

Inline-Überwachung der Aushärtung von applizierten Klebstoffen mit der Terahertz-Technik

Marcel MAYR¹

¹ SKZ – Das Kunststoff-Zentrum, Würzburg

Kontakt E-Mail: m.mayr@skz.de

Kurzfassung. Das Kleben ist in einer Vielzahl von Anwendungen und Industriebereichen als unverzichtbares Fügeverfahren etabliert. Herausforderungen liegen derzeit in einer zuverlässigen Qualitätssicherung. So beschreibt die DIN 2304 das Kleben als einen durch zerstörungsfreie Prüfmethoden nicht vollständig prüfbar Prozess. Gleichzeitig sind die Methoden der Terahertz (THz)-Technik in den letzten Jahren zu praxistauglichen Prüfverfahren avanciert. In Vorversuchen konnte sehr vielversprechend gezeigt werden, dass diese sich grundsätzlich sehr gut zur Überwachung von Klebstoffaushärteprozessen eignen und bisher keine anderen anwendungstauglichen, berührungslosen und zerstörungsfreien Methoden existieren. Die Entwicklungsarbeiten zielen auf eine zeitabhängige Charakterisierung des kohäsiven Klebstoffaushärtegrades sowie den Abgleich mit Referenzverfahren wie u. a. dynamische Differenzkalorimetrie, Rheologie, dielektrischer Analyse und zerstörende Versuche ab. Damit eine stark ausgeprägte Industrienähe hergestellt wird, sollen verschiedenste Klebstofftypen untersucht werden sowie industrierelevante Einflussfaktoren wie Temperatur, Luftfeuchte sowie Klebevolumen und -geometrie Berücksichtigung finden. Letztlich wird anhand von Prüfungen in industrieller Umgebung die praktische Anwendbarkeit demonstriert.

1. Einführung

Aufgrund des flexiblen Gebrauchs von Klebstoffen sowie deren Weiterentwicklungs- und Anpassungspotenzials ergeben sich zahlreiche Anwendungen dieser Verbindungstechnik [1]. Hierzu zählen z. B. der Leichtbau [2], der Anlagen- und Maschinenbau [3], die Elektrotechnik [4] und die Verpackungsindustrie [5]. Damit ein Bauteil nach dessen Klebung weiterverarbeitet werden kann, ist die Kenntnis über den Aushärtegrad von entscheidender Bedeutung. Hierzu wird meist auf Klebstoff-Herstellerangaben zurückgegriffen. Allerdings kann die Aushärtung durch zahlreiche Einflüsse wie die Umgebungstemperatur, Luftfeuchtigkeit, Klebpartner und -geometrie beeinflusst werden. Damit das Bauteil nicht zu früh in die weitere Verarbeitung gelangt, werden daher häufig Toleranzzeiten eingehalten, welche bei Kenntnis des realen Aushärtegrades häufig vermieden werden könnten. An dieser Stelle setzt die Terahertz (THz)-Technik an, welche in der Lage ist, berührungslos und zerstörungsfreie eine in ein Bauteil applizierte Klebung zu untersuchen. Im Rahmen eines geförderten Forschungsprojektes wurden dabei zahlreiche Klebstoffe mit unterschiedlichen Klebpartnern untersucht. Dabei wurden auch die Einflüsse der Umgebungsbedingungen analysiert sowie verschiedene Messaufbauten (Transmission, Reflexion) genutzt.



2. Stand der Technik

Überblick über Klebstoffarten

Aus den vielfältigen Einsatzmöglichkeiten für Klebstoffe ergeben sich verschiedene Optionen diese zu kategorisieren. So können diese entsprechend der chemischen Zusammensetzung, des Anwendungsgebietes, der Temperatur beim Abbinden oder des Aushärtemechanismus unterschieden werden. Eine gängige Differenzierung erfolgt nach dem Abbindevorgang. Dabei werden die Klebstoffe in die Kategorien physikalisch und chemisch aushärtend eingeteilt. Bei Ersterem beruht die Härtung auf physikalischen Vorgängen wie dem Verdunsten oder Abkühlen der Klebstoffe. Beispiele hierfür stellen Schmelz-, Lösungsmittel-, Kontakt-, Dispersions- oder Haftklebstoffe sowie Plastisole dar. Das Abbinden der chemischen Klebstoffe dagegen basiert auf dem Ablauf einer chemischen Reaktion, bei der neue Bindungen generiert werden. Aufgrund dessen werden sie auch Reaktionsklebstoffe genannt. Bei den ablaufenden Reaktionen handelt es sich um eine Polymerisation, Polyaddition oder Polykondensation. Eine entsprechende Übersicht der verschiedenen Klebstoffarten mit ausgewählten Beispielen ist in Abbildung 1 illustriert [6, 7].

