

Zerstörungsfreie Charakterisierung der Alterung additiv gefertigter Kunststoffbauteile

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

¹ BAM, Berlin

² SKZ – Das Kunststoff-Zentrum, Würzburg

Kontakt E-Mail: christian.metz@bam.de

Kurzfassung. Das vorgestellte Projekt beschäftigt sich mit den optischen, thermophysikalischen und mechanischen Materialeigenschaften von additiv gefertigten Kunststoffteilen und deren Alterung. Dazu wurden mittels Fused Layer Modeling (FLM) Probekörper aus ABS hergestellt, die anschließend für drei Monate einer künstlichen Bewitterung unterzogen wurden. Die dabei erzeugte definierte Alterung wurde nach drei Zeitabschnitten jeweils mit zerstörungsfreien Methoden charakterisiert. Dabei wurde neben den spektroskopischen Standardmethoden auch die aktive Thermografie eingesetzt. Die Ergebnisse zeigen, dass sich mittels der Thermografie sowohl chemische Veränderungen als auch mechanische Schädigungen (Fehlstellen) darstellen lassen. Die Bewitterung beeinflusst die Teiltransparenz der Proben zumindest im sichtbaren Spektralbereich, was bei der Charakterisierung der Fehlstellen, die mittels optisch angeregter aktiver Thermografie detektiert wurden, berücksichtigt werden muss.

1 Einleitung

Die Additive Fertigung (engl. additive manufacturing - AM) befindet sich derzeit in der Transformation vom vorrangigen Einsatz in der Entwicklung von Prototypen hin zur Integration in die industrielle Produktionskette. Forschung und Entwicklung konzentrieren sich dabei vor allem auf die Weiterentwicklung von Verfahren zur Qualitätssicherung, z. B. bei der in-situ Prozessüberwachung oder der anschließenden zerstörungsfreien Prüfung. Indes finden sich kaum Studien, welche die möglicherweise abweichende Alterung und Langzeitstabilität additiv gefertigter Kunststoffbauteile gegenüber dem Fertigungszustand und im Vergleich zu konventionell hergestellten Komponenten untersuchen. Bis jetzt ist lediglich die Alterung der im Prozess verwendeten Ausgangsmaterialien im Zusammenhang mit der Wiederverwendung (z. B. im nächsten Druckprozess) gut untersucht. [1,2] Neben chemischen Veränderungen ist jedoch bei additiv gefertigten Bauteilen aufgrund des schichtweisen Aufbaus und der Anisotropie innerhalb der Lagen verstärkt mit physikalischen Veränderungen aufgrund der Bewitterung, wie Delaminationen, Poren oder Rissen, zu rechnen. Vor allem in sicherheitsrelevanten Einsatzgebieten ist daher eine detaillierte Charakterisierung und ein vertieftes Verständnis der Wirkung von Umwelteinflüssen auf die mechanischen und weiteren Materialeigenschaften der gefertigten Teile unabdingbar.



Das hier vorgestellte AiF-IGF-Projekt beschäftigt sich mit den Eigenschaften von additiv gefertigten Kunststoffteilen und wie sich diese unter dem Einfluss von wechselnden Witterungsbedingungen verändern. Dazu wurden am SKZ – Das Kunststoff-Zentrum – unter anderem Probekörper mittels des AM-Verfahrens Fused-Layer-Modeling (FLM) hergestellt. Die Probekörper wurden anschließend an der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) unter definierten Bedingungen künstlich bewittert, um eine beschleunigte Alterung hervorzurufen. Dabei wurden sie direkt nach der Herstellung und nach unterschiedlich langen Bewitterungszeiten mit verschiedenen Methoden charakterisiert. Neben Verfahren der Sichtprüfung (Fotos, Bilder mit Flachbettscanner, Mikroskopie) wurden spektroskopische Methoden eingesetzt, um den chemischen Alterungszustand näher zu untersuchen. Dabei handelt es sich zum einen um die Attenuated-Total-Reflection-Infrarot-Spektroskopie (ATR-IR), die eine Art chemischen Fingerabdruck des Untersuchungsobjekts liefert, und zum anderen um die spektralen Reflexions- und Transmissionsmessungen im ultravioletten und sichtbaren Spektralbereich (UV/VIS), die unter anderem die optische Erscheinung und den Gesamtfortschritt der Alterung des Prüfobjektes charakterisieren. [3] Mittels aktiver Thermografie (engl. thermographic testing - TT) konnten weiterhin Risse und Hohlräume detektiert werden, wobei die optische Anregung von den Änderungen der optischen Eigenschaften beeinflusst wird. Als Standardmethoden zur Bestimmung der Änderungen der mechanischen Eigenschaften im Zusammenhang mit der Alterung wurde die Zugprüfung eingesetzt. Im folgenden Beitrag werden Ergebnisse der Sichtprüfung, der UV/VIS-Spektroskopie und der aktiven Thermografie an bewitterten Acrylnitril-Butadien-Styrol (ABS)-Proben vorgestellt.

