

Kleben verspannt – entspannt kleben

Präzise Vorhersagen von härtungsbedingten Verspannungen sind mit einem im Rahmen eines durch das BMWI geförderten Forschungsprojekts entwickelten Lösungsweg jetzt auch für bei Raumtemperatur härtende Klebverbunde möglich.

Stefan Schwedat, Dr. Annett Hartmann, Dr. Katrin Pawlik, Dr. Bernd Grünler

Warum verspannen Klebungen?

Die Ursachen des Verspannens von Klebverbindungen bei der Härtung liegen in der Knüpfung neuer chemischer Bindungen bei der Vernetzungsreaktion. Das heißt, chemische Bindungen der eingesetzten Klebstoffmonomere öffnen sich und gehen neue energetisch günstigere Bindungszustände ein. Dadurch verdichten sich die chemischen Strukturen innerhalb des Klebstoffes, wodurch das Klebstoffvolumen während der Härtung abnimmt (Volumenschrumpf). Gleichzeitig verfestigt sich der Klebstoff, wodurch die schrumpfbedingten Verspannungen als Vorlast auf den Klebverbund wirken. Dies führt zu einem früheren Bruch der Klebung, obwohl die innere Festigkeit (Kohäsionsfestigkeit) des Klebstoffes noch Reserven aufweist.

Volumenschrumpf und Festigkeitszunahme bei Härtung

Eine realistische Vorhersage der Verspannung „kalt“ ausgehärteter Klebverbunde konnte bislang nicht realisiert werden. Der in der Literatur [1] beschriebene Weg über die kinetischen Untersuchungen zum Beispiel mithilfe der Differential-Scanning-Kalorimetrie (DSC) führte zu Fehlbefunden, weil aufgrund der sehr kleinen Beträge der Wärmestromsignale nur circa 2/3 der tatsächlichen Reaktionsenthalpie eines Klebstoffsystems bei DSC-

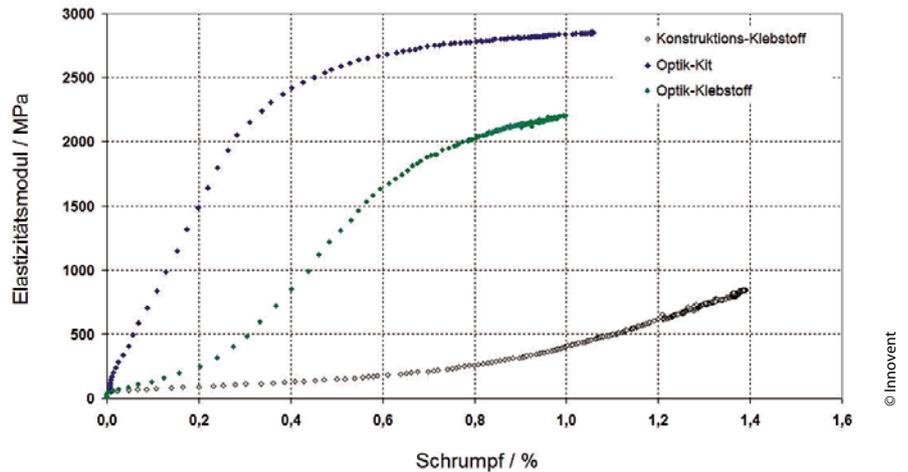


Bild 1 > Härtungsverhalten verschiedener industriell eingesetzter Harzmassen.

Messungen in der Nähe der Raumtemperatur wiedergefunden werden. Der in dem Projekt erarbeitete Lösungsweg beinhaltet die zeitgleiche Erfassung von Festigkeitszunahme und Volumenabnahme während der isothermen Härtung des Klebstoffes beispielsweise bei Raumtemperatur. Dafür wird der Klebstoff in ein Vorratsgefäß gegeben und anschließend ein vibrierender Fühler eingetaucht. Die für die Erzeugung der Vibration benötigte Energie korreliert mit der zunehmenden Festigkeit des Harzes. Die Volumenabnahme des Klebstoffes ergibt sich aus der Zugwirkung des Reaktionsgemisches auf den Fühler. Der Härtungsverlauf wird

ohne Unterbrechung vom flüssigen bis in den vollständig ausgehärteten Bereich erfasst. *Bild 1* zeigt exemplarisch die so gemessenen Härtungsverläufe bei 23 °C von drei industriell eingesetzten Harzmassen. Beobachtet man die Härtungsverläufe bei unterschiedlichen Temperaturen, verändern sich die Kurvenverläufe hinsichtlich der Steigungen und Endpunkte.

