

Zerstörungsfreie Gussstückprüfung (ZfP) mit Hilfe der Computertomografie

Detektion und Bewertung von Porositäten mit industrieller CT unter Anwendung der BDG - Richtlinie P 203

Dipl.-Ing. (FH) **A. Harborth**, Volume Graphics GmbH, Heidelberg

Kurzfassung

Gussstücke weisen trotz ihrer bedeutenden technischen und wirtschaftlichen Vorteile oftmals den Nachteil auf, dass sie durch unterschiedliche Ursachen generierte Porositäten in Form von Gasporen und Erstarrungslunkern enthalten. Das Ziel der Gießerei besteht darin, die Menge und Größe von Porositäten in Gussstücken so zu minimieren, dass diese die spätere Funktion der Bauteile nicht beeinträchtigen.

Der Einfluss von Porositäten auf die statische und dynamische Bauteilfestigkeit ist bedeutend und darf nicht unterschätzt werden. Einige Beispiele verdeutlichen hier die Zusammenhänge.

Die zerstörungsfreie Prüfmethode mittels Röntgen-CT zur dreidimensionalen Bestimmung und Beurteilung von Volumendefiziten in Gussstücken ist in der BDG - Richtlinie P 203, Stand Dezember 2019 ausführlich beschrieben.

Anhand eines Anwendungsbeispiels mit einem Druckgussbauteil aus dem Automotive Powertrain-Bereich wird die Vorgehensweise bei der zerstörungsfreien Prüfung mit Hilfe der industriellen CT gezeigt. Die Ergebnisse der Porositätsanalyse nach BDG - Richtlinie P 203 werden dargestellt und zusätzlich mit Porositätsdaten aus einer Formfüll- und Erstarrungssimulation verglichen.

Die statistische Erfassung und Auswertung von detektierten Porositäten sowie Trendanalysen für verschiedene Porositätsparameter bieten dem Gießer neue Möglichkeiten für den rechtzeitigen Eingriff in den Gießprozess, bevor Ausschuss entsteht.

Künstliche Intelligenz & Machine Learning Funktionen in CT-Systemen und CT-Software werden die Automatisierung der Auswertung von Volumendefiziten in Gussteilen zugunsten aller am Produktentstehungsprozess beteiligten Parteien weiter voranbringen.

Abstract (optional)

In spite of their significant technical and economic advantages, castