

Inline-Monitoring der Aushärtung von applizierten Klebstoffen mittels kostengünstiger Terahertz-Methoden

Marcel Mayr¹, Luis Wachter¹, Michael Heilig¹, Linda Mittelberg¹, Benjamin Baudrit¹

¹SKZ-KFE gGmbH, Friedrich-Bergius-Ring 22, D-97076 Würzburg

Im Rahmen eines Forschungsprojektes wurden die Terahertz (THz)- und Mikrowellenradar-Technik für die Überwachung der Aushärtung von physikalisch sowie chemisch härtenden Klebstoffen, die zwischen verschiedenen Substraten appliziert wurden, untersucht. Dabei wurde auch die Abhängigkeit der Umgebungsbedingung wie Temperatur und Luftfeuchtigkeit betrachtet. Zur Durchführung von Vergleichsmessungen wurden die Referenzverfahren Rheologie, Differenzkalorimetrie und Infrarot-Spektroskopie eingesetzt. Es wurde gezeigt, dass eine Verbindung zwischen den Messsignalen und dem Aushärtevergang besteht. Weiterhin wurde ein mathematischer Zusammenhang identifiziert, dessen Parameter Aussagen über einzelne Kennwerte des Aushärtevergangs zulassen.

Keywords: Zerstörungsfreie Prüfung, Terahertz-Technik, Mikrowellenradar, Klebstoffe, Materialkenn-daten

Einleitung

Am Kunststoff-Zentrum SKZ, einem Mitglied der Zuse-Gemeinschaft, werden zerstörungsfreie Messtechniken entwickelt und eingesetzt, um Informationen über Kunststoffbauteile und kunststoffverarbeitende Prozesse, die mit bloßem Auge nicht sichtbar sind, zu erhalten. Ein Forschungsschwerpunkt liegt hierbei in der messtechnischen Erfassung und Charakterisierung von Aggregatzustandsänderungen. Diese treten beispielsweise während der Verarbeitung beim Aufschmelzen und Erstarren von Thermoplasten oder bei der Aushärtung von Klebstoffen auf. So werden letztere zunächst flüssig viskos zwischen Substraten appliziert und ändern im Rahmen der Aushärtung ihren Aggregatzustand durch Vernetzung, um ihre Klebwirkung zu entfalten. Bei den meisten industrierelevanten Applikationen ist die Klebschicht im Anschluss von außen nicht mehr zugänglich und damit mit herkömmlichen Methoden nicht prüfbar. Um dennoch sicherzustellen, dass die Aushärtung vor der Weiterverarbeitung zuverlässig stattgefunden hat, wird gängiger Weise mit großen Sicherheitsfaktoren in Bezug auf seitens der Hersteller definierten Aushärtezeiten gearbeitet. Die realen Aushärtezeiten sind jedoch maßgeblich von den vor Ort herrschenden Produktionsbedingungen abhängig. So beeinflussen je nach Klebstoffsystem die Temperatur, Luftfeuchtigkeit, die angesetzte Klebstoffmenge und das Mischungsverhältnis zweikomponentiger (2K) Klebstoffe die Aushärtereaktion signifikant. Herstellerangaben für untersuchte Kleinmenge im Labor dienen daher primär der Orientierung und können nicht zur

Optimierung technischer Abläufe genutzt werden.

Zur Lösung dieser Frage wurde in einem Forschungsprojekt die Terahertz (THz)- sowie die Mikrowellenradar-Technik eingesetzt, um anhand der generierten Messsignale Aussagen über das Klebstoffverhalten an einem geklebtem Bauteil treffen zu können.

Stand der Technik

Zum Stand der Technik zählen zahlreiche Methoden zur Charakterisierung von Klebstoffen, die jedoch zumeist für die Untersuchung von Kleinstmengen im Labor geeignet sind. Sie arbeiten daher in der Regel nicht zerstörungsfrei, berührungslos sowie geometrieunabhängig und sind daher nicht zur Anwendung an Realbauteilen, bei denen die applizierten Klebstoffe oftmals nicht von außen direkt zugänglich sind, geeignet: Rheologie [1], Chromatografie [2], Infrarot(IR)-Spektroskopie [3, 4], Massenspektrometrie [5, 6], mikroskopische Methoden [7, 8], dynamisch-mechanische Analyse [9, 10], Computertomografie [11, 12], Zugscherprüfung [13], dynamische Differenzkalorimetrie [14] oder unilaterale Magnetresonanz [15–17].

