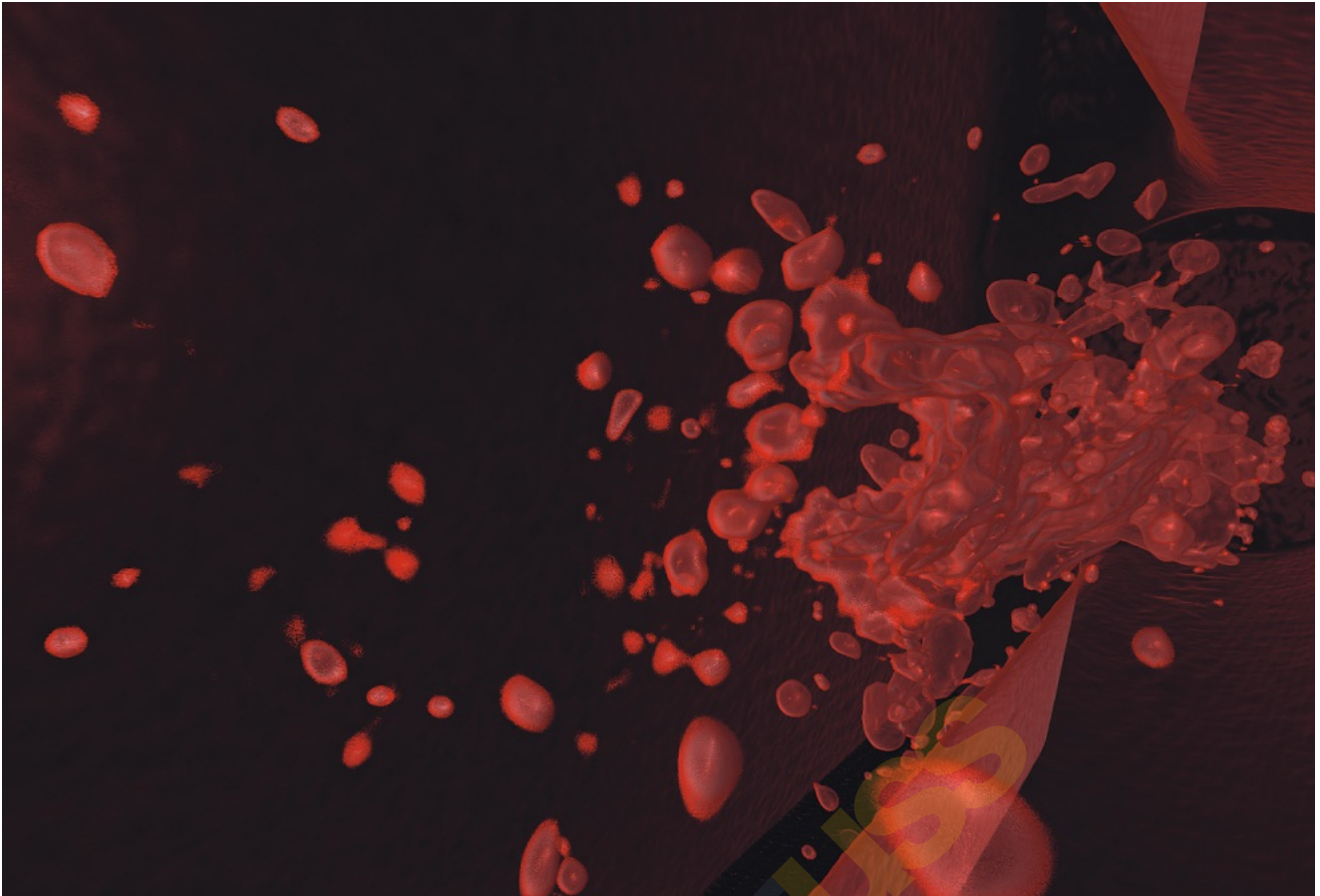


FOTOS UND GRAFIKEN: ÖGI

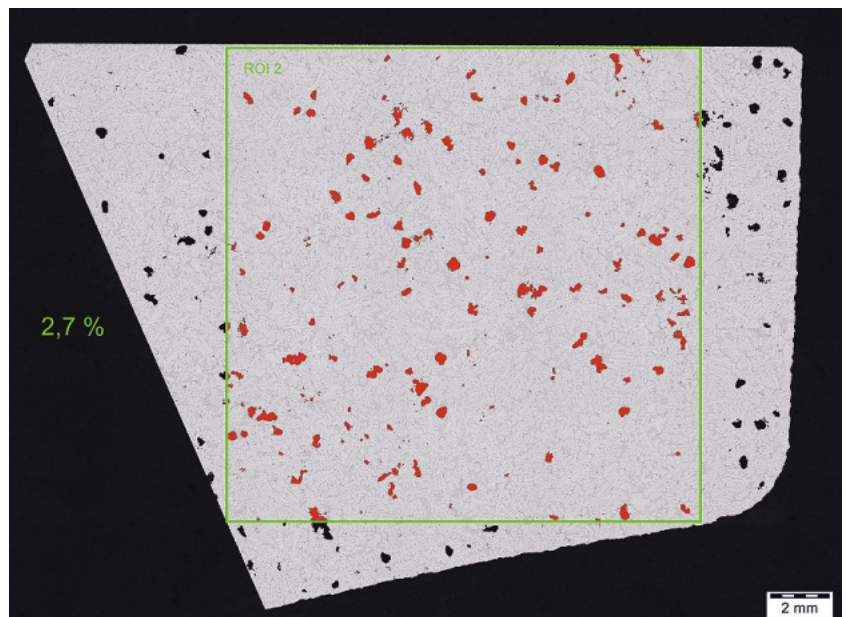


# Porositätsanalyse mittels Computertomografie – die neue BDG-Richtlinie P 203

Direct Volume Rendering von per CT detektierten Volumendefiziten in einem AI-Druckgussteil.

VON BERND OBERDORFER, DANIEL HABE UND GERHARD SCHINDELBACHER, LOEBEN, ÖSTERREICH

**A**bhängig vom Gießverfahren, der Legierung und der Schmelzebehandlung, der Gießtechnik und den Prozessparametern, aber auch der Bauteilgeometrie, ist in Gussteilen mit inneren Volumendefiziten wie Poren oder Lunkern zu rechnen. Je nach Einsatz des Bauteils und den damit zu erwartenden lokalen Spannungen ist bereits bei der Entwicklung vom Konstrukteur die maximal zulässige Porosität festzulegen und in der Zeichnung einzutragen. Als vorteilhaft hat sich in der Praxis erwiesen, die Teile in mehrere Bereiche mit z. B. höchster, mittlerer und geringer Beanspruchung einzuteilen. Dementsprechend ist auch in den verschiedenen beanspruchten Bereichen unterschiedliche Porosität zulässig,



**Bild 1:** Schliffprobe mit eingeschriebenem Quadrat als Bezugsfläche für die Auswertung der Flächenporosität (2,7 %).

ohne dass der Anwendungszweck beeinträchtigt wird.

Durch die Einbindung der numerischen Simulation können schon frühzeitig, bevor noch ein Werkzeug angefertigt bzw. ein Abguss erfolgt ist, mögliche Problemstellen durch die Formfüllung (Luft einschüsse) und Erstarrung (Lunker) erkannt werden. In dieser Phase sind oft noch geometrische Änderungen möglich, um diese Porositätszonen zu vermeiden oder zumindest in Bereiche zu verlagern, die weniger kritisch sind. Damit sind aber auch bereits jene Stellen festgelegt, auf die bei der Qualitätskontrolle besonderes Augenmerk zu legen ist. Auch wenn Prozessparameter in so engen Grenzen wie möglich gehalten werden, ist mit einer gewissen Schwankungsbreite bei Position und Ausprägung von Porositäten zu rechnen. Diesem Umstand muss Rechnung getragen und im Sicherheitsbeiwert berücksichtigt werden [1].