2 Additive Fertigung der Probekörper

2.1 Fused-Layer-Modeling (FLM)

Das FLM-Verfahren (auch als Fused Deposition Modelling, FDM, bezeichnet) hat sich bereits bis in den privaten Anwendungsbereich durchgesetzt und wird umgangssprachlich oft als 3D-Druck bezeichnet. Für den Herstellungsprozess liegt das Ausgangsmaterial als Kunststofffilament vor. Dieses wird in den Druckkopf eingeführt, in welchem es in eine heiße Düse gedrückt, dort aufgeschmolzen und auf einem sogenannten Druckbett aufgebracht wird. Der Druckkopf ist in lateraler Richtung verfahrbar, sodass es möglich ist, eine aufgeschmolzene Kunststoffbahn mit beliebiger Form auf dem Druckbett abzulegen. Um nun dreidimensionale Strukturen zu realisieren, wird mit dem Druckkopf zunächst eine Schicht des zu bearbeitenden Teils aus einzelnen Kunststoffbahnen aufgebaut. Anschließend wird der Druckkopf um eine Schichtdicke angehoben und die nächste Schicht gefertigt. Diese besteht wieder aus einzelnen aufgeschmolzenen Kunststoffbahnen, die eine Bindung zu der darunterliegenden Kunststofflage herstellen. So entsteht Schicht für Schicht ein reales Abbild des vorher am PC designten Bauteils.

Ein großer Vorteil des FLM im Vergleich zu anderen kunststoffbasierten AM-Verfahren ist die große Bandbreite an verfügbaren Ausgangsmaterialien. Im vorgestellten Projekt wurden die Probekörper aus ABS („ABS – Filament 1,75 mm natur“ von der Firma Herz) gefertigt.

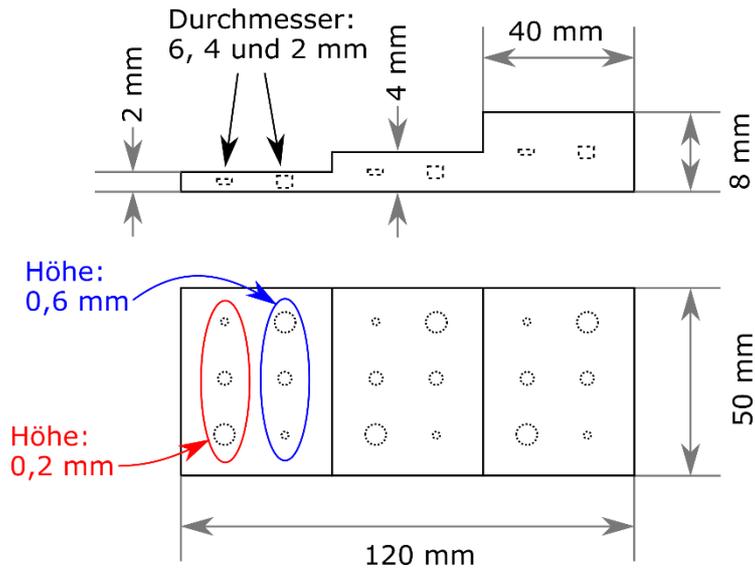


Abb. 1. Skizze (nicht maßstabsgetreu) der Stufenkeile (Seitenansicht oben, Aufsicht unten), die für die Studie als Probekörper entworfen wurden. Die nominellen Stufenhöhen sind 2 mm, 4 mm und 8 mm.