Zusammenfassend besteht aktuell kein geeignetes System zur Aushärteüberwachung für applizierte Klebungen, welches zusätzlich mobil eingesetzt werden kann.

THz- und Mikrowellenradar-Messtechnik

Die THz- und Mikrowellenradar-Technik sind berührungslose und zerstörungsfreie Messmethoden, welche in Transmissions- und Reflexionsanordnung genutzt werden können [18, 19]. Beide Messanordnungen ermöglichen integral

durch ein geklebtes System zu messen, wobei in Reflexionsgeometrie zusätzlich Informationen über Grenzschichten erhalten werden. Dies ermöglicht zusätzlich die Gewinnung von Dickeninformationen, was z. B. bei einem Klebstoffschumpf interessant ist, sowie Tiefeninformationen, die helfen können, die Vernetzung entlang des Bauteilquerschnitts zu erfassen. Bei der Aushärteüberwachung wird die Änderung der Absorption der elektromagnetischen Wellen genutzt, die sich auf eine Änderung der Polymerkettenlänge der Klebstoffe je nach Aushärtefortschritt zurückführen lässt. Messtechnisch lassen sich Absorptionseigenschaften über die Dämpfung der Messsignale erfassen. In Abbildung 1 ist das Funktionsprinzip eines THz-Zeitbereichsspektrometers in Transmissionsanordnung dargestellt. Dabei werden mittels eines Laserpulses in halbleiterbasierten photoleitenden Antennen THz-Wellen erzeugt und anschließend von einem Empfänger mittels einer Verschiebestrecke detektiert. Zwischen den THz-Antennen befindet sich das geklebte System, welches mit den THz-Wellen wechselwirkt.

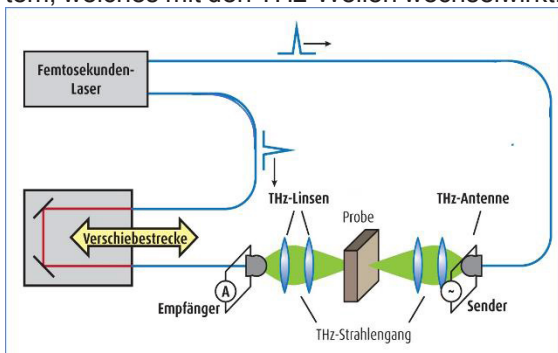


Abbildung 1: Funktionsprinzip eines THz-Zeitbereichsspektrometers

Die genutzte Mikrowellenradar-Technik basiert auf dem Prinzip von frequenzmodulierten, kontinuierlichen Wellen (engl.: frequency modulated continuous wave, FMCW, vgl. Abbildung 2 (1)). Die Radarwellen werden an Grenzflächen wie dem Übergang zum Klebstoff reflektiert und transmittiert und gelangen anschließend wieder zum Radar (2). In diesem findet eine Mischung zwischen der ausgesendeten und der empfangenen Frequenzrampe statt, dessen Zwischenfrequenzen genau den Abständen der Grenzflächen vom Radar entsprechen ((3) und (4)). Auch bei der Mikrowellenradar-Technik werden Dämpfungseffekte genutzt, um Aussagen über die Aushärtung des Klebstoffes zu treffen.

