oder im Extremfall sogar zu einem Versagen der Verbindung führen.

In Bild 3 ist der Modellaufbau und das Simulationsergebnis einer thermischen Simulation zu erkennen. Dabei wird die De-

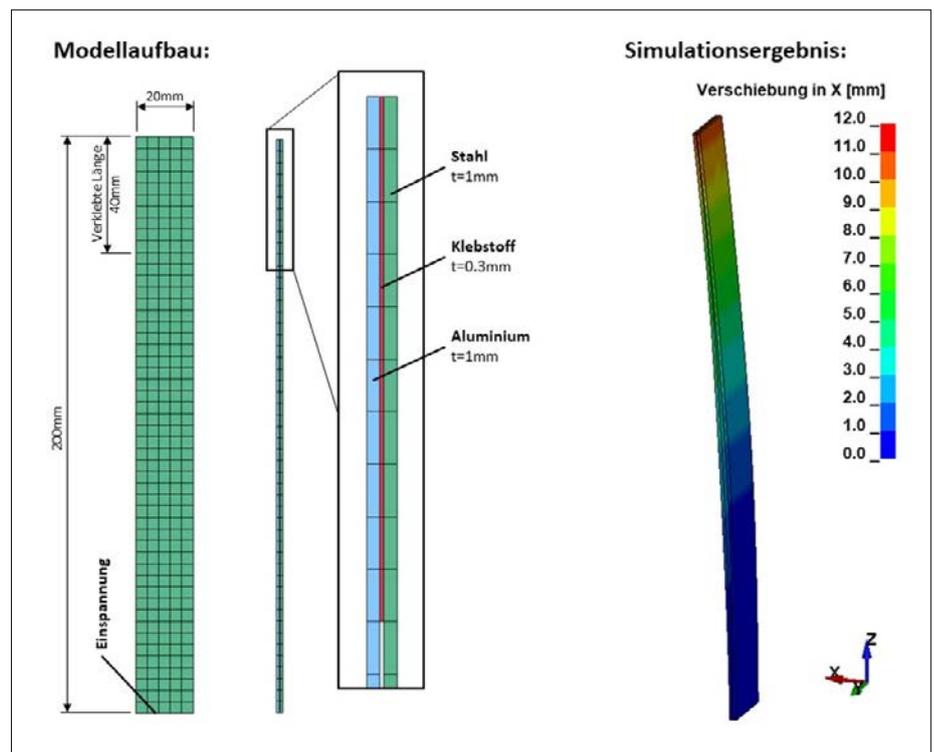


Bild 3: Simulation der Wärmedehnung eines verklebten Aluminium- und Stahlbauteils

formation beim Abkühlen der Probe von 180°C auf Raumtemperatur analysiert. Der Prüfkörper besteht aus einem Stahl- und einem Aluminiumblech, welche im oberen Bereich verklebt sind. Am unteren Ende des Prüfkörpers werden die Bleche fixiert. Es ist zu erkennen, dass sich der Prüfkörper beim Abkühlen, nach dem Aushärten des Klebstoffs bei 180°C, am oberen Ende um über 11 mm deformiert. In der aktuellen Simulation ist sowohl die Steifigkeit als auch der Wärmeausdehnungskoeffizient der verwendeten Materialien über den gesamten Temperaturbereich konstant. Diese Annahme führt bei den meisten metallischen Werkstoffen in einem Temperaturbereich von 20°C bis 180°C zu keinem grossen Fehler. Soll jedoch das thermomechanische Verhalten von Kunststoffen analysiert werden, kann diese Annahme nicht gemacht werden. Wie im Diagramm (Abb. 2) zu erkennen ist, ändert sich der Wärmeausdehnungskoeffizient von Kunststoffen im Bereich der Glasübergangstemperatur extrem. Mit der am IWK entwickelten Prüfvorrichtung können die benötigten Daten für die thermomechanische Simulation von Kunststoffen oder Faserverbundwerkstoffen ermittelt werden.

Relevanz für die Industrie

In einer industriellen Anwendung, wie beispielsweise im Automobilbau, wo oftmals



Bild: VW

Bild 4: Karosserie aus einer Multi-Material-Kombination [4]

Multimaterialkombinationen eingesetzt werden, muss eine solche Deformation und die daraus resultierenden Spannungen unbedingt verhindert werden. Mithilfe einer thermomechanischen Simulation können solche Fehler schon in einer frühen Entwicklungsphase verhindert und die Konstruktion oder die Werkstoffwahl können angepasst werden.

Quellen

- [1] Kittelmann Florian, Messung der Wärmeausdehnungskoeffizienten von Polymeren, Semesterarbeit Frühlingssemester 2019, HSR
- [2] Neff Silvan, Messung und Simulation der Wärmeausdehnungskoeffizienten von Polymeren, Herbstsemester 2019, HSR

- [3] Baur, Brinkmann, Osswald, Rudolph, Schmachtenberg, Saechtling Kunststoff Taschenbuch, 31. Ausgabe, München, Carl Hanser Verlag
- [4] Rainerhaufe, Karosserie des Volkswagen XL1, ausgestellt in der Gläsernen Manufaktur, Creative-Commons-Lizenz, https://de.wikipedia.org/wiki/Datei:Karosserie_XL1_Gl%C3%A4serne_Manufaktur.JPG

Kontakt

IWK Institut für Werkstofftechnik und Kunststoffverarbeitung
 Eichwiesstrasse 18b
 CH-8645 Rapperswil-Jona
 +41 55 222 47 70
 iwk@ost.ch
 www.iwk.ost.ch



ERGE Elektrowärmetechnik - Franz Messer GmbH
 91220 Schnaittach - Hersbrucker Straße 29-31
 Tel. +49/9153/921-0 Fax +49/9153/921-117
 www.erge-elektrowaermetechnik.de
 mail: verkauf@erge-elektrowaermetechnik.de

HEIZEN - HEATING - CHAUFFAGE

REGELN - CONTROLLING - REGLAGE

TROCKNEN - DRYING - SECHAGE

ELEKTROWÄRMETECHNIK FRANZ MESSER GMBH

Machen Sie den richtigen Zug!

Erfolgreich werben mit der KunststoffXtra.

KUNSTSTOFFXTRA

+41 (0)56 619 52 52 • info@sigimedia.ch