### VDG-Merkblätter P 201 und P 202

Die Festlegung der lokal zulässigen Porosität in Form von Grenzmustern sollte nach Möglichkeit immer in Zusammenarbeit mit dem Gießer erfolgen, da häufig durch kleine geometrische Anpassungen oder auch die richtige Gestaltung der Anschnitt- und Speisertechnik, bzw. die richtige Temperierung von Kokillen und geeignete Schlichten (isolierend oder wärmeleitend), Einfluss auf die Erstarrung des Gussteils und damit auf die lokale Porosität genommen werden kann. Als Basis zur Vereinbarung zwischen Gießer und Gussanwender über die zulässigen Grenzwerte haben sich in

## KURZFASSUNG:

Gussteile sind aufgrund von Topologieoptimierung zur Materialeinsparung und der energie- und ressourcenschonenden Leichtbauweise stetig wachsenden Qualitätsanforderungen unterworfen, was dazu führt, dass auch die zugehörige Qualitätssicherung kontinuierlich verbessert werden muss. Mit heutigen Prüfmethoden wie der Computertomografie werden beispielsweise Porositäten erkennbar, die man früher nicht oder weniger detailliert gesehen hat. Die Porositätsbewertung erfolgt aber vielfach noch nach alten Schemata der Radioskopie oder Metallografie, was häufig Anlass für Diskussionen zwischen Gießer und Gussanwender bietet und Ausgangspunkt des Forschungsprojekts CT-Real und zur Entwicklung der hier vorgestellten neuen BDG-Richtlinie P 203 war.

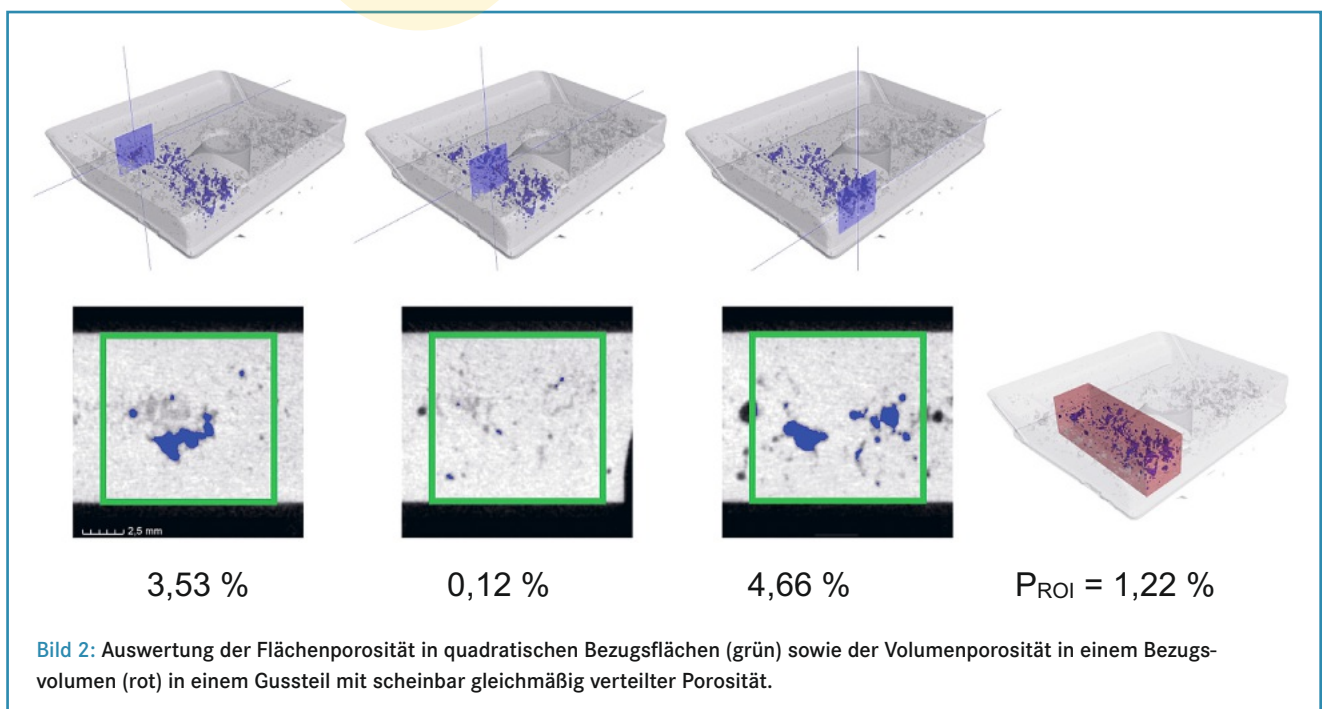
den letzten Jahrzehnten die VDG-Merkblätter P 201 bzw. P 202 etabliert [2, 3]. Darüber hinaus gibt es vielfach gussanwenderspezifische Porositätsvorschriften (z. B. VW-Norm 50093), die sich auf die VDG-Merkblätter beziehen.