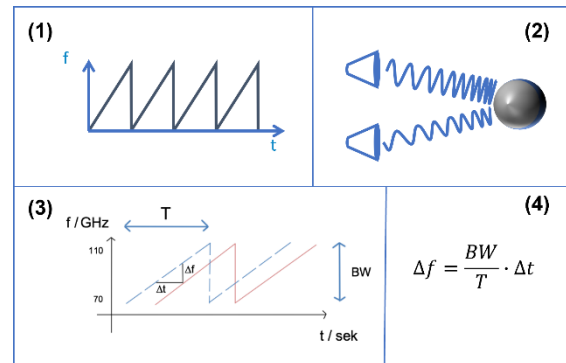


Abbildung 2: Funktionsprinzip eines FMCW-Radars

Klebstoffe

Zum einen gibt es physikalisch abbindende Systeme wie z. B. Dispersions-, Lösemittel- oder Schmelzklebstoffe. Dabei verfestigt sich der Klebstoff durch physikalische Prozesse wie z. B. das Verdunsten des Lösungsmittels. Zum anderen existieren chemisch abbindende Adhäsive, die auch Reaktionsklebstoffe genannt werden und mittels Polymerisation, Polyaddition oder Polykondensation aushärten [20]. In dem Forschungsprojekt wurden sowohl physikalisch abbindende Systeme sowie Reaktionsklebstoffe untersucht, wobei diese entweder als ein- oder zweikomponentige Systeme vorlagen. Weiterhin wurden die Klebstoffe zwischen Substraten appliziert und anschließend gemessen, damit eine reale Anwendung nachgestellt werden kann, da die meisten Klebstoffe nach Anwendung von außen nicht mehr zugänglich sind.

Durchführung der Messungen

Es wurden Messaufbauten zur Untersuchung der Klebstoffe mittels THz- sowie Mikrowellenradar-Technik konstruiert. Neben einem Aufbau zur gleichzeitigen Untersuchung von drei länger aushärtenden Klebstoffen wurde auch ein Aufbau zur Untersuchung schnell härtender Klebstoffproben jeweils in Transmissionsgeometrie aufgebaut (vgl. Abbildung 3). Zusätzlich wurde eine Klimakammer konstruiert, in welcher eine konstante Temperatur und Luftfeuchtigkeit während einer Messung eingestellt werden konnte.

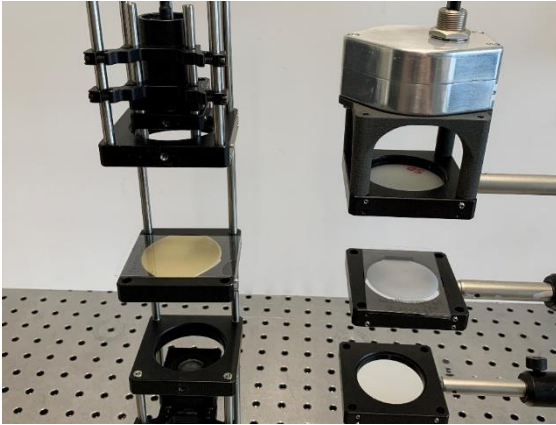


Abbildung 3: Messaufbau für die THz-Technik (links) und das Mikrowellenradar (rechts) zur Untersuchung der Aushärtung von zwischen Materialien (Glas) applizierten Klebstoffen

THz- und Mikrowellenradar-Ergebnisse

Abbildung 4 zeigt vergleichend THz-Messsignale einer Referenzmessung (Substrate ohne Klebstoff) und mehrere Probenmessungen mit dem applizierten Klebstoff SikaFast 555 L05 der Firma Sika Deutschland GmbH zu verschiedenen Aushärtezeiten. Aufgrund des Klebstoffes kommt es gegenüber dem Referenzsignal zu einer zeitlichen Verschiebung und einer Dämpfung. Weiterhin ist eine Abnahme der Dämpfung des THz-Signals im Laufe der Aushärtung zu sehen. Die Auswertung der THz-Amplitude bei der Probenmessung über die Aushärtezeitdauer ist in Abbildung 5 an drei parallel gemessenen Polymerisationsklebstoffen SikaFast 555 L05 der Firma Sika Deutschland GmbH zu sehen, welcher mit Kettenwachstumsreaktion aushärtet. Hierbei ist ab etwa 6 min eine steigende Zunahme der Amplitude zu erkennen, welche ab etwa 15 min in Sättigung geht. Dieses Verhalten ist mit einer Aushärtereaktion des Klebstoffes zu korrelieren, was in den späteren Referenzmessungen bestätigt wird. Der geringe Versatz zwischen den drei Probenmessungen konnte mit einem Unterschied in der jeweiligen Klebstoffdicke erklärt werden. So ist in Grün die dünnste ($1,30 \pm 0,02 \text{ mm}$) und in Rot ($1,52 \pm 0,02 \text{ mm}$) die dickste Klebeschicht gezeigt. Vergleichend zu diesen Messungen sind in Abbildung 6 die Ergebnisse einer THz-Messung an dem Polyadditionsklebstoff SikaForce 7570 HP der Firma Sika Deutschland GmbH dargestellt. Dieser Klebstoff härtet mittels Stufenwachstumsreaktion aus und hat nach den Herstellerangaben eine größere Aushärtezeitdauer, was sich in der später eintretenden Sättigung zeigt.

