

Drum prüfe, was sich ewig verbindet

Möglichkeiten und Grenzen der zerstörungsfreien Prüfung in der Kunststofffügetechnik

Die Methoden der zerstörungsfreien Bauteilprüfung werden stetig weiterentwickelt, und so steht den Anwendern bereits heute ein breites Spektrum an Verfahren zur Verfügung. In der Kunststofffertigung liegt ein besonderes Augenmerk auf der Prüfung der Fügestellenqualität. In Abhängigkeit von Fügeverfahren, Material und Fehlertyp ergibt sich das für die jeweilige Anwendung passende Prüfverfahren. Das Kunststoff-Zentrum (SKZ) gibt einen kurzen Überblick.

Der Wechsel von Metall zu Kunststoff kann in sehr vielen Bereichen beobachtet werden, zum Beispiel in der Automobil-, Medizin- oder Luft- und Raumfahrtindustrie. Immer dort wo Funktionsfähigkeit und Zuverlässigkeit von Bauteilen eine große Rolle spielen, ist die Gewährleistung einer hohen Produktqualität entscheidend, um Personen- und Sachschäden zu vermeiden. Da es sich hierbei zudem häufig um komplexe Baugruppen handelt, kann auf Fügeverfahren in der Regel nicht verzichtet werden. Im Entstehungsprozess eines Produkts sind Fügeverfahren – bei Kunststoffen meistens Schweißen und Kleben – in der Regel am Ende der Prozesskette angesiedelt, weshalb sich Abweichungen aus vorhergehenden Prozessschritten häufig direkt auf die Nahtqualität auswirken. Fehler in der Fügezone führen oftmals zu stark verringerter Produktlebensdauer oder beeinträchtigen die Funktionalität.

Um diese Fehler aufzuspüren, werden üblicherweise zerstörende Prüfungen eingesetzt, da es sich z. B. beim Kleben und Schweißen laut DIN EN ISO 9001 und DIN 2304 um spezielle Prozesse handelt, deren Qualität gegenwärtig durch zerstörungsfreie Prüfung nicht vollständig bestimmbar ist [1, 2]. Bei zerstörenden Prüfungen lassen sich jedoch nur stichprobenartig Untersuchungen vornehmen, und es finden dabei irreversible Veränderungen der Bauteile statt, die u. U. mit hohen Kosten verbunden sind. Um detektierbare Fehler frühestmöglich und mit möglichst geringen Folgekosten aufzudecken sowie die Erkenntnislücke zwi-



Aktive Thermografie im Einsatz: Bei diesem Aufbau für die optische Anregung mit Halogenstrahlern ist die Thermografiekamera von oben durch die Öffnung auf die Bauteile gerichtet (© SKZ)

schon ausgewählten Stichproben der zerstörenden Prüfungen zu schließen, ist der Einsatz zerstörungsfreier Prüfverfahren zur durchgehenden Online- oder Inline-Defekterkennung in Kunststoff-Fügeverbindungen erstrebenswert [3, 4]. Ein Einblick in die Möglichkeiten der zerstörungsfreien Prüfung wurde in dieser Zeitschrift 2013 durch Hochrein et. al gegeben [4]. Darüber hinaus liefert **Tabelle 1** einen Überblick über die technischen Möglichkeiten verschiedener Verfahren. Insbesondere um in Zukunft eine immer höhere Defekterkennungsrate mit zerstörungsfreien Mitteln zu ermöglichen, werden am SKZ – einem Institut der Zuse-Ge-

meinschaft – stetig zerstörungsfreie Prüfverfahren für die Kunststofffügetechnik erprobt, weiterentwickelt und in das industrielle Umfeld übertragen. In diesem Artikel wird insbesondere auf Röntgen-, Ultraschall-, Kernspinresonanz- und Terahertzverfahren sowie Thermografie als zerstörungsfreie Prüfverfahren für die Kunststofffügetechnik eingegangen.

