

Zerstörungsfreie Charakterisierung und Qualitätssicherung der Materialeigenschaften und Beständigkeit additiv gefertigter Kunststoffteile

Philipp FRANZ¹, Christian METZ¹, Daniel BRACKROCK¹, Christian FISCHER²,
Volker WACHTENDORF¹, Christiane MAIERHOFER¹

¹ Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM), Berlin

² SKZ - Das Kunststoff-Zentrum, Würzburg

Kontakt E-Mail: philipp.franz@bam.de

Kurzfassung. Mit additiven Fertigungsverfahren hergestellte Bauteile und Produkte aus Kunststoffen werden zunehmend nicht mehr nur als Prototypen, sondern als voll funktionsfähige Bauteile und Produkte gefertigt. Bedingt durch die Fertigungsprozesse und den schichtweisen Aufbau resultieren physikalische Materialeigenschaften, die stark von den Fertigungsparametern abhängen und zudem anisotrop sind. Von den Fertigungsparametern werden auch die Oberflächeneigenschaften beeinflusst, sodass zu erwarten ist, dass sich die Beständigkeit gegenüber äußeren Umwelteinflüssen bei additiv gefertigten Bauteilen von der konventionell gefertigter unterscheiden kann. Nachfolgend wird daher die Entwicklung eines Qualitätssicherungskonzeptes basierend auf spektroskopischen und zerstörungsfreien Prüfverfahren vorgestellt, in dem der Alterungsprozess von mittels Fused Deposition Modelling (FDM) und mittels Lasersintering (LS) hergestellten Probekörpern untersucht wird.

1 Einleitung

Die Additive Fertigung (Additive Manufacturing, AM) befindet sich derzeit in einer rasanten Entwicklung. Neben der Erschließung immer neuer Materialien und dem Entwurf neuer Verfahren, verschiebt sich derzeit deren Einsatz von der Prototypenherstellung hin zur Produktion von Serien-Bauteilen. Vor allem die hohe Flexibilität und die signifikant kürzeren Entwicklungsphasen werden sowohl von großen Firmen, aber auch von kleinen und mittelständischen Unternehmen (KMUs) sehr geschätzt. Für den Einsatz in der Produktion von Kleinserien (ab Stückzahl 1) werden jedoch höhere Anforderungen an die Fehlerfreiheit und Langzeitstabilität gestellt, als es vorher bei der Fertigung von Prototypen der Fall war. Durch den Fertigungsprozess und den schichtweisen Aufbau additiv gefertigter Artikel resultieren Materialeigenschaften, die sich von denen konventionell gefertigter unterscheiden. Davon betroffen sind die physikalischen Eigenschaften (Porosität, Dichte, Festigkeit, Wärmeleitfähigkeit, spezifische Wärmekapazität, elektrische Leitfähigkeit usw.), die Anisotropie der chemischen Zusammensetzung, speziell in Bezug auf die laterale und Tiefenprofil-Verteilung thermisch-oxidierter Spezies, die Anisotropie der molekularen Orientierungen (lateral und Tiefenprofil), die Oberflächeneigenschaften (Rauigkeit,



Kantenausprägung, molekulare Bindungszustände) und die Beständigkeit gegenüber äußeren Umwelteinflüssen (Alterung). Zur Gewährleistung geforderter Bauteileigenschaften wird daher zwingend eine verlässliche und vor allem zerstörungsfreie Qualitätssicherung benötigt, denn nur möglichst fehlerfreie und sichere Bauteile können sich auf dem Markt langfristig durchsetzen. [1]