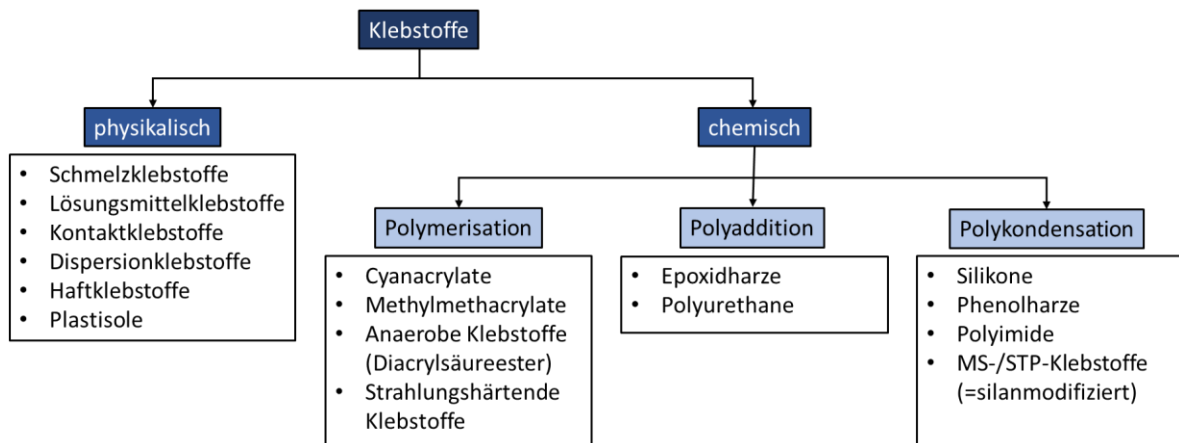


Abbildung 1: Übersicht der verschiedenen Klebstoffarten mit ausgewählten Beispielen.

Methoden zur Klebstoffaushärtungsüberwachung

Bisher etablierte Methoden zur Aushärtungsprüfung sind im Gegensatz zur THz-Technik ausschließlich zerstörend und nicht berührungsfrei, wodurch eine 100 %-Kontrolle nicht möglich ist. Weiterhin können zwischen zwei Bauteilen applizierte Klebstoffe mit diesen Messmethoden nicht charakterisiert werden. Folgend sind die Messmethoden zusammengefasst, welche den aktuellen Stand der Technik wiedergeben:

- Zugscherversuch nach DIN EN 1465 [8, 9]
- Dynamische Differenzkalorimetrie (DSC) [10, 11]
- Rheologische Untersuchungen [12, 13]
- Dielektrische Analyse (DEA) [14, 15]
- Infrarot(IR)-Spektroskopie [16–18]
- Klassisch berührende Ultraschall-Technik [19]

Den Stand der akademischen Forschung zur Aushärtegradbestimmung wird von folgenden Messtechniken bestimmt:

- Luftgekoppelte Ultraschall(LUS)-Technik [20, 21]
- Kernspinresonanzmethoden (NMR) [22–24]
- THz-Technik [25–28]

Die großen Signalverluste bei der LUS-Technik am Übergang von Grenzschichten sowie der schwer umzusetzende Inline-Einsatz der NMR in der Produktion sind entscheidende Nachteile gegenüber der THz-Technologie. Die THz-Technik ist eine berührungslose und zerstörungsfreie Messmethode, welche sowohl in Transmissions- als auch in Reflexionsanordnung genutzt werden kann [29]. Beide Messanordnungen messen integral durch die Probe, wobei in Reflexionsgeometrie zusätzlich Informationen über Grenzschichten erhalten werden. Dies ermöglicht zusätzlich die Gewinnung von Dickeninformationen, was z. B. bei einem Klebstoffschumpf interessant ist, und Tiefeninformationen, die Vernetzungen entlang des Bauteilquerschnitts zeigen können.

3. Versuchsdurchführung

THz-Systemtechnik

Es wurde ein gepulstes optisches System, das einen schmalen THz-Puls und daher ein breitbandiges THz-Frequenzspektrum aufweist, verwendet (vgl. **Abbildung 2 Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**).

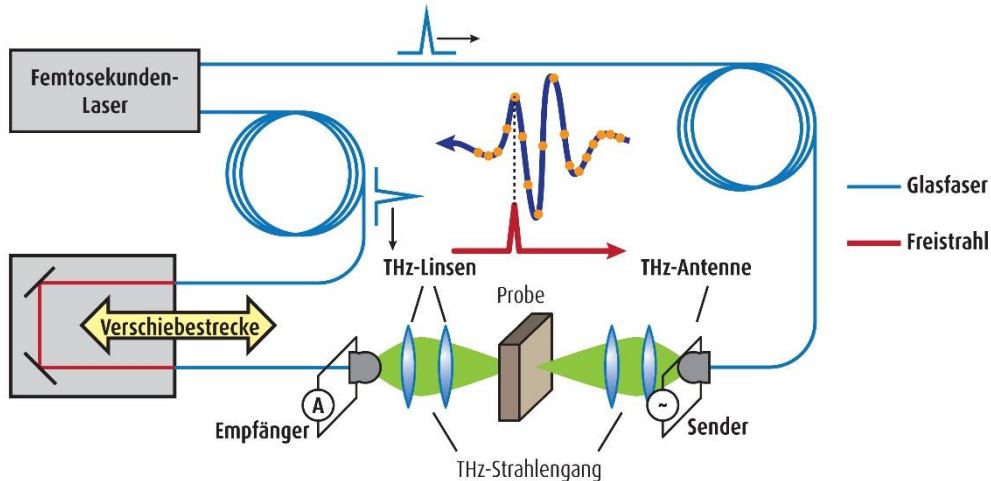


Abbildung 2: Aufbau eines fasergekoppelten THz-Zeitbereichsspektrometers in Transmissionsgeometrie.