Röntgenverfahren und iCT

Röntgenverfahren nutzen die von einem Bauteil hervorgerufene Schwächung der Röntgenstrahlung zur Bildgebung aus. Der Kontrast entsteht hierbei durch un-

terschiedliche Massenschwächungskoeffizienten (Materialkontrast) und Strahlwege (Geometriekontrast), wodurch ungefüllte Polymere jedoch nicht immer sicher differenziert werden können [4]. Bei der industriellen Röntgen-Computertomografie (iCT) werden im Gegensatz zur Durchstrahlungsprüfung mehrere Durchstrahlbilder aus verschiedenen Blickwinkeln aufgezeichnet und durch einen Rekonstruktionsalgorithmus in ein dreidimensionales Volumenbild umgerechnet. Dieses aus der Medizin bekannte Verfahren ermöglicht einen ausgeprägten Detailreichtum der Volumendaten (bis sub- μm) [5]. Aufgrund des hohen Reifegrads und der hohen Auflösung erfreut sich die iCT einer starken industriellen Verbreitung und dient daher häufig als Referenzverfahren für andere zerstörungsfreie Prüfverfahren.

Aktuelle, durch die hohe industrielle Nachfrage getriebene Entwicklungstrends der iCT bilden die Beschleunigung der Messung (in-line CT, 4D-CT) und die Erhöhung der Auflösung durch verbesserte Röntgenquellen und höher auflösende Detektoren [5, 6]. In diesem Zusammenhang werden auch Techniken zur multispektralen Messung („Farb-CT“) und zur Ausnutzung alternativer Kontrastmechanismen (Phasenkontrast, Dunkelfeld) erarbeitet [7–9]. Außerdem werden neue Messregime zur hochauflösenden Messung von Bauteilausschnitten (Region of Interest, ROI-CT) oder zum vollständigen Scan (extended field of view) übergroßer Bauteile sowie zur Reduktion bekannter Bildartefakte (z. B. Helix-CT) entwickelt [5, 10].

Am SKZ wird die iCT z. B. zur Bemessung und Funktionsanalytik von Baugruppen eingesetzt. Fügeverbindungen werden untersucht auf Einschlüsse (Luft, Fremdstoffe) und quetschfließbedingte Füllstoffausrichtungen oder -ansammlungen (z. B. Glasfasern), die einen entscheidenden Einfluss auf die Fügequalität haben (Bild 1). Darüber hinaus können auch von außen nicht mehr zugängliche Fügenähte zerstörungsfrei bewertet werden. Bei Klebeverbindungen wird in den kommenden zwei Jahren in Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer-Institut für Integrierte Schaltungen IIS das dreidimensionale Deformationsverhalten von Klebeschichten unter Last untersucht, indem eine iCT-geeignete Belastungseinheit mit einer angepassten Software weiterentwickelt und getestet wird [11].

Tiefenauflösung mit Ultraschall

Für die Ultraschallprüfung werden mechanische Wellen im Bereich von 20 kHz bis zu 50 MHz zur Materialcharakterisierung und Bauteilprüfung eingesetzt. Übliche Messgrößen bilden die Schalllaufzeit, die Schallgeschwindigkeit oder die Schalldämpfung. Stand der Technik ist in der Bauteilprüfung gegenwärtig der Einsatz der Gruppenstrahlertechnik (engl. Phased-Array) in Verbindung mit einem Koppelmedium (z. B. Wasser), mit der eine Strahlfokussierung und -lenkung möglich ist, sodass z. B. durch Veränderung des Strahlwinkels auch Strukturen unterhalb des Schweißwulstes ohne Wulstentfernung untersucht werden können. In der Forschung werden bereits Luftultraschallsysteme erprobt, mit denen die Prüfung auch ohne zusätzliches Koppelmedium berührungslos möglich ist [12–15].