Das hier vorgestellte Projekt setzt genau an diesem Punkt an. Untersucht werden die Eigenschaften von additiv gefertigten Kunststoffbauteilen, wie diese durch verschiedene Fertigungsparameter beeinflusst werden und deren Veränderung im Rahmen einer künstlichen Alterung. Diese Arbeit fokussiert sich auf additiv gefertigte Bauteile aus Polyamid 12 (PA12) mittels Laser Sintering (LS) sowie aus Acrylnitril-Butadien-Styrol (ABS) mittels Fused Layer Modeling (FLM). LS und FDM sind die beiden derzeit wichtigsten AM-Methoden für Polymerwerkstoffe [2,3]. Die verschiedenen Produktionsparameter der Testkörper, wie z. B. die Verarbeitungstemperatur oder die Rohstoffzusammensetzung, wurden variiert und deren Einfluss auf die Bauteileigenschaften zerstörungsfrei mit aktiver Thermografie (thermal Testing, TT), bildgebenden Ultraschallverfahren (Ultrasonic Testing, UT) sowie mit spektralanalytischen Methoden (ATR-IR, UV/VIS, spektrale Reflexion) untersucht. Ergänzend werden die mechanischen Eigenschaften geprüft, was im Gegensatz zu den anderen Charakterisierungsmethoden aber nur zerstörend möglich ist. Um die Funktionalität und Zuverlässigkeit von Bauteilen langfristig gewährleisten zu können, muss neben den anfänglichen Probekörpereigenschaften auch deren Änderung durch Alterung bekannt sein. Hierfür werden die Probekörper nach definierten Kriterien künstlich bewittert und die Veränderungen der Materialeigenschaften ebenfalls mit den oben beschriebenen Verfahren überprüft.

2 Additive Fertigung der Probekörper

Im Gegensatz zu konventionellen subtraktiven Verfahren (z.B. Bohren, Fräsen) und formgebenden Verfahren (Kunststoff-Spritzguss), werden die Bauteile bei der additiven Fertigung Schicht für Schicht aufgebaut. Die Vorteile dieser Vorgehensweise liegen vor allem in einem oftmals geringeren Materialverbrauch und in der Möglichkeit, bisher nicht realisierbare Geometrien umzusetzen. [4] Die bereits oben erwähnten Verfahren der additiven Fertigung im Bereich der thermoplastischen Polymerbauteile (LS und FLM) werden im Folgenden kurz beschrieben.

2.1 Laser-Sintering (LS)

Beim LS wird eine dünne Schicht aus Polymerpulver mit einer Rakel im Bauraum verteilt. Typische Schichtdicken liegen im Bereich von 60 µm bis 200 µm. Der gesamte Bauraum ist mit Schutzgas geflutet und das Pulverbett wird auf eine Temperatur kurz unterhalb der Aufschmelztemperatur eingestellt. Mittels eines Infrarot-Lasers (Wellenlänge 10,6 µm, maximale Leistung 26 W) wird dann lokal genau der Energieeintrag in das System eingebracht, der notwendig ist, um das Pulver von der festen, teilkristallinen Phase in die amorphe, flüssige Phase umzuwandeln. Hat der Laser die entsprechende Bauteilgeometrie in der aktuellen Schicht abgerastert, wird der Bauraum abgesenkt, neues Pulver aufgetragen und der Prozess wiederholt sich für die nächste Schicht. [2,3] Wird das Werkstück nach der Fertigstellung von dem Pulver befreit, so kann dieses Altpulver, nach einer Aufarbeitung, zu einem gewissen Anteil mit Neupulver gemischt und für den nächsten Fertigungsprozess wiederverwendet werden. [2,3]

Das LS ist gegenüber dem FLM relevanter für die Industrie, da sich bei guter Fokussierung des Lasers und entsprechend dünner Pulverschicht auch filigrane Bauteile mit hoher Qualität herstellen lassen. Allerdings ist durch die Komplexität des Prozesses die

Auswahl an verwendbaren Polymeren limitiert. Als Standard hat sich hier eine für AM optimierte, nicht pigmentierte Variante von PA12 etabliert, welches auch zur Herstellung der LS-Proben für das Projekt verwendet wurde. Dabei wurden folgende Prozessparameter verwendet: Bauraumtemperatur 168°C, Laserenergieeintrag 0,033 J/mm² und ein Altpulveranteil von 50%.

2.2 Fused Layer Modeling (FLM)

Beim FLM liegt das Ausgangsmaterial als Filament vor. Während des Prozesses wird dieser in eine heiße Düse gedrückt, dort aufgeschmolzen und auf dem Druckbett abgeschieden. Typische Düsendurchmesser liegen im Bereich von 0,15 mm bis 0,8 mm. [4,5] Die Düse ist auf einem, in lateraler Richtung verfahrbaren Druckkopf montiert. Dieser fährt den, für die aktuelle Schicht relevanten Bauteilquerschnitt ab und erzeugt somit eine, aus einzelnen Bahnen bestehende Kunststofflage. Nach Fertigstellung einer Schicht wird der Druckkopf um eine Schichthöhe angehoben, bzw. das Druckbett abgesenkt und die nächste Schicht wird oben aufgedruckt. Im Gegensatz zum LS findet der FLM-Prozess ohne Schutzgasatmosphäre und bei Raumtemperatur statt. Lediglich das Druckbett wird, abhängig vom verwendeten Polymer, auf eine definierte Temperatur geheizt. Außerdem ist die Probe nicht von einem stabilisierenden Pulverbett umgeben, daher müssen bei stark überhängenden Geometrien zusätzliche Stützstrukturen mitgedruckt werden.

Das FLM findet neben der Herstellung von Bauteilen für Prototypen gleichwohl im privaten Bereich Anwendung und wird umgangssprachlich auch als 3D-Druck bezeichnet. Insgesamt sind die realisierbaren Strukturen im Vergleich zum LS etwas größerer Natur, was auf die Größe der Düsendurchmesser zurückzuführen ist. Als typisches Material wurde für dieses Projekt Acrylnitril-Butadien-Styrol (ABS) verwendet. Für die vorgestellten Probekörper wurde ein ABS-Filament mit rotem Farbstoff genutzt. Fertigungsparameter waren ein Düsendurchmesser von 0,4 mm, eine Druckgeschwindigkeit von 30 mm/s und eine Schichtdicke von 75% des Düsendurchmessers.

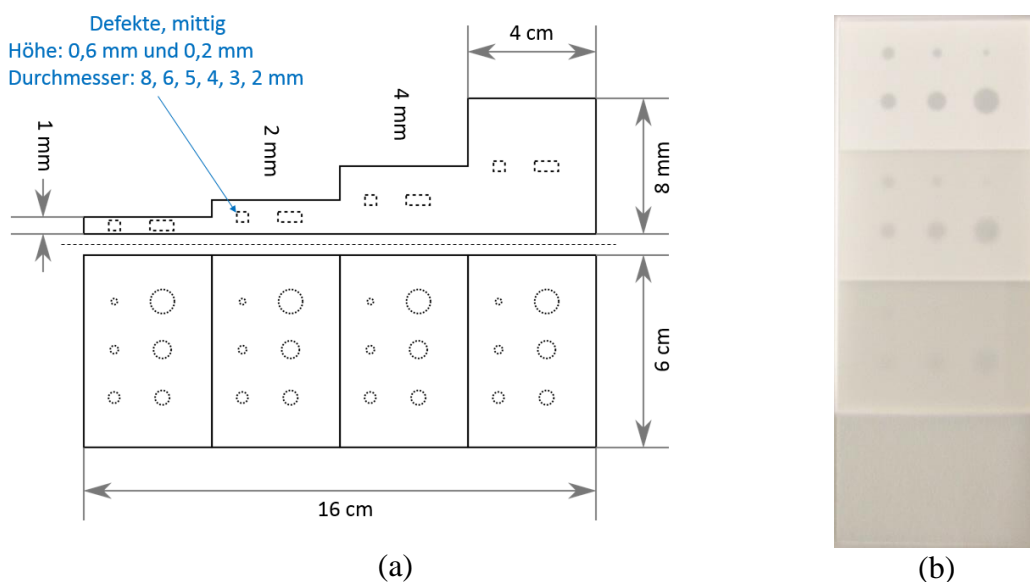


Abb. 1. (a) Schematische Darstellung der Probekörper (Seitenansicht nicht maßstabsgetreu). Die Stufenkeile sind mit zylinderförmigen, beidseitig überdeckten Defekten unterschiedlicher Größe versehen. Die Variation im Durchmesser ist auf allen Proben identisch. Unterschiedliche Defekthöhen wurden in unterschiedlichen Proben realisiert. (b) Foto einer LS-Probe aus PA12. Die Defekte (hier 0,6 mm Defekthöhe) sind im Durchlicht erkennbar.

2.3 Probekörper

Bei den Probekörpern handelt es sich um Stufenkeile mit Stufenhöhen von 1, 2, 4 und 8 mm. Jeweils mittig in der Stufe wurden bei der Herstellung sechs beidseitig überdeckte künstliche Defekte (Delamination) eingefügt. Dabei wurden zwei Defekthöhen von 0,2 mm und 0,6 mm realisiert. In Abbildung 1 ist eine Skizze der Probekörper sowie ein Foto eines LS-Stufenkeils aus PA12 in Draufsicht dargestellt. Obwohl die Probekörper für beide AM-Verfahren identisch geplant sind, unterscheiden sie sich durch verfahrensspezifische Merkmale. So sind die Defekte der LS-Probekörper mit Polymerpulver gefüllt, während die Defekte der FLM-Probekörper nur als Lufteinschlüsse zu betrachten sind. Im Rahmen des Projektes wurden weiterhin Probekörper für die zerstörende Zugprüfung, mit Geometrien entsprechenden Standards, hergestellt. Alle Probekörper im Projekt werden am SKZ – Das Kunststoffzentrum gefertigt.

2.4 Künstliche Bewitterung

Für die künstliche Bewitterung werden die Proben in einem Bewitterungsgerät über 2000 h unterschiedlichen Witterungseinflüssen wie UV-Bestrahlung, Regen, Feuchte- oder Temperaturwechsel ausgesetzt. Die Bewitterung im künstlichen Bewitterungsgerät sichert die Kontrolle aller Beanspruchungsparameter und damit Wiederholbarkeit bzw. Reproduzierbarkeit. Des Weiteren wird, im Vergleich zur Freibewitterung, eine Beschleunigte Alterung ermöglicht. Die Gesamtdauer der Bewitterung ist dabei in drei gleichlange Phasen untergliedert, um den bewitterungsbedingten Alterungsfortschritt der Probekörper begleitend mit unterschiedlichen ZfP-Methoden zu charakterisieren.

3. Experimentelles

Für eine Qualitätssicherung von Kleinserien mit sehr geringen Stückzahlen ist der Einsatz zerstörungsfreier Verfahren unabdingbar. Methoden, die stichprobenartig zerstörend prüfen, können schon aus wirtschaftlicher Sicht von vornherein ausgeschlossen werden. Mit TT und UT werden hier zwei Verfahren benutzt, die bereits in der Praxis für zerstörungsfreie Prüfung (ZfP) eingesetzt werden. Dadurch ist zu erwarten, dass einer Implementierung in einen etwaigen Produktionsprozess ohne größere Hürden umsetzbar ist. Im Folgenden wird kurz auf die verwendeten experimentellen Techniken eingegangen.

3.1 Aktive Thermografie

Für die TT wurden Messungen mit Blitzanregung und mit Impulsanregung mittels Halogenlampen durchgeführt. Mit beiden Anregungsvarianten wurden sowohl in Reflexion- als auch in Transmissionskonfiguration Untersuchungen durchgeführt. Dabei kam ein Infratec ImageIR 8800 Infrarot(IR)-Kamerasystem mit gekühltem Quecksilber-Kadmium-Tellurid (MCT) Focal Plane Array Detektor zum Einsatz, womit der Spektralbereich zwischen 8 μm und 9,4 μm (langwelliger Infrarotbereich, LWIR) liegt. Um störende Wärmestrahlungen der Anregungsquellen weitestgehend zu minimieren, wurden vor diese jeweils Infrarotfilter aus Plexiglas montiert.

Für die Blitzanregung wurden vier Hensel EH Pro 6000 Blitzlampen genutzt, die in einem Abstand von 40 cm zur Probe aufgebaut waren. Die Pulslänge des erzeugten Blitzes liegt im Bereich von 3 ms, die aufgenommene Energie pro Blitzlampe liegt bei 6 kJ. Für die Impulsanregung wurden zwei Hedler H25s Halogenlampen mit einer Leistung von jeweils 2 kW verwendet. Diese wurden in einem Anstand von 50 cm zum Probekörper angebracht.