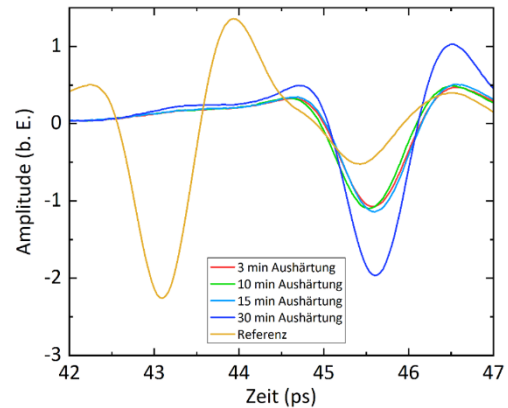


Abbildung 4: Vergleich von THz-Messsignalen zwischen einer Referenzmessung (Substrat ohne Klebstoff) und an Klebungen zu unterschiedlichen Aushärtezeiten bei dem Klebstoff SikaFast 555 L05

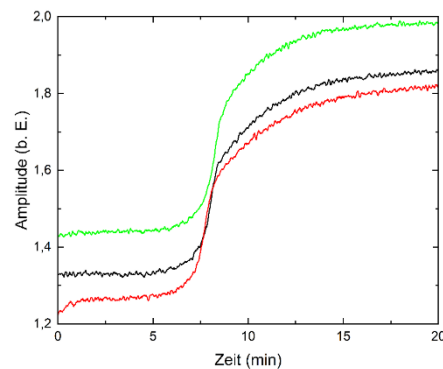


Abbildung 5: Vergleich von drei THz-Messungen in Transmissionsgeometrie an dem Polymerisationsklebstoff SikaFast 555 L05 und Darstellung der ausgewerteten THz-Amplitude

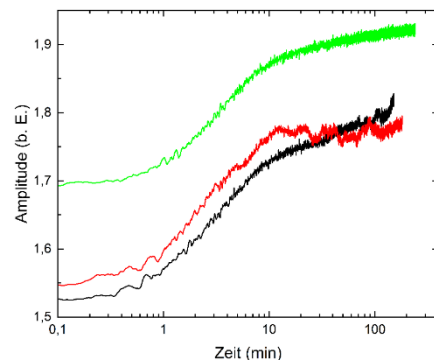


Abbildung 6: Vergleich von drei THz-Messungen in Transmissionsgeometrie an dem Polyadditionsklebstoff SikaForce 7570 und Darstellung der ausgewerteten THz-Amplitude

Um die Aushärteverläufe zu modellieren, wurde eine doppelte Sigmoidfunktion verwendet, die eine gute Anpassung der Aushärteverläufe liefert (vgl. Gleichung (1)):

$$y = A_1 + (A_2 - A_1) \cdot \left[\frac{p}{1 + 10^{(x_1 - x)/k_1}} + \frac{1 - p}{1 + 10^{(x_2 - x)/k_2}} \right] \quad (1)$$

Hierbei sind A_1 und A_2 die untere und obere Grenze des Verlaufs, p die Position des Plateaus (Terrassenpunkt) und $k_{1,2}$ und $x_{1,2}$ die Steigung bzw. die Position der Wendepunkte. Die jeweiligen Positionen $x_{1,2}$ und p geben demnach eine Aussage über charakteristische Zeiten der Aushärtung, wobei die Steigungen $k_{1,2}$ die Geschwindigkeit der Aushärtung wiedergeben. In die Werte von $A_{1,2}$ geht z. B. die Dicke der Klebstoffschicht ein. In Abbildung 7 ist dazu die Modellierung des Aushärteverlaufs über den realen Aushärteverlauf aus den THz-Messdaten bei dem Polymerisationsklebstoff SikaFast 555 L05 vergleichend dargestellt, wobei sich ein Korrelationskoeffizient R^2 von 0,998 ergibt.

