

Analyse der Tinteausbreitung in Polymerschäumen mit Hilfe von Röntgen- Mikro Computertomografie

Dietmar SALABERGER*, Hannes SCHARLEITNER*, Johann KASTNER*
* FH OÖ Forschungs & Entwicklungs GmbH, Stelzhamerstrasse 23, 4600 Wels,
dietmar.salaberger@fh-wels.at

Kurzfassung. Die Möglichkeit der Speicherung von Flüssigkeiten machen Polymerschäume zu einem idealen Material für die Herstellung von Stempeln. Für die Speicherung der Tinte werden Polyurethanschäume PUR verwendet. Darüber hinaus werden extrudierte thermoplastische Schäume aus Ethylvinylacetat EVA für die Generierung des Stempelbildes verwendet. Um beide Aufgaben optimal zu erfüllen müssen die Materialien so gestaltet sein, dass zum einen die Tinteaufnahme möglichst gut ist und dass zum anderen ein scharfes Bild entsteht.

Für die Charakterisierung der Schäume wurde ein Labor-Röntgencomputer-tomografiegerät eingesetzt. Die Verteilung und Aufnahme der Tinte wurde in-situ mittels Radiografie analysiert. Um die gefundenen Phänomene erklären zu können wurde zusätzlich hochauflösende Tomografie durchgeführt.

Das Setup für die Applikation der Tinte wurde im Inneren des CT Geräts platziert und die Steuerung so optimiert, dass Menge, Geschwindigkeit und Form der Tropfen konstant war. In den Radioskopiebildern wurden nach definierten Zeiten die Eindringtiefen und auch die Geschwindigkeit des Eindringens bestimmt. Die tomografischen Untersuchungen wurden an kleinen Proben mit sehr hoher Auflösung durchgeführt. Bestimmt wurden die Porengrößenverteilung und die Formfaktoren der Poren.

Die Ergebnisse zeigen deutliche Unterschiede zwischen verschiedenen Materialien in der Art wie die Tinte aufgenommen wird. Die neu entwickelten EVA Schäume zeigen Unterschiede in Eindringgeschwindigkeit zwischen Vorder- und Rückseite, was vermutlich auf den Extrusionsvorgang zurück zu führen ist. Die Eindringtiefe der Rückseite und der Standard EVA Schäume ist ähnlich. Die wesentlich bessere Tinteaufnahme der Vliese ist in der höheren Eindringtiefe erkennbar.

Der quantitative Vergleich verschiedener EVA Materialien zeigt deutliche Unterschiede in Form und Größe der Poren. Die neu entwickelten EVA Schäume weisen eine breite Verteilung von Formfaktor und Porengrößen auf während die Standardmaterialien eher sphärische Form und kleiner Poren zeigen. Es konnte also eine Korrelation zwischen Tinteaufnahme und Morphologie der Schäume gefunden werden. Mit Hilfe dieser Erkenntnisse kann die Herstellung der Schäume für die jeweilige Aufgabe optimiert werden.

Einführung

Polymerschäume werden vielseitig eingesetzt, da Sie sehr gute mechanische und physikalische Eigenschaften aufweisen. Geringes Gewicht, exzellentes Verhältnis zwischen Festigkeit und Gewicht und sehr gute thermische und akustische Isolationseigenschaften machen diese Werkstoffgruppe für viele verschiedene Anwendungen interessant.



Unter anderem werden Polymerschäume für die Herstellung von Stempeln eingesetzt. Neben der Aufgabe die Tinte zu speichern, sind Polymerschäume auch für die Entstehung des Stempelbildes verantwortlich. Die Eigenschaften des Schaummaterials, die für die Speicherung und den Transport der Tinte entscheidend sind, sind Porenmorphologie und mechanischen Eigenschaften. Wichtig ist eine gleichmäßige Aufnahme und Abgabe der Tinte, da die Qualität des Stempelbildes von dieser Gleichmäßigkeit abhängt. Um die Stempelbildqualität zu verbessern, werden sehr feinzellige thermoplastische Polymerschäume verwendet, die eine schmale Porengrößenverteilung aufweisen sollen.

Die Charakterisierung von Schäumen ist grundsätzlich eine Herausforderung, da die Struktur komplex, fragil und von außen schwer zugänglich ist. Standardmethoden aus der Materialografie wie die Mikroskopie liefern nur bedingt gültige Aussagen, da durch die Präparation die Zellstruktur zumindest verändert wird. [1,2,3,4]

Aus diesem Grund wurde die zerstörungsfreie Prüfmethode Röntgencomputertomografie eingesetzt, um verschiedene polymere Schaummaterialien zu charakterisieren.

Industrielle Röntgencomputertomografie (XCT) wird seit mehreren Jahren für die drei dimensional Charakterisierungen von Werkstoffen und Bauteilen eingesetzt. Die hohe Auflösung von Laborgeräten von 1 μm und höher erlaubt es, moderne Werkstoffe zu analysieren. Der Vorteil, dass die Probe zerstörungsfrei und berührungslos gescannt werden kann, ist besonders für leichte, fragile Materialien wie Polymerschäume von Vorteil. [10,11,12]

Wenn man Prozesse in-situ mittels Röntgenmethoden abbilden möchte, wird hauptsächlich Synchrotronstrahlung eingesetzt. [5,6] Diese hat den Vorteil, dass die Bildaufnahmefrequenz sehr hoch ist und sehr hohe Auflösungen, die im Bereich einiger 100 nm liegen, erzielt werden können.