Zusätzlich zur thermografischen Messung wurde Form und Dauer des Anregungsimpulses mit einer Fotodiode gemessen. Als Anregungszeiten wurden 15 s und 30 s gewählt.

Bereits während der Anregung wurden Thermogramme der Probekörper aufgenommen. Inklusiv der Abkühlung wurden dabei für die Blitzanregung Sequenzen mit einer Dauer von 62 s und einer Bildwiederholrate von 50 Hz erstellt. Für die Impulsanregung wurde eine Dauer von 160 s und eine Bildwiederholrate von 25 Hz gewählt, um den längeren Prozesszeiten gerecht zu werden.

3.2 Ultraschall

Für das UT wurden zwei unterschiedliche Prüfkopfarten getestet: ein Impuls-Echo-Prüfkopf (IE-Prüfkopf) und ein Seder-Empfänger-Prüfkopf (SE-Prüfkopf). Beide waren allerdings auf Untersuchungen an Stahl optimiert, und damit auf eine Schallgeschwindigkeit von 5920 m/s. Die Mittenfrequenzen waren 2,25 MHz (IE) und 2 MHz (SE). Für den Versuch wurden die Proben mit einem Spurabstand von 1 mm unidirektional abgerastert. Dabei wurde in 1 mm Schritten eine Messung durchgeführt. Als Kopplungsmittel wurde Wasser benutzt.

3.3 Weitere spektroskopische Verfahren

Zur chemischen Charakterisierung der Bewitterung, wird vor allem auf spektroskopische Verfahren zurückgegriffen. Neben der Messung der spektralen Reflexion und der Attenuated Total Reflexion IR-Spektroskopie (ATR-IR) wird auch UV-VIS Spektroskopie in Transmissionskonfiguration verwendet. Abbildung 2 zeigt exemplarisch zwei Spektren der verwendeten Materialien, rotes ABS und PA12, jeweils gemessen an der 1 mm Stufe eines Stufenkeils ohne künstliche Defekte. Zu erkennen sind die Absorptionskanten im sichtbaren Spektralbereich. Für das nicht pigmentierte PA12 liegt sie bei einer Wellenlänge von 400 nm, während sie durch den roten Farbstoff im ABS zu 620 nm verschoben ist. Jenseits dieser Absorptionskanten, hin zu größeren Wellenlängen geht die Extinktion auf Werte kleiner eins zurück, sodass, abhängig von Streuung und Reflexion, ein signifikanter Anteil der Strahlung das Material durchdringen kann. Die Materialien sind in diesem Bereich teiltransparent.

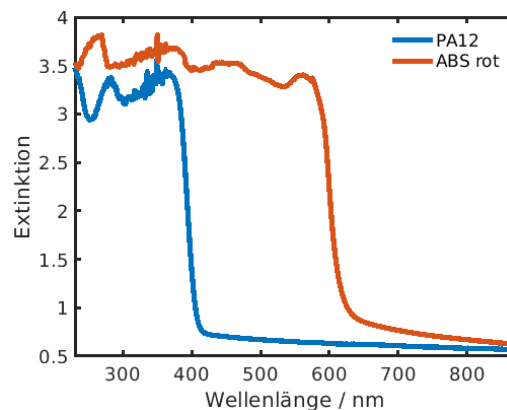


Abb. 2 UV-VIS-Transmissionsspektren einer PA12- und ABS-Probe ohne Defekte (1 mm Stufe).