Das THz-System Tera K15 der Fa. Menlo System GmbH arbeitet mit einer Laserwellenlänge von 1.550 nm. Der Laserstrahl wird in zwei Teilstrahlen geteilt, wobei beide Teilstrahlen je auf eine photoleitende Antenne geleitet werden. In diesen werden mittels eines Halbleiterchips durch den Laserpuls freie Ladungsträger erzeugt, die im Falle des Senders durch eine äußere Spannung und das folglich entstehende elektrische Feld beschleunigt werden und nach einer definierten Lebensdauer rekombinieren. Diese Zunahme bzw. Abnahme der Ladungsträgerdichte haben nach den Maxwell-Gleichungen eine elektromagnetische Welle zur Folge. Da die Lebensdauer der Ladungsträger im Bereich von Picosekunden (ps) liegt, ist die emittierte Strahlung im THz-Bereich. Am Detektor werden die freien Ladungsträger durch das ankommende THz-Feld zu den Elektroden beschleunigt und der resultierende Photostrom gemessen. Eine zeitliche Abtastung des THz-Pulses wird

durch eine variable mechanische Verzögerungsstrecke im Laserteilstrahl zum Detektor realisiert (Vernier-Effekt). Das THz-System hat eine Frequenzbandbreite von > 4 THz mit einem Signal-Rausch-Verhältnis von > 75 dB. Das Laserlicht ist vollständig in polarisationserhaltenden Lichtwellenleitern gekapselt, sodass eine hohe Robustheit und Flexibilität gewährleistet ist. Lediglich die mechanische Verzögerungseinheit besitzt eine Laserfreistrahlstrecke. Diese ist jedoch ebenfalls durch ein Gehäuse gekapselt.

Versuchsaufbau

Zur Aushärtungsüberwachung der Klebstoffe in Abhängigkeit verschiedener Einflussfaktoren wie der Umgebungstemperatur und der relativen Luftfeuchte wurden die Untersuchungen in einer Einhausung durchgeführt (vgl. Abbildung 3). In dieser wurde mittels einer Wärmelampe definierte Temperaturen und mittels eines Luftbefeuchters relative Luftfeuchtegrade eingestellt, welche anhand eines Temperatur- und Luftfeuchtesensors überprüft wurden.

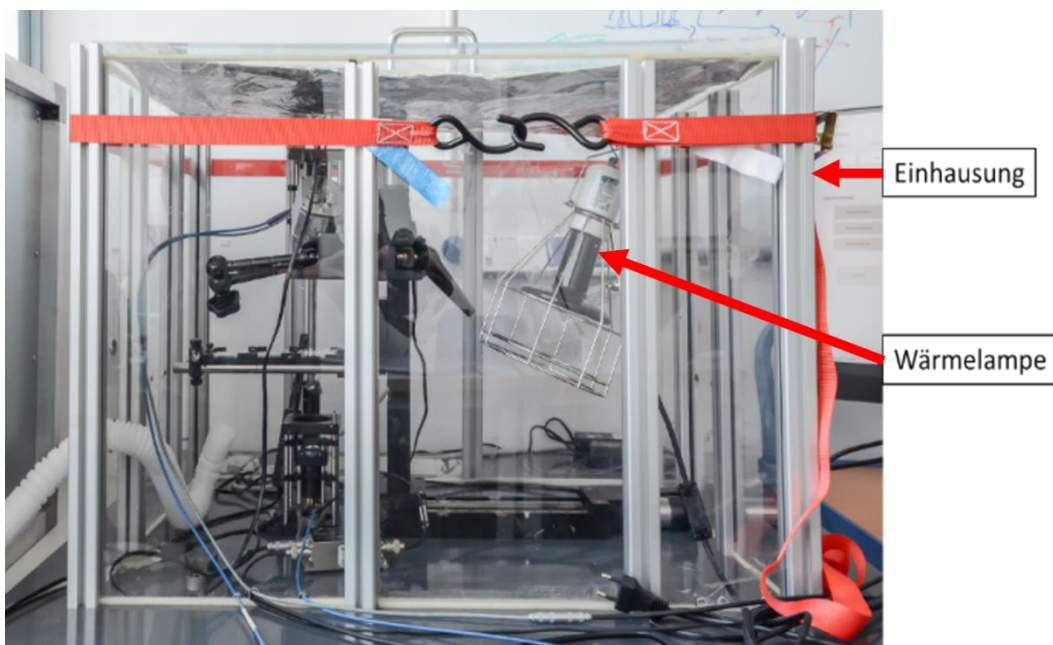


Abbildung 3: Gesamter Messaufbau zur Untersuchung der Aushärtung von Klebstoffen mittels der THz-Technik.