Für die Darstellung der Tinteverteilung im Polymerschäum ist eine Bildaufnahmefrequenz von einigen Bildern pro Sekunde ausreichend. Diese kann auch mit einem Laborgerät erzielt werden.

In dieser Arbeit wurden zwei Messmodalitäten einer Labor-XCT Anlage genutzt: Radiografie und Tomografie.

Die radiografischen Untersuchungen wurden für die in-situ Charakterisierung der Tinteverteilung durchgeführt. Tomografische Untersuchungen liefern zusätzlich Informationen über die Morphologie der Zellstruktur.

Die Ergebnisse aus beiden Untersuchungen werden für die Optimierung der Schaumherstellung und für die Auswahl der Materialien verwendet. Ein wesentliches Ziel ist die Verbesserung des Stempelbilds mit neu entwickelten Materialien.

1. Experimentelles

1.1 Materialien

Die untersuchten Materialien lassen sich nach Einsatzgebiet unterteilen. Für die Speicherung der Tinte werden grobzellige Polyurethanschäume eingesetzt, welche mit einem Baumwollvlies beschichtet werden. Für eine andere Art von Speicherung werden Polymerfasern verwendet, die zu einem Vlies verarbeitet werden.

Das Stempelbild wird mit einem feinzelligen, thermoplastischen Ethylvinylacetat Schaum realisiert.

Die Herstellung der thermoplastischen Schäume erfolgt über Extrusion mit anschließendem Auswaschen der Füllstoffe. Die verwendeten Füllstoffe sind Kristalle wie Zucker oder Salz, die die eigentliche Porenstruktur bestimmen. [7, 8, 9] Wesentlich für die Eigenschaften des Schaums sind Form und Größenverteilung der Füllstoffe im Granulat und auch deren Verteilung.

Polyurethanschaum wird über einen herkömmlichen Mischungsprozess hergestellt, wobei die Offenporigkeit durch darauffolgendes Zusammendrücken (crushen) erreicht wird. Die sphärische Zellstruktur wird dadurch zerstört.

Das Hauptaugenmerk wurde in dieser Publikation auf die EVA Schäume gelegt, da diese für die Qualität des Stempels am Wichtigsten sind. Neben einem Serienmaterial und einem kompetitiven Standardmaterial wurden 3 neu entwickelte Materialien EVA 01, 02 und 08 analysiert.

In Tabelle 1 sind alle untersuchten Materialien und deren Bezeichnungen aufgelistet. Abbildung 1 zeigt Fotos der untersuchten Proben.

Tabelle 1: Übersicht über die untersuchten Materialien

Bezeichnung	Material	Art	Verwendung
EVA 01, 02, 08, Serie, Standard	Ethylvinylacetat	Schaum	Stempelbild
EVA Vlies 1, 2	Ethylvinylacetat	Vlies	Speicherung
PUR 1, 2	Polyurethan	Schaum	Speicherung

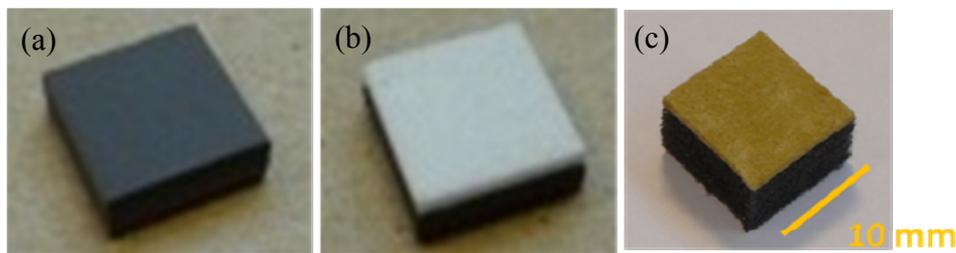


Abbildung 1: Fotos von EVA 08 (a), EVA Vlies (b) und PUR mit Baumwollvlies (c) Die Kantenlänge für in-situ Versuche wurde bei allen Materialien mit 10 mm festgelegt

1.2 Röntgenmethodik

Für die radiografischen und tomografischen Untersuchungen wurde das Sub- μ m-CT Gerät Nanotom 180NF (GE Phoenix|x-rax, Wunstorf, D) eingesetzt. Es handelt sich um ein kompaktes Laborgerät mit Vollschutzgehäuse. Die Röntgenquelle kann mit sehr kleinen Brennflecken (ca. 1 μ m) betrieben werden. Es wird ein Flachbettdetektor mit 2300 x 2300 Pixeln eingesetzt.