2.2 Probekörper

Für die Studie wurden Probekörper designt und am SKZ mittels des FLM-Verfahrens gefertigt. Dabei handelt es sich um Stufenkeile mit nominellen Stufenhöhen von 2, 4 und 8 mm. Jeweils mittig in den Stufen wurden sechs künstliche Hohlräume (vgl. Delaminationen) in Form von Zylindern in die Probekörper eingearbeitet. Es wurden Höhen von 0,2 und 0,6 mm und Durchmesser von jeweils 2, 4 und 6 mm realisiert. Über die Detektierbarkeit der Defekte wurde bereits an anderer Stelle berichtet, [4, 5] in diesem Artikel wird die Charakterisierung der Alterung mittels Thermografie beschrieben.

Abbildung 1 zeigt eine Skizze der zugrundeliegenden Geometrie. Im Projekt wurden außerdem verschiedene Fertigungsparameter realisiert. Dabei wurden Düsendurchmesser, Schichtdicke und Druckgeschwindigkeit variiert. Die hier vorgestellten Ergebnisse beziehen sich auf den Probekörper mit folgendem Parametersatz: Düsendurchmesser: 0,25 mm, Schichtdicke: 0,75 x Düsendurchmesser (ca. 0,2 mm) und Druckgeschwindigkeit: 30 mm/s. Weiterhin wurde für die Fertigung eine Hotend-Temperatur von 250 °C, eine Druckbetttemperatur von 110 °C und eine Bauraumtemperatur von 80 °C verwendet. Die Richtung der einzelnen Bahnen der Düse wurde von einer Lage zur nächsten um 90° gedreht, bzgl. der Kanten des Probekörpers hatten die Bahnen eine Orientierung von +45° und -45°. Die Proben sind nominell zu 100 % gefüllt und weisen nur die oben beschriebenen künstlich eingefügten Hohlräume auf. Als Referenz wurden zusätzlich Stufenkeile mit nominellen Stufenhöhen von 1, 2 und 4 mm gefertigt, welche keine künstlich eingebauten Hohlräume enthielten.

3 Experimentelles

3.1 Künstliche Bewitterung

Um bei den Probekörpern einen definierten Alterungszustand zu erzeugen, wurden sie für 3 Monate (2000 h) in einem Bewitterungsgerät (Weiss Global UV-Test 200) künstlich bewittert. Im Bewitterungsgerät wurden dazu Verhältnisse eingestellt, die denen

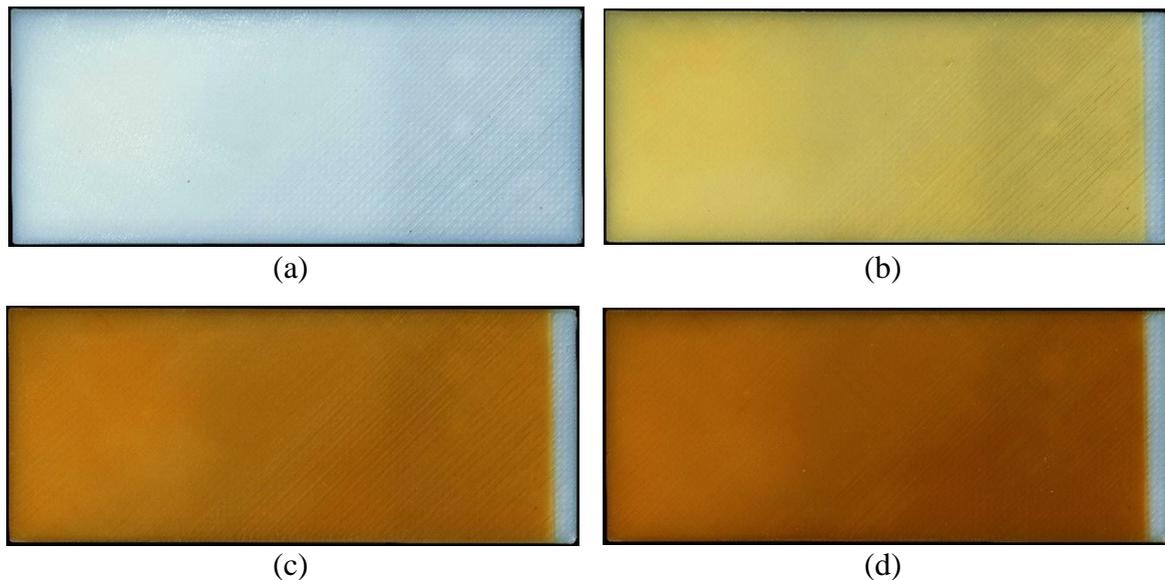


Abb. 2. Kontrastoptimierte Abbildungen (Scans) eines 3 Monate bewitterten Probekörpers. (a) Ausgangszustand, (b-d) nach jeweils 1, 2 und 3 Monaten künstlicher Bewitterung.