In Abbildung 4 ist eine detaillierte Ansicht des THz-Messaufbaus in Transmissionsgeometrie zu sehen. Für die Probekörper wurde ein Probenhalter additiv gefertigt, sodass pro Messdurchgang jeweils drei geklebte Proben untersucht werden konnten und zusätzlich eine Leermessung als Referenz gemacht wurde. Als Klebpartner wurde Glas (vgl. Abbildung 4), Polyamid (PA) und glasfaserverstärktes (GFK) PA verwendet. Mittels einer Lineareinheit wurden die Proben zwischen den THz-Antennen bewegt und jeweils eine Messung durchgeführt. Je nach Aushärtedauer der Klebstoffe lagen die Messzeiten zwischen wenigen Minuten und mehreren Stunden. Weiterhin wurde eine Absaugung installiert, welche die Abluft abtransportierte. Außerdem wurde eine IR-Kamera verwendet, die die Oberflächentemperatur der Proben aufnahm, da manche Klebstoffe zu exothermen Reaktionen neigten und dies damit gezeigt werden konnte.

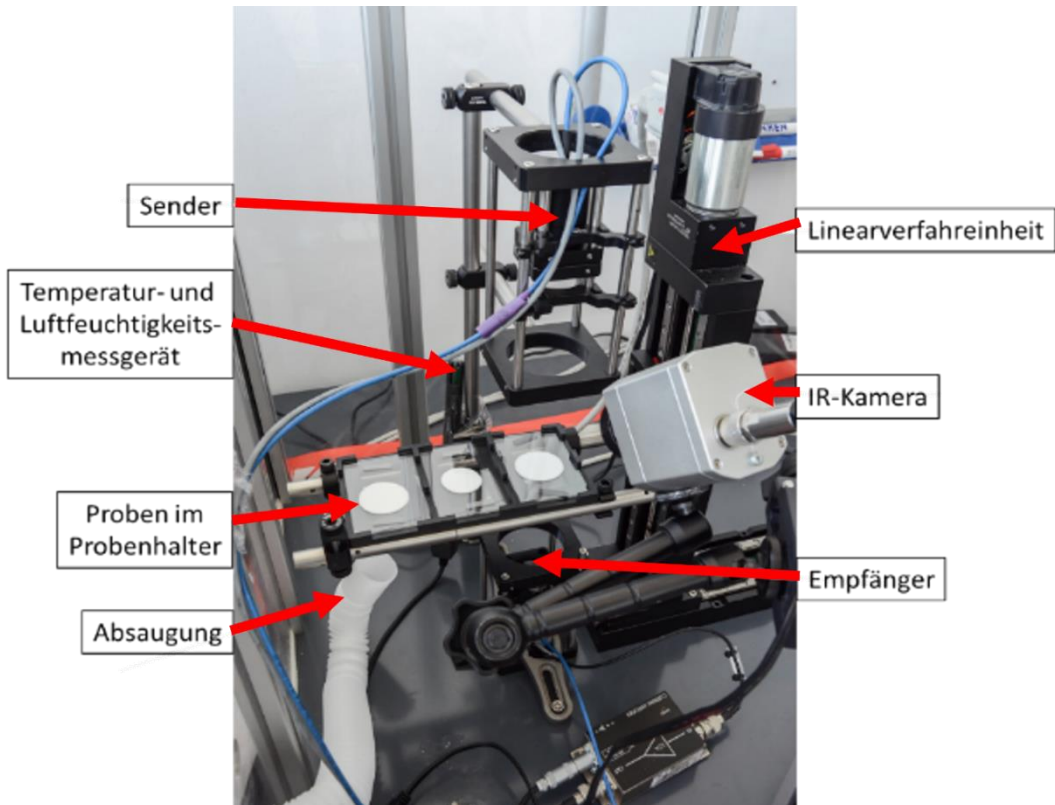


Abbildung 4: Detailansicht des THz-Messaufbaus in Transmissionsgeometrie.

4. Durchführung und Ergebnisse der Messreihen

Untersuchungen bei Normklima in Transmissionsgeometrie

Es wurden chemisch aushärtende Klebstoffe untersucht. Hierbei wurden von jedem Vertreter (Polymerisation, Polyaddition, Polykondensation) jeweils zwei Klebstoffe ausgewählt und diese in Transmissionsanordnung über 24 Stunden gemessen. Wie in Abbildung 5 zu sehen ist, zeigte sich bei dem Polymerisationsklebstoff bereits nach etwa 35 min eine Sättigung des THz-Amplitudenverlaufs, was auf eine abgeschlossene Aushärtung hindeutet. Bei dem Polyadditionsklebstoff hingegen wurden längere Aushärtedauern von mehreren Stunden gemessen.

