Polymer Service GmbH Merseburg

An-Institut an der Hochschule Merseburg

Polymer Service GmbH Merseburg Eberhard-Leibnitz-Str. 2, 06217 Merseburg

Investitionsbank Sachsen-Anhalt
Innovation und Technologie 1
Domplatz 12
39104 Magdeburg

Geschäftsfeld
Kunststoffprüfung und Kunststoffdiagnostik

Ansprechpartner
Prof. Dr. Wolfgang Grellmann
Geschäftsführer

Tel. +49 (0) 3461 46 2777
Fax +49 (0) 3461 46 2592
E-Mail: wolfgang.grellmann@psm-merseburg.de
www.psm-merseburg.de

Merseburg, 15.12.2020

Sachbericht

für das Gemeinschaftsprojekt

Prognose des Einsatzverhaltens 3D-gedruckter Bauteile mittels bruchmechanischer Ansätze

Kurztitel: FFD-Crack

Mittelgeber:	Investitionsbank Sachsen-Anhalt
Zuwendungsbescheid-Nr.	1704/00066
Projektlaufzeit:	18.04.2017 – 17.04.2020
Bewilligungszeitraum:	18.04.2017 – 17.07.2020
Berichtszeitraum:	01.04.2018 – 17.04.2020
Berichterstatter:	Polymer Service GmbH Merseburg
Kooperationspartner:	Fraunhofer-Institut für Mikrostruktur von Werkstoffen und Systemen (IMWS), Halle

Prof. Dr. Wolfgang Grellmann
Geschäftsführer Polymer Service GmbH Merseburg

1 Aufzählung der wichtigsten wissenschaftlich-technischen Ergebnisse und anderer wesentlicher Ereignisse

Die Forschungsarbeiten in den Arbeitspaketen (AP1, AP4, AP5, AP7, AP8, AP12 und AP13 durch PSM allein sowie AP14, AP17, AP18 und AP19 zusammen mit dem IMWS) wurden durch die Polymer Service GmbH Merseburg (PSM) planmäßig begonnen, entsprechend der in der jeweiligen Laufzeit formulierten Aufgabenstellungen bearbeitet und erfolgreich zum Abschluss gebracht. Die dabei erhaltenen Ergebnisse werden im Folgenden für die einzelnen Arbeitspakete gesondert dargestellt. Die restlichen Arbeitspakete (AP2, AP3, AP6, AP9, AP10, AP11, AP15 und AP16) wurden durch das Fraunhofer-Institut für Mikrostruktur von Werkstoffen und Systemen (IMWS) in Halle allein bearbeitet.

AP 1: Verbundkonzept
Laufzeit: 18.04.2017 – 17.04.2020

Die Zusammenarbeit der beiden Kooperationspartner gestaltet sich außerordentlich konstruktiv und vertrauensvoll. Die Partner führen auftretende Fragen und kleinere Probleme bei der Bearbeitung des Projektes umgehend zu einer, für alle Seiten einvernehmlichen Lösung. Bereits vor dem Kick-Off-Meeting am 11.12.2017 bestand ein enger Kontakt per Telefon und E-Mail. Auch auf dem zweiten und dritten stattgefundenen Treffen der Partner am 20.03.2018 und 19.03.2019 fand ein intensiver Austausch und eine Ziel führende Diskussion der inhaltlich-organisatorischen Vorgehensweise und der Forschungsergebnisse statt. Die Partner haben dabei jeweils einen Kurzvortrag präsentiert, in denen u. a. die jeweiligen spezifischen Teilaufgaben der Projektpartner und das Projektziel des Verbundvorhabens nochmals dargelegt worden sind, Ergebnisse erläutert und diskutiert worden sind sowie die Verwertung der Ergebnisse in Form von studentischen Qualifizierungsarbeiten bzw. Vorträgen und Fachaufsätzen aufgezeigt worden ist. Gegenseitige Kontakte bestanden per E-Mail und telefonisch auch zwischen den Treffen.

Projektbezogene Begriffe wie Rapid-Verfahren, Fused Deposition Modeling, Selektives Lasersintern, Porosität – FDM-Werkstoffe, Mixed-Mode-Beanspruchung, RCT-Prüfkörper u. a. zur Aufnahme in Version 10 des von W. Grellmann, C. Bierögel und K. Reincke herausgegebenen „Lexikon Kunststoffprüfung und Diagnostik“ (siehe http://www.polymerservice-merseburg.de/wiki-lexikon-kunststoffpruefung) wurden bzw. werden derzeit weiter vorbereitet. Das zu Projektbeginn erstellte Lastenheft wurde fortlaufend mit den aktuellen Projektergebnissen gepflegt.

AP2: Modellierung des Thermo-Mechanischen Verhaltens zur Ermittlung von fertigungsprozessbedingten Eigenspannungen
Laufzeit: 18.04.2017 – 17.01.2018

Dieses Arbeitspaket wurde durch das Fraunhofer-Institut für Mikrostruktur von Werkstoffen und Systemen (IMWS) in Halle bearbeitet.

AP3: Experimentelle Bestimmung der Eigenspannungen in Prüfkörpern
Laufzeit: 18.07.2017 – 17.04.2017

Dieses Arbeitspaket wurde durch das Fraunhofer-Institut für Mikrostruktur von Werkstoffen und Systemen (IMWS) in Halle bearbeitet.

AP4: Herstellung verschiedenster Prüfkörper mittels FDM-Verfahrens
Laufzeit: 18.04.2017 – 17.04.2019

Als wesentlichste Voraussetzung für die Prüfkörperherstellung mittels des FDM-Verfahrens wurde im Dezember 2017 ein Fused Filament Fabrication (FFF) 3D-Drucker vom Typ HT500.2 (**Bild 1**) der Fa. Kühling&Kühling GmbH, Kiel beschafft inklusive von Modellmaterialien in Form von Kunststofffilamenten auf der Basis von Polycarbonat (PC), Polyethylenterephthalat Glycol (PETG), Acrylnitril-Butadien-Styren-Copolymer (ABS), Polyamid 12 (PA12), Polyamid 6.66 (PA6.66) Polyvinylalkohol (PVA) und schlagzähes Polystyren (PS-HI). Eine Anwender-schulung fand bei Inbetriebnahme des Druckers durch die Fa. Kühling&Kühling am 07.12.2017 vor Ort (in Merseburg) für die mit der Bedienung des 3D-Druckers beauftragten Mitarbeiter von PSM statt. Im Gegensatz zu anderen am Markt erhältlichen 3D-Druckern der im Rahmen eines Forschungsvorhabens finanzierbaren Preisklasse ist beim 3D-Drucker HT500.2 sowohl der Bauraum als auch die Bauplattform beheizbar. Damit werden eine wohldefinierte Temperaturführung und damit reproduzierbare Prozessbedingungen während des Druckprozesses ermöglicht. Derartige reproduzierbare Prozessbedingungen sind eine wesentliche Voraussetzung zur Generierung von Prüfkörpern für die mechanischen und bruchmechanischen Untersuchungen mit reproduzierbarem Eigenschaftsniveau.

Bild 1: 3D-Drucker HT500.2 der Fa. Kühling&Kühling (siehe: https://kuehlingkuehling.de).

Voruntersuchungen zur Herstellung von Prüfkörpern, u. a. für die mechanische Grundcharakterisierung, mit den von der Fa. Kühling&Kühling vorgegebenen Standardeinstellungen des 3D-Druckers ergaben, dass die Qualität der generierten Prüfkörper absolut unzureichend war. Da trotz weiter erfolgter Voruntersuchungen zur Variation der Prozessbedingungen bei der Prüfkörpergenerierung die erreichte Prüfkörperqualität immer noch bei weitem nicht ausreichend war, wurden für die ersten Untersuchungen im AP8 vorerst Prüfkörper herangezogen, die in Kooperation mit der Fa. V.G. Kunststofftechnik GmbH, Chemnitz mit einem anderen Rapid-Verfahren, dem Selektiven Lasersintern (SLS), erzeugt worden sind.

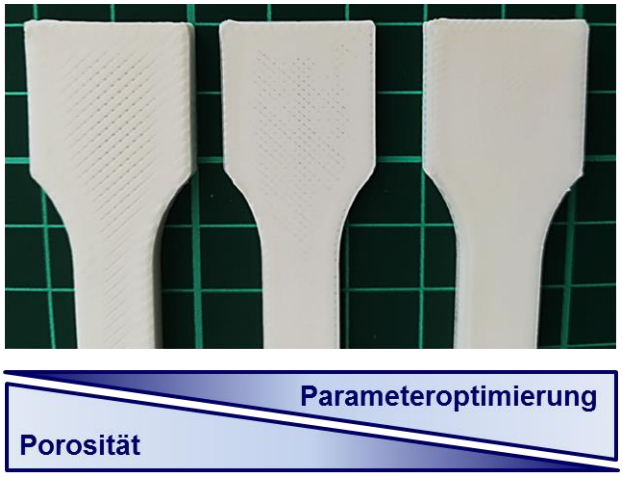

Bild 2: Schulterbereich der Vielzweckprüfkörper aus ABS in Abhängigkeit von der Parameteroptimierung.

Tabelle 1: Matrix für die Prüfkörperherstellung.

	Geschwindigkeit (mm/s)	Orientierung (Winkel)
Zugversuch	60	45°/45°
		0°/90°
	80	45°/45°
		0°/90°
IKBV	60	45°/45°
		0°/90°
	80	45°/45°
		0°/90°
Bruchmechanik-versuch	60	45°/45°
		0°/90°
	80	45°/45°
		0°/90°

Die Parameteroptimierung als wesentlichste Voraussetzung für die reproduzierbare Prüfkörperherstellung mittels des FDM-Verfahrens auf Basis des im Dezember 2017 angeschafften

Fused Filament Fabrication (FFF) 3D-Druckers vom Typ HT500.2 der Fa. Kühling&Kühling GmbH, Kiel konnte für die Modellmaterialien Acrylnitril-Butadien-Styren-Copolymer (ABS) und Polycarbonat (PC) jedoch im weiteren Projektverlauf abgeschlossen werden. Dabei erfolgte ausgehend von einer Überarbeitung der Standardparameter des Druckers die systematische Änderung von druckerspezifischen Parametern wie Schichthöhe, Overlap, Extrusionsbreite etc. Zur Überprüfung des Optimierungsgrades wurden die Porosität und die mechanischen Eigenschaften (einachsiger Zugversuch) von Vielzweckprüfkörpern des Typs 1B herangezogen (**Bild 2**). Wie anhand **Bild 2** zu erkennen ist, konnte die Porosität soweit verringert werden, dass insbesondere auch bruchmechanische Prüfkörper ausreichender Güte hergestellt werden konnten.

Aufbauend auf den optimierten grundlegenden Prozessparametern, die im Folgenden konstant gehalten worden sind, erfolgte die Auswahl der für die anschließenden (bruch) mechanischen und sonstigen Untersuchungen zu variierenden weiteren Prozessparameter. Als besonders aussichtsreich wurden die Orientierung (45°/45° und 0°/90°) und die Druckgeschwindigkeit (60 und 80 mm/s, zusätzlich 40 mm/s in den Voruntersuchungen) herausgearbeitet (**Tabelle 1**).