In Kunststoffen werden mit Ultraschallverfahren lateral üblicherweise Sub-Millimeter-Auflösungen und noch höhere Tiefenaufösungen erreicht. Daher eignen sich diese Verfahren sehr gut zur Untersuchung von Fügeverbindungen auf Risse, Einschlüsse und Vakuolen (Bild 2).

Bei Schweißverbindungen (z. B. Stumpf- oder Elektromuffenschweißungen) besteht darüber hinaus in einem gewissen Rahmen die Möglichkeit, Kaltschweißungen zu erkennen [16]. Bei Elektromuffenschweißungen kann zusätzlich noch die Heizwendelverschiebung bewertet werden.

Da die im Metallbereich geltenden Normen zur Ultraschallprüfung (z. B. von Rohrverbindungen) aufgrund der starken Unterschiede in den Materialeigenschaften (Schallgeschwindigkeit, Dämpfung) nicht ohne Weiteres auf Kunststoffe übertragen werden können, sind Normen für die Prüfung von Kunststoffverbindungen in Vorbereitung. In Klebeverbindungen kann Ultraschall zusätzlich zur Defektdetektion u. a. zur Bestimmung des Aushärtegrads eingesetzt werden, da die mechanischen Wellen sensitiv auf Veränderungen der mechanischen Eigenschaften (z. B. während der Klebstoffaushärtung) sind. Aufgrund erster vielversprechender Ergebnisse wird die Überwachung des Aushärtegrads mittels Luftultraschalltechnik am SKZ weiter vorangetrieben, um industrielle Anwendungen zu ermöglichen [17]. Der Aushärtegrad kann ebenfalls mit Kernspinmethoden be- »

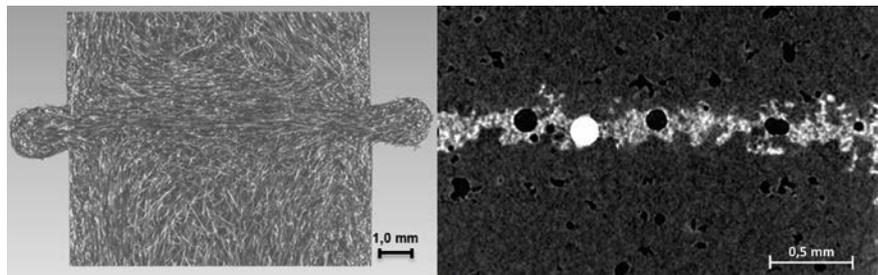


Bild 1. Reif für die Anwendung: Ein geschweißtes kurzglasfaserverstärktes Kunststoffteil mit fließbedingter Faserausrichtung (links) und ein geklebtes lasergesintertes Kunststoffteil mit raueitsbedingten Lufteinschlüssen in der Klebschicht (rechts) in einer iCT-Aufnahme (industrielle Röntgen-Computertomografie) (© SKZ)

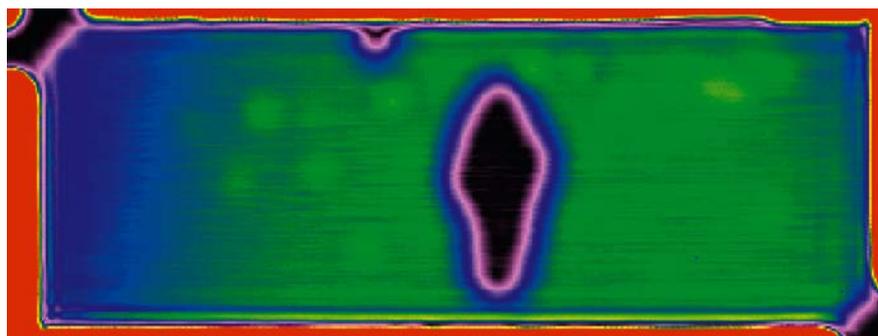


Bild 2. Sub-Millimeter-Auflösungen erreichbar: Luftultraschallmessung (Transmission) eines geklebten Verbunds von Kunststoffplatten mit Lufteinschluss (schwarz) im Zentrum (© SKZ)



Bild 4. Für dünnwandige und großflächige Kunststoffbauteile gut geeignet: optische Lock-in-Thermografie der Rückseite eines Armaturenbretts mit aufgeschweißten Strukturen (links) sowie Amplituden- (Mitte) und Phasenbild (rechts) des Armaturenbretts (© SKZ)

stimmt werden, auf die im Folgenden eingegangen wird.