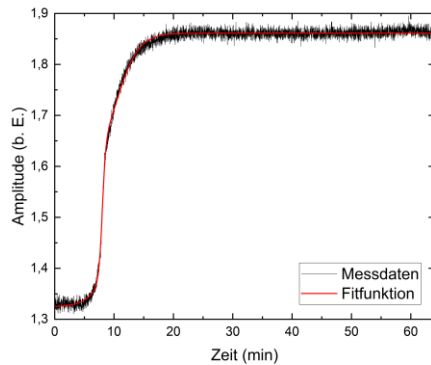


Abbildung 7: Anwendung der doppelten Sigmoidfunktion an die gemessene THz-Amplitude bei dem Polymerisationsklebstoff SikaFast 555 L05

Neben der THz- wurden auch die Mikrowellenradar-Technik zur Aushärteüberwachung der Klebstoffe genutzt, wobei Vorgehensweise und Auswertung identisch zu den THz-Messungen sind. Für einen guten Vergleich zur THz-Technik wurde die 300-GHz- sowie 24-GHz-Mikrowellenradar-Technik zur Aushärteüberwachung an einem Polymerisationsklebstoff Araldite 2020 der Firma Huntsman Advanced Materials GmbH getestet. Die Ergebnisse der einzelnen Messtechniken sind in Abbildung 8, Abbildung 9 und Abbildung 10 zu sehen. Zusätzlich sind die herstellerseitig charakteristischen Zeiten der Topfzeit und der Anfangsfestigkeit dargestellt. Es zeigt sich eine sehr gute Übereinstimmung der Verläufe der einzelnen Messtechniken zueinander sowie in Bezug auf Änderungen zu den charakteristischen Zeiten der Topfzeit und Anfangsfestigkeit. Erstaunlicherweise ist somit auch die sehr kostengünstige 24-GHz-Mikrowellenradar-Technik in der Lage, Aushärteverläufe bei diesem Klebstoff darzustellen.

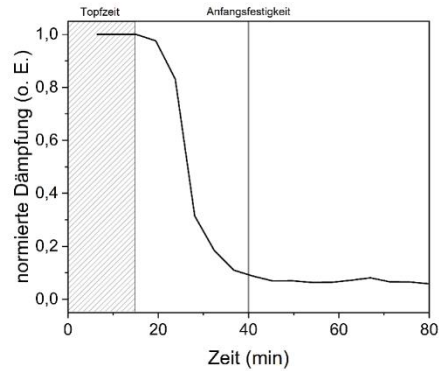


Abbildung 8: Normierte THz-Signaldämpfung während der Aushärtung des Polymerisationsklebstoffes Araldite 2020 und Vergleich mit charakteristischen Aushärtezeiten

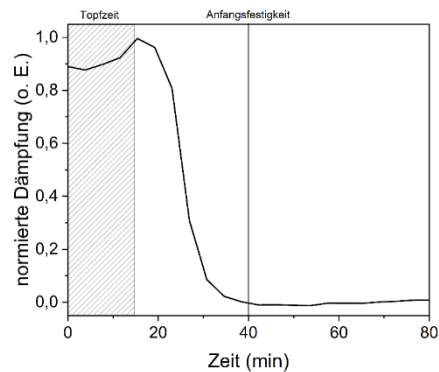


Abbildung 9: Normierte Signaldämpfung eines 300-GHz-Mikrowellenradars während der Aushärtung des Polymerisationsklebstoffes Araldite 2020 und Vergleich mit charakteristischen Aushärtezeiten

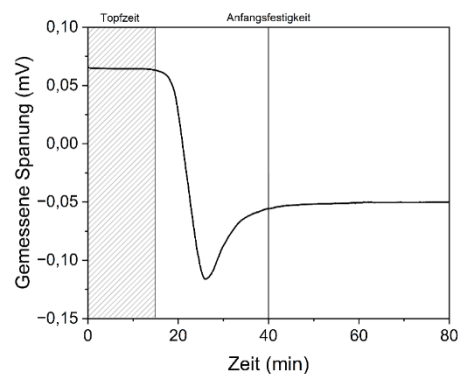


Abbildung 10: Gemessene Spannung eines kostengünstigen 24-GHz-Mikrowellenradars während der Aushärtung des Polymerisationsklebstoffes Araldite 2020 und Vergleich mit charakteristischen Aushärtezeiten