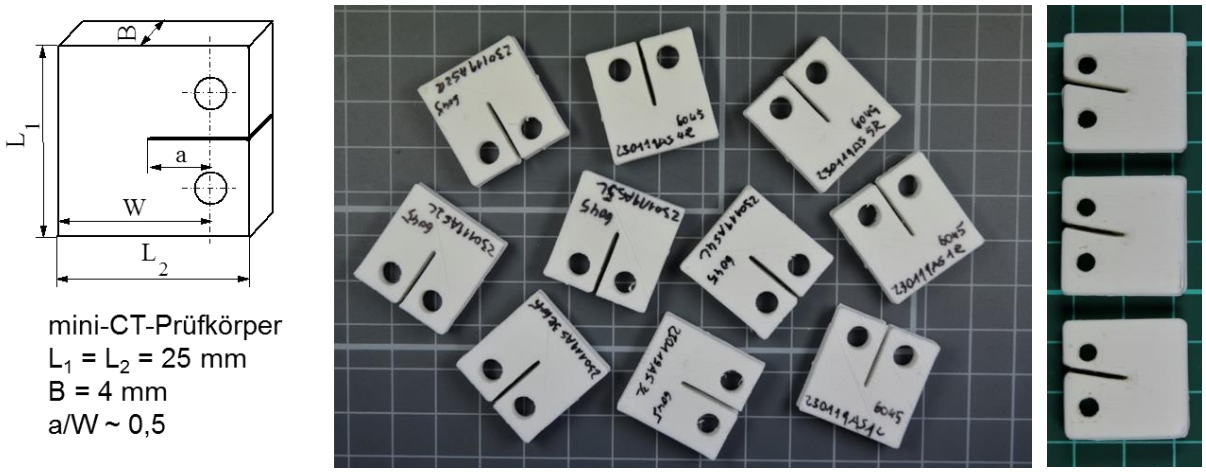

Bild 3: Kleine Compact-Tension(CT)-Prüfkörper (mini-CT) aus ABS für den quasistatischen Bruchmechanikversuch (Mode I-Beanspruchung – links und Mixed Mode I/II-Beanspruchung – rechts).

Basierend auf den erstellten Druckvorlagen mit Variation von Orientierung und Druckgeschwindigkeit wurden Prüfkörpern aus ABS und PC mit optimierten Parametern für den einachsigen Zugversuch, den instrumentierten Kerbschlagbiegeversuch (IKBV) und den quasistatischen Bruchmechanikversuch hergestellt (**Tabelle 1**). Zur Ermittlung der Dichte, der spektroskopischen und thermoanalytischen Eigenschaften sowie der Oberflächenstruktur und Bruchflächenmorphologie wurden im Wesentlichen Streifenprüfkörper, wie sie z. B. im IKBV zum Einsatz kamen, herangezogen. Die Prüfkörperanzahl pro Serie (d. h. je Druckgeschwindigkeit und Orientierung) betrug dabei für den Zugversuch je 10 Vielzweckprüfkörper, für den IKBV je 15 SENB-Prüfkörper (SENB – single-edge notch bending) und für den Bruchmechanikversuch je 10 mini-CT-Prüfkörper (CT – compact tension; siehe **Bild 3**). Neben den CT-Prüfkörper für Mode I-Beanspruchung (Kerbwinkel: 0°) wurde auch CT-Prüfkörper für Mixed Mode I/II-Beanspruchung (Kerbwinkel: 15°, siehe **Bild 3** sowie 5°

und 10°) gedruckt (60 mm/s; je 6 Prüfkörper pro Baurichtung und Winkel). Weiterhin wurde Dreipunktbiege-Prüfkörper (Sollabmessungen Länge L × Breite W × Dicke B = 80 × 14 × 10 mm^3) mit zwei scharfen Kerben an derselben Schmalseite (Kerbtiefe: je 2 mm, Kerbabstand: 5 mm) erstellt (60 mm/s; 25 bzw. 5 Prüfkörper für die Baurichtung 0°/90° bzw. 45°/45°).

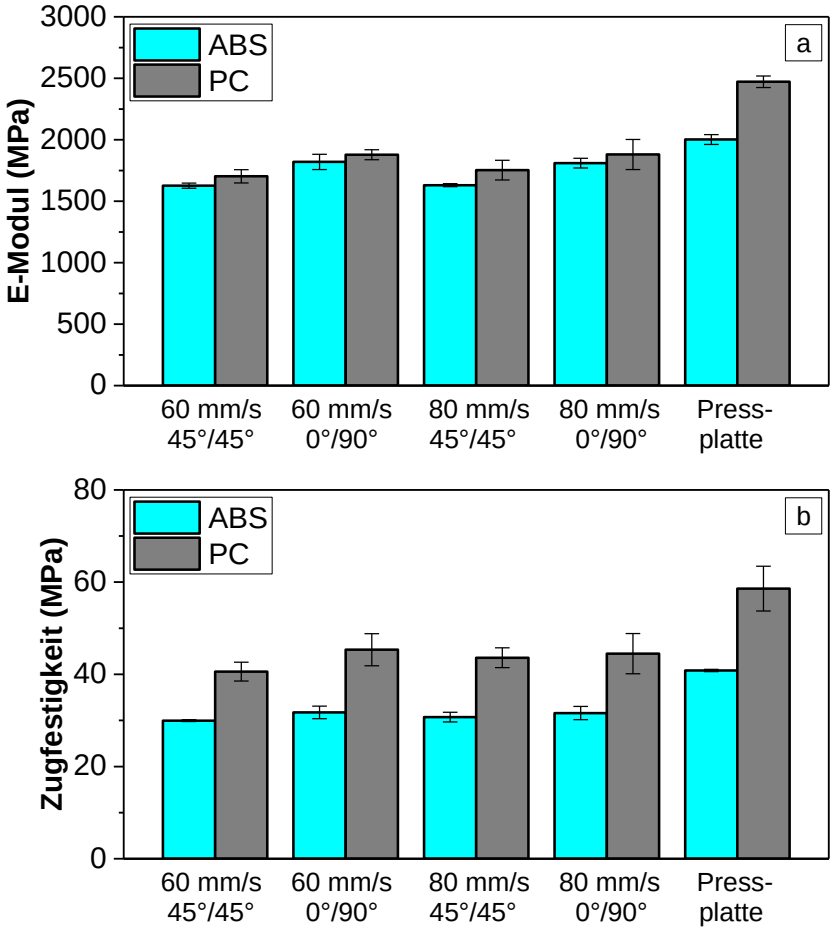

Bild 4: E-Modul aus dem einachsigen Zugversuch (a) und Zugfestigkeit (b) für ABS und PC in Abhängigkeit von den Prozessparametern (Druckgeschwindigkeit und Orientierung).

AP5: Mechanische Grundcharakterisierung der Werkstoffe aus dem FDM-Verfahren
Laufzeit: 18.07.2017 – 17.07.2018

Eine mechanische Grundcharakterisierung der verfügbaren Werkstoffe (siehe AP4) ist mittels der im FDM-Verfahren zum Einsatz kommenden Kunststofffilamente nicht möglich. Daher wurden Kunststofffilamente (ABS und PC) mechanisch zerkleinert. Die geplante Herstellung von Standardprüfkörpern im Spritzgussverfahren durch das Kunststoff-Zentrum in Leipzig gGmbH aus diesen zerkleinerten Kunststofffilamenten erwies sich aufgrund der zu geringen Materialmengen als technisch leider nicht durchführbar. Aus diesem Grund wurden in Rücksprache mit dem Kunststoff-Zentrum Pressplatten hergestellt, aus denen die Prüfkörper spanend entnommen werden konnten. Des Weiteren wurden Vielzweckprüfkörper (siehe **Bild 2**) per 3D-Druck generiert. Neben den mechanischen Eigenschaften unter einachsiger Zugbeanspruchung (ISO 527) wurden ergänzend dazu die thermischen und strukturellen

Eigenschaften mittels thermoanalytischer und spektroskopischer Untersuchungsmethoden, wie DSC, DMTA und FTIR, ermittelt. Aufgrund des technisch bedingten erheblichen zeitlichen Verzugs bei der Prüfkörperherstellung wurden die Arbeiten zeitlich verzögert abgeschlossen.

Werkstoffunabhängig und unabhängig von der Baugeschwindigkeit sind die Werte für den E-Modul (**Bild 4a**) und die Zugfestigkeit (**Bild 4b**) für die in Richtung 0°/90° erstellten Prüfkörper aus PC und ABS etwas größer als für die in Richtung 45°/45° erstellten, erreichen jedoch nicht das Niveau der an Pressplatten ermittelten Kennwerte. Der Grund dafür ist die hohe Porosität der additiv generierten Prüfkörper.

AP6: Herstellung repräsentativer Teststrukturen mittels FDM-Technologie zur Bestimmung von kritischen Materialkenngrößen für Werkstoffe mit Faserverstärkung (Kohlefaser, Aramidfaser und Glasfaser)
Laufzeit: 18.04.2018 – 17.04.2019

Dieses Arbeitspaket wurde durch das Fraunhofer-Institut für Mikrostruktur von Werkstoffen und Systemen (IMWS) in Halle bearbeitet.

AP7: Ermittlung der Porosität von FDM-Werkstoffen
Laufzeit: 18.10.2017 – 17.01.2020

Um die Porosität von FDM-Werkstoffen zu ermitteln, wurden Dichteuntersuchungen herangezogen. Dabei wurde die Dichte von mittels des FDM-Verfahrens erzeugten Prüfkörpern mit der Dichte spritzgegossener Teile bzw. von Pressplatten (siehe AP4) verglichen. Nachdem Prüfkörper ausreichende Qualität erzeugt worden waren, konnte die Dichte und damit die Porosität fortlaufend erzeugter FDM-Prüfkörper in Abhängigkeit vom Werkstoff (ABS und PC) und den Prozessparametern (siehe **Tabelle 1**) analysiert werden. Bei der Bestimmung der Porosität konnte auch auf Voruntersuchungen unter Anwendung anderer Rapid-Verfahren im Rahmen der von PSM-Mitarbeitern betreuten Qualifizierungsarbeiten (Doktorarbeiten) zurückgegriffen werden:

- *Eigenschaftsprofil von lasergesinterten Polyamid-Werkstoffen* (Sören Grießbach)
- *Ableitung von allgemeingültigen Modellen zur Korrelation von Strukturparametern und Eigenschaftsprofilen generativ gefertigter Bauteile aus thermoplastischen Polymeren* (Franziska Kaut)

Das gilt auch für das Arbeitspaket AP8. Auch in der Bachelorarbeit von Sören Köhler (siehe „Fortschreibung des Verwertungsplans“) war die Dichtebestimmung bereits thematisiert worden.

Tabelle 2: Ergebnisse für die Dichte und Porosität gedruckter Teile aus ABS.