Unilaterale NMR: leichter Probenzugang

Mittels unilateraler NMR (nuclear magnetic resonance) kann das Aushärteverhalten von Klebstoffen untersucht werden. Dabei handelt es sich um NMR-Systeme mit spezieller Anordnung von Festkörpermagneten und einer Spule, sodass sich mit einseitigem Probenzugang berührungslos und tiefen aufgelöst messen lässt. Das an der RWTH Aachen entwickelte Messverfahren findet derzeit vor allem in der Forschung zahlreiche Anwendungen [18].

Dass mit diesem Verfahren der Vernetzungs- und Aushärtegrad insbesondere bei Klebstoffen bestimmt werden kann, wurde bereits in den letzten Jahren gezeigt [19, 20]. Die bei der Aushärtung

von Klebstoffen aufgrund der Netzwerkbildung kleiner werdende molekulare Beweglichkeit spiegelt sich dabei in einer Abnahme von Relaxationszeiten und Echosummen wider. Die Messsignale der unilateralen NMR lassen sich sehr gut mit Referenzverfahren korrelieren, z. B. rheologischen Messungen (**Bild 3**) [21].

Aufgrund des einseitigen Probenzugangs ist das Verfahren für die zerstörungsfreie Prüfung von Klebeverbindungen prädestiniert. Die kompakte Bauform und die hohe Mobilität eines unilateralen NMR-Systems erlauben auch nachträgliche Prüfungen an bereits im Einsatz befindlichen geklebten Bauteilen. Um das Potenzial dieses Messverfahrens nutzbar zu machen, wird am SKZ aktuell im Bereich der prozessnahen zerstörungsfreien Prüfung von Klebeverbindungen mittels unilateraler NMR geforscht.

Die Autoren

Heinrich Leicht ist wissenschaftlicher Mitarbeiter im SKZ, Würzburg, und arbeitet in der Gruppe Forschung im Bereich Fügen und Oberflächentechnik; h.leicht@skz.de

Norbert Halmen ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am SKZ und arbeitet in der Gruppe Prozessmesstechnik des Bereichs Produkte und Prozesse.

Daniel Hoffmann ist wissenschaftlicher Mitarbeiter im SKZ und arbeitet in der Forschung und Entwicklung als Laborleiter der Arbeitsgruppe für zerstörungsfreie Prüfung.

Giovanni Schober ist Leiter der Gruppe Zerstörungsfreie Prüfung im Bereich Produkte und Prozesse des SKZ.

Dr. Eduard Kraus ist Leiter der Gruppe Forschung im Bereich Fügen und Oberflächentechnik des SKZ.

Dr. Thomas Hochrein ist Geschäftsführer der Bildung & Forschung des SKZ.

Prof. Dr.-Ing. Martin Bastian ist Institutsdirektor des SKZ und Professor für das Fachgebiet „Technologie der polymeren Werkstoffe“ an der Universität Würzburg.