beabsichtigter Außenanwendungen additiv gefertigter Bauteile in der realen Umwelt nahekommen. Durch ein dynamisches Prüfprogramm bezüglich Temperatur-, und Feuchtewechsel bzw. Regenphasen und eine kontinuierliche UV-Bestrahlung lässt sich jedoch im Vergleich zur Freibewitterung eine beschleunigte Alterung erreichen, ohne in den Maximalbedingungen einzelner Beanspruchungsparameter zu überhöhen. Dabei ergeben sich durch die definierten und kontrollierten Beanspruchungsbedingungen wiederholbare und reproduzierbare Alterungseffekte. Konkret wurden die Proben neben einer permanenten UV-Bestrahlung wechselnden Phasen von künstlicher Beregnung sowie hoher, gemäßiger und niedriger Temperatur (50 °C, 25 °C und -10 °C) ausgesetzt.

Die UV-Strahlung initiiert in Kombination mit der erhöhten Temperatur und dem durch das Eindringen von Wasser verfügbaren Sauerstoff photolytische Abbaureaktionen im Polymer, die sich makroskopisch unter anderem in einer Vergilbung der Oberfläche äußern. [3] (vgl. Abbildung 2) Weiterhin tritt durch die Beanspruchung eine Versprödung der Oberfläche auf und es bilden sich Mikrorisse, in die wiederum vermehrt Wasser eindringen kann. Dies führt hier zum einsetzen einer Hydrolyse-Reaktion. Mit weiter fortschreitender Beanspruchungsdauer dringen die Alterungsprozesse in zunehmend tiefere Bereiche der Probe vor, wodurch auch mechanische Schädigungen eintreten können. Spannungen, die durch die großen Temperaturkontraste erzeugt werden, oder Eisbildung könnten zum Beispiel zu makroskopischen Rissen oder zum Ablösen von einzelnen Schichten beziehungsweise Kunststoffbahnen führen.

Die gesamte Bewitterung war dabei in drei Abschnitte von jeweils einem Monat unterteilt. Nach jedem Abschnitt wurden die Probekörper entnommen und der Alterungszustand mittels der nachfolgend beschriebenen Verfahren an immer denselben Proben (sich ändernden Alterungszustandes) untersucht. Dazu gehörten zur grundlegenden Dokumentation der Alterungseffekte Scan-Aufnahmen (Mikrotek ScanMaker i800plus) der Probekörper. Eine Auflösung von 1200 dpi und Farbkalibrierung machen es möglich, Details von Veränderungen abzubilden, die mit bloßem Auge nur schwer erkennbar sind. Bei gleichbleibenden Betriebsbedingungen ergibt sich somit eine farblich reproduzierbare Gesamtübersicht der Alterung des Probekörpers. (vgl. Abbildung 2)

3.2 UV/VIS-Spektroskopie

Für UV-VIS-Transmissionsspektroskopie wurde ein Varian UV/VIS Spektrometer Cary 300 mit einem spektralen Auflösungsvermögen von 0,2 nm verwendet. Gemessen wurde im Spektralbereich zwischen 220 nm und 700 nm in 1 nm Schritten, jeweils bis zu einem Signal-zu-Rauschverhältnis von 1000, bzw. bis zu einer Zeitbegrenzung von 10 s. Um die gesamte Strahlung richtungsunabhängig ohne Streulichtverluste hinter dem Probekörper zu erfassen, wurde eine Ulbricht-Kugel vor dem Detektor verwendet. Ausreichend gute Signal-zu-Rausch-Verhältnisse wurden nur bei Messungen an den 1 mm dicken Stufen der Probekörper erreicht.

3.3 Aktive Thermografie

Um zu zeigen, welche Alterungseffekte sich mittels Thermografie abbilden lassen, wurden die Probekörper mittels Blitzanregung untersucht. Dazu wurden vier Hensel EH Pro 6000 Blitzlampen eingesetzt, die in einem Abstand von 40 cm zur Probe montiert wurden. Die Anregungspulse hatten eine Dauer von 3 ms, wobei jede Blitzlampe eine Energie von 6 kJ aufnahm. Um störende Wärmestrahlung der Anregungsquellen vor und nach der Messung zu minimieren, wurden zusätzlich Filter aus Plexiglas verwendet.