Baurichtung	Dichte (g/cm^3)		Porosität (%)		
	ρ_1	ρ_2	P_1	P_2	P
0°/90°	0,974±0,008	0,928±0,007	5,5	4,4	9,9
45°/45°	0,980±0,004	0,947±0,006	4,8	3,2	8,1

Im Folgenden wurde die Dichte von ABS (Baurichtung 0°/90° und 45°/45°) einerseits im

Auftriebsverfahren mittels Pyknometers (Verfahren 1: ρ_1) und konventionell aus dem Verhältnis von Masse und Volumen (Verfahren 2: ρ_2) ermittelt und mit der Dichte kompakten ABS (ρ = 1,030 g/cm^3) verglichen, um die Porosität P abzuschätzen. Während mit dem Verfahrens 1 nur die geschlossene Porosität P_1 erfasst werden kann, ermöglicht das Verfahren 2 die Abschätzung der Gesamtporosität ($P = P_1 + P_2$), in die auch die offene Porosität P_2 mit eingeht. Dabei ergibt sich P zu $P = 1 - \rho_2/\rho$ und P_1 zu $P_1 = 1 - \rho_1/\rho$. Die Ergebnisse sind in **Tabelle 2** zusammengefasst.

AP8: Experimentelle Ermittlung kritischer Energiefreisetzungsraten im Rahmen einer Mode I, Mode II und Mixed-Mode-Belastung
Laufzeit: 18.10.2017 – 17.04.2019

Für die Durchführung von bruchmechanischen Experimenten wurde eine Haltevorrichtung für eine Universalprüfmaschine konzipiert, mit der die präferierten Mini-Compact Tension (CT-) Prüfkörper mit einer Grundfläche von ca. 2,5 cm × 2,5 cm, aber auch andere Bruchmechanikprüfkörper, unter Mode I, Mode II und Mixed-Mode-Belastung untersucht werden können (zu bruchmechanischen Untersuchungen unter Mode I, Mode II und Mixed-Mode-Belastung siehe auch Abschlussbericht des IMWS). Da jedoch die Prüfkörperherstellung mittels des FDM-Verfahrens anfangs nicht zufriedenstellend war, wurden Voruntersuchungen zum Rissausbreitungs- und Bruchverhalten an lasergesinterter Prüfkörpern durchgeführt. Dazu wurde der Rollringtest an gekerbten Rollringen methodisch erweitert. Die Ergebnisse wurden bzw. werden in Form von Kurzvorträgen auf den internationalen und nationalen Tagungen „22nd European Conference on Fracture“ „PolyMerTec 2018“, Kathmandu Symposia on Advanced Materials 2018“, 17. Dynamik Symposium „Zyklische und schlagdynamische Material- und Bauteilprüfung an Kunststoffen und Verbundwerkstoffen“ und „Werkstoffprüfung 2020“ – teils mit entsprechenden Beiträgen in den Tagungs- bzw. Abstraktbänden – präsentiert.

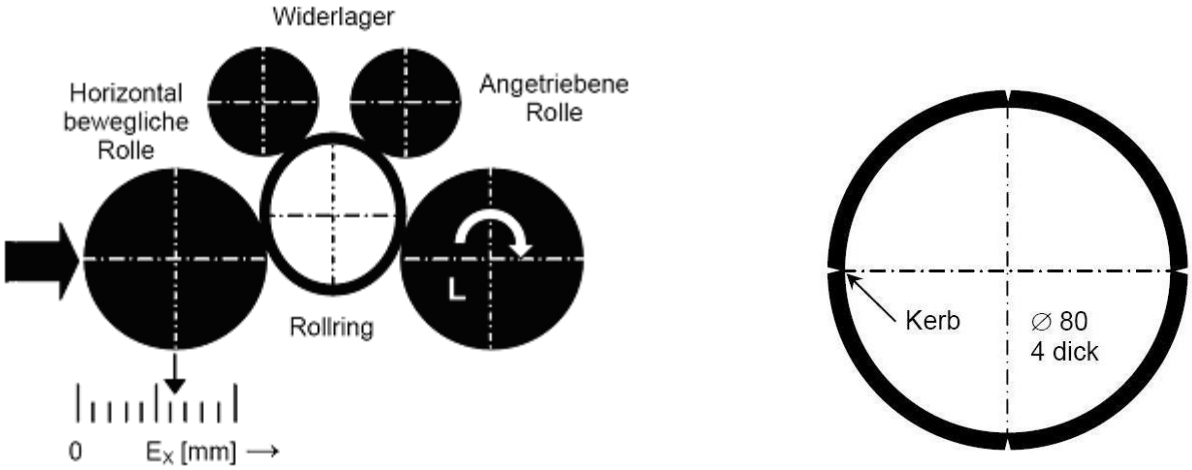

Bild 5: Schematischer Aufbau des Rollringtests (links) und Rollring (rechts).

Obwohl additiv hergestellte Polymerwerkstoffe (beispielsweise produziert mittels des Selektiven Lasersinterns) in zunehmendem Maß für mechanisch belastete Teile in industriellen Anwendungen eingesetzt werden, sind das mechanische Langzeitverhalten und die

Lebensdauer derartiger Teile jedoch zumeist unbekannt. Das gilt auch für andere Rapid-Verfahren, wie das FDM-Verfahren. Vor diesem Hintergrund wurde der Rollringtest entwickelt mit zyklisch beanspruchten, gekerbten Rollringen zur Bewertung der Lebensdauer additiv hergestellter polymerer Werkstoffe (**Bild 5 links**). Die Rollringe mit einem Außendurchmesser von 80 mm und einer Querschnittsfläche von 4 × 10 mm^2 sind vierfach alle 90° gekerbt (**Bild 5 rechts**) und können gleichzeitig mit Teilen für reale Anwendungen erzeugt werden. Die in enger Zusammenarbeit mit der Fa. Festo AG & Co. KG, Esslingen konstruierte Prüfmaschine (**Bild 6**) für den Rollringtest ermöglicht eine relativ einfache und schnelle Analyse der mechanischen Performance und Lebensdauer ohne eine Bauteilprüfung. Sowohl die Deformation, d. h. die Exzentrizität der Rollringe, als auch die Frequenz der Umlaufbiegung können variiert werden. Die Anzahl N_B der Zyklen bei Bruch (Bruchrollschwingspielzahl) der Rollringe ist ein Maß für die Lebensdauer. Zur Kalibrierung der Last wurden die Rollringe quasistatisch mittels des einachsigen Druckversuchs untersucht.

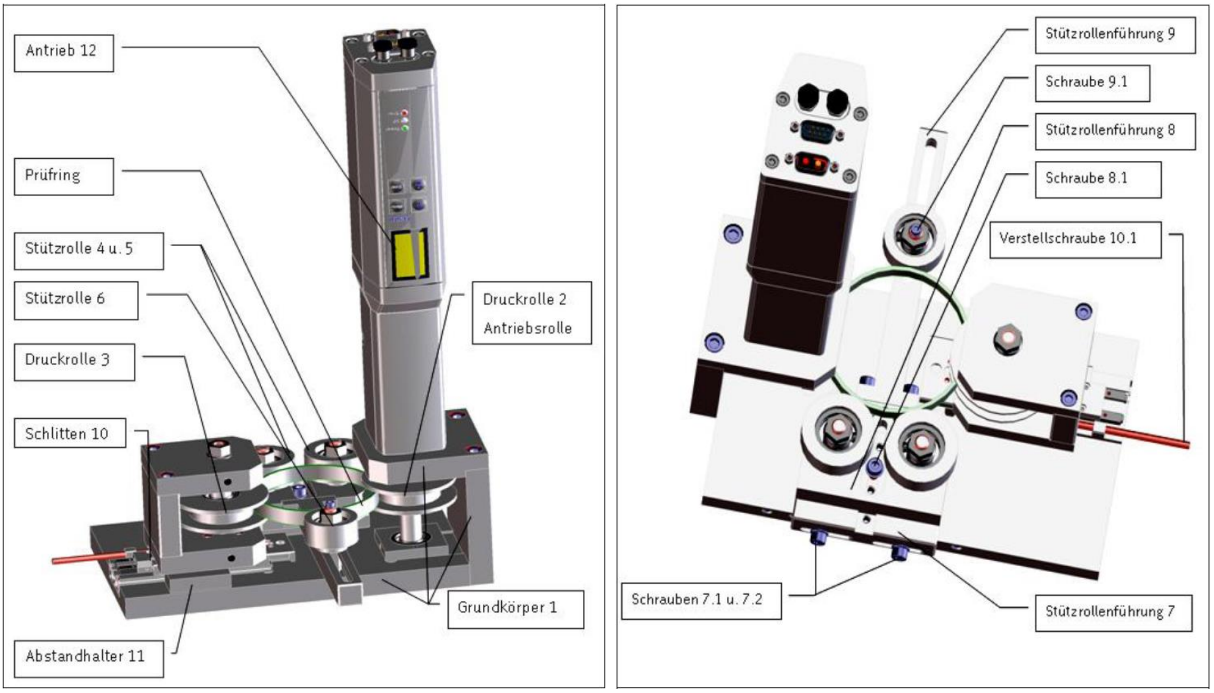

Bild 6: Frontansicht (links) und Draufsicht (rechts) der weiterentwickelten Prüfeinrichtung zum Rollringtest.

Es wurde festgestellt, dass die Frequenz, mit der lasergesinterten Rollringe aus Polyamid 12 beansprucht werden, keinen Einfluss auf N_B hat, N_B jedoch etwa logarithmisch mit zunehmender Deformation (Exzentrizität) abnimmt und näherungsweise durch **Gleichung (1)** beschrieben werden kann (**Bild 7**):

$$N_B = -N_0 \cdot \ln\left(\frac{E_x - E_\infty}{E_0 - E_\infty}\right) \qquad (1)$$

mit N_0 = 8510 ± 2700, E_0 = 15,84 ± 0,58 (in %) und E_∞ = 6,91 ± 0,84 (in %).

Die Abnahme von N_B ist dabei in einem Übergang von vollständig stabiler Rissausbreitung zu gemischt stabil-instabiler Rissausbreitung mit zunehmender Deformation begründet. Weiterhin gibt es einen linearen Zusammenhang zwischen der zur Produktion der Rollringe

während des Lasersinterprozesses verwendeten Energiedichte und der Lebensdauer N_B.