zwischen Blitz- und Halogenanregung an der ABS-Probe. Mit der Halogenanregung kann ein deutlich höherer Temperaturkontrast erreicht werden. Mit der Halogenanregung (vgl. Abb. 3a und b) werden deutlich höhere Temperaturanstiege erreicht als mit der Blitzanregung (vgl. Abb. 3c und d), d. h. bei der Halogenanregung wird deutlich mehr Wärme absorbiert und damit ein höherer Temperaturkontrast erreicht. Dieser lässt sich hier über die Dauer des Anregungsimpulses optimieren, was für die Blitzanregung nicht möglich ist. Der Vergleich der Kontraste der Messungen mit den Halogenlampen an Probekörpern mit unterschiedlichen Materialien (Abb. 4b) zeigt, dass unabhängig von der Art der Anregung auch das Material und/oder das Herstellungsverfahren einen großen Einfluss auf den Kontrast hat. Einerseits hat die unterschiedliche Absorption einen Einfluss auf die Erwärmung der Probe. In diesem Fall ist der Kontrast für die rote ABS-Probe deutlich höher, da durch den roten Farbstoff ein größerer Spektralbereich zur Absorption zur Verfügung steht (vgl. Abb. 2). Andererseits wirkt sich die Pulverfüllung der Defekte in den PA12-Proben auf die Messung aus. Durch einen geringeren thermischen Übergangswiderstand wird eine Detektion der Defekte mittels Thermografie erschwert.

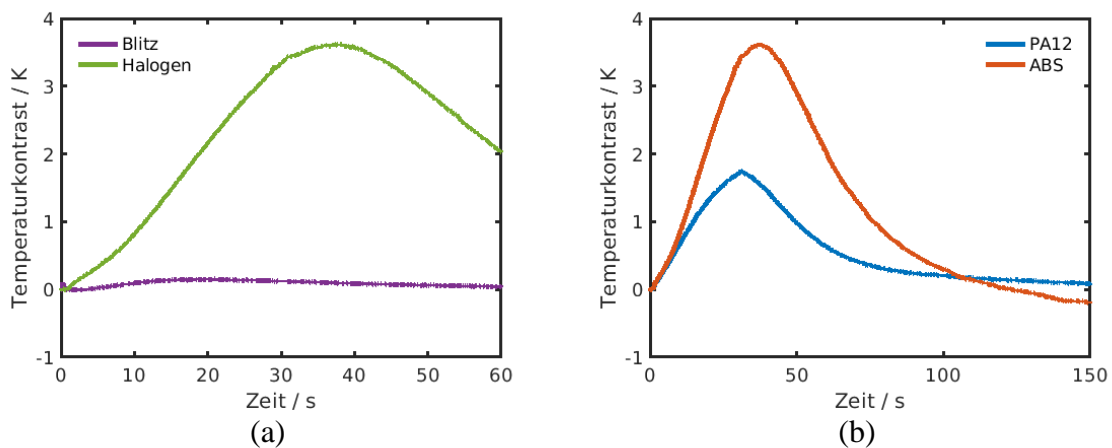


Abb. 4 Vergleich der Kontraste zwischen Defektbereich und Hintergrundbereich. (a) Anregung mittels verschiedener Quellen, ausgewertet an der roten ABS-Probe, 4 mm Stufe, größter Defekt mit einer Höhe von 0,6 mm. (b) Messungen an Proben mit unterschiedlichen Materialien. Jeweils mit Anregung mit Halogenlampen und an der 4 mm Stufe, größter Defekt mit einer Höhe von 0,6 mm, bestimmt.

4.2 Ultraschall

Abbildung 5 zeigt beispielhaft Ergebnisse aus dem Bildgebenden Ultraschall. Mit beiden verwendeten Prüfköpfen (IE- und SE-Prüfkopf) ließen sich die Defekte sowohl in der direkten Reflexion (helle Bereiche jeweils in der rechten Stufe in Abb. 5), als auch in der Abschattung des Rückwandreflexes (dunklere Bereiche in den drei linken Stufen in Abb. 5) darstellen. Der IE-Kopf lieferte für die direkte Reflexion dabei etwas bessere Ergebnisse. Dies ist hauptsächlich auf die Optimierung der Prüfköpfe auf Stahl zurückzuführen, da sich dadurch der Messpunkt des SE-Kopfes zu größeren Abständen verschiebt.

Im Gegensatz zur Thermografie lassen sich mit UT die Defekte in der 8 mm Stufe sehr gut darstellen. Allerdings sind die flacheren Defekte in der 1 mm Stufe mit dem IE-Kopf aufgrund seines Todbereiches nicht mehr abbildbar. Dieses Problem lässt sich mit dem SE-Prüfkopf umgehen.