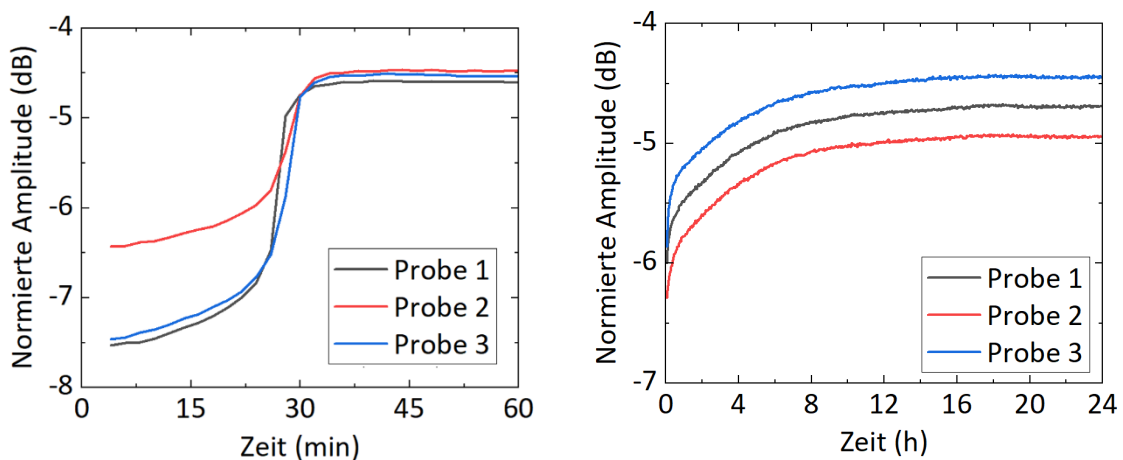


Abbildung 5: Ausgewertete THz-Amplituden zweier Proben, welche mittels Polymerisation über 60 min (links) und Polyaddition (rechts) über 24 h zwischen zwei Glasplättchen als Klebpartner aushärteten.

Die jeweils gleichzeitig gemessenen Proben zeigten ein vergleichbares Verhalten. Lediglich die Offsetwerte der Amplituden unterschieden sich, was vermutlich an einer minimal unterschiedlichen Klebeschichtdicke lag. Aufgrund des markanten Aushärteverlaufs des Polymerisationsklebstoffes (vgl. Abbildung 5 links) wurde dieser für die weiteren Messreihen zur Untersuchung des Einflusses der Umgebungsbedingungen sowie für die Messungen in Reflexionsgeometrie genutzt.

Untersuchungen bei Normklima in Reflexionsgeometrie

Neben der Untersuchung einer Vielzahl von unterschiedlichen Klebstoffarten in Transmissionsgeometrie wurden auch Messungen in Reflexionsanordnung durchgeführt, damit die Schichtdicke der Klebstoffschicht erfasst werden kann, um damit ggf. Schrumpfeffekte zu erkennen. Weiterhin wurde der Einfluss der Klebeschichtdicke auf die Aushärtung betrachtet. In Abbildung 6 sind zwei Messreihen bei unterschiedlichen nominellen Klebeschichtdicken gezeigt. Wie schon in Abbildung 5 links zu sehen, zeigt der Polymerisationsklebstoff bei 20 min eine größere Änderung, welche auch bei den Dickenverläufen gut zu sehen ist und mit einer Aushärtereaktion in Verbindung gebracht werden kann. Der Schrumpf der Klebeschicht beträgt bei allen Proben etwa 20 %.

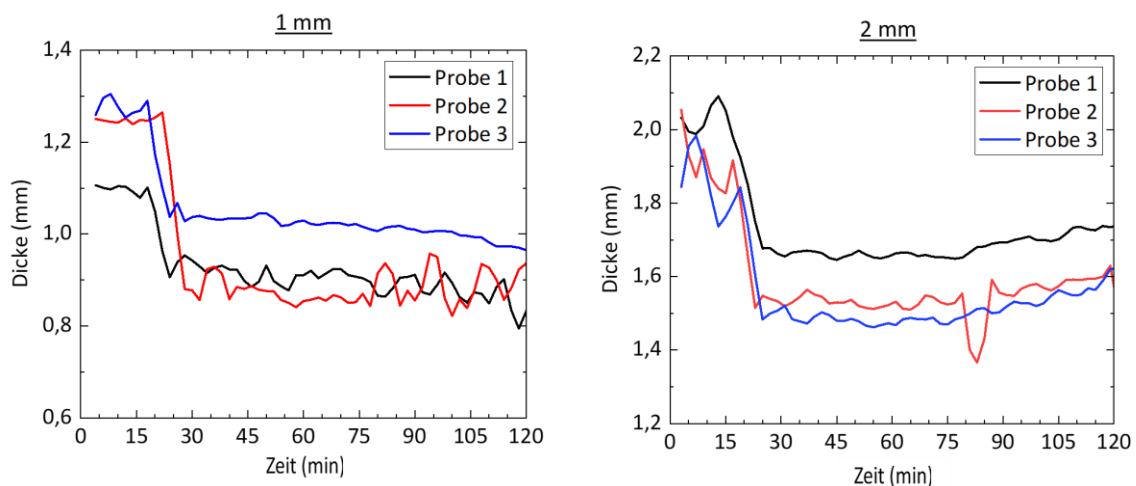


Abbildung 6: Verläufe der Klebeschichtdicken bei nominellen Dicke von 1 mm (links) und 2 mm (rechts).

Untersuchungen bei veränderten Umgebungsbedingungen

Um den Einfluss der Umgebungsbedingungen zu messen, wurden THz-Untersuchungen bei fünf Luftfeuchtegraden zwischen 30 % und 70 % rF und fünf Temperaturen zwischen 23 °C und 40 °C durchgeführt. Daraus ergaben sich insgesamt 25 Messungen. In Abbildung 7 links ist die normierte THz-Amplitude bei einer rF von 60 % bei fünf verschiedenen Temperaturen gezeigt. Hierbei ist zu sehen, dass eine Änderung der THz-Amplitude, welche mit der Aushärtung des Klebstoffes zusammenhängt, bei einer Erhöhung der Temperatur zeitlich früher beginnt. In der Regel wird durch eine höhere Temperatur der Aushärtevorgang beschleunigt, was sich auch hier zeigt. In Abbildung 7 rechts ist die normierte THz-Amplitude bei einer Temperatur von 35 °C bei fünf verschiedenen Luftfeuchtegraden gezeigt. Im Gegensatz zu Abbildung 7 links sind die Verläufe hierbei sehr ähnlich, was zeigt, dass die Aushärtung dieses Klebstoffes weniger von der umgebenden Luftfeuchte als von der Temperatur abhängig ist.