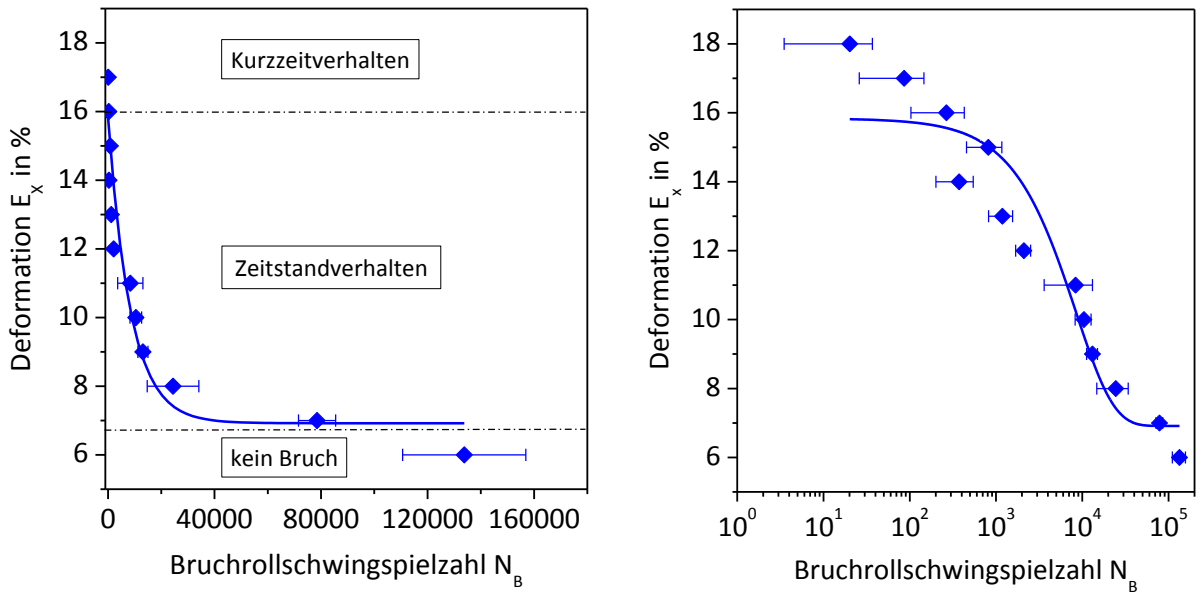

Bild 7: Bruchrollschwingspielzahl N_B in Abhängigkeit von der Deformation E_x: lineare Darstellung (links) und logarithmische Darstellung (rechts); die durchgezogenen Linien entsprechen der Anpassung von **Gleichung (1)** an die Daten.

Für die Durchführung von bruchmechanischen Experimenten wurde an der Konzeption der Haltevorrichtung für eine Universalprüfmaschine gearbeitet, mit der die präferierten mini-CT-Prüfkörpern (siehe **Bild 3**) unter Mode I, Mode II und Mixed-Mode-Belastung untersucht werden können. Die quasistatischen bruchmechanischen Untersuchungen von mini-CT-Prüfkörper aus ABS unter Mode I werden nachfolgend vorgestellt. Dazu wurden Risswiderstandskurven (R-Kurven) ermittelt, bei denen eine aus den Kraft-Verlängerungs-Diagrammen (Universalprüfmaschine Z020 der Fa. ZwickRoell, Traversengeschwindigkeit: 2 mm/min, Normklima) ermittelte Belastungsgröße (wie das hier herangezogene J-Integral) als Funktion einer Rissgröße (im Allgemeinen der stabilen Rissverlängerung) aufgetragen wird. Aus diesen R-Kurven werden bruchmechanische Kennwerte als Widerstand gegen stabile Risseinleitung und stabile Rissausbreitung abgeleitet. Allerdings hat sich gezeigt, dass zum einen der Bereich der stabilen Rissverlängerung auf den Bruchflächen aufgrund deren prinzipiell großen Oberflächenrauheit (siehe **Bild 9**) nicht eindeutig von anderen Bruchflächenphänomenen abgrenzbar ist und dass zum anderen bei einer Orientierung 45°/45° die Rissausbreitung nicht senkrecht zur Belastung erfolgte (siehe **Bild 14**). Aus diesem Grund wurde statt der stabilen Rissverlängerung die Zeit als Maß für den Rissfortschritt und damit die Rissgröße herangezogen. Dieses Vorgehen lässt sich methodisch damit begründen, dass sich bei der stabilen Rissausbreitung polymerer Werkstoffe, wie durch eigene Untersuchungen gezeigt werden konnte (siehe: R. Lach, W. Grellmann: In: W. Grellmann, B. Langer (Eds.): Deformation and Fracture Behaviour of Polymer Materials. Springer-Verlag, Berlin (2017), 3–19 und R. Lach, S. Seidler, W. Grellmann: Mech. Time-Depend. Mater. 9 (2005) 103–119), nach Rissabstumpfung/Rissinitiierung und instationär stabilem Risswachstum ein stationären Zustand einstellt, bei dem die stabile Rissverlängerung proportional zur Zeit ist (d. h. die Rissausbreitungsgeschwindigkeit konstant ist).

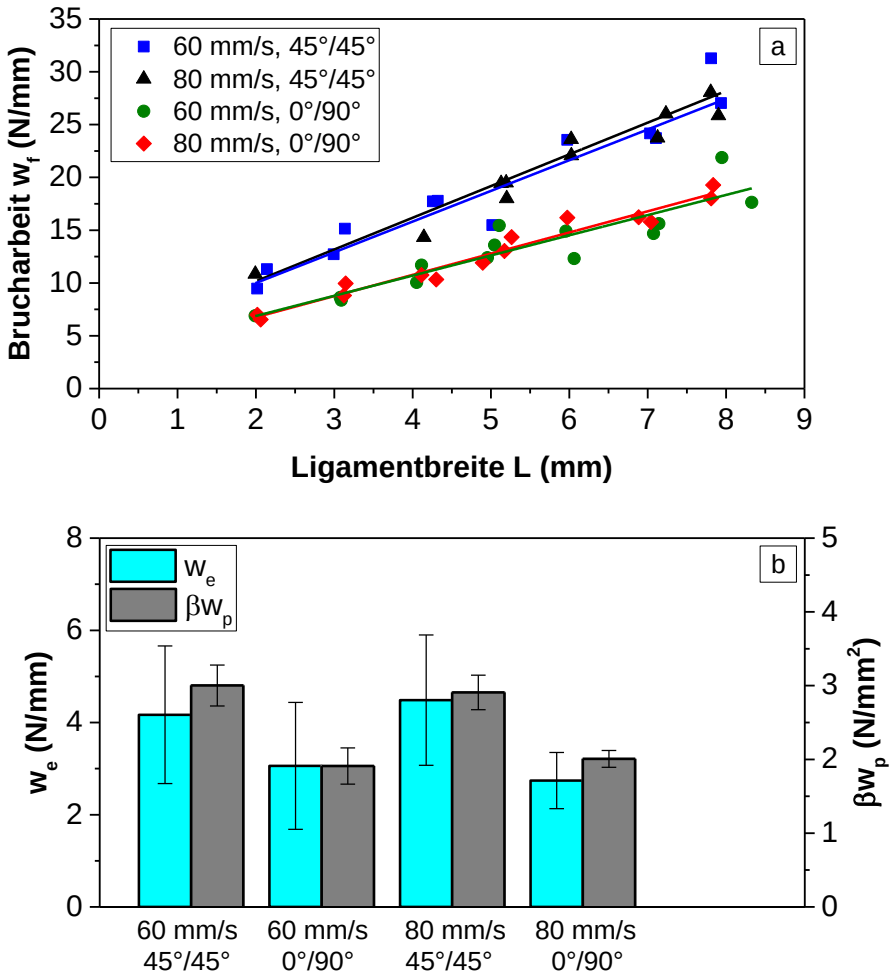

Bild 8: Brucharbeit vs. Ligamentlänge (a) und bruchmechanische Kennwerte (w_e und βw_p) für ABS als Widerstand gegen stabile Risseinleitung und Rissausbreitung (b) unter quasistatischen Versuchsbedingungen in Abhängigkeit von den Prozessparametern (Druckgeschwindigkeit und Orientierung).

Da jedoch die auf diese Art und Weise ermittelten R-Kurven keine ausreichende Differenzierung des Einflusses der Verarbeitungsbedingungen auf das Risseinleitungs- und Rissausbreitungsverhaltens zuließen (siehe dazu die Masterarbeit von Andreas Schmidtke), erfolgte alternativ die Adaption der Methode der Wesentlichen Brucharbeit (essentiell work of fracture, EWF) auf 3D-gedruckte Prüfkörper aus ABS und PC. Das EWF-Konzept, mit dem sich im Rahmen von Voruntersuchungen bereits ausführlich beschäftigt worden ist (siehe z. B.: R. Lach, K. Schneider, R. Weidisch, A. Janke, K. Knoll: Eur. Polym. J. 41 (2005) 383–392), hat sich zur Charakterisierung des stabilen Rissinitiierungs- und Rissausbreitungsverhaltens duktiler Werkstoffe bewährt. Dabei wurden im vorliegenden Fall doppelseitig scharf und unterschiedlich tief gekerbte Prüfkörper unter Zugbeanspruchung (10 mm breite DENT-Prüfkörper, DENT – double-edge notched tension) bis zum Bruch beansprucht und die Kraft-Verschiebungs-Diagramme aufgezeichnet (Universalprüfmaschine Z020 der Fa. ZwickRoell, Traversengeschwindigkeit: 2 mm/min, Normklima). Die Anwendbarkeit des EWF-Konzepts ist insbesondere davon abhängig, ob die vollständige Ausbildung der plastischen Zone im Prüfkörperligament vor der Rissinitiierung erfolgt und ob die Kraft-Verschiebungs-Diagramme selbstähnlich sind. In diesem Fall kann die totale Brucharbeit U in zwei

Komponenten aufgespalten werden, wobei U_p der in der plastischen Zone dissipierten Energie entspricht und U_e die Arbeit für Rissfortschritt innerhalb der Prozesszone umfasst. Mit $U_e = w_e \cdot L\,B$ und $U_p = \beta \cdot w_p \cdot L \cdot B$ erhält man die spezifische Brucharbeit $w_f = U/(L\,B)$ mit $w_f = w_e + \beta \cdot w_p \cdot L$, wobei w_e als wesentliche Brucharbeit (EWF) ein Maß für den Widerstand gegen stabile Rissinitiierung und $\beta \cdot w_p$ ein Maß für den Widerstand gegen stabile Rissausbreitung ist (L ist die Ligamentbreite mit L = 2...8 mm; β hängt von der Form der plastischen Zone ab).

Wie am linearen Zusammenhang zwischen spezifischer Brucharbeit und Ligamentbreite in **Bild 8a** zu erkennen ist, ist die EWF-Methode für ABS anwendbar. Auch die anderen Bedingungen zur Anwendbarkeit dieser Methode, wie die Selbstähnlichkeit der Kraft-Verschiebungs-Diagramme, sind erfüllt. Aus der Auftragung der spezifischen Brucharbeit als Funktion der Ligamentbreite lassen sich mittels einer linearen Regression somit die entsprechenden bruchmechanischen Kennwerte (w_e und βw_p) ermitteln. Der Vorteil der EWF-Methode besteht u. a. darin, dass keine mikrofraktografische Bruchflächenanalyse zur Bestimmung des stabilen Rissfortschritts erforderlich ist, wodurch sie auch für 3D-gedruckte Werkstoffe gut geeignet ist. Das ist auch vor dem Hintergrund zu sehen, dass sich auf den Bruchflächen der hier untersuchten 3D-gedruckten Werkstoffe (ABS und PC) der Bereich der stabilen Rissausbreitung nicht abgrenzen lässt, was auch bei der Ermittlung der R-Kurven festgestellt worden ist.

Wie **Bild 8b** entnommen werden kann, ergibt sich für den Widerstand gegen stabile Risseinleitung (w_e) und stabile Rissausbreitung (βw_p), dass unter quasistatischen Beanspruchungsbedingungen die Baugeschwindigkeit im Gegensatz zur Baurichtung kaum einen Einfluss auf die Zähigkeitskennwerte hat.