Um die Tinte möglichst effektiv und in reproduzierbarer Menge auf das Material aufzubringen wurde eine Peristaltikpumpe im Inneren des CT Gerätes platziert, welches von außen mittels Fußtaster gesteuert wurde. Über einen Schlauch wurde die Tinte mit ca. 10 mm Abstand auf die Probe getropft. Um Form und Volumen eines jeden Tropfens konstant zu halten, wurde zusätzlich zum Schlauchende, welches in Abbildung 2 b) zu sehen ist, ein Glasendstück eines Arzneibehälters angebracht. Der Abstand zur Probe war nötig, um einen definierten Abriss der Tropfen zu gewährleisten.

Die tomografischen Untersuchungen wurden an sehr kleinen Proben, mit sehr hoher Auflösung durchgeführt, da die kleinsten Poren im Bereich eines Mikrometers und darunter liegen. Die Probe wurde wie in Abbildung 2 c) gezeigt auf einen Glasstab aufgeklebt und sehr nahe an der Röntgenquelle platziert.

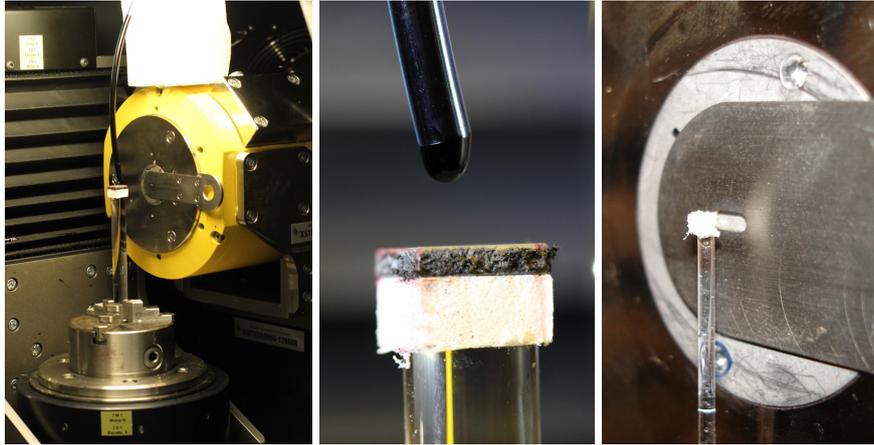


Abbildung 2: Fotos der Anordnung von Probe und Tintenzuführung (a), Abstand und Form des Tropfens (b) und Probenfixierung und -positionierung für 3DCT (c)

1.3 2D in-situ Analyse

Die verwendete Abbildungsgeometrie entspricht einer Kegelstrahlanordnung und beinhaltet deshalb eine Vergrößerung. Diese muss bei der quantitativen Auswertung der Durchstrahlungsbilder berücksichtigt werden.

Die Vergrößerung wurde aufgrund der Abmessungen der Proben und der Abbildungsgeometrie mit 10 gewählt. Die größtmögliche Bildaufnahme­frequenz des Detektors von 8 pro Sekunde kann bei 4x4 Binning erzielt werden.

Es wurde darauf geachtet, dass die Tropfen immer im Zentrum der Probe aufgebracht werden, da sonst die Tinte über die Ränder abfließt und damit die reproduzierbare Auswertung von Eindringtiefe und Eindringgeschwindigkeit nicht möglich wäre.

Wie in Abbildung 3 rechts gezeigt, wurde die Eindringtiefe an 3 Positionen ermittelt, um eine Aussage über die Gleichförmigkeit des Eindringens zu erhalten. Der Mittelwert aller 3 Werte wurde als Eindringtiefe gespeichert.

Für die Bestimmung der Eindringgeschwindigkeit wurde die Eindringtiefe zu bestimmten Zeiten ermittelt.

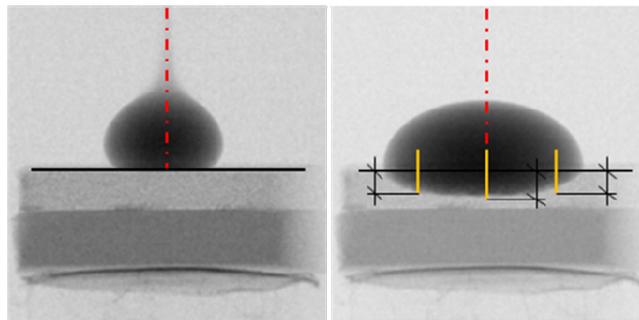


Abbildung 3: Durchstrahlungsbilder, die die Aufbringung des Tropfens in Probenmitte (linkes) und die Bestimmung der Eindringtiefe (rechts) zeigen

Die Menge an Tinte, die appliziert wurde, wurde in Anlehnung an die realen Verhältnisse vom Stempelhersteller übernommen und auf die Probengröße umgerechnet. Das Experiment hat gezeigt, dass die Masse der Tropfen nur kleinen Schwankungen unterliegt. Es wurden bei fast allen Materialien 6 Tropfen appliziert. Die Materialien, bei denen die Tinte nur langsam eindringt, wurde die Anzahl der Tropfen reduziert, um ein Überlaufen über die Ränder zu vermeiden.

1.4 3D Morphologische Analyse

In Tabelle 3 sind die wichtigsten Scanparameter für die verschiedenen Materialgruppen aufgelistet. Die Auflösung wurde auf die Porengrößen angepasst. Beim EVA Schaum war die Wahl der bestmöglichen Auflösung nötig, um auch sehr kleine Poren noch abbilden zu können.