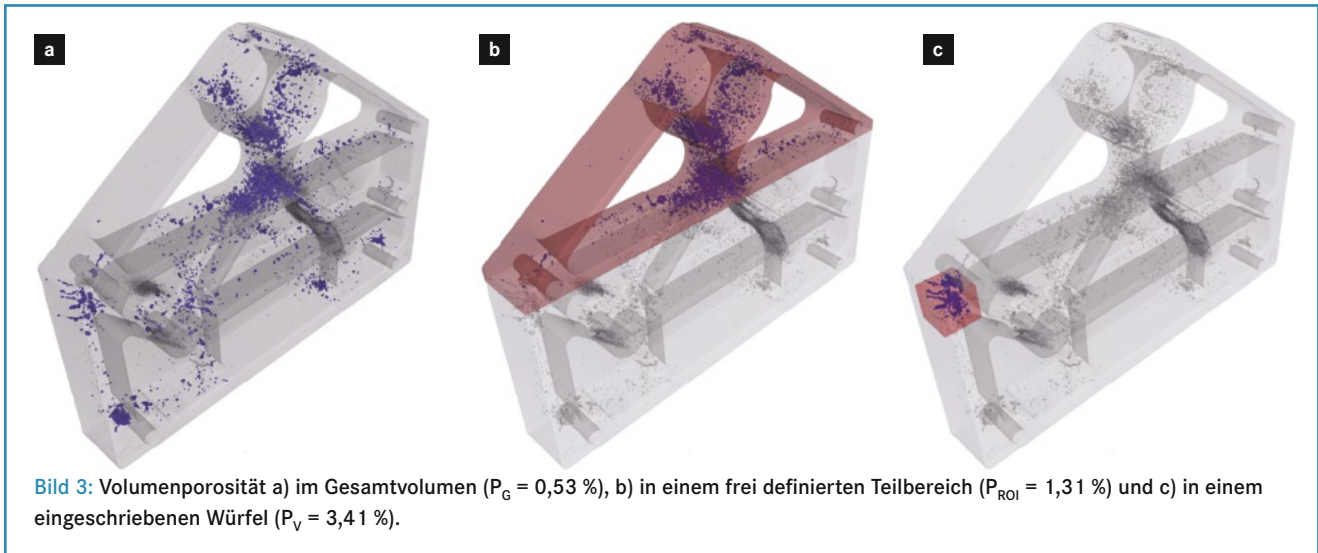
In den Merkblättern wird beschrieben, wie die zulässige Porosität in Zeichnungen anzugeben ist und wie die Auswertung an einem metallografischen Schliff zu erfolgen hat. Die Angabe der zulässigen Porosität berücksichtigt die Beanspruchungsart, die maximal zulässige Porosität, den maximalen Porendurchmesser sowie durch Zusätze den Abstand benachbarter Poren, Porennester und die Lage der Poren. Bei der Auswertung wird im Querschnitt des metallografischen Schliffs an der Stelle der höchsten Porosität eine definierte Bezugsgeometrie eingeschrieben, die auf die Bauteilwandstärke maximiert wird und in der der Prozentsatz der Porosität berechnet wird (Bild 1). Diese Methode der Schliffauswertung ist im Zuge der Entwicklung unerlässlich, da damit die Porosität sehr genau ermittelt und