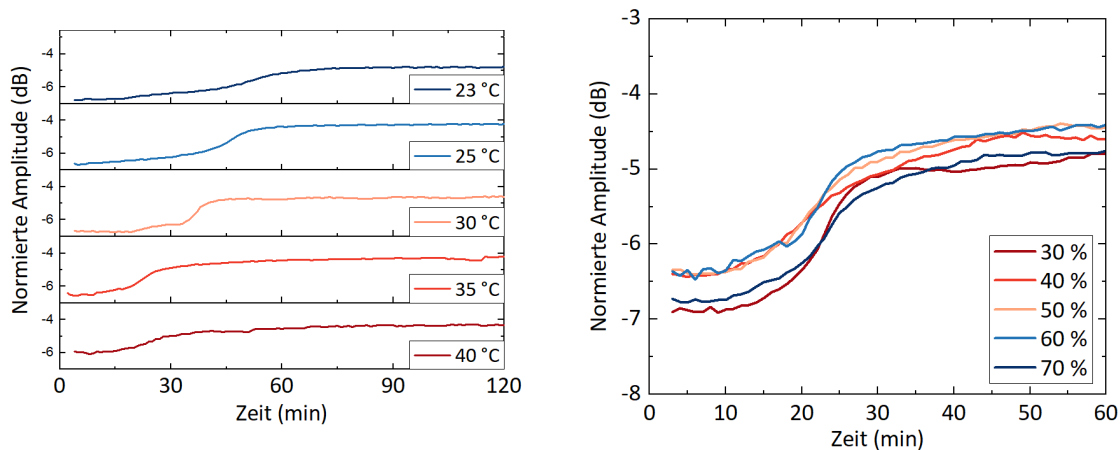


Abbildung 7: Amplitudendämpfung des durch die Klebstoffprobe transmittierten THz-Signals bei einer relativen Luftfeuchtigkeit von 60 % bei verschiedenen Umgebungstemperaturen (links) sowie bei einer Umgebungstemperatur von 35 °C bei verschiedener relativer Luftfeuchtigkeit (rechts).

Untersuchungen bei verschiedenen Substraten

Es wurde die Abhängigkeit der Aushärtung des Polymerisationsklebstoffes bei unterschiedlichen Substraten untersucht. Dazu ist in Abbildung 8 die Amplitudendämpfung des THz-Signals nach Durchgang durch die Proben im Vergleich zu der Referenzmessung gezeigt. Es ist bei allen drei Substraten ein ähnlicher Verlauf zu erkennen. Der wesentliche Unterschied besteht hierbei vor allem im Rauschen der Kurve. Dies resultiert aus den unterschiedlich THz-Signaldämpfungen in den Substraten, was eine Überwachung der Aushärtung besonders bei der GFK-Probe nahezu unmöglich macht. Weiterhin ist bei etwa 28 min Aushärtung bei der Messung der PA-Platte ein Einbruch zu erkennen, welcher allerdings keine physikalischen Ursachen hat, sondern an einer leichten Erschütterung des Messsystems lag.

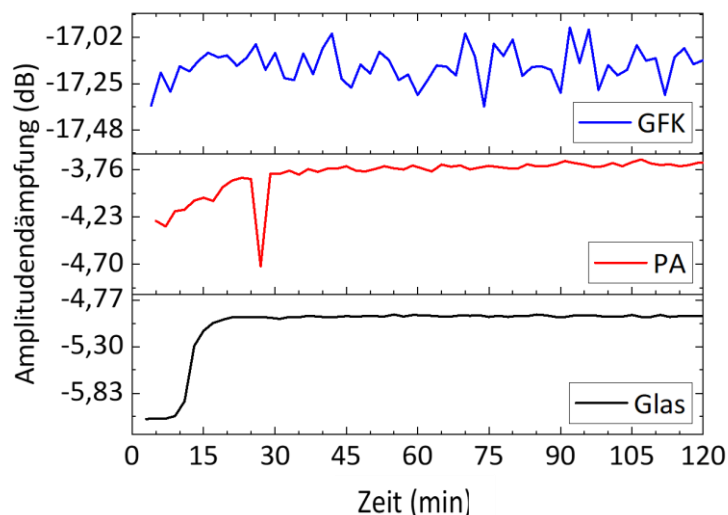


Abbildung 8: Darstellung der Amplitudendämpfung des Polymerisationsklebstoffes im Vergleich zum jeweils ursprünglichen Referenzpuls für jeweils drei verschiedene Substrate.