Generell ist das Prüfergebnis vor allem von der Einkopplung und damit von der Oberflächenbeschaffenheit der Probekörper abhängig. Diese kann sich bei additiv gefertigten Kunststoffbauteilen stark unterscheiden und hängt ihrerseits von der Fertigungsmethode und den Fertigungsparametern ab. Alle gemessenen LS-Probekörper weisen eine ähnliche Oberflächenbeschaffenheit auf, was auch vergleichbare Messbedingungen ermöglichte. Bei den FLM-Probekörpern ist vor allem das Druckbett der entscheidende Fertigungsparameter.

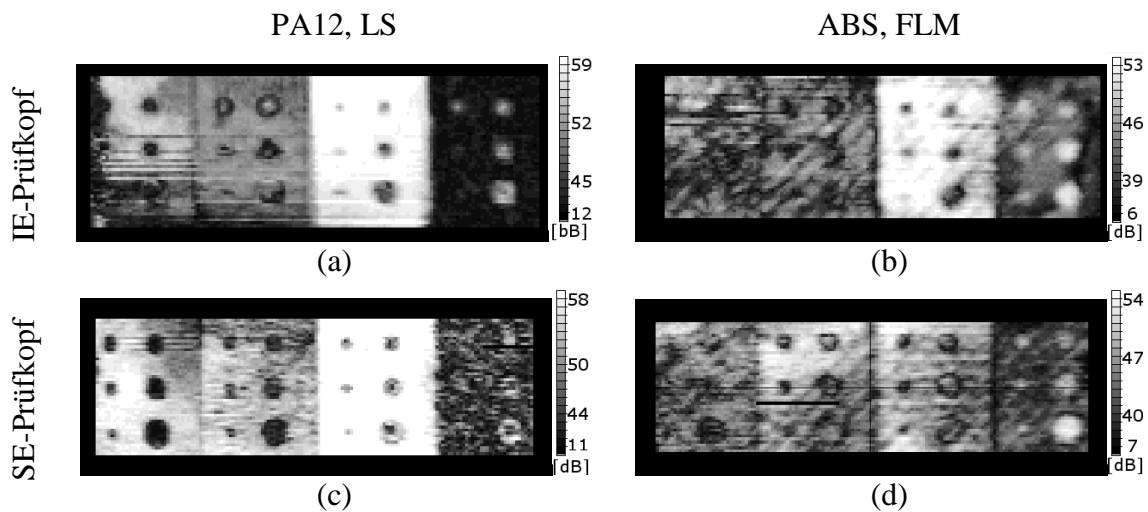


Abb. 5 Exemplarische Ergebnisse des bildgebenden Ultraschalls. Oben: Messungen mit IE-Prüfkopf, unten: Messungen mit SE-Prüfkopf, links: SL-Probekörper aus PA12 mit Defekthöhe 0,6 mm, rechts: FLM-Probekörper aus rotem ABS mit Defekthöhe 0,2 mm. Zu sehen ist jeweils der direkte Reflex der Defekte in der 8 mm Stufe und die Abschattung des Rückwandreflexes durch die Defekte in den restlichen Stufen.

Je nach Druckbett unterscheidet sich die Rauigkeit der zur Messung benutzten Oberfläche. Die geringste Rauigkeit und damit die besten Ergebnisse in der UT wurden mit einem Druckbett aus Glas erzielt.