Vergleich zu Referenzverfahren

In Abbildung 11 und Abbildung 12 sind die aus den rheologischen Messungen ermittelten komplexen Viskositäten bei dem Polymerisationsklebstoff SikaFast 555 L05 und dem Polyadditionsklebstoff SikaForce 7570 HP dargestellt. Die

komplexe Viskosität ist in der Rheologie ein mechanisches Maß für die Aushärtung und zeigt eine gute Vergleichbarkeit zu den Ergebnissen der THz-Messungen aus Abbildung 5 und Abbildung 6. Beispielsweise zeigt der Verlauf der komplexen Viskosität des Klebstoffes SikaFast 555 L05 in Abbildung 11 eine Sättigung ab 15 min Aushärtung. Dies kann ebenfalls aus den THz-Messungen aus Abbildung 5 und Abbildung 7 abgelesen werden.

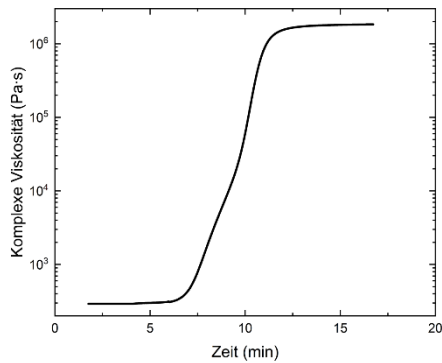


Abbildung 11: Aus den rheologischen Untersuchungen ermittelte komplexe Viskosität des Polymerisationsklebstoffes SikaFast 555 L05 während dessen Aushärtung

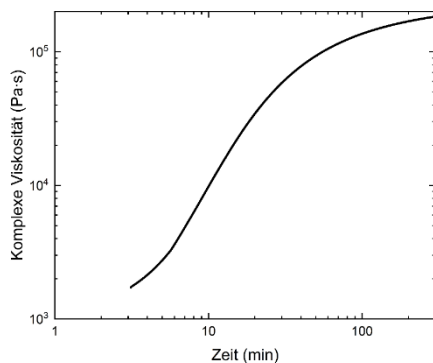


Abbildung 12: Aus den rheologischen Untersuchungen ermittelte komplexe Viskosität des Polymerisationsklebstoffes SikaForce 7570 HP während dessen Aushärtung

Weiterhin wurden Referenzmessungen mittels NIR-Spektroskopie an verschiedenen Klebstoffen durchgeführt und die Absorbanz der NIR-Wellen an den Klebstoffen über die Aushärtezeit betrachtet. In Abbildung 13 sind beispielhaft die Ergebnisse von drei Messungen des Polymerisationsklebstoffes SikaFast 555 L05 dargestellt. Der stufenförmige Übergang ergibt sich aus der Aushärtung des Klebstoffes und

zeigt eine gute Vergleichbarkeit zu den Ergebnissen der Rheologie und THz-Technik.

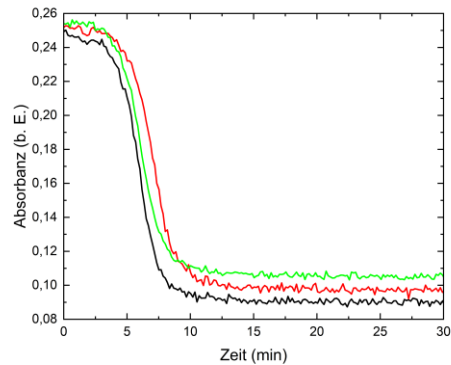


Abbildung 13: Aus den NIR-Messungen ermittelte Absorbanz der NIR-Wellen durch den Polymerisationsklebstoff SikaFast 555 L05 über dessen Aushärtezeit

Betrachtung der Umgebungseinflüsse

Zur Untersuchung der Abhängigkeit der Klebstoffaushärtung von Umgebungsbedingungen, wurden Untersuchungen der Aushärtung bei verschiedenen Umgebungstemperaturen und Luftfeuchtgraden durchgeführt. Die ausgewertete THz-Amplitude bei der Aushärtung des Polymerisationsklebstoffes Araldite 2020 ist in Abbildung 14 in Abhängigkeit der Umgebungstemperatur dargestellt. Hierbei konnte mit der THz-Technik beobachtet werden, dass die Aushärtereaktion bei einer höheren Temperatur, wie es zu erwarten war, früher vonstattengeht, da die einzelnen Molekülketten aufgrund der zusätzlichen Energie durch die erhöhte Temperatur beweglicher sind und sich somit schneller Verbindungen auf molekularer Ebene einstellen.