Tabelle 3: Übersicht über die wichtigsten CT Scanparameter der verschiedenen Materialgruppen

Probe	Voxelgröße [μm]	U [kV]	Scanzeit [min]
EVA Vlies	1,5	60	238
EVA Schaum	0,6	60	306
PUR Schaum	1,5	60	238

Für das EVA Vlies und den PUR Schaum wurden für diese Arbeit keine quantitativen Werte ermittelt. Die qualitative Auswertung der Schnittbilder liefert auch nützliche Informationen, die für die Erklärung des Tinteaufnahmeverhaltens herangezogen werden können. Daten für den PUR Schaum sind in der Bachelor Abschlussarbeit von R. Kickingner [12] zu finden.

Die quantitative Auswertung der XCT Daten der EVA Schäume erfolgte mittels MAVI, einem Softwarepaket für 3D Bildverarbeitung. Es musste eine Abfolge von Algorithmen angewendet werden, um zuverlässige Daten zu extrahieren. Die Vorverarbeitung beinhaltet die Reduktion des Rauschens und die Optimierung des Kontrasts. Die eigentliche Segmentierung der Poren wird mit einem Watershed-Algorithmus durchgeführt.

2. Ergebnisse

2.1 In-situ Tintevertelung

Die Abbildungen 4 bis 6 zeigen Projektionsbilder von unterschiedlichen Materialien zu bestimmten Zeitpunkten. Das erste Bild wurde nach Abgabe des ersten Tropfens aufgenommen, das zweite nach dem dritten Tropfen. Beim dritten Bild ist die gesamte Menge an Tinte appliziert. Das vierte Bild wurde nach vollständiger Aufnahme der Tinte im Material aufgenommen und das fünfte Bild zeigt das Ende der Messreihe nach 5 Minuten.

Schon ein Vergleich der Bilder an Position 2 zeigt Unterschiede in der Tropfenform. Beim PUR Schaum dringt die Tinte sofort in das Baumwollvlies ein während bei den beiden thermoplastischen Materialien die Tinte noch nicht eingedrungen ist. Die vierte Position zeigt, dass sowohl beim PUR als auch bei EVA-Serie die Tinte vollständig in den Schaum eingedrungen ist. Bei EVA 08 türmt sich ein Teil der Tinte über der Oberfläche auf. Dies ändert sich bis zum Ende der Messreihe nicht.

Beim PUR Schaum ist zu erkennen, dass die gesamte Tintenmenge schnell und auch tief in die PUR Struktur eindringt. Zum Ende der Messreihe quillt das Baumwollvlies etwas auf und ein Teil der Tinte fließt wieder aus dem Schaum zurück in das Vlies.

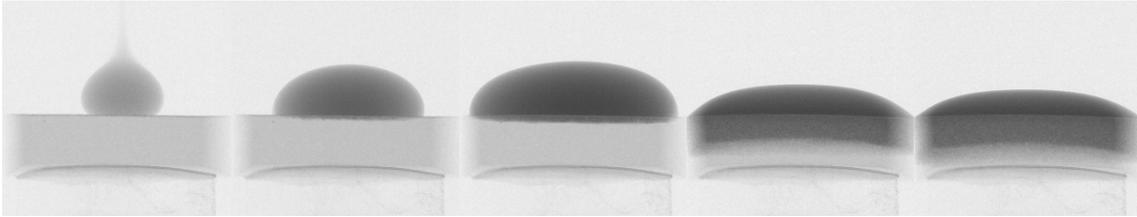


Abbildung 4: Projektionsbilder von EVA 08, Rückseite

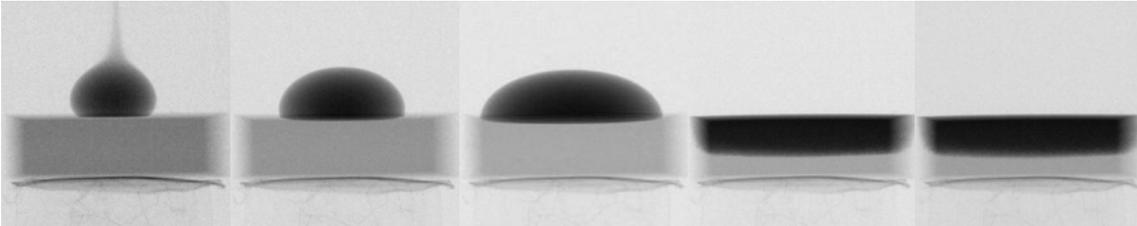


Abbildung 5: Projektionsbilder von EVA Serie, Rückseite

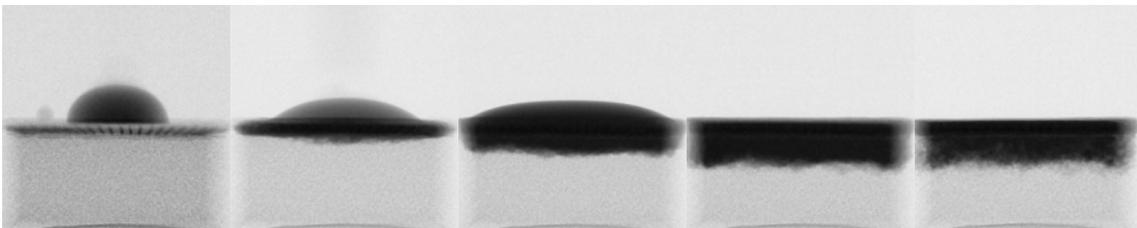


Abbildung 6: Projektionsbilder von PUR Schaum, Baumwollvliesseite

Die gemessenen maximalen Eindringtiefen sind in Abbildung 7 dargestellt.