Durchführung von Referenzmessungen

Zur Charakterisierung der Klebstoffe und zur Referenzierung der Aushärtegradbestimmung mittels der THz-Technik wurde der Polymerisationsklebstoff in drei Messreihen mittels DSC untersucht (vgl. **Abbildung 9 Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**). Hierbei stellt die ermittelte Fläche aus der DSC-Kurve den Aushärtegrad dar. Es ist ersichtlich, dass ab etwa 45 min ein Plateau erreicht und damit die Probe ausgehärtet ist, was somit die THz-Ergebnisse bestätigt.

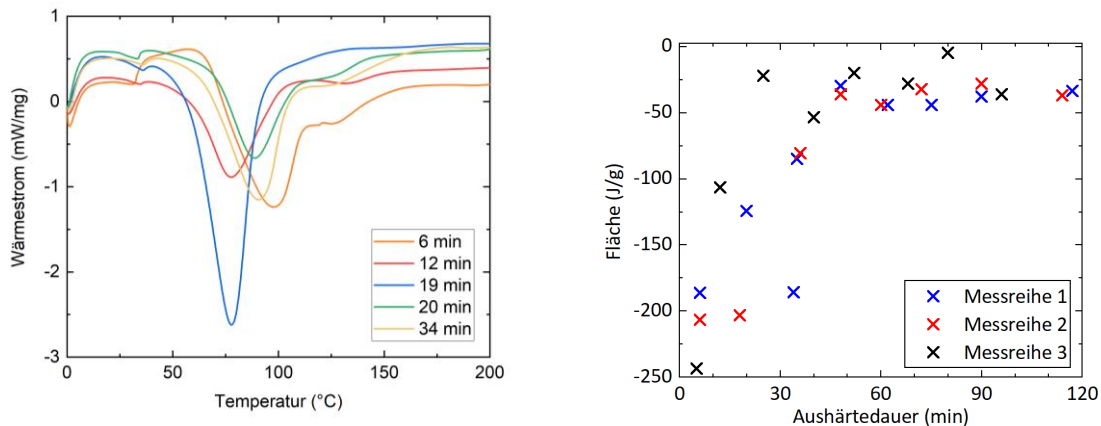


Abbildung 9: Links: Gemessene temperaturabhängige Enthalpie des Klebstoffes zu verschiedenen Aushärtezeiten. Rechts: Ermittelte Fläche der Enthalpiekurven aufgetragen über die Aushärtezeit bei drei Messreihen.

5. Zusammenfassung und Ausblick

Es wurde ein Messaufbau zur Untersuchung der Klebstoffaushärtung mittels der THz-Technik entwickelt, welcher in Transmissions- sowie Reflexionsgeometrie genutzt werden kann. Durch eine Einhausung werden Messungen bei unterschiedlichen Umgebungsbedingungen (Temperatur, Luftfeuchte) ermöglicht. In diesem Messaufbau wurde die Aushärtung verschiedener Reaktionsklebstoffe anhand der THz-Signale untersucht. Hierbei konnte eine Abhängigkeit der Temperatur gegenüber der Aushärtegeschwindigkeit erkannt werden. Weiterhin zeigte ein Polymerisationsklebstoff während der Aushärtung eine markante Änderung in der gemessenen THz-Amplitude und damit in der Dämpfung im Klebstoff sowie im Schrumpf des Klebstoffes zwischen 15 min und 25 min, welche auf die Aushärtereaktion zurückzuführen ist. Ob eine Aushärtereaktion beobachtet werden kann, ist außerdem abhängig von den verwendeten Substraten, da z. B. GFK aufgrund der hohen Absorption von THz-Wellen die Aushärteüberwachung stark einschränkt. Mittels einer DSC-Messung wurden die Ergebnisse der THz-Messung bei dem Polymerisationsklebstoff validiert. Zusammenfassend scheint die THz-Technik großes Potenzial zu besitzen, zur Aushärteüberwachung von Klebstoffen eingesetzt zu werden.

6. Literatur

- [1] T. Jüntgen, *Klebtechnik: Klebgerechte Konstruktionen und Anwendungen in der Praxis*, 1. Aufl. Würzburg: Vogel Communications Group, 2019.
- [2] W. Siebenpfeiffer, *Leichtbau-Technologien im Automobilbau: Werkstoffe - Fertigung - Konzepte*. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2014.
- [3] K. P. Subrahmanian und F. Dubouloz, "Adhesives for bonding wind turbine blades," *Reinforced Plastics*, Jg. 53, Nr. 1, S. 26–29, 2009.
- [4] B. G. Yacobi, S. Martin, K. Davis, A. Hudson und M. Hubert, "Adhesive bonding in microelectronics and photonics," *J. Appl. Phys.*, Jg. 91, Nr. 10, S. 6227, 2002.