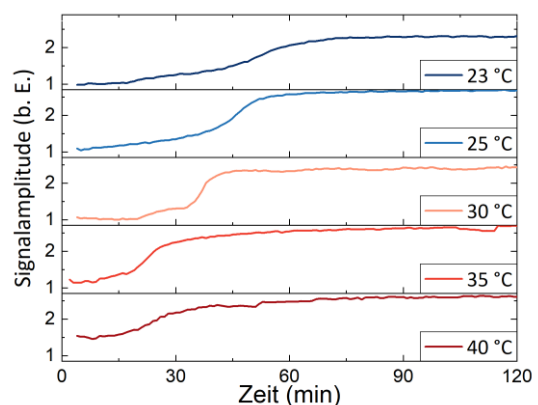


Abbildung 14: Gemessene THz-Amplitude während der Aushärtung des Polymerisationsklebstoffes Araldite 2020 in Abhängigkeit der Umgebungstemperatur

Zusammenfassung und Fazit

Die THz- und Mikrowellenradar-Untersuchungen an aushärtenden und zwischen Substraten applizierten Klebstoffen haben gezeigt, dass eine Überwachung der Aushärtereaktion mit diesen Messtechniken möglich ist. Auch zeigten sich gute Übereinstimmung mit den herstellerseitig angegebenen charakteristischen Aushärtezeiten sowie zu den Referenzmessungen mittels Rheologie oder NIR-Spektroskopie. Aus den Untersuchungen bei variablen Umgebungstemperaturen konnte eine Abhängigkeit in Bezug auf den Zeitpunkt der Aushärtung mittels THz-Technik festgestellt werden. Weiterhin wurde eine Modellierungsfunktion vorgeschlagen und beispielhaft angewendet, anhand welcher die mittels THz-Technik gemessenen Aushärtekurven simuliert und perspektivisch als Vorhersage-Modelle genutzt werden könnten. Die berührungslose Aushärteüberwachung von Klebstoffen stellt somit ein weiteres potenzielles Anwendungsfeld für die THz- sowie die Mikrowellenradar-Technik dar. Zukünftig besteht die Möglichkeit, diese Messtechniken im Produktionsprozess einzusetzen und Zeit sowie Kosten zu sparen, da direkt im Prozess reale Aushärtungen festgestellt werden können und letztlich Produktionsschritte verkürzt werden könnten. Das IGF-Vorhaben 22161 N der Forschungsvereinigung Fördergemeinschaft für das Süddeutsche Kunststoff-Zentrum e.V. – FSKZ wurden über die Arbeitsgemeinschaft industrielle Forschungsvereinigungen (AiF) im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Literatur