Realistische Vorhersage der Verspannung

Mit Unterstützung der CADFEM GmbH als zertifizierten Chanel Elite Partner der ANSYS Inc. ist es gelungen, diese gemessenen

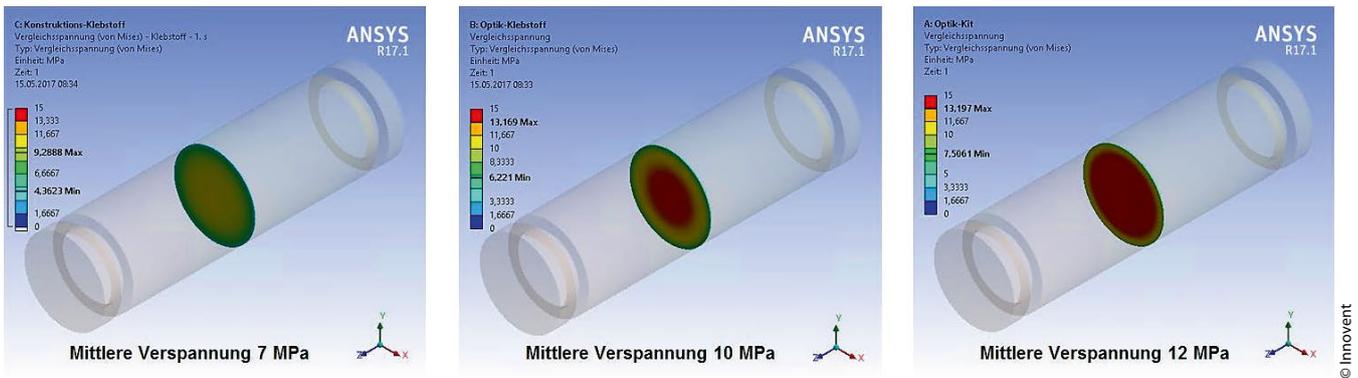


Bild 2 > Verspannung von Klebstoffen während der Härtung. Links – Konstruktions-Klebstoff, Mitte – Optik-Klebstoff, rechts – Optik-Kit.

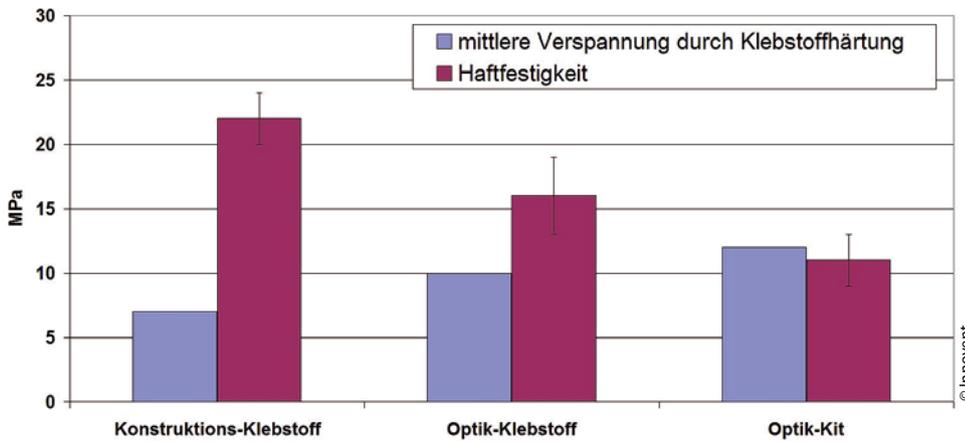


Bild 3 > Vergleich der härtungsbedingten Verspannung in den Klebefugen und den erreichbaren Haftfestigkeiten der Stempel-Stempel-Klebungen.

Härtungsverläufe in numerische Simulationen zu implementieren. Somit können anhand bekannter Härtungsverläufe der Klebstoffe die zu erwartenden Verzüge und Verspannungen in beliebigen Klebverbindungen vorhergesagt werden. In *Bild 2* ist exemplarisch für Stempel-Stempel-Klebungen die härtungsbedingte Verspannung in Abhängigkeit des verwendeten Klebstoffes dargestellt.

Durch die Berücksichtigung des unterschiedlichen Härtungsverhaltens der Klebstoffe aus *Bild 1* können die härtungsbedingten Verspannungen richtig berechnet werden, da der verspannungsrelevante Schrumpffanteil in der Simulation berücksichtigt wird. Der Konstruktions-Klebstoff zeigt mit 7 MPa die geringste und der Optik-Kit mit 12 MPa die größte mittlere Verspannung im Klebverbund. In den zugehörigen experimentellen Untersuchun-

gen erreichte der Konstruktions-Klebstoff bis zum Kohäsionsbruch eine Haftfestigkeit von 22 +/- 2 MPa. Der Optik-Klebstoff hielt einer Zugbelastung von 16 +/- 2 MPa stand, während der Optik-Kit nur mit 11 +/- 3 MPa belastet werden konnte, wobei beide Klebstoffe ebenfalls Kohäsionsbruch zeigten.

In *Bild 3* sind die mittleren Verspannungen aus den Berechnungen und die erreichten Haftfestigkeiten der realen Klebverbunde gegenübergestellt. Das Bild veranschaulicht, dass mit wachsender Verspannung des Klebstoffes die erreichbare Haftfestigkeit fällt, obwohl alle drei Klebstoffe nach DIN 527-1, -2 eine vergleichbare Eigenfestigkeit von 30 bis 40 MPa aufweisen. Auf Basis der Materialeigenschaften Zugfestigkeit, E-Modul und Härtungsverlauf ist es nun auch möglich, die maximal zu erwartende Festigkeit unterschiedlicher Kleb-

stoffe in beliebigen Klebverbunden vorherzusagen. Um die volle Leistungsfähigkeit eines Klebstoffes nutzen zu können, müssen härtungsbedingte Verspannungen in der Klebefuge vermieden beziehungsweise minimiert werden.