zusätzlich auch das Gefüge beurteilt werden kann. Sie hat jedoch den Nachteil, dass es sich um eine zweidimensionale „Momentaufnahme“ einer Ebene handelt und nur wenige Millimeter darunter die Porosität stark abweichen kann. Zudem ist der metallografische Schliff als zerstörendes Verfahren für eine serienbegleitende Prüfung nicht geeignet. Bestenfalls können stichprobenartige Überprüfungen durchgeführt werden.

### Die neue Richtlinie P 203

In den letzten Jahren hat sich die Computertomografie (CT) zur zerstörungsfreien Prüfung von Gussteilen zunehmend als Standard etabliert und wird auch zur Inline-Prüfung eingesetzt. Es ist davon auszugehen, dass in wenigen Jahren in Gießereien anstelle oder als Ergänzung zu Röntgengeräten CT-Anlagen stehen werden, um von den Vorteilen der genaueren dreidimensionalen Charakterisierung zu profitieren. Damit einhergehend ist aber auch eine einheitliche Basis für die Aus-





**Bild 3:** Volumenporosität a) im Gesamtvolumen ( $P_G = 0,53 \%$ ), b) in einem frei definierten Teilbereich ( $P_{ROI} = 1,31 \%$ ) und c) in einem eingeschriebenen Würfel ( $P_V = 3,41 \%$ ).

wertung, ähnlich den VDG-Merkblättern P 201 und P 202, notwendig. Sowohl was die Aufnahmeparameter und die Güte der CT-Daten als auch die Auswertung der Porosität betrifft, gab es bisher keine einheitliche Vorgehensweise. Aus Mangel an Alternativen wurden und werden die Merkblätter P 201 und P 202 auf CT-Daten angewendet, was eine Verschärfung der einzuhaltenden Porositätsgrenzwerte bedeuten kann, die nicht in den Bauteilanforderungen begründet ist. **Bild 2** veranschaulicht, wie stark eine P 202-Auswertung von der im CT-Datensatz gewählten Ebene in einem Bereich mit scheinbar homogen verteilter Porosität abhängig ist. Je nach Lage des Schnittbilds wird eine Flächenporosität zwischen 0,12 % und 4,66 % ermittelt. Wird hingegen das gesamte Teilvolumen für die Auswertung herangezogen, ergibt sich eine sehr viel aussagekräftigere Porosität  $P_{ROI}$  von 1,22 %. Dabei wird auch klar, dass Flächenporositätswerte mit Volumenporositätswerten im Allgemeinen nicht identisch und nicht miteinander vergleichbar sind.

Mit der BDG-Richtlinie P 203 „Porositätsanalyse und -beurteilung mittels industrieller Röntgen-Computertomographie“, die in Zusammenarbeit des Bundesverband der Deutschen Gießerei-Industrie (BDG) mit dem Österreichischen Gießerei-Institut (ÖGI), der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, CT-Dienstleistern, Gießereien und Gussanwendern ausgearbeitet wurde, steht nun ein Leitfaden für die Prüfung von Gussteilen aus Al-, Mg- und Zn-Gusslegierungen mittels CT zur Verfügung [4]. Sie befasst sich neben der genauen Erläuterung innerer Volumendefizite detailliert mit der Messmethode der CT. Dazu gehören die Beschreibung der Detailerkennbarkeit, welche Bildartefakte auftreten und wie sie redu-