Die größte Eindringtiefe wurde beim EVA Vlies gemessen, gefolgt vom PUR Schaum mit Baumwollvlies. Die EVA Schäume weisen eine geringere Eindringtiefe auf.

Es fällt auf, dass bei den Neuentwicklungen ein Unterschied zwischen Vorder- und Rückseite besteht. Die Eindringtiefe auf der Vorderseite ist immer niedriger als auf der Rückseite. Dieser Unterschied wurde bei den anderen EVA Materialien Serie und Standard nicht festgestellt.

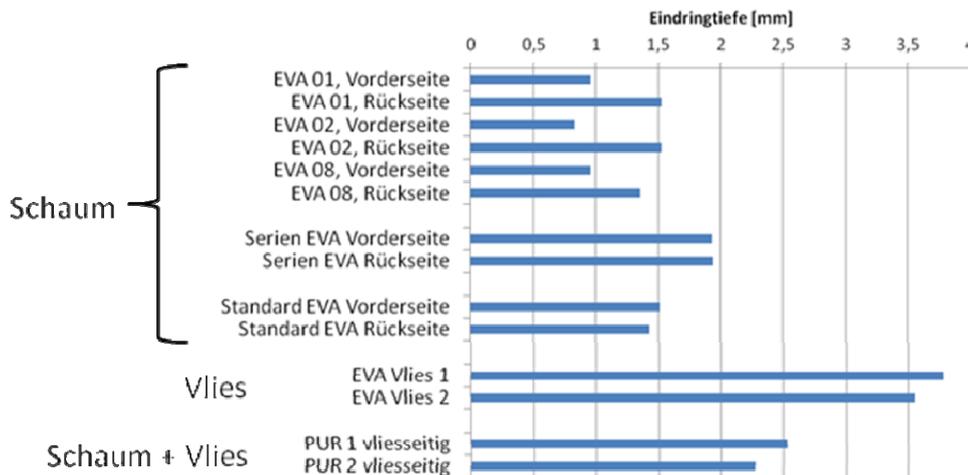


Abbildung 7: Eindringtiefen der untersuchten Materialien

Neben den Eindringtiefen wurden für die EVA Schäume auch die Geschwindigkeiten ermittelt, mit denen die Tinte eindringt. Tabelle 4 zeigt die Ergebnisse von vier Messungen. Besonders die geringe Geschwindigkeit bei EVA 08 Vorderseite fällt auf. Die größte Geschwindigkeit wurde beim Serienmaterial gemessen.

Tabelle 4: Eindringgeschwindigkeiten verschiedener EVA Schäume

Probe	EVA 08 Vorderseite	EVA 08 Rückseite	EVA Serie	EVA Standard
Geschwindigkeit [$\mu\text{m} / \text{s}$]	25	45	59	43

2.2 3D Morphologie

Für EVA Vlies und PUR Schaum wurden lediglich qualitative Auswertungen durchgeführt.

Abbildung 8 zeigt Darstellungen der CT Daten des EVA Vlies. Das komplexe Fasernetzwerk kann drei dimensional dargestellt werden. Man kann eine gewisse Vorzugsorientierung sowohl im 3D Bild als auch in den Schnittbildern erkennen.

Zwischen den Fasern sind große Hohlräume, die für die Aufnahme und Abgabe von Tinte von Vorteil sind.

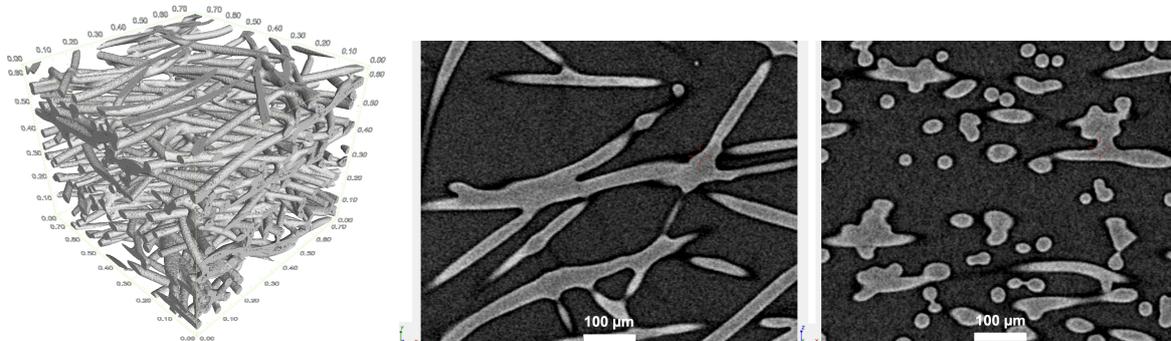


Abbildung 8: Darstellungen eines kleinen Ausschnitts aus dem Datensatz des EVA Vlies. Links: 3D Rendering, rechts: Schnittbilder aus verschiedenen Richtungen