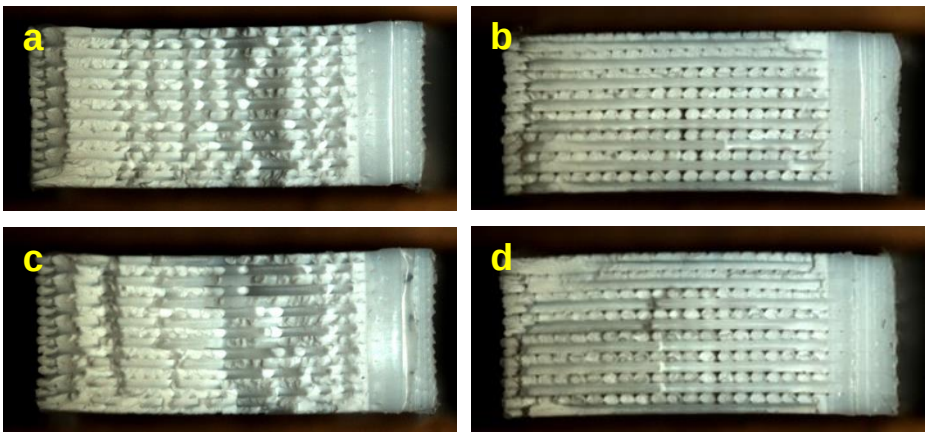

Bild 9: Lichtmikroskopische Bruchflächenaufnahmen von ABS: Druckgeschwindigkeit: 60 mm/s (a, b) und 80 mm/s (c, d), Orientierung: 45°/45° (a, c) und 0°/90° (b, d), Bruchflächenmaße: 4×10 mm^2.

Weiterhin wurden an SENB-Prüfkörpern aus ABS und PC bruchmechanische Untersuchungen unter einer schlagartigen Biegebeanspruchung mittels des IKBV durchgeführt. Die Bestimmung fließbruchmechanischer Kennwerte für thermoplastische Kunststoffe unter Schlagbiegebeanspruchung wird ausführlich in der hausinternen MPK-Norm beschrieben (siehe: MPK-Prozedur MPK-IKBV: Prüfung von Kunststoffen – Instrumentierter Kerbschlagbiegeversuch (IKBV) – Prozedur zur Ermittlung des Risswiderstandsverhaltens aus dem Instrumentierten Kerbschlagbiegeversuch, Teil I: Kennwertermittlung als Widerstand gegenüber instabiler

Rissausbreitung, 2016). Die Versuchsdurchführung erfolgte mittels eines modifizierten Pendelschlagwerks der Fa. ZwickRoell (Pendelhammergeschwindigkeit: 1 m/s, Normklima). Die quantitative Bewertung der Auswirkungen einer Prozessparametervariation auf das Zähigkeitsniveau erfolge anhand bruchmechanischer Kennwerte (J-Wert und CTOD). Anhand des Habitus der Kraft-Durchbiegungs-Diagramme und der lichtmikroskopischen Bruchflächenanalyse konnte für ABS bei der Orientierung 45°/45° elastisch-plastisches Deformationsverhalten mit überwiegend stabilem Risswachstum (hohe Energiedissipation) verbunden mit einer ausgeprägten Weißfärbung der sehr unebenen Bruchflächen und bei der Orientierung 0°/90° elastisch-plastisches Deformationsverhalten mit stabilem und instabilem Risswachstum (Rissarrest und geringere Energiedissipation) verbunden mit einer weniger ausgeprägte Weißfärbung der relativ ebenen Bruchflächen festgestellt werden (für die Bruchflächen siehe **Bild 9**).

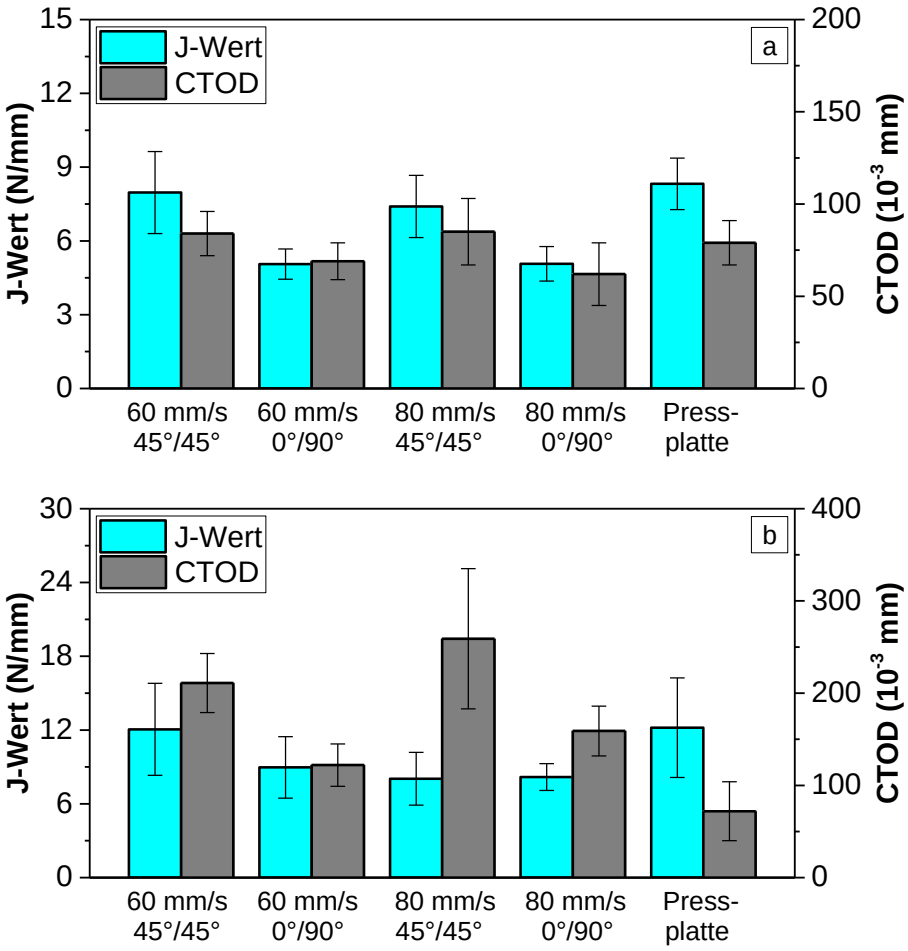

Bild 10: Bruchmechanische Kennwerte (J-Wert und CTOD aus dem IKBV) für ABS (a) und PC (b) als Widerstand gegen instabile Risseinleitung unter schlagartigen Versuchsbedingungen in Abhängigkeit von den Prozessparametern (Druckgeschwindigkeit und Orientierung).

Die Ergebnisse der mittels des IKBV durchgeführten bruchmechanischen Untersuchungen unter Schlagbiegeversuchung sind in **Bild 10** dargestellt. In **Bild 10a** ist für ABS deutlich zu erkennen, dass die Baugeschwindigkeit kaum einen Einfluss auf die Zähigkeitskennwerte als Widerstand gegenüber instabiler Risseinleitung hat; dies trifft gleichermaßen auf die

energiedeterminierten (J-Werte) und die verformungsdeterminierten (CTOD) Kennwerte zu. Die Baurichtung (45°/45° und 0°/90°) und damit die Orientierung hat dagegen einen starken Einfluss auf das Zähigkeitsverhalten von ABS. ABS ist insgesamt sehr gut für den 3D-Druck geeignet, was sich auch daran zeigt, dass für die Baurichtung 45°/45° ähnliche Zähigkeitskennwerte wie für konventionell hergestellte Prüfkörper, d. h. aus Pressplatten entnommenen Prüfkörpern, erhalten werden. Wie **Bild 10b** entnommen werden kann, ergibt sich also für den Widerstand gegen instabile Risseinleitung ein den Daten in **Bild 8b** qualitativ vergleichbares Bild. Er bestätigt sich, dass auch unter schlagartigen Beanspruchungsbedingungen die Baugeschwindigkeit kaum einen Einfluss auf die Zähigkeitskennwerte hat, nicht jedoch die Baurichtung.

Für PC gilt das für ABS Gesagte abgesehen von größeren Messwertstreuungen in ähnlicher Weise (**Bild 10b**). Allerdings gibt eine keine generelle Übereinstimmung zwischen den Zähigkeitskennwerten 3D-gedruckter und konventionell hergestellter Prüfkörper, d. h., PC ist weniger gut für den 3D-Druck geeignet.

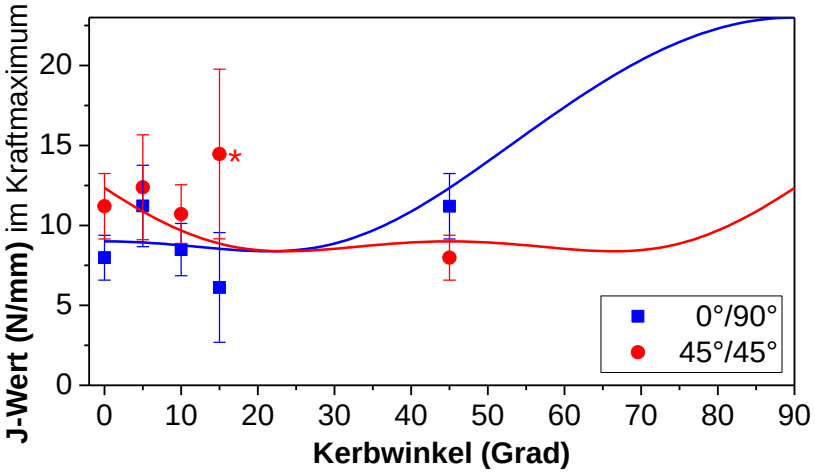

Bild 11: Bruchmechanischer Kennwert (J-Wert im Kraftmaximum) für ABS als Funktion des Kerbwinkels unter quasistatischen Versuchsbedingungen in Abhängigkeit von der Orientierung (0°/90° und 45°/45°; Druckgeschwindigkeit: 60 mm/min), Punkte – experimentelle Werte (bei dem mit * bezeichneten J-Wert trat der Bruch teilweise in der Einspannung auf), durchgezogene Linien – berechneter Vergleichswert J_v (siehe Text).