Die Thermogramme wurden mit einem Infratec ImageIR 8800 Infrarot-Kamerasystem mit einem gekühlten Quecksilber-Kadmium-Tellurid (MCT) Focal Plane Array Detektor aufgenommen. Der sensitive Spektralbereich der Kamera liegt damit zwischen 8 μm und 9,4 μm (langwelliger Infrarotbereich, LWIR) und wurde ausgewählt, da hier die Probekörper näherungsweise opak sind. Die Kamera wurde für die Messungen in einem Abstand von 48 cm aufgestellt. Die hier vorgestellten Ergebnisse wurden in Reflexionsanordnung mit einer Bildwiederholrate von 50 Hz aufgenommen.

4 Ergebnisse

4.1 UV/VIS-Spektroskopie

Abbildung 3 zeigt die Ergebnisse der UV/VIS-Transmissionsspektroskopie vor und nach unterschiedlichen Zeiten der Bewitterung. Im unbewitterten Zustand (Abbildung 3 (a), blaue Kurve) lässt sich die Absorptionskante von ABS deutlich zwischen 300 und 400 nm

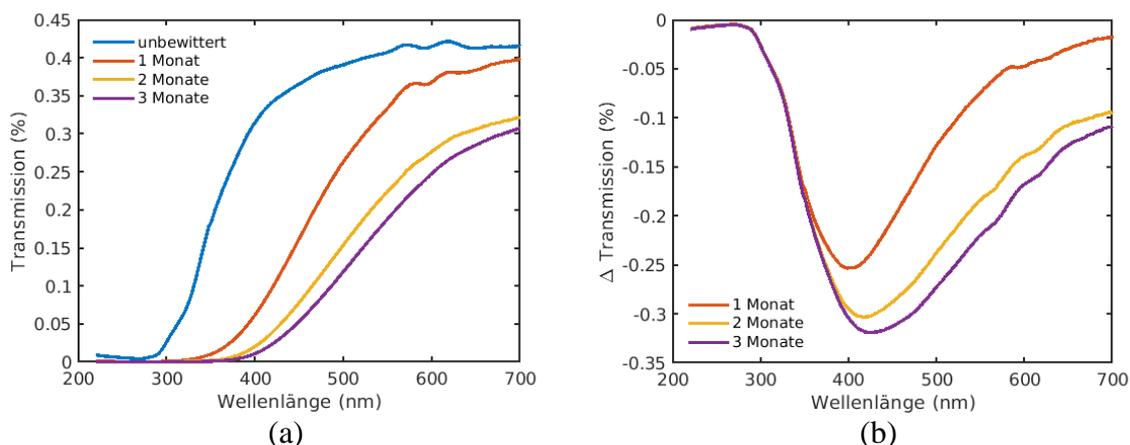


Abb. 3. Ergebnisse der UV/VIS-Messungen in Transmission (a), gemessen an der 1 mm Stufe und Änderung der Transmission im Vergleich zum Ausgangszustand als Differenzspektrum (b)