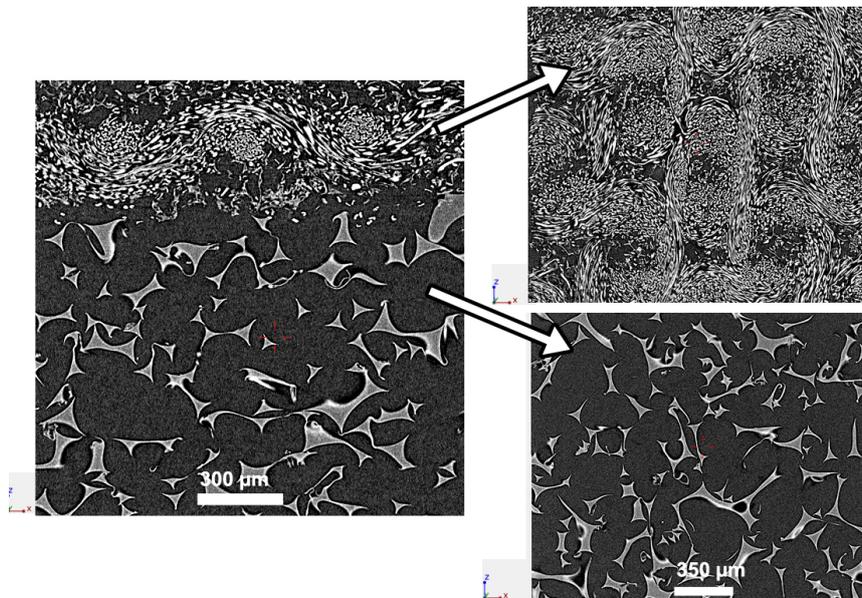


Abbildung 9: Darstellungen eines kleinen Ausschnitts aus dem Datensatz des PUR Schaums. Links: frontales Schnittbild, rechts: axiale Schnittbilder vom Baumwollvlies und vom PUR Schaum

Schnittbilder des PUR Schaums mit Baumwollvlies sind in Abbildung 9 dargestellt. Das Baumwollvlies besteht aus dünnen Fasern, die in orthogonalen Bündeln verwoben sind. Neben der Tatsache, dass die Baumwollfasern die Tinte aufnehmen können existieren

auch Hohlräume, durch die die Tinte durchtreten kann. Der PUR Schaum zeigt große Poren, die durch das crushen nicht mehr ihre ursprüngliche sphärische Form haben. Die Bestimmung der Porengrößenverteilung ist aufgrund dieser Tatsache schwierig. Die dünnen Zellwände können, wenn noch vorhanden, aufgrund der verwendeten eingeschränkten Auflösung nicht überall aufgelöst werden.

Bei den EVA Schäumen wurden neben den qualitativen Analysen auch quantitative Werte bestimmt. Die Charakterisierung wurde mit Hilfe des Formfaktors und der Porengrößenverteilung durchgeführt.

Der Formfaktor wurde nach der Formel

$$f = 6\sqrt{\pi} \frac{V}{\sqrt{S^3}}$$

berechnet. Für eine Kugel liefert diese Formel den Wert 1.

In Abbildung 10 kann man in den Schnittbildern erkennen, dass die Porengrößenverteilung breit gestreut ist. Neben einzelnen großen sind vor allem viele kleine Poren zu erkennen. In manchen Bereichen und für bestimmte Materialien war die maximal mögliche Auflösung nicht ausreichend, um die kleinsten Poren zu detektieren. Das bedeutet, dass die Poren kleiner als 1 µm im Durchmesser sind.

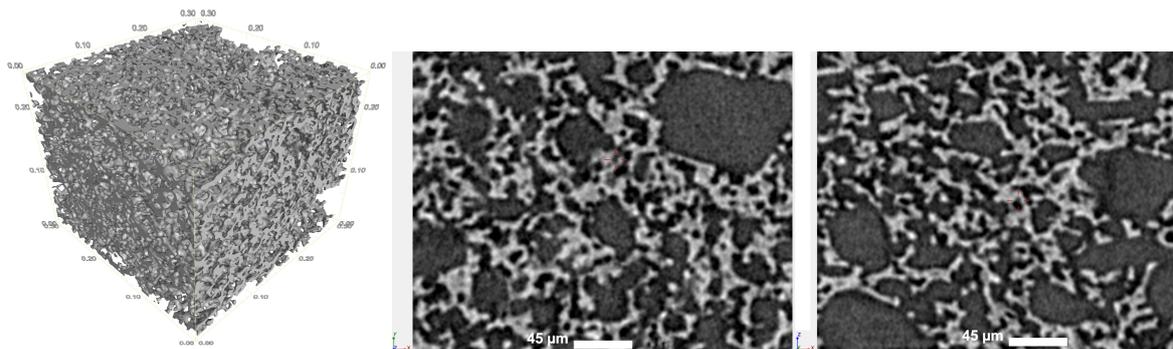


Abbildung 10: Darstellungen eines kleinen Ausschnitts aus dem Datensatz EVA 08. Links: 3D Rendering, rechts: Schnittbilder aus verschiedenen Richtungen

Die Form der Poren in Abbildung 10 ist nicht sphärisch sondern folgt der Struktur der Kristalle, die in das Polymer gemischt wurden. Es ist zu erkennen, dass alle Füllstoffe vollständig ausgewaschen wurden.