Im **Bild 11** sind die Ergebnisse der bruchmechanischen Untersuchungen unter Mixed Mode-Beanspruchung (Mode I/II) an mini-CT-Prüfkörpern (siehe **Bild 3**) zusammenfassend dargestellt (für die Versuchsbedingungen siehe Mode I-Beanspruchung). Zusätzlich zu den experimentell ermittelten (Kerbwinkel: 0 – 15°) bzw. durch Analogieschlüsse abgeschätzten (Kerbwinkel: 45°) J-Werten im Kraftmaximum der Kraft-Verlängerungs-Diagramme (die J-Werte bei einem Kerbwinkel von 45° ergeben sich entsprechend des beobachteten Zusammenhangs zwischen Orientierung, Rissausbreitungsrichtung und Kerbwinkel aus den J-Werten bei einem Kerbwinkel von 0°) wurden Vergleichswerte J_v aus den Mode I- und Mode II-Anteilen der J-Werte (J_I und J_{II}) abgeschätzt, wobei als Parameter entweder der Kerbwinkel ϕ (Orientierung: 0°/90°) oder der um 45° reduzierte Kerbwinkel (ϕ – 45° entsprechend der Rissausbreitungsrichtung von 45° bei einem Kerbwinkel von 0°;

Orientierung: 45°/45°) herangezogen wurde. Für die Orientierung 0°/90° ergibt sich mit $J_I = J_{Ic} \cdot \cos^2\phi$ und $J_{II} = J_{IIc} \cdot \sin^2\phi$ als Vergleichswert $J_v = (J_I^2 + J_{II}^2)^{0,5}$ (für die Orientierung 45°/45° ist ϕ durch ϕ – 45° zu ersetzen). Die Bruchzähigkeiten J_{Ic} bzw. J_{IIc} unter reiner Mode I- bzw. reiner Mode II-Belastung wurden zu J_{Ic} = 9 N/mm bzw. J_{IIc} = 23 N/mm angesetzt.

Wie **Bild 11** entnommen werden kann, ist eine hinreichend gute Übereinstimmung zwischen experimentellen Zähigkeitskennwerten und der theoretischen Abschätzung der Zähigkeit festzustellen. Für kleine Kerbwinkel bis 15° ist der Zähigkeitskennwert (J-Wert im Kraftmaximum) für die Baurichtung 45°/45° größer als die für die Baurichtung 0°/90° (zur Begründung siehe AP17). Für größere Kerbwinkel als 15° scheinen jedoch nach anfänglicher Negierung dieses Unterschieds die J-Werte für die Baurichtung 0°/90° größer als die für die Baurichtung 45°/45° zu sein. Die Baurichtung 45°/45° hätte beim praktischen Einsatz gedruckter Bauteile den Vorteil, dass die Risszähigkeit nahezu unabhängig von der Ausrichtung möglicher struktureller Ungänzen und der Beanspruchungsrichtung wäre.

AP9: Modellierung der einzelnen Teststrukturen nach der Virtuellen Rissschließmetode (VCCT)
Laufzeit: 18.10.2017 – 17.10.2019

Dieses Arbeitspaket wurde durch das Fraunhofer-Institut für Mikrostruktur von Werkstoffen und Systemen (IMWS) in Halle bearbeitet.

AP10: Analyse des mikrostrukturellen Versagens mittels Computertomographischer und Rasterelektronischer Bildgebungsverfahren nach den Belastungstests
Laufzeit: 18.04.2018 – 17.01.2020

Dieses Arbeitspaket wurde durch das Fraunhofer-Institut für Mikrostruktur von Werkstoffen und Systemen (IMWS) in Halle bearbeitet.

AP11: Aufbau und Entwicklung einer in-situ-Belastungsapparatur zur Durchführung von experimentellen Prüfungen im CT
Laufzeit: 18.01.2018 – 17.10.2018

Dieses Arbeitspaket wurde durch das Fraunhofer-Institut für Mikrostruktur von Werkstoffen und Systemen (IMWS) in Halle bearbeitet.

AP12: Stochastische bruchmechanische Untersuchungen zur Berücksichtigung der multiplen Kerben in FDM-Kunststoffen
Laufzeit: 18.08.2019 – 18.01.2020

Für die stochastischen bruchmechanischen Untersuchungen wurden mit zwei 2 mm tiefen scharfen Kerben (Kerben an derselben Schmalseite; Kerbabstand: 5 mm) versehene prismatische Prüfkörper (etwa 80 × 14 × 10 mm^3) aus ABS (siehe AP4) herangezogen wurden, die einer Dreipunktbiegebeanspruchung unterzogen wurden (Universalprüfmaschine Z020 der Fa. ZwickRoell, Traversengeschwindigkeit: 10 mm/min, Normklima). Unabhängig von der Orientierung (0°/90° und 45°/45°) wurde Rissausbreitung nur an einem der beiden Kerben festgestellt; eine gegenseitige Beeinflussung der jeweiligen kerbnahen Deformationszonen wurde nicht beobachtet. Für nachfolgende Untersuchungen ist daher eine Variation der

Kerbtiefe und des Kerbabstandes anzustreben.

In **Bild 12** ist beispielhaft die stochastische Auswertung der spezifischen Brucharbeit w_f = U/(L B) für die Orientierung 0°/90° dargestellt (U ist hier die Arbeit bis zum Kraftmaximum bzw. des Einsetzen instabilen Risswachstums). Die spezifische Brucharbeit für diese Orientierung ist mit w_f = 6.32±0.61 kJ/m^2 (Medianwert: 6,35 kJ/m^2) deutlich kleiner als für die Orientierung 45°/45° mit w_f = 10.68±1.33 kJ/m^2. Als Ursache sind die für die Orientierung 45°/45° zu beobachtenden Mode II-Anteile an der Rissausbreitung anzusehen (vgl. AP8, AP14 und AP17).

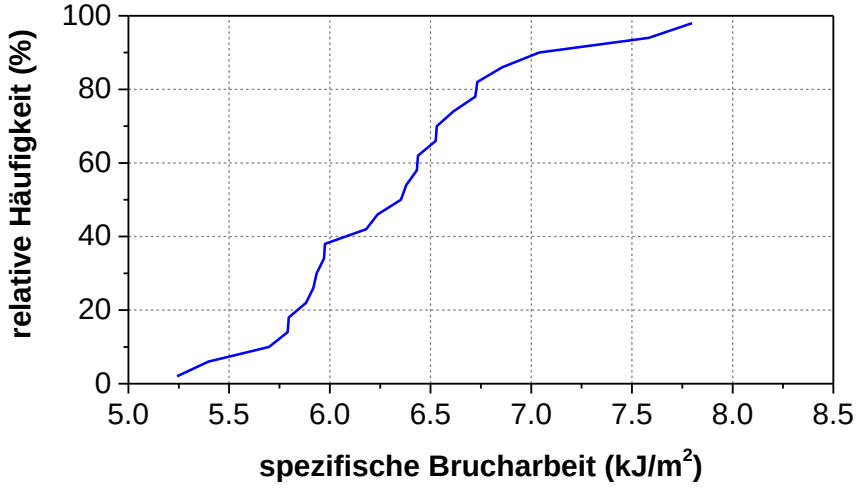

Bild 12: Stochastische Auswertung der Werte der spezifischen Brucharbeit für ABS für die Orientierung 0°/90°.

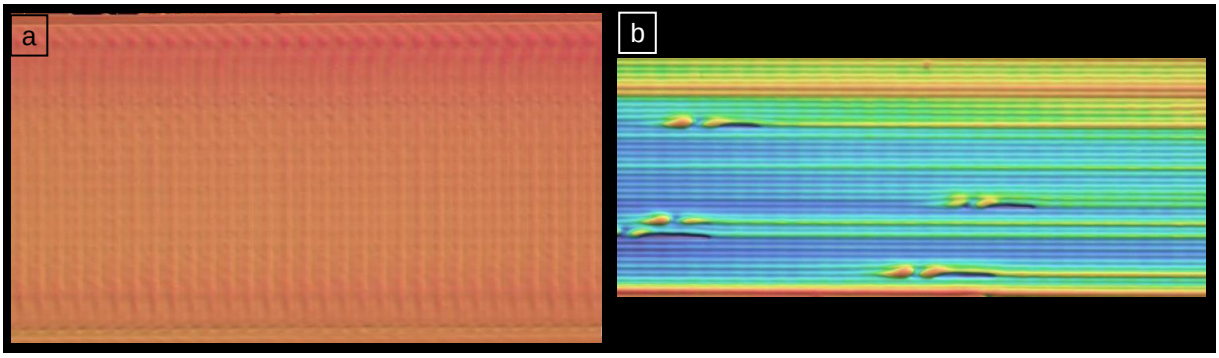

Bild 13: Profilometergestützte 3D-Scans der Oberflächentopographie prismatischer Prüfkörper aus ABS für die Orientierung 0°/90°: (a) Prüfkörperoberseite (Breite W ca. 13,7 mm), (b) Prüfkörperschmalseite (Dicke B ca. 10,0 mm).

AP13: Entwicklung einer geeigneten Methode zur Bewertung der Oberflächenstruktur von FDM-Kunststoffen und Korrelation mit bruchmechanischen Ergebnissen
Laufzeit: 18.04.2018 – 17.01.2020

Neben der Bruchflächenanalyse, die die Bewertung des inneren Aufbaus der FDM-Kunststoffe und der während der Rissausbreitung abgelaufenen Schädigungsphänomene ermöglicht, gestattet der „Messplatz zur digitalisierten dreidimensionalen Oberflächenanalyse von

Kunststoffbauteilen und polymeren Werkstoffen“ (Laserscanningmikroskop und Profilometer sowie softwareseitige Komponenten) einen softwaregestützten Soll-Ist-Vergleich der gedruckten FDM-Teile und der erstellten Druckvorlagen.

Mittels eines Profilometers der Fa. Keyence wurde die Oberflächentopographie 3D-gedruckter prismatischer Prüfkörper aus ABS 3D-dimensional vermessen (**Bild 13**) und die so erhaltene Ist-Geometrie mit der Soll-Geometrie verglichen. Dabei wurde festgestellt, dass das Ist-Volumen kleiner als das Soll-Volumen ist und zwar um 2,7±0,4 % für die Baurichtung 0°/90° und um 3,1±0,3 % für die Baurichtung 45°/45°. Diese Abweichungen sind um eine Größenordnung größer als die Schwindung von ABS (0,4 – 0,7 %).

AP14: Bestimmung des 3D ermittelten Verformungsverhaltens der Proben zum Vergleich mit zu entwickelnden Simulationsmodellen (zusammen mit dem Fraunhofer IMWS Halle)
Laufzeit: 18.04.2018 – 17.01.2020

Bei PSM wurden die bruchmechanischen Untersuchungen unter quasistatischen Beanspruchungsbedingungen (siehe AP8) mit einer Analyse sowohl der Rissausbreitungskinetik des stabilen Risswachstums als auch des zeitabhängigen lokalen Dehnungsfeldes (Videotechnik und Grauwertkorrelation) verbunden (für weitere Ergebnisse siehe Abschlussbericht des IMWS). Der Beginn der Bearbeitung dieses Arbeitspakets hatte sich etwas verzögert, da zuerst eine reproduzierbare Herstellung von bruchmechanischen Prüfkörpern in einer ausreichenden Qualität (siehe AP4) sichergestellt werden musste. Zur Untersuchung der Evolution rissspitzennaher Dehnungsfelder während der Belastung und Rissausbreitung wurde dabei die Grauwertkorrelationsanalyse herangezogen (Q400-Dehnungsmesssystem der Fa. LIMESS). Dazu war es notwendig, vor Versuchsbeginn ein stochastisches Muster auf die Prüfkörperoberfläche der mini-CT-Prüfkörper per Airbrush aufzubringen. Die Videoaufnahmen wurden mit den Kraft-Verschiebungs-Diagrammen zur Ermittlung der R-Kurven (siehe AP8) zeitlich korreliert. Wie **Bild 14** entnommen werden kann, erfolgt die Ausbildung der plastischen Zonen und die Rissausbreitung unabhängig von der Baurichtung (0°/90° und 45°/45°) immer entlang der Bauebenen, so dass für die Baurichtung 45°/45° Rissausbreitung unter Mode II-Anteilen (Mode II: Rissöffnung unter Schub) trotz makroskopisch vorgegebener Zugbeanspruchung erfolgt (vgl. auch AP8, AP12 und AP17).