ziert werden können, Verfahren zur Segmentierung von Porosität trotz des Auftretens von Artefakten sowie Anlagenqualifizierung und Prüfdurchführung, inkl. Methoden zur Quantifizierung der Bildgüte. Vorteile, die die CT durch den Informationsgewinn in der dritten Dimension hat (wie etwa Porenmorphologie), fanden in Form von verschiedenen Porenparametern Eingang. Dementsprechend wurde ein Porositätsschlüssel zur Vereinbarung von Abnahmebestimmungen und seine Eintragung in Zeichnungen definiert. Festgelegt wird auch, wie die Dokumentation der Prüfung auszusehen hat. Die BDG-Richtlinie P 203 bildet damit eine Basis, wie sich Gießer und Gussabnehmer hinsichtlich Angaben in Zeichnungen und Prüfung der zulässigen Porosität in lokalen Bereichen von Gussteilen verständigen können.

#### Auswertung der Porosität

Bezüglich der Angabe und der Auswertung der inneren Volumendefizite wird unterschieden in: Gesamtvolumenporosität  $P_G$  (Porenvolumenanteil, bezogen auf das gesamte Bauteilvolumen), Volumenporosität in einem Teilbereich  $P_{ROI}$  (Porenvolumenanteil, bezogen auf das Volumen eines frei definierten Bauteilbereiches) sowie Volumenporosität in einem geometrisch definierten Bezugsvolumen  $P_V$  (Porenvolumenanteil, bezogen auf das Volumen eines eingeschriebenen geometrisch definierten Körpers, z. B. Würfel, Zylinder, ...). In **Bild 3** ist anhand eines Beispiels aus der BDG-Richtlinie der Unterschied bei der Auswertung dargestellt. Bei Beurteilung des gesamten Bauteils ergibt sich eine Gesamtvolumenporosität  $P_G$  von 0,53 %. Wird jedoch nur ein frei definierter Bauteilbereich gewählt, beträgt die Porosität  $P_{ROI}$  1,31 % und wenn ein ein-

geschriebener Würfel herangezogen wird, liegt die Porosität  $P_V$  bei 3,41 %.

Wie bedeutend letztere Größe ist, trat bei Vorarbeiten an Al-Druckguss-Flachzugproben zutage. Die mechanische Prüfung ergab, dass der Bruch nicht zwangsläufig von der größten Pore, sondern oft von der Stelle des Maximums der lokalen Porosität in einem Würfel ausgeht [5]. Dieses Ergebnis unterstreicht die Wichtigkeit einer lokalen Auswertung des Porositätsanteils für die Abschätzung der Bauteilfestigkeit. Der Porenparameter  $P_V$  hat außerdem den Vorteil der Übertragbarkeit auf andere Bauteile, allerdings den großen Nachteil des enormen Aufwands, der zu seiner manuellen Auswertung nötig ist. Dieses Problem soll u. a. in einem Nachfolgeprojekt behandelt werden.

#### Umgang mit Artefakten

Ein Aspekt, der hier noch detaillierter aufgegriffen werden soll, ist die Porositätsanalyse bei artefaktbehafteten CT-Datensätzen. Eine Segmentierung der Porosität vom umgebenden Material ist in solchen Daten mit globalen Schwellwertalgorithmen meist nicht möglich. Lokal adaptive Algorithmen, die eine Festlegung einer Vielzahl von Parametern vorab erfordern, sind hingegen zeit- und ressourcenintensiv. Mit der am ÖGI in Zusammenarbeit mit der VRVis GmbH entwickelten Forschungssoftware Volume Renderer [6] wurde daher ein anderer Ansatz gewählt. Dabei wird zunächst eine schnelle Segmentierung - mithilfe nur eines einzustellenden Parameters, der die lokale Schwellwertsetzung beschreibt, durchgeführt. Der Segmentierungsalgorithmus nutzt dabei die in Grafikkarten implementierte massive Parallelisierung. Die Analyse eines kleineren CT-Datensatzes von knapp über 2