Die quantitativen Ergebnisse für Formfaktor und Volumen für EVA 08, EVA Serie und EVA Standard sind in Abbildung 10 dargestellt. Die von der Kugel abweichende Form, die man schon in den Schnittbildern erkennen konnte findet man in der Verteilung der Formfaktoren wieder. Man kann deutliche Unterschiede zwischen den Materialien erkennen. Das Standardmaterial weist Poren mit der größten Sphärizität auf während die niedrigsten Werte bei EVA 08 gemessen wurden. Auch die Breite der Verteilung ist bei EVA 08 am Größten.

Vergleicht man die Porengrößen so findet man die schmalste Verteilung beim Standardmaterial und sehr breite Verteilungen bei den beiden anderen Materialien. Die größten Poren sind beim Serienmaterial und bei EVA 08 um etwa den Faktor 10 größer als beim Standardmaterial.

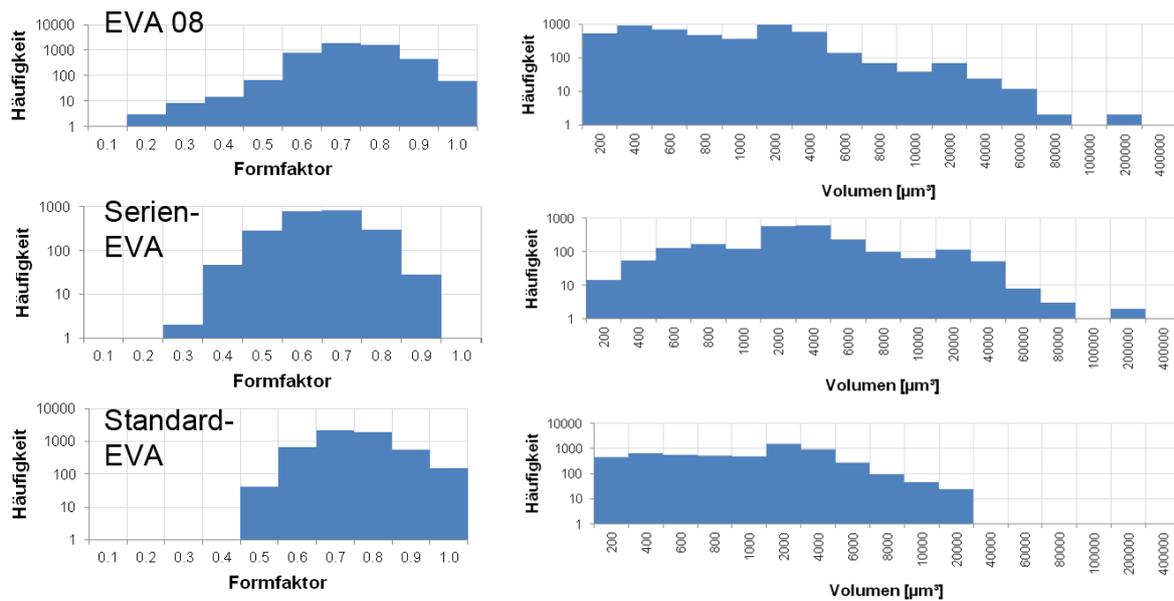


Abbildung 11: Verteilungen von Formfaktor und Volumen der Poren in verschiedenen EVA Schäumen

3. Zusammenfassung und Diskussion

Für die Charakterisierung der Tinteausbreitung in Polymerschäumen wurde ein Röntgencomputertomografie Laborgerät eingesetzt. Neben tomografischen wurden auch radiografische Analysen durchgeführt, die den Verlauf der Tinte in-situ beschreiben.

Die Aufbringung der Tinte erfolgte automatisiert, damit sowohl Menge als auch Geschwindigkeit genau definiert sind. Aufgrund der Viskosität der Tinte ist es wichtig, dass sich die Form der Tropfen möglichst nicht ändert.

Die Aufnahmegeschwindigkeit von acht Bildern pro Sekunde reicht aus, um die Aufnahme der Tinte in die Schäume zu analysieren und Unterschiede zwischen verschiedenen Materialien festzustellen.

Die Materialien, die für die Speicherung der Tinte verwendet werden, zeigen das beste Eindringverhalten. Die Tinte kann das Vlies und auch den PUR Schaum leicht durchdringen wobei das Polymervlies und auch das Baumwollvlies die Tinte besonders gut aufsaugen. Diese Eigenschaften sind für Speicherung und Abgabe der Tinte aus dem Reservoir erforderlich. Die großen Hohlräume, die die Aufnahme und Abgabe unterstützen, sind in den CT Schnittbildern zu sehen.