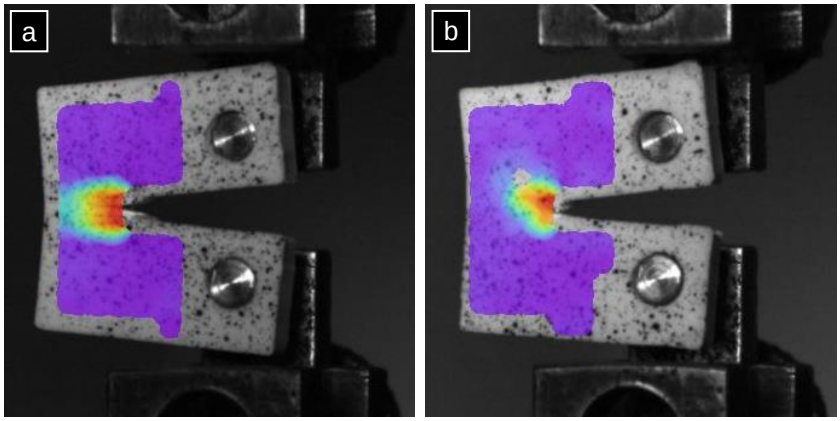

Bild 14: Rissspitzennahe lokale Dehnungsfelder während bruchmechanischer Untersuchungen an mini-CT-Prüfkörpern aus ABS für unterschiedliche Orientierungen: 0°/90° (a) und 45°/45° (b).

Zu weiteren Ergebnissen zum AP14, insbesondere des Vergleichs des experimentell ermittelten Verformungsverhaltens mit den entwickelnden Simulationsmodellen sei auf den Abschlussbericht des IMWS verwiesen.

AP15: Entwicklung einer 4D-Grauwertkorrelationsanalyse für große Verschiebungen
Laufzeit: 18.10.2017 – 17.07.2018

Dieses Arbeitspaket wurde durch das Fraunhofer-Institut für Mikrostruktur von Werkstoffen und Systemen (IMWS) in Halle bearbeitet.

AP16: Einsatz der 4D-Grauwertkorrelationsanalyse zur Bestimmung von Verformungsfeldern aus den CT-Daten zur Kalibrierung der Simulationsmodelle
Laufzeit: 18.07.2018 – 17.01.2020

Dieses Arbeitspaket wurde durch das Fraunhofer-Institut für Mikrostruktur von Werkstoffen und Systemen (IMWS) in Halle bearbeitet.

AP17: Struktur-Eigenschafts-Beziehungen (zusammen mit dem Fraunhofer IMWS Halle)
Laufzeit: 18.04.2019 – 17.04.2020

Wie in den obigen Arbeitspaketen (insbesondere AP8) dargelegt worden ist, liegen eine Reihe hoch aussagefähiger Struktur-Eigenschafts-Beziehungen bzgl. der mechanischen und bruchmechanischen Eigenschaften vor. Für die durch den Projektpartner eruierten Struktur-Eigenschafts-Beziehungen sei auf den Abschlussbericht des IMWS verwiesen. Diese Struktur-Eigenschafts-Beziehungen bilden die Grundlage der werkstoff- und verfahrensgerechten Konstruktion von 3D-gedruckten Bauteilen für reale Einsatzzwecke im Rahmen des Rapid Manufacturing.

Die Porosität und damit die Dichte bestimmen abhängig von der Baurichtung und inneren Prüfkörperstrukturen (Orientierungen) die mechanischen und bruchmechanischen Eigenschaften generativ hergestellter Teile maßgeblich. Im Allgemeinen nehmen Elastizitätsmodul, Zugfestigkeit und Kerbschlagzähigkeit linear mit der Dichte zu.

Die Orientierung hat einen starken Einfluss auf die bruchmechanischen Eigenschaften und den Rissausbreitungsmodus (siehe dazu auch Abschlussbericht des IMWS). Dabei lassen die sich im Vergleich zur Baurichtung 0°/90° unabhängig von der Beanspruchungsgeschwindigkeit höheren Zähigkeitskennwerte der Baurichtung 45°/45° wie folgt erklären: Trotz einer makroskopisch vorgegebener Zugbeanspruchung – die eigentlich auch zur Rissöffnung unter Zug (Rissöffnungsmodus I) führen sollte – erfolgt der Rissausbreitung auch für die Baurichtung 45°/45° immer entlang der Bauebenen. Das bedeutet, dass für die Baurichtung 45°/45° mikroskopisch (IKBV, EWF-Konzept) oder makroskopisch (R-Kurven-Konzept) Rissausbreitung unter Mode II-Anteilen (Mode II: Rissöffnung unter Schub) auftritt. Die kann durch die hohe lichtmikroskopisch detektierbare Bruchflächenrauheit bzw. anhand der Grauwertkorrelationsanalyse bestätigt werden, d. h. durch die lokalen Dehnungsfelder in **Bild 14** (insbesondere die Form der plastischen Zonen). Es ist allgemein bekannt, dass bruchmechanische Zähigkeitskennwerte unter Mode II immer größer sind als unter Mode I gemessene Werte.

Die Druckgeschwindigkeit hat im Vergleich zur Orientierung kaum einen Einfluss auf die

Werkstoffstruktur und die bruchmechanischen Kennwerte und damit auch nicht auf die Struktur-Eigenschafts-Beziehungen.

AP18: Erstellung eines bruchmechanischen Auslegungskonzeptes für mit FDM gefertigte Kunststoffbauteile (zusammen mit dem Fraunhofer IMWS Halle)
Laufzeit: 18.01.2019 – 17.04.2020

Erste Vorüberlegungen zum anzuwendenden bruchmechanischen Auslegungskonzept, basierend auf einem bruchmechanischen Versagenskriterium (modifiziertes MTS-Kriterium, MTS – maximum tangential stress) unter einer Mode I/Mode II-Mixed-Mode-Beanspruchung, wurden zwar bereits gemacht (siehe: R. Lach, W. Grellmann: Macromol. Symp. 373 (2017) 1600108). Vollkommen unklar war jedoch, ob dieses Kriterium auch für FDM-Kunststoffe anwendbar ist. Weiterhin war ebenfalls kritisch zu prüfen, ob die für metallische Werkstoffe bewährten NFAD- und FAD-Konzepte (NFAD – notch failure assessment diagram, FAD – failure assessment diagram) auch für FDM-Kunststoffe Anwendung finden können, auch in Hinsicht auf die durchzuführenden Bauteiltests (AP19).

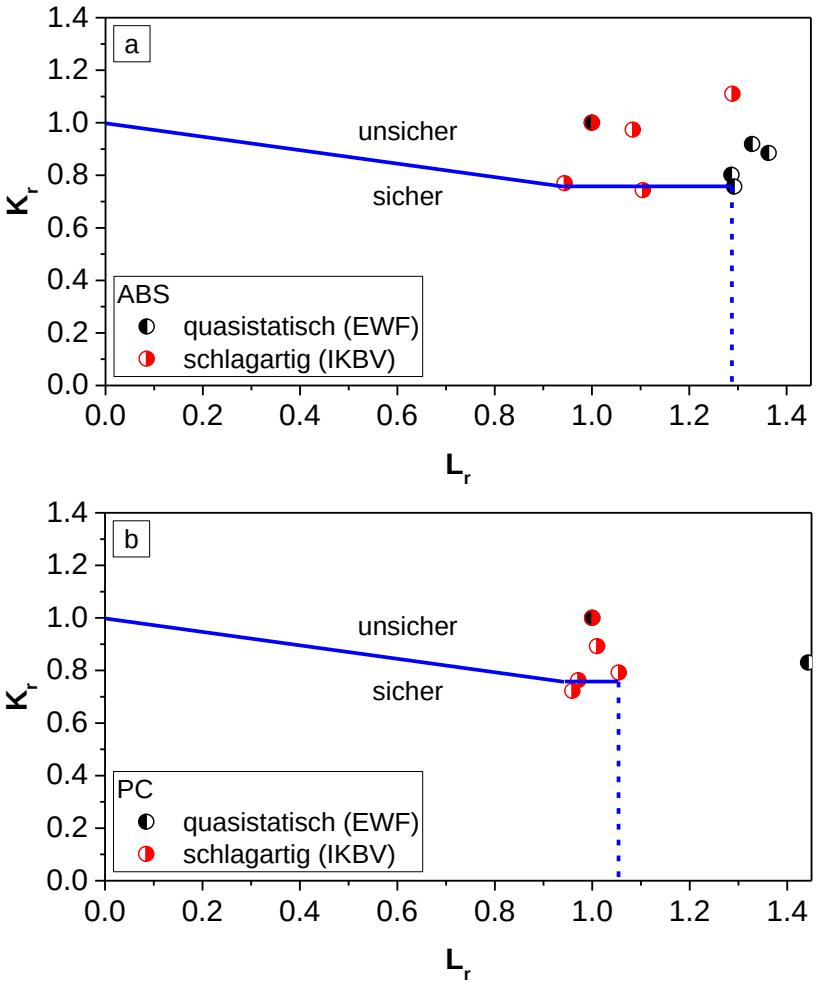

Bild 15: FAD (failure assessment diagram) für ABS (a) und PC (b).

Das FAD-Konzept basiert auf einer zweiparametrigen grafischen Darstellung, bei der der Parameter K_r, der ein Maß für das Versagen durch Risswachstum ist, als Funktion des

Parameters L_r als Maß für plastisches Versagen aufgetragen wird. Aus den experimentellen Daten unter quasistatischer und schlagartiger Beanspruchung konnten Werte für K_r und L_r berechnet werden mit $K_r = K/K_{ref}$ und $L_r = \sigma_{ref}/\sigma_y$ (K – Bruchzähigkeit, σ_y – Streckspannung), wobei für die Referenzwerte für die Bruchzähigkeit und die Streckspannung (K_{ref} und σ_{ref}) die an den Pressplatten ermittelten Werte herangezogen worden sind. Basierend auf den so ermittelten K_r-L_r-Werten konnte ein FAD für ABS (**Bild 15a**) und PC (**Bild 15b**) konservativ abgeschätzt werden mit einer Eingrenzung des sicheren „Betriebszustandes". Der Cutoff liegt hierbei für ABS bei $L_r = 1{,}3$ und für PC bei $L_r = 1{,}05$.