GB dauert dabei nur ca. 14 s. Per interaktiver Exploration können die überdetektierten Regionen in Echtzeit von der Segmentierung ausgeschlossen und die Analyse weiter verfeinert werden. Die Interaktion geschieht über Eigenschaften der detektierten Features wie Volumen, Oberfläche, durchschnittlicher Grauwert und Standardabweichung in Form von parallelen Koordinaten, an denen eine Eingrenzung der Parameterwerte vorgenommen wird. Diese nachträgliche interaktive Filterung ermöglicht eine schnelle und intuitive Defektdetektion mit visuellem Feedback, ohne dass spezielles Vorwissen bestimmter Parameter vorausgesetzt wird.

Als große Herausforderung für eine Porositätsanalyse mittels CT wurde ein AI-Stufenzylinder mit verschiedenen Wandstärken (und damit starken Bildartefakten in Form von Helligkeitsschwankungen) konstruiert und mit künstlich aufgegebener Schmelze und folglich hoher Porosität abgegossen, an dem die Analysealgorithmen bestens getestet werden konnten. Bild 4 zeigt einen Screenshot der Forschungssoftware Volume Renderer mit der erfolgreichen Porositätsanalyse dieses Stufenzylinders. Die Erkenntnisse aus diesen Untersuchungen flossen auch in die neue Richtlinie P 203 ein.

## Fazit

Zusammenfassend hat die dreidimensionale Charakterisierung von Volumendefiziten mittels CT gegenüber anderen zerstörungsfreien Prüfverfahren wie Radio-

skopie, Ultraschall- oder Eindringprüfung große Vorteile, die aber nur dann richtig ausgenutzt werden können, wenn die CT schnell und so weit wie möglich automatisiert ausgeführt wird. Wenn Porosität zuverlässig erkannt wird, können überkonservative Sicherheitsgrenzen und zu viel Ausschuss in der Serienproduktion vermieden werden. Das frühzeitige Erkennen schadhafter Gussteile per CT im Vorhinein verhindert auch unnötige Kosten bei nachgeschalteten Prozessen wie Wärmebehandlung oder mechanischer Bearbeitung und verspricht hohes Einsparpotential bei Energie und Ressourcen in der vergleichsweise sehr energieintensiven Gießereibranche. Problematisch kann bei der CT die durch die dritte Dimension bedingte enorme Zunahme an auszuwertenden Daten sein. Gleichzeitig sind daher auch Gussanwender gefordert, ihre Abnahmebestimmungen, die üblicherweise auf einer Radioskopieprüfung basieren, entsprechend der neuen BDG-Richtlinie P 203 zu adaptieren. Mittelfristig ist aber davon auszugehen, dass an einer dreidimensionalen Auswertung kein Weg vorbeiführt.

## Folgeprojekte

Die Arbeiten des ÖGI zur neuen Richtlinie entstanden im Rahmen des mittlerweile abgeschlossenen Forschungsprojekts CT-Real. Ein Nachfolgeprojekt zur konsequenten digitalen Umsetzung der neuen Richtlinie, ebenfalls wieder mit Industriebeteiligung, wurde kürzlich zur Förderung bei der Österreichischen Forschungsför-

derungsgesellschaft FFG eingereicht. Der Projektstart ist für den Herbst 2020 geplant; eine Beteiligung auch internationaler Industriepartner ist nach wie vor möglich. Synergieeffekte ergeben sich dabei mit einem unlängst gestarteten Forschungsprojekt namens InterACTS, das sich mit der Online-Visualisierung von CT-Datensätzen aller Art befasst, was die Möglichkeit der kollaborativen Analyse von CT-Daten über das Internet auch auf einfachen Endgeräten eröffnen soll.



Das Projekt CT-Real wurde von der Österreichischen Forschungsförderungsgesellschaft FFG gefördert und von industriellen Partnern finanziell unterstützt, wofür herzlich gedankt wird. Die Arbeiten zu Porositätsanalyse und Visualisierung entstanden in Zusammenarbeit mit der VRVis GmbH und der Aardworx GmbH.