Übereinstimmung von Simulation und Praxis

Für eine schlüssige Beweisführung zur Richtigkeit des oben beschriebenen Lösungswegs war es erforderlich, die härtungsbedingten Verzüge und Verspannung in Klebverbindungen in praktischen Versuchen nachzuweisen. Hierfür hat die Carl-Zeiss Jena GmbH einen Versuchstand zur interferometrischen Beobachtung aufgebaut, welcher die experimentelle Überprüfung des Verzugs geklebter Baugruppen erlaubt. Durch die Konstruk-

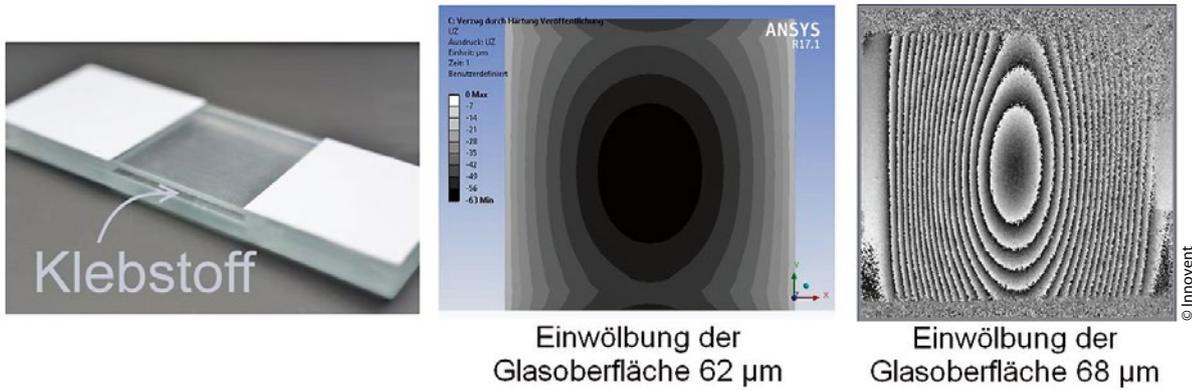


Bild 4 > Bestimmung des Verzugs in einer Klebverbindung. Links – Modellsystem, Mitte – Ergebnis der numerischen Simulation, rechts – Auszug aus der interferometrischen Messung.

tion geometrisch einfacher Klebverbunde konnte der härtungsbedingte Verzug messtechnisch erfasst und mit den Ergebnissen numerischer Simulationen verglichen werden. *Bild 4* zeigt die Verformung einer Glasplatte, unter der ein 25 mm x 25 mm x 1 mm großes Klebstoffreservoir aushärtet. Die Ergebnisse der holografischen Interferometrie zeigen deutlich das Auftreten der Verformung im geklebten Bereich. Die Simulationsergebnisse stimmen sehr gut mit den Messergebnissen überein. Die Abweichung zwischen Simulation und Messung beträgt 9 %, was für die Untersuchungen von Kunststoffen oder Klebverbindung eine akzeptable Unsicherheit ist.

Ausblick

Die nachfolgenden Arbeiten werden die Anwendung der beschriebenen Technolo-

gie auf die Themen Nachvernetzung von Klebstoffen, Randenthaftung von flächig verklebten Bauteilen sowie die Beurteilung von Verzug und Verspannung thermoplastisch verarbeiteter Werkstoffe beinhalten. //

Förderhinweis

Die in dem Artikel beschriebenen Arbeiten wurden im Rahmen des noch bis zum April 2018 vom BMWI geförderten FuE-Projekts Inno-KOM Ost MF150099 bei Innovent e. V. durchgeführt.

Literaturhinweis

/ 1 / „Simulation des Härtungsschrumpfes von Klebstoffen zur Berücksichtigung bei der Bauteilauslegung“, 2010, Veröffentlichung vom IFAM in Bremen zum BMBF Projekt 03X0502D

Die Autoren

Stefan Schwedat und Dr. Annett Hartmann (ah@innovent-jena.de) sind wissenschaftliche Mitarbeiter.

Dr. Katrin Pawlik ist Bereichsleiterin Analytik & Werkstoffprüfung.

Dr. Bernd Grünler ist geschäftsführender Direktor beim Innovent e. V., Jena.

BRANCHEN- VERBUNDEN

Jetzt registrieren:
www.springerprofessional.de/mynewsletters

Der neue Newsletter „Kleb- und Dichttechnik“ von **adhäsion**

Alle Top-News und Branchen-Highlights aus der Welt der Kleb- und Dichttechnik, regelmäßig in Ihrem Postfach: Bestellen Sie jetzt unseren kostenlosen Newsletter.

adhäsion

KLEBEN+
DICHTEN