- [1] J. Jaruchattada, A. Fuongfuchat und C. Patamaprom, "Rheological investigation of cure kinetics and adhesive strength of polyurethane acrylate adhesive," *J of Applied Polymer Sci*, Jg. 123, Nr. 4, S. 2344–2350, 2012, doi: 10.1002/app.34754.
- [2] D. D. Bly, "Gel permeation chromatography," *Science (New York, N.Y.)*, Jg. 168, Nr. 3931, S. 527–533, 1970, doi: 10.1126/science.168.3931.527.
- [3] O. Faix, "Fourier Transform Infrared Spectroscopy," in *Methods in lignin chemistry* (Springer Series in Wood Science), S. Y. Lin und C. W. Dence, Hg., Berlin, Heidelberg: Springer, 1992, S. 83–109.
- [4] H. Rosenkrantz und L. Zablow, "The 9-10 μ Region of Infrared Absorption Spectra of Steroids in Relation to Chemical Structure 1," *J. Am. Chem. Soc.*, Jg. 75, Nr. 4, S. 903–907, 1953, doi: 10.1021/ja01100a038.
- [5] R. A. Pethrick, "Design and ageing of adhesives for structural adhesive bonding – A review," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications*, Jg. 229, Nr. 5, S. 349–379, 2015, doi: 10.1177/1464420714522981.
- [6] I. Bertelli, M. Mattonai, J. La Nasa und E. Ribechini, "Study of thermal behavior and molecular composition of mixtures of resinous materials and beeswax found as adhesives in archaeological finds," *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, Jg. 171, S. 105936, 2023, doi: 10.1016/j.jaap.2023.105936.
- [7] D. Payne, "Use and limitations of light microscopy for diagnosing malaria at the primary health care level," *Bulletin of the World Health Organization*, Jg. 66, Nr. 5, S. 621–626, 1988.
- [8] H Ma, KJ Shieh, TX Qiao, *Study of transmission electron microscopy (TEM) and scanning electron microscopy (SEM)*, 2006.
- [9] R. Hardis, J. L. Jessop, F. E. Peters und M. R. Kessler, "Cure kinetics characterization and monitoring of an epoxy resin using DSC, Raman spectroscopy, and DEA," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Jg. 49, S. 100–108, 2013. doi: 10.1016/j.compositesa.2013.01.021. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359835X13000596>
- [10] G. W. Ehrenstein, G. W. Ehrenstein, E. Bittmann und L. Hoffmann, Hg. *Duroplaste: Aushärtung - Prüfung - Eigenschaften*. München, Wien: Hanser, 1997.
- [11] A. Grießer, R. Westerteiger, E. Glatt, H. Hagen und A. Wiegmann, "Identification and analysis of fibers in ultra-large micro-CT scans of nonwoven textiles using deep learning," *The Journal of The Textile Institute*, Jg. 114, Nr. 11, S. 1647–1657, 2023, doi: 10.1080/00405000.2022.2145429.
- [12] I. Dumbryte, A. Vailionis, E. Skliutas, S. Juodkazis und M. Malinauskas, "Three-dimensional non-destructive visualization of teeth enamel microcracks using X-ray micro-computed tomography," *Scientific reports*, Early Access. doi: 10.1038/s41598-021-94303-4.
- [13] M. Heilig, E. Kraus, T. Hochrein und M. Bastian, "Charakterisierung und Qualitätssicherung von Oberflächenvorbehandlungen auf Kunststoffbauteilen," *Chemie Ingenieur Technik*, Jg. 95, Nr. 9, S. 1428–1440, 2023, doi: 10.1002/cite.202200073.
- [14] Analysieren & Prüfen. "Dynamische Differenzkalorimeter (DSC) / Differenz-Thermoanalysegeräte (DTA)." Zugriff am: 1. Dezember 2023. [Online.] Verfügbar: <https://analyzing-testing.netzsch.com/de/produkte-und-loesungen/dynamische-differenzkalorimetrie-dsc-differenz-thermoanalyse-dta>
- [15] A. J. Brandolini, "Nuclear Magnetic Resonance of Coating and Adhesive Systems," in *Encyclopedia of analytical chemistry: Applications, theory and instrumentation*, R. A. Meyers, Hg., Chichester: Wiley, 2000.
- [16] N. Halmen, C. Kugler, E. Kraus, B. Baudrit, T. Hochrein und M. Bastian, "Single-sided NMR

- for the measurement of the degree of cross-linking and curing," *J. Sens. Sens. Syst.*, Jg. 7, Nr. 1, S. 21–30, 2018, doi: 10.5194/jss-7-21-2018.
- [17] R. P. Cocker, D. L. Chadwick, D. J. Dare und R. E. Challis, "A low resolution pulsed NMR and ultrasound study to monitor the cure of an epoxy resin adhesive," *International Journal of Adhesion and Adhesives*, Jg. 18, Nr. 5, S. 319–331, 1998, doi: 10.1016/S0143-7496(98)00013-X.
- [18] J. El Haddad, B. Bousquet, L. Canioni und P. Mounaix, "Review in terahertz spectral analysis," *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, Jg. 44, S. 98–105, 2013. doi: 10.1016/j.trac.2012.11.009. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0165993613000022>
- [19] J. Barowski, M. Zimmermanns und I. Rolfes, "Millimeter-Wave Characterization of Dielectric Materials Using Calibrated FMCW Transceivers," *IEEE Trans. Microwave Theory Techn.*, Jg. 66, Nr. 8, S. 3683–3689, 2018, doi: 10.1109/TMTT.2018.2854180.
- [20] G. Habenicht, *Kleben: Grundlagen, Technologien, Anwendungen*, 6. Aufl. (VDI-Buch). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2009.