Trotz der vielversprechenden Resultate der UT gibt es eine Problemstellung die eine Anwendung für die Charakterisierung während der Bewitterung ausschließt. Durch den Andruck der Metallischen Prüfkopfs auf die Kunststoffbauteile, wird während der Messung geringfügig Material von der Oberfläche abgetragen. Dies stellt einen extremen Nachteil dar, da chemische Bewitterungseffekte vor allem die Oberfläche betreffen. Daher kann die berührende UT im Kontext des Projektes nicht als hundertprozentig zerstörungsfrei betrachtet werden.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Insgesamt ist TT nach bisherigem Kenntnisstand besser geeignet um oberflächennahe Defekte zu detektieren, während sich UT mit den verwendeten Prüfköpfen besser für die tieferen Defekte eignet. Dabei hat TT den Vorteil, dass die Messung komplett berührungsfrei stattfindet und die Probe nicht abgerastert werden muss. Bei beiden Verfahren können durch Optimierung der Messparameter und der Datenauswertung noch potenziell bessere Ergebnisse erreicht werden. Beim TT ist vor allem mit dem Einsatz fortgeschrittener Auswertungsmethoden wie Puls-Phasen-Thermografie (PPT) oder Thermal Signal Reconstruction (TSR) noch eine Verbesserung der Defektdetektion zu erwarten. [7,8] Für die Bestimmung von thermophysikalischen Materialparameter (Temperaturleitfähigkeit) sind für TT zusätzlich Messungen mit beschichteten Proben geplant, um den Effekt der Teiltransparenz zu umgehen. Beim UT würden vor allem speziell optimierte SE- und Phased-Array Prüfköpfe eine deutliche Verbesserung der Detektion der oberflächennahen Defekte bringen. Daher sind hier im Rahmen des Projektes zusätzlich Messungen mit einem Phased-Array-System geplant. Mit diesem ist es möglich, den Fokuspunkt des Ultraschallsignals unabhängig vom Material in unterschiedlicher Tiefe einstellen. Um das Problem mit der Beschädigung der Probekörperoberfläche zu adressieren, sind weiterhin Messungen mit Tauchtechnik oder Luftultraschall geplant.

Eine quantitative Aussage der Defekttiefe setzt bei beiden Verfahren genaue Kenntnisse der entsprechenden Materialparameter voraus (Temperaturleitfähigkeit bei TT, Ultraschallgeschwindigkeit bei UT), welche im Bereich der additiven Fertigung stark variieren können. Um diese Variation in Teilen zu untersuchen, werden im weiteren Verlauf des Projektes Probekörper mit unterschiedlichen Prozessparametern verglichen. Im Anschluss wird an diesen Probekörpern der Einfluss der Bewitterung untersucht.

Danksagung

Gefördert durch Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages. IGF-Vorhaben 19151 N – „Zerstörungsfreie Charakterisierung und Qualitätssicherung der Materialeigenschaften und Beständigkeit additive gefertigter Kunststoffe“.

Referenzen

- [1] VDI-Richtlinie VDI 3405, Blatt 1, Additive Fertigungsverfahren, Rapid Manufacturing - Laser-Sintern von Kunststoffbauteilen – Güteüberwachung. Beuth Verlag Berlin, Oktober 2013
- [2] J. Breuninger, R. Becker, A. Wolf, S. Rommel, A. Verl, Generative Fertigung mit Kunststoffen. Springer Vieweg Berlin Heidelberg, 2013, 257 Seiten
- [3] A. Gebhardt, Additive Fertigungsverfahren, Hanser Verlag München, 5. Auflage, 2016, 711 Seiten
- [4] J. S. Cuellar, G. Smit, D. Plettenburg, A. Zadpoor. Additive manufacturing of non-assembly mechanisms. Additive Manufacturing 2018; 21:150-158
- [5] Shaina Chang, Analysis of Polymer Standards by Fourier Transform Infrared Spectroscopy-Attenuated Total Reflectance and Pyrolysis Gas Chromatography/Mass Spectroscopy and the Creation of Searchable Libraries. Research Report FSC 630 Forensic Science Internship Marshall University Forensic Science Program, 2012
- [6] M. A. Peydro, D. Juarez, S. Sanchez-Caballero, F. Parres. Study of the thermal properties acrylonitrile butadiene styrene – high impact polystyrene blends with styrene ethylene butylene styrene. ANNALS OF THE ORADEA UNIVERSITY, Fascicle of Management and Technological Engineering, ISSUE #1, 2013
- [7] SM. Shepard. Advances in pulsed thermography. Proceedings of SPIE 4360, Thermosense XXIII, 511, 2001
- [8] X. Maldaque, S. Marinetti. Pulse phase infrared thermography. J. Appl. Phys. 1996; 79:2694