Bei den EVA Schäumen, die für die Erstellung des Druckbildes verwendet werden, ist eine Korrelation zwischen Eindringgeschwindigkeit und Eindringtiefe zu erkennen. Der Unterschied zwischen Vorder- und Rückseite der neu entwickelten Materialien ist für die Eigenschaften des Schaums von Nachteil und rührt vom Extrusionsprozess her. Die Offenporigkeit an der Oberfläche der Vorderseite ist durch eine ungünstige Parameterwahl beim Extrudieren nicht oder nur eingeschränkt gegeben.

Es sind geringe Unterschiede zwischen Standard- und Serienmaterial in Bezug auf das Eindringverhalten zu erkennen. Auch die Rückseite der neu entwickelten Materialien liefert annähernd dieselbe Eindringtiefe wie diese beiden Materialien.

Für die dreidimensionale Charakterisierung der thermoplastischen EVA Schäume ist die maximale Auflösung nötig, um alle Poren charakterisieren zu können. Sowohl Formfaktor als auch Porengrößenverteilung zeigen deutliche Unterschiede in der Morphologie der verschiedenen EVA Materialien. Die unterschiedlichen Formfaktoren deuten darauf hin, dass unterschiedliche Füllstoffe verwendet wurden. Die kleinsten Poren sind beim Standardmaterial vorhanden. Die Sphärizität ist bei Serien- und Standardmaterial

hoch. Das Stempelbild wird also durch große Poren und eine große Abweichung von der Sphärizität negativ beeinflusst, da Standard- und Serienmaterial die besten Stempelbilder aufweisen.

Die Kombination aus 2D in-situ und 3D Analyse liefert umfassende Informationen über die Materialeigenschaften. Eine Analyse alleine würde viele Fragen unbeantwortet lassen. Einige Phänomene können über die ergänzende Analyse geklärt werden.

Die Ergebnisse dieser Arbeit werden für die Optimierung der Herstellung der Schäume verwendet.

Danksagung

Die Arbeiten wurden durch das K-Projekt für zerstörungsfreie Prüfung und Tomografie (ZPT), der österreichischen Forschungsförderungsgesellschaft unterstützt. (www.zerstoerungsfrei.at)

Referenzen

- [1] Rhodes, M. B., Khaykin, B.: Stereology: a technique for the quantitative Characterization of foam structure. In: J. Thermal Insulation, 1991, 14, 175–183
- [2] Hamza, R., Zhang, X. D., Macosko, C. W. et al.: Imaging open-cell polyurethane foam via confocal microscopy, from Polymeric Foams. In: Science and Technology, 1997, 165–177
- [3] Montminy, M. D., Tannenbaum, A. R., Macosko, C. W.: New Algorithms for 3-D Imaging and Analysis of Open-Celled Foams. In: Journal of Cellular Plastics, Volume 37, Nov. 2001
- [4] Cenens, J., Huis, R., Chauvaux, B., et al: 3D cellular structure characterization of flexible polyurethane foam, from Cellular and Microcellular Materials, 1994, 29–44.
- [5] Eric Maire, A.F., Luc Salvo, Remy Dendievel, Souhail Youssef, Peter Cloetens, Jean Michel Letang X-ray tomography applied to the characterization of cellular materials. Related finite element modeling problems. Composites Science And Technology, 2003. 63: p. 2431-2443,
- [6] L. Salvo, P.C., E. Maire, S. Zabler, J.J. Blandin, J.Y. Buffière, W. Ludwig, E. Boller, D. Bellet, C. Josserson, X-ray Micro-Tomography an Attractive Characterisation Technique in Material Science. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, 2003. 200: p. 273-286,
- [7] Shutov, F., Ananthanarayan, V. T.: Cellular UHMW Polyethylene Produced by Non-Foaming Leaching Technique: Morphology and Properties. In: Journal of Cellular Plastics, 2002
- [8] Qingpu Hou, D.W.G., Jan Feijen, Porous Polymeric Structures for Tissue Engineering Prepared by a Coagulation, Compression Moulding and Salt Leaching Technique. Biomaterials, 2003. 24: p. 1937-1947,
- [9] Bigg, D.M., Properties and Processing Characteristics of Open-Celled Foams Produced by Leaching NaCl from High Density Polyethylene. Polymer Engineering and Science, 2004. 21(2): p. 76-79,
- [10] J Kastner. Proceedings Industrielle Computertomografietagung, Wels, Austria, 28.-30. September 2010, ISBN 978-3-8322-6949-4, Shaker Verlag, Aachen (2010).
- [11] J Kastner, R Kickinger, and D Salaberger. 'High resolution X-ray computed tomography for 3D-microstructure characterisation of a cellulose particle filled polymer foam'. Journal of Cellular Plastics 47, 567-578 (2011).
- [12] R. Kickinger, Analyse von Schaumwerkstoffen mittels Röntgen Comupter Tomografie, Bachelor thesis University of Applied Sciences Upper Austria (2009).
- [13] H. Scharleitner, 2D In-situ Investigations of Polymer Foams by Means of Radiography and 3D Structural Analysis by means of X-ray Computed Tomography Master thesis, University of Applied Sciences Upper Austria (2012).