Service

Literatur & Digitalversion

Das Literaturverzeichnis und ein PDF des Artikels finden Sie unter www.kunststoffe.de/7773912

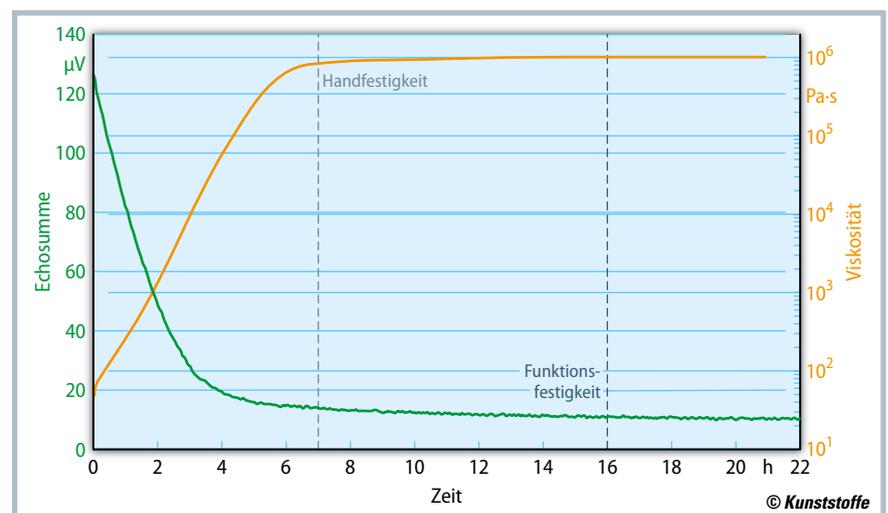


Bild 3. Gute Korrelation: Gegenüberstellung des Aushärteverlaufs eines 2K-Epoxidklebstoffs bei 23 °C, gemessen mittels unilateraler NMR (Echosumme, grün) und mit Platte-Platte-Rheometer (Viskosität, orange) (© SKZ)

Thermografie mit Verfahrensvarianten

Bei der Thermografie wird die an der Oberfläche emittierte Infrarotstrahlung orts aufgelöst detektiert. Die erreichbaren Auflösungen liegen dabei (je nach Kamerasystem) im Sub-Millimeter-Bereich. Abhängig vom gewählten Verfahren und dem Anwendungsbereich zählt die Thermografie teilweise bereits zum Stand der Technik in der Bauteilprüfung. Je nach Herkunft des Temperaturunterschieds von Bauteil zur Umgebung kann grundsätzlich zwischen passiver und aktiver Thermografie unterschieden werden [22]. In der aktiven Thermografie (**Titelbild**) wird das Bauteil durch eine externe Quelle thermisch angeregt. Hierfür stehen Anregungstechniken (z. B. optische oder Ultraschall-Quellen) und Verfahrensvarianten (z. B. Lock-in) zur Verfügung, die laufend weiterentwickelt werden. Bei der passiven Thermografie wird die Temperaturverteilung des Bauteils gemessen, die sich durch Umgebungs- oder Prozessbedingungen einstellt. Klassischerweise wird dieses Verfahren daher in der Überwachung von Prozessen eingesetzt, die einen genügend hohen Temperaturhub hervorrufen. Beispiele hierfür liegen im Spritzgießen [23], der Extrusion oder dem Kunststofffügen [24]. So lassen sich beim Kunststoffschweißen beispielsweise Abweichungen der Prozessparameter sowie der Bauteileigenschaften (u. a. Verzug, Füllstoffansammlungen, Feuchtigkeit) erkennen, weshalb das Verfahren verstärkt im industriellen Umfeld erprobt wird [22, 24]. Auch bei der Überwachung von Klebeverbindungen ist Potenzial vorhanden, wenn die Aushärtereaktion des Klebstoffs mit einer Temperaturentwicklung einhergeht.