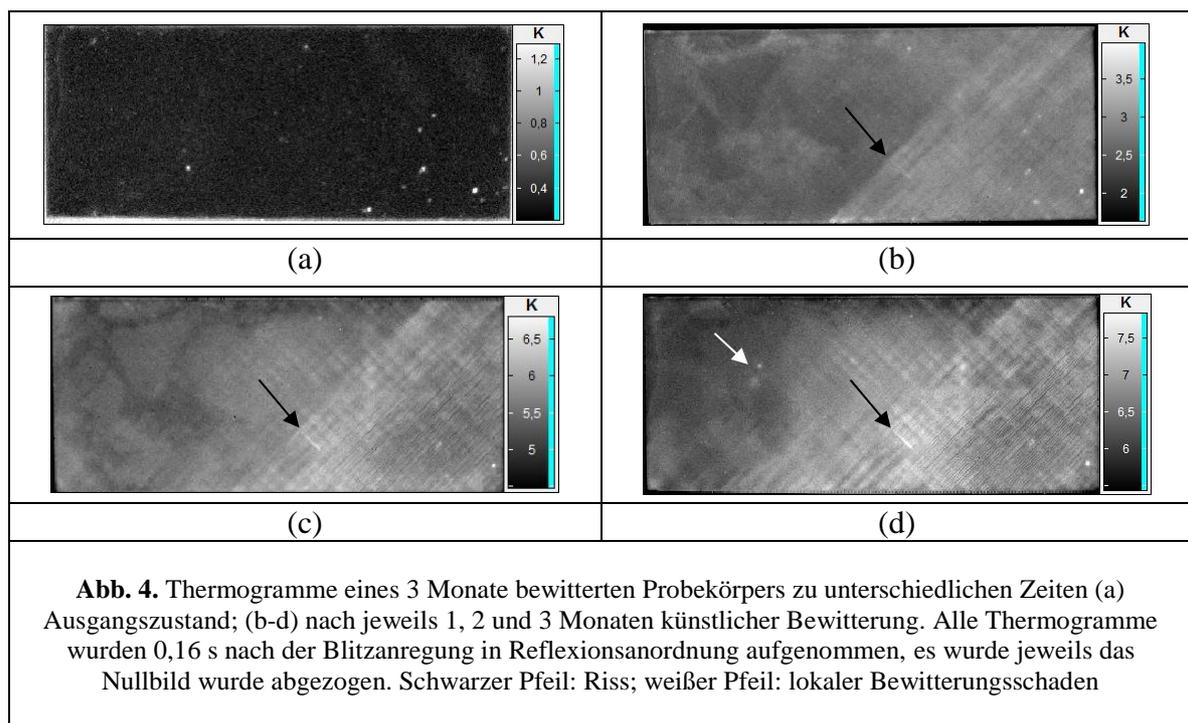
erkennen. Unterhalb von 300 nm ist das Material opak, während es Oberhalb von 400 nm teiltransparent ist. In diesem Spektralbereich wird elektromagnetische Strahlung also zu einem bedeutenden Teil transmittiert. Diese Tatsache stellt eine Herausforderung für die aktive Thermografie dar, da die optischen Anregungstechniken auf elektromagnetischer Strahlung im sichtbaren und nahen Infrarotbereich basieren. In dem Fall wird der Probekörper nicht wie gewünscht nur an der Oberfläche erwärmt, sondern näherungsweise entsprechend des Lambert-Beerschen Absorptionsgesetzes auch im Volumen darunter. Dies erschwert eine quantitative Auswertung deutlich.

Weiterhin lässt sich mit zunehmender Bewitterungsdauer eine Verschiebung der Absorptionskante zu größeren Wellenlängen und eine deutliche Abnahme der Transmission im teiltransparenten Bereich beobachten. Verursacht wird dieser Effekt durch die Vergilbung der bewitterten Oberfläche. Damit lässt sich schlussendlich der makroskopische Verlauf der chemischen Alterung an der Oberfläche darstellen.

Abbildung 3 (b) zeigt Differenzspektren, welche die Änderung der Transmission durch die Bewitterung in Bezug auf den Ausgangszustand aufzeigen. Einsetzend bei 300 nm liegt der Bereich der stärksten Änderung knapp unterhalb von 400 nm. Des Weiteren lässt sich eine Verlangsamung der spektralen Änderung mit zunehmender Bewitterungsdauer erkennen. Während die Änderung nach dem ersten Monat mit maximal -25 % noch sehr stark in Erscheinung tritt, fällt sie nach dem zweiten Monat mit maximal -30 % (5 % Differenz) schon geringer aus. Ein weiterer Monat Bewitterung bewirkt dann nur noch eine Abnahme um 2 % auf maximal -32 % Transmission im Vergleich zum Ausgangszustand.

4.2 Aktive Thermografie

Abbildung 4 zeigt Thermogramme, die zu den jeweiligen Unterbrechungen der Bewitterung aufgenommen wurden. Aus der gesamten Sequenz ist dabei immer das Thermogramm derselben Probe 0,16 s nach der Blitzanregung dargestellt, wobei das „Nullbild“ (Thermogramm vor der Blitzanregung) jeweils von der gesamten Sequenz abgezogen wurde. Daher zeigen die dargestellten Thermogramme nur die Temperaturänderungen aufgrund der Blitzanregung. Im unbewitterten Zustand (Abbildung 4 (a)) ist der Probekörper aufgrund der Teiltransparenz von ABS nur schwer zu erwärmen. Ein großer Teil der Strahlung wird



transmittiert und geht für die Messung verloren. Somit fällt der Temperaturanstieg mit 0,15 K auch sehr gering aus. Details der Probekörperstruktur lassen sich damit nicht abbilden. Zu sehen sind jedoch Staub und Schmutzpartikel, die an der Oberfläche des Probekörpers anhafteten. Da diese normalerweise im Anregungsspektrum stark absorbieren, sind sie im Thermogramm gut sichtbar. Die Scan-Aufnahmen der Probekörper zeigen, dass es sich dabei um Partikel mit Ausdehnungen unterhalb von 0,5 mm handelt.