AP19: Fertigung eines prototypischen Bauteils und Erprobung des Auslegungskonzeptes unter einer definierten realen Belastungssituation (zusammen mit dem Fraunhofer IMWS Halle)
Laufzeit: 18.07.2019 – 17.04.2020

Zur Anwendung der durch PSM und das IMWS entwickelten Bewertungsmethoden wurde als prototypisches Bauteil entsprechend der derzeitigen Situation eine Atemmaske ausgewählt. Für Informationen zur Erstellung des Bauteils mittels 3D-Drucks, dessen Prüfung und die Simulation des Bauteils unter realen Belastungsbedingungen sei auf den Abschlussbericht des IMWS verwiesen.

2 Vergleich des Stands des Vorhabens mit der ursprünglichen (bzw. mit Zustimmung des Zuwendungsgebers geänderten) Arbeits-, Zeit- und Ausgabenplanung

Das Vorhaben befand sich abgesehen von AP5 im Wesentlichen im ursprünglichen Arbeits-, Zeit- und Kostenplan. Die technisch bedingten, erheblichen zeitlichen Verzögerungen der Arbeiten in AP5 konnten bis zum Projektende allerdings wieder aufgeholt werden. Die für das Erreichen der Projektziele geplanten Versuche und Experimente haben grundsätzlich einen erfolgreichen Projektverlauf gewährleistet.

3 Haben sich die Aussichten für die Erreichung der Ziele des Vorhabens innerhalb des angegebenen Ausgabenzeitraums gegenüber dem ursprünglichen Antrag geändert?

Die Aussichten für das Erreichen der Ziele des Vorhabens hatten sich nicht verändert.

4 Sind inzwischen von dritter Seite Ergebnisse bekannt geworden, die für die Durchführung des Vorhabens relevant sind?

Während der Projektlaufzeit sind keine Untersuchungen Dritter bekannt geworden, die für den Projektablauf relevant waren.

5 Sind oder werden Änderungen in der Zielsetzung notwendig?

Während der Projektlaufzeit waren keine Änderungen in der Zielsetzungen der FuE-Thematik notwendig.

6 Fortschreibung des Verwertungsplans

Es gibt keine Änderungen im Verwertungsplan. Es wird und wurde experimentell auf die Vorbereitung von Konferenzbeiträgen und wissenschaftlichen Veröffentlichungen hingearbeitet.

Die Ergebnisse der mechanischen Langzeituntersuchungen (Rissausbreitungs- und Bruchverhalten lasergesinterter Prüfkörper) mittels des Rollringtests (für Einzelheiten siehe AP8) wurden 2018 in Form eines Kurzvortrags auf der internationalen Tagung „22nd European Conference on Fracture“ (ECF 22, 26.–31.08.2018, Belgrad) einem breiteren Fachpublikum präsentiert. Der Beitrag mit dem Thema

R. Lach, A. Monami, S. Grießbach, V. Grießbach, W. Grellmann: *Lifetime assessment of additive manufactured polymer materials by means of the rolling ring test using cyclically loaded notched ring specimens.* **22nd European Conference on Fracture**

erschien außerdem im zugehörigen Tagungsband:

Structural Integrity Procedia 13 (2018) 34–38

Weiterhin erfolgten außerdem Präsentationen projektrelevanter Ergebnisse in Form von Kurzvorträgen auf internationalen Fachkonferenzen wie „PolyMerTec 2018“ (13.–15.06.2018, Merseburg), „Kathmandu Symposia on Advanced Materials 2018“ (KaSAM 2018, 26.–30.10.2018, Kathmandu) sowie „Rapid.Tech 2018“ (05.–07.06.2018, Erfurt) zu den Themen:

R. Lach, A. Monami, S. Grießbach, V. Grießbach, W. Grellmann: *Mechanical and fracture mechanics properties of additive manufactured polymer materials*. **Kathmandu Symposia on Advanced Materials 2018**

F. Kaut, V. Cepus, W. Grellmann, R. Lach: *Struktur-Eigenschafts-Beziehungen additiv gefertigter thermo-plastischer Polymere am Beispiel der ARBURG-Freeformer-Technologie*. **Rapid.Tech 2018**

R. Lach, A. Monami, S. Grießbach, V. Grießbach, W. Grellmann: *The rolling ring test using cyclically loaded notched ring specimens to assess the lifetime of additive manufactured polymers*. **PolyMerTec 2018**

F. Kaut, V. Cepus, W. Grellmann, R. Lach: *Correlation of process parameters, structural properties and fracture mechanical properties of additive manufactured polypropylene specimen*. **PolyMerTec 2018**

Ein Poster wurde auf dem 6. Mitteldeutschen Forum „3D-Druck in der Anwendung“ (29.10.2019, Leipzig) präsentiert:

A. Schmidtke, B. Langer, R. Lach, W. Grellmann: *Mechanische und bruchmechanische Eigenschaften von 3D-gedruckten amorphen thermoplastischen Kunststoffen*. **6. Mitteldeutsches Forum „3D-Druck in der Anwendung“**

Die Ergebnisse des Vortrags auf der Tagung „Rapid.Tech 2018“ sind auch in Form eines Aufsatzes im zugehörigen Tagungsband publiziert worden:

M. Kynast, M. Eichmann, G. Witt (Hrsg.): **Proceedings of the 15th Rapid.Tech Conference**. Carl Hanser Verlag, München (2018), 217–235

Außerdem sind für das Jahr 2020 (bzw. 2021) weitere projetrelevante Kurzvorträge für die Tagung „Werkstoffprüfung 2020“ (03./04.12.2020, Berlin; durchgeführt als online-Veranstaltung) und das 17. Dynamik Symposium „Zyklische und schlagdynamische Material- und Bauteilprüfung an Kunststoffen und Verbundwerkstoffen“ (25.11.2020, Ulm; situationsbedingt verschoben auf den 21.04.2021) gehalten worden bzw. in Vorbereitung:

R. Lach, A. Schmidtke, B. Langer, W. Grellmann: *Bruchmechanische Performance von 3D-gedruckten amorphen thermoplastischen Kunststoffen unter schlagartiger und quasi-statischer Beanspruchung*. **Werkstoffprüfung 2020**

R. Lach, A. Monami, S. Grießbach, V. Grießbach, W. Grellmann: *Der Rollringversuch an zyklisch beanspruchten gekerbten Ringprüfkörpern zur schnellen Lebensdauerabschätzung additiv gefertigter Kunststoffteile.* **17. Dynamik Symposium „Zyklische und schlag-dynamische Material- und Bauteilprüfung an Kunststoffen und Verbundwerkstoffen“**

Die Ergebnisse des Vortrags auf der Tagung „Werkstoffprüfung 2020“ sind auch in Form eines Aufsatzes im zugehörigen Tagungsband publiziert werden:

B. Langer, M. Wächter (Hrsg.): **Werkstoffe und Bauteile auf dem Prüfstand: Prüftechnik – Kennwertermittlung – Schadensvermeidung**. 6 Seiten

Die erhaltenen Forschungsergebnisse werden zur praxisbezogenen Lehre an der Martin-Luther-Universität (internationaler Masterstudiengang „Polymer Materials Science“) und der Hochschule Merseburg (Studiengang Maschinenbau/Mechatronik/Physiktechnik, Vertiefungsrichtung „Kunststofftechnik“) bereitgestellt. Weiterhin erfolgt die Nutzung von Forschungsergebnissen (Ergebnistransfer in die Wirtschaft) im Rahmen von Weiterbildungsveranstaltungen bzw. Workshops für die Industrie und Forschungseinrichtungen. Außerdem wurden aufgrund vertraglicher Vereinbarungen zwischen der Hochschule Merseburg (HoMe) und PSM als ein An-Institut der HoMe studentische Qualifizierungsarbeiten durchgeführt und erfolgreich zum Abschluss gebracht. Im Einzelnen sind das folgende Arbeiten:

- Betriebspraktikum zum Thema: *Untersuchungen der mechanisch-thermischen Struktureigenschaften additiv gefertigter Produkte* (Bearbeiter: Sören Köhler, Verteidigung: 06.03.2018)
- Studienbegleitendes Projekt zum Thema: *Charakterisierung mechanischer Eigenschaften von generativ gefertigten Kunststoffen* (Bearbeiter: Andreas Schmidtke, abgeschlossen)
- Bachelorarbeit zum Thema: *Einfluss der Fertigungsparameter auf die mechanischen und thermischen Eigenschaften additiv gefertigter Produkte* (Bearbeiter: Sören Köhler, Verteidigung: 25.05.2018)
- Masterarbeit zum Thema: *Characterisation of polymer materials manufactured by fused filament fabrication using different mechanical and fracture mechanics approaches* (Bearbeiter: Andreas Schmidtke, Verteidigung: 12.06.2020)

Fortlaufend wird an der Aufnahme projektbezogener Begriffe in das „Lexikon Kunststoffprüfung und Diagnostik“ gearbeitet, was der Beratung von interessierten Anwendern hinsicht-

lich des Marketings und Wissenstransfers entlang der Wertschöpfungskette Generative Fertigung und Kunststoffprüfung bzw. Bruchmechanik dient. Dem dient auch die Veröffentlichung des Projektes auf der Homepage von PSM (zum Internetauftritt siehe: http://www.psm-merseburg.info/forschungsprojekte/aktuelle-forschungsprojekte/prognose-des-einsatzverhaltens-3d-gedruckter-bauteile-mittels-bruchmechanischer-ansaetze-ffd-crack).

7 Zusammenfassung

Die Forschungsarbeiten in den Arbeitspaketen (AP1, AP4, AP5, AP7, AP8, AP12 und AP13 durch PSM allein sowie AP14, AP17, AP18 und AP19 zusammen mit dem IMWS) wurden durch die Polymer Service GmbH Merseburg (PSM) planmäßig begonnen und entsprechend der in der jeweiligen Laufzeit formulierten Aufgabenstellungen erfolgreich bearbeitet, wobei bei Arbeitspaket AP5 zwischenzeitlich technisch bedingte Verzögerungen auftraten. Es gab keine Änderungen im Verwertungsplan. Es wurde und wird experimentell auf die Vorbereitung von Konferenzbeiträgen und wissenschaftlichen Veröffentlichungen hingearbeitet. So wurden Ergebnisse in Form von sechs Kurzvorträgen und einem Poster auf den internationalen und nationalen Tagungen „22nd European Conference on Fracture“, „PolyMerTec 2018“, „Kathmandu Symposia on Advanced Materials 2018“, „Rapid.Tech 2018“, 6. Mitteldeutsches Forum „3D-Druck in der Anwendung“ und „Werkstoffprüfung 2020“ präsentiert (ein weiterer Beitrag ist in Vorbereitung), teils mit entsprechenden Publikationen in den zugehörigen Abstrakt- und Tagungsbänden (z. B. drei mehrseitige Fachaufsätze). Weiterhin werden vier studentische Qualifizierungsarbeiten durchgeführt und zum Abschluss gebracht. Außerdem wurden projektbezogene Begriffe zur Aufnahme in das „Lexikon Kunststoffprüfung und Diagnostik“ vorbereitet. Das Vorhaben befand sich von AP5 abgesehen im ursprünglichen Arbeits-, Zeit- und Kostenplan. Die für das Erreichen der Projektziele geplanten Versuche und Experimente gewährleisteten einen erfolgreichen Projektverlauf.