- [5] A. Emblem und M. Hardwidge, "Adhesives for packaging," in *Packaging technology: Fundamentals, materials and processes* (Woodhead publishing in materials), A. Emblem, A. Emblem und H. Emblem, Hg., 1. Aufl. Oxford: Woodhead Publ, 2012, S. 381–394.
- [6] G. Habenicht, *Kleben: Grundlagen, Technologien, Anwendungen*, 6. Aufl. (VDI-Buch). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2009.
- [7] G. Habenicht, *Kleben - erfolgreich und fehlerfrei: Handwerk, Praktiker, Ausbildung, Industrie*, 7. Aufl. (SpringerLink Bücher). Wiesbaden: Springer Vieweg, 2016.
- [8] E. Kraus, B. Baudrit, P. Heidemeyer und M. Bastian, "Der Festigkeit schnell auf der Spur," *adhäsion KLEBEN & DICHTEN*, Jg. 58, Nr. 9, S. 43–47, 2014.
- [9] E. Kraus, B. Baudrit, P. Heidemeyer und M. Bastian, "Fast detection of mechanical strength," *Adhesion Adhesives & Sealants*, Jg. 11, Nr. 4, S. 31–34, 2014.
- [10] G. W. Ehrenstein, E. Bittmann und L. Hoffmann, *Duroplaste: Aushärtung - Prüfung - Eigenschaften*. München: Hanser, 1997.
- [11] E. Baur, S. Brinkmann, T. A. Osswald und E. Schmachtenberg, *Saechtling Kunststoff Taschenbuch*, 31. Aufl. (Hanser eLibrary). München: Hanser, 2013.
- [12] J. Jaruchattada, A. Fuongfuchat und C. Pattamaprom, "Rheological investigation of cure kinetics and adhesive strength of polyurethane acrylate adhesive," *J. Appl. Polym. Sci.*, Jg. 123, Nr. 4, S. 2344–2350, 2012.
- [13] M. Feustel, C. Küchenmeister, J. P. Plog. "Detailed analysis of curing reactions of polyurethane resins using the Rheonaut technology for simultaneous rheometry and FTIR." Resultec analytical equipment.
- [14] N. Halmen, C. Kugler, E. Kraus, B. Baudrit, T. Hochrein, and M. Bastian, *Vernetzungsgrad und Aushärtung schnell bestimmt: Prozessnahe Qualitätssicherung mittels unilateraler NMR*, 1. Aufl. (SKZ – Forschung und Entwicklung). Herzogenrath: Shaker, 2018.
- [15] L. H. Garden, D. Hayward und R. A. Pethrick, "Dielectric non-destructive testing approach to cure monitoring of adhesives and composites," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering*, Jg. 221, Nr. 4, S. 521–533, 2007.
- [16] Nadin Pemberger, Lukas Bittner und Christian W. Huck, "Using Near-Infrared Spectroscopy to Monitor the Curing Reaction of Silicone Adhesives," *Spectroscopy*, Jg. 30, s8, S. 8, 2015.
- [17] S. K. Tomlinson, O. R. Ghita, R. M. Hooper und K. E. Evans, "The use of near-infrared spectroscopy for the cure monitoring of an ethyl cyanoacrylate adhesive," *Vibrational Spectroscopy*, Jg. 40, Nr. 1, S. 133–141, 2006.
- [18] M. B. S. Radice. "Time-Based FT-IR Analysis of Curing of Polyurethanes."
- [19] UltraTest GmbH. "8-Kanal-Ultraschall-Messsystem – UltraTest GmbH." <https://www.ultratest.de/produkte-leistungen/ip-8-messsystem/> (Zugriff am: 1. Apr. 2021).
- [20] D. G. Aggelis und A. S. Paipetis, "Monitoring of resin curing and hardening by ultrasound," *Construction and Building Materials*, Jg. 26, Nr. 1, S. 755–760, 2012.
- [21] E. Schmachtenberg, J. Zur Schulte Heide und J. Töpker, "Application of ultrasonics for the process control of Resin Transfer Moulding (RTM)," *Polymer Testing*, Jg. 24, Nr. 3, S. 330–338, 2005.
- [22] 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.
- [23] A. Marchi Netto, *Advances in Single-Sided NMR of Polymer and Cultural Heritage Science*, 1. Aufl. (Berichte aus der Physik). Herzogenrath: Shaker, 2015.
- [24] C. G. Fry und A. C. Lind, "Determination of crosslink density in thermoset polymers by use of solid-state proton NMR techniques," *Macromolecules*, Jg. 21, Nr. 5, S. 1292–1297, 1988.
- [25] S. Sommer, T. Probst, E. Kraus, B. Baudrit, G. E. Town und M. Koch, "Cure monitoring of two-component epoxy adhesives by terahertz time-domain spectroscopy," *Polymer Science Series B*, Jg. 58, Nr. 6, S. 769–776, 2016.
- [26] T. Probst, S. F. Busch, E. Kraus, B. Baudrit, V. P. Wallace und M. Koch, "Nondestructive determination of defects in firmly joint plastic compounds with portable THz system," in *IEEE Microwave Theory and Techniques Society et al. 2013 – 38th International Conference on Infrared*, S. 1–2.
- [27] T. Probst *et al.*, "Monitoring the Polymerization of Two-Component Epoxy Adhesives Using a Terahertz Time Domain Reflection System," *Journal of Infrared Millimeter & Terahertz Waves*, Jg. 36, Nr. 6, S. 569–577, 2015.
- [28] E. Kraus *et al.*, "Portables Messsystem für das zerstörungsfreie Prüfen von Fügeverbindungen. Verbindungen konstruktiv prüfen," *Plastverarbeiter*, Jg. 65. Jahrgang, S. 144–147, 2014.
- [29] VDI/VDE-Gesellschaft, "Terahertzsysteme und Anwendungsfelder: VDI-Statusreport," 2020.