Mit fortschreitender Vergilbung durch die Bewitterung (Abbildung 4 (b-d)) wird ein deutlich größerer Anteil der Anregungsenergie absorbiert. Somit werden Strukturen des Probekörpers erkennbar. Eindeutig lässt sich die Richtung, in der die Kunststoffbahnen im Druckprozess abgelegt wurden, identifizieren. In diesem Fall wurde der Probekörper im Bezug zur unteren Kante mit um 45° orientierten Kunststoffbahnen ausgefüllt. Im rechten Teil des Probekörpers befindet sich ein unterextrudierter Bereich, der auch auf den Scan-Aufnahmen zu erkennen ist. Dieser entsteht, wenn der Materialfluss aus der Düse während des Druckvorgangs zu gering für die eingestellte Geschwindigkeit des Druckkopfes ist, oder der Spurbstand beziehungsweise die Schichtdicke zu groß gewählt wurde. Die abgelegten Kunststoffbahnen werden zu dünn und bilden keine geschlossene Schicht. Somit kann während der Bewitterung Wasser zwischen die einzelnen Bahnen eindringen, was für eine verstärkte Alterung unterhalb der eigentlichen Probenoberfläche sorgt. Vor allem im Thermogramm nach einem Monat Bewitterung (Abbildung 4 (b)) ist dieser Bereich durch eine stärkere Erwärmung deutlich zu erkennen.

Weiterhin sieht man in den drei Thermogrammen des bewitterten Probekörpers einen Riss (Abbildung 4, schwarzer Pfeil), der in Richtung der Bahnen in der Lage unterhalb der obersten Schicht orientiert ist. Ein Vergleich mit den Scan-Aufnahmen zeigt, dass dieser Riss schon vor der Bewitterung erkennbar war. Durch den geringen Temperaturanstieg ist er aber im Thermogramm des unbewitterten Probekörpers (Abbildung 4 (a)) nicht zu sehen.

Ein weiteres Merkmal ist im Thermogramm nach abgeschlossener Bewitterung zu sehen. Im linken Bildteil gibt es einen auffälligen Punkt (Abbildung 4(d), weißer Pfeil). Der Vergleich mit den Scan-Aufnahmen zeigt, dass sich an dieser Stelle ein mechanischer Bewitterungsschaden befindet, der im Thermogramm deutlich besser zu erkennen ist.

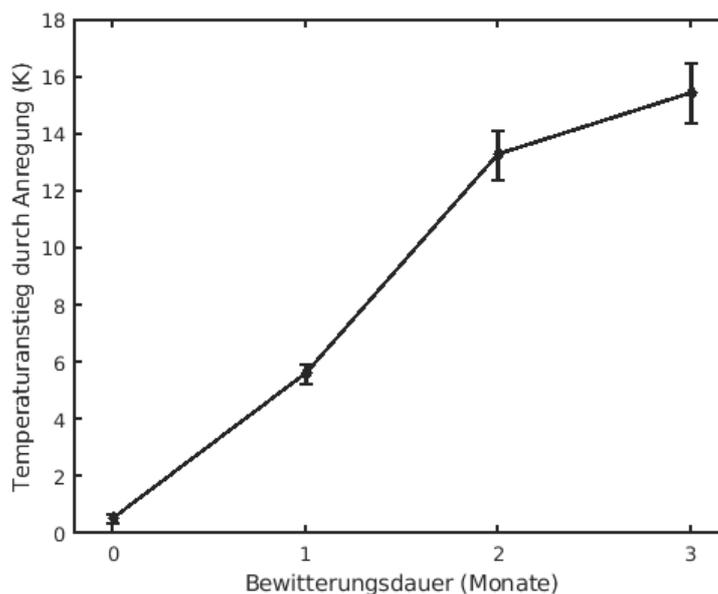


Abb. 5. Maximaler Temperaturanstieg der Thermografie-Messungen zu unterschiedlichen Altersstadien. Die Werte sind über die gesamte Oberfläche des Probekörpers gemittelt, die Fehlerbalken entsprechen der Standardabweichung. Die Blitzanregung erfolgte in Reflexionsanordnung, ein Nullbild wurde abgezogen.