Dipl.-Ing. Dr. Bernd Oberdorfer, Leitung CT-Labor, Daniel Habe, CT-Labor, Dipl.-Ing. Gerhard Schindelbacher, Geschäftsführung, Österreichisches Gießerei-Institut (ÖGI), Leoben, Österreich.

[www.ogi.at](http://www.ogi.at)

## Literatur

- [1] Giesserei Rundschau 66 (2019), [Nr. 4], S. 13 ff.
- [2] VDG-Merkblatt P 201, Volumendefizite von Gussstücken aus Nichteisenmetallen, 2002.
- [3] BDG - Bundesverband der Deutschen Gießerei-Industrie, BDG-Richtlinie P 202, Volumendefizite von Gussstücken aus Aluminium-, Magnesium- und Zinkgusslegierungen, 2010.
- [4] BDG-Richtlinie P 203 E, Porositätsanalyse und -beurteilung mittels industrieller Röntgen-Computertomographie (CT), 2019.
- [5] B. Oberdorfer, E. Kaschnitz, D. Habe, H. Holzer, G. Schindelbacher, P. Schumacher, New Method of Enhanced Quality Assessment for Aluminium Cast Parts by Computed Tomography, Proc. 5th Conf. Industrial Computed Tomography (iCT) 2014, Wels, Österreich.
- [6] H. Steinlechner, G. Haaser, B. Oberdorfer, D. Habe, S. Maierhofer, M. Schwärzler, E. Gröller, A Novel Approach for Immediate, Interactive CT Data Visualization and Evaluation using GPU-based Segmentation and Visual Analysis, Proc. 9th Conf. Industrial Computed Tomography (iCT) 2019, Padua, Italien.

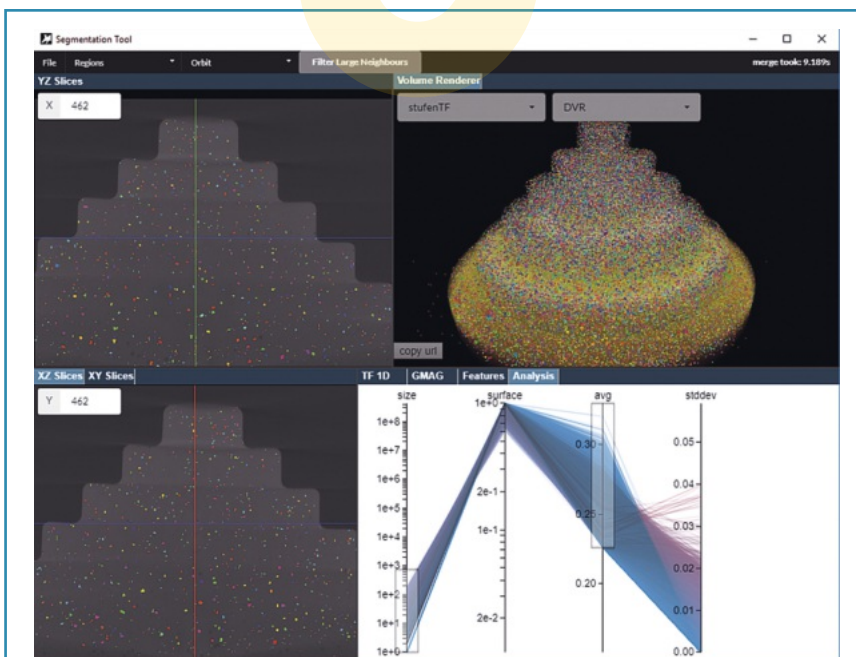


Bild 4: Screenshot der Software Volume Renderer aus dem FFG-Projekt CT-Real mit Seiten- und 3-D-Ansicht eines Stufenzylinders sowie den parallelen Koordinaten für die Porositätsanalyse.