Bei der aktiven Thermografie treibt vor allem die angestrebte Verbesserung der Schadenserkenkung in Faserverbundkunststoffen die Weiterentwicklung der Methode voran, insbesondere in Bezug auf Anregungs- und Auswerteverfahren [3, 25–28]. Dabei konnte z. B. am SKZ gezeigt werden, dass eine Defekterkennung in Kunststoffen derzeit bis zu einigen Millimetern Tiefe möglich ist, wobei sich die Faustformel bewährt hat, dass die laterale Ausdehnung eines Defekts mindestens seiner Tiefenlage entsprechen sollte. Daher eignet sich die Thermografie insbesondere für die Untersuchung dünnwandiger und großflächiger Kunststoffbauteile (**Bild 4**). In Schweiß- und Klebeverbindungen von Kunststoffen können mittels aktiver Thermografie Einschlüsse und Poren ab einer Größe von etwa einem Millimeter detektiert sowie in Klebeverbindungen, insbesondere mit Ultraschallanregung, geschlossene schlecht haftende Verbindungen und fehlender Klebstoffauftrag erkannt werden [29].

Terahertzverfahren in der Kunststoffindustrie

Terahertzstrahlung besteht aus elektromagnetischen Wellen im Wellenlängenbereich zwischen Mikrowellen- und Infrarotstrahlung und ist somit nicht ionisierend. Als Messgrößen werden i. d. R. die Amplitude oder Laufzeit (z. B. für Dickenmessungen) herangezogen. Hierdurch können laterale Auflösungen im Millimeter-Bereich und noch höhere Tiefenaufösungen erreicht werden. Durch Auswertung im Frequenzraum lassen sich auch der Brechungsindex und der Absorptionskoeffizient eines Materials (z. B. zur Feuchtebestimmung) bestimmen.

Anwendungen der Terahertzverfahren in der Kunststoffindustrie decken die gesamte Prozesskette ab, vom Compoundieren, der Extrusion und Schaumcharakterisierung über das Spritzgießen »

Kenngröße		Messsystem									
		Röntgen		Thermografie		Ultraschall		Shearografie	Terahertz		Unilaterale NMR
		Durchstrahlungsprüfung	Computertomografie	aktiv	passiv	Gruppenstrahlertechnik	Luftultraschall		optisch	voll-elektronisch	
Materialien	elektrische Leitfähigkeit	+	+	+	+	+	+	+	-	-	-
	Schäume	+	+	-	-	-	-	-	+	+	-
Fehlerart	Einschluss, Poren, Lunker	+	+	+	+	+	+	0	+	+	+
	Riss senkrecht zur Bildebene	+	+	-	-	0	-	0	0	0	0
	Delamination parallel zur Bildebene	-	+	+	+	+	0	+	+	+	0
Laterale Auflösung (min) ¹		µm	nm	mm	mm	µm	mm	mm	µm	µm	µm
Eindringtiefe ¹		einige dm	einige dm	wenige mm	wenige mm	einige cm	einige cm	wenige mm	viele cm	viele cm	einige mm
Bevorzugter Probenzugang		2	2	1 bzw. 2	1	1	1 bzw. 2	1 bzw. 2	1 bzw. 2	1 bzw. 2	1
Mobilität		0	-	+	+	+	0	+	-	+	+
Erforderliche Schutzeinrichtung ²		-	-	+	+	+	+	0	0	+	0
Reifegrad bzgl. industrieller Verfügbarkeit		+	+	+	+	+	0	+	-	+	0
Arbeitsabstand ³		mm bis dm	mm bis dm	cm bis m	cm bis m	Berührend	mm bis cm	cm bis m	cm	cm	mm
Zeitaufwand zur Prüfung eines Quadratmeters ³		wenige Minuten	mehrere Stunden	mehrere Minuten	einige Sekunden bis Minuten	mehrere Minuten	mehrere Minuten	einige Minuten	wenige Stunden	mehrere Minuten	mehrere Stunden

¹ Laterale Auflösung und Eindringtiefe sind sowohl material-, system- als auch geometrieabhängig. Aus diesem Grund wird lediglich die Mindestgröße angegeben.

² Schutzeinrichtungen können z. B. aufgrund ionisierender Strahlung (Röntgenverfahren), Laserkomponenten (Terahertz) oder starker Magnetfelder (NMR) notwendig sein.

³ Arbeitsabstand und Zeitaufwand zur Prüfung sind anwendungsabhängig. Aus diesem Grund wird lediglich eine Größenordnung angegeben.

Tabelle 1. Gegenüberstellung von ZfP-Systemen und Beurteilungskriterien der technischen Funktionalität in Bezug auf thermische und klebtechnische Fügetechnik. Legende: + = gut/unkritisch, 0 = mittel/bedingt kritisch, - = schlecht/kritisch, 1 = einseitig, 2 = zweiseitig (Quelle: SKZ, nach [1–3])

bis hin zum Fügen, und zählen in manchen dieser Bereiche bereits zum Stand der Technik (z. B. bei der Rohrvermessung in der Extrusion) [30, 31]. In der Gerätetechnik werden zudem weiter sinkende Kosten prognostiziert, weshalb sich die beobachtbare industrielle Verbreitung der Terahertztechnik auch in Zukunft fortsetzen sollte [32]. In Schweiß- und Klebeverbindungen können mittels Terahertzverfahren Vakuolen, Einschlüsse und Delaminationen erkannt sowie deren Position bestimmt werden [33–35]. Bei Klebeverbindungen besteht darüber hinaus die Möglichkeit, durch Betrachtung des Brechungsindex den Aushärtzustand zu ermitteln [36, 37].

Ausblick

Das in diesem Beitrag gezeichnete Bild zum Einsatz zerstörungsfreier Verfahren zur Prüfung von Kunststoffverbindungen erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit, da es mindestens so viele zerstörungsfreie Prüfverfahren wie Arten von

Fügeverbindungen gibt. So wurde hier zum Beispiel die Shearografie (u. a. zur Untersuchung von Dickschichtklebungen) nicht näher betrachtet [3, 38–43].

Insbesondere durch die stetige Entwicklung neuer Fertigungsverfahren und die wachsenden Qualitätsanforderungen, die sich auch in der Normung widerspiegeln, werden der Einsatz und die Weiterentwicklung zerstörungsfreier Prüfverfahren in der Fügetechnik wichtiger denn je. So schreitet die Verbreitung etablierter Verfahren, wie der Terahertztechnik und der

Thermografie, im industriellen Umfeld immer weiter voran, und jüngere Verfahren wie z. B. Kernspinresonanzmethoden stehen an der Schwelle zum industriellen Einsatz. Darüber hinaus wird die Anwendung von Techniken in neuen Feldern, z. B. Klebüberwachung durch Luftultraschall, erprobt. Das SKZ, ein Mitglied der Zuse-Gemeinschaft, beteiligt sich hierbei intensiv an der Weiterentwicklung der Verfahren für die Kunststoffbranche, um in Zukunft dem Traum einer zerstörungsfreien 100-%-Prüfung immer näher zu kommen. ■

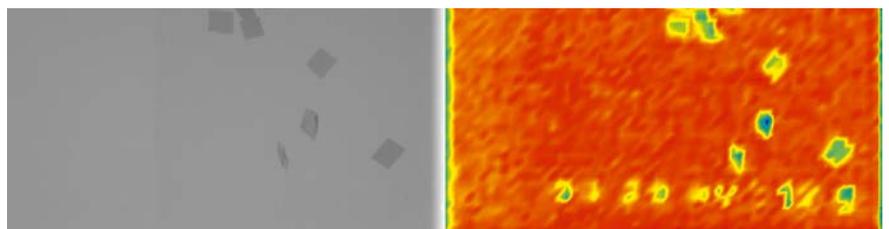


Bild 5. Prüfverfahren im Vergleich: Röntgendurchstrahlungsbild (links) und THz-Bild (rechts) geklebter PP-Platten mit PVC-Verunreinigungen in der Klebschicht. Im THz-Bild ist unten im Bild zusätzlich die eingepreßte Probenbeschriftung zu erkennen (© SKZ)