Um den Bewitterungsverlauf quantitativ zu verfolgen, lässt sich der über die Probenoberfläche gemittelte Temperaturanstieg durch die Anregung in Abhängigkeit zur Bewitterungszeit darstellen. Dies zeigt Abbildung 5. Der Verlauf spiegelt im Wesentlichen die Ergebnisse der UV/VIS-Messungen wieder. Wie bereits erwähnt, erwärmt sich der Probekörper bei der Messung vor der Bewitterung nur sehr gering. Mit zunehmender Vergilbung wird dann jedoch mehr und mehr Anregungsenergie absorbiert und der Temperaturanstieg wird höher. Der Kurvenverlauf in Abbildung 5 beschreibt damit den Grad der chemischen Alterung in Form von Vergilbung der Probekörperoberfläche. Zu erkennen ist, wie im Fall der UV/VIS-Messungen, eine einsetzende Sättigung nach dem zweiten Bewitterungsmonat.

5 Fazit

Der Großteil der Standardmethoden zur Charakterisierung des Alterungsverhaltens konzentriert sich auf die Untersuchung der chemischen Alterung, wie zum Beispiel die eingangs aufgeführten spektroskopischen Methoden. Alterungseffekte, wie beispielsweise Risse, lassen sich durch Sichtprüfung (Fotos, Bilder mit Flachbettscanner, Mikroskopie) dokumentieren und schlagen sich natürlich in den Ergebnissen von zerstörenden Prüfungen zur Ermittlung der mechanischen Eigenschaften nieder.

Bei additiv gefertigten Teilen, speziell beim FLM-Verfahren, ist im Vergleich zu konventionell gefertigten Teilen verstärkt mit Alterungseffekten zu rechnen. Die Thermografie kann daher als sinnvolle Erweiterung der Standardverfahren genutzt werden, um diese nachzuweisen. Weiterhin bietet die Thermografie als bildgebendes Verfahren den Vorteil, sowohl lokale Effekte abzubilden, als auch generelle Aussagen, gemittelt über einen Bereich des Probekörpers, zu machen. Dies wird hier am Beispiel der absorbierten Anregungsenergie als Maß für den Fortschritt der makroskopischen sichtbaren, chemischen Alterung aufgezeigt.

6 Danksagung

Gefördert durch das 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“.

7 Referenzen

- [1] Peng Chen, Mingchen Tang, Wei Zhu, Lei Yang, Shifeng Wen, Chunze Yan, Zhijun Ji, Hai Nan, Yusheng Shi: “Systematical mechanism of Polyamide-12 aging and its micro-structural evolution during laser sintering” in Polymer Testing, Volume 67, 2018, Pages 370-379
- [2] Antal Boldizar, Kenneth Möller: „Degradation of ABS during repeated processing and accelerated ageing” in Polymer Degradation and Stability, Volume 81, Issue 2, 2003, Pages 359-366
- [3] Wypych, G. (Hrsg.). Handbook of Material Weathering. ChemTec Publishing, 4th edition, Toronto 2008. ISBN 978-1-895198-38-6. Kapitel 13, “Methods of weathered specimen evaluation”.
- [4] P. Franz, C. Metz, D. Brackrock, C. Fischer, V. Wachtendorf, C. Maierhofer: „Zerstörungsfreie Charakterisierung und Qualitätssicherung der Materialeigenschaften und Beständigkeit additiv gefertigter Kunststoffteile“ in DGZfP-Berichtsband BB 166, DGZfP-Jahrestagung 2018, 07.-09.05. - Leipzig (ISBN: 978-3-940283-92-4)
- [5] C. Metz, P. Franz, C. Fischer, V. Wachtendorf, C. Maierhofer: „Active thermography for quality assurance of 3D-printed polymer structures” in DGZfP-Proceedings BB 167, QIRT 2018, 25.-29.06. – Berlin (ISBN 978-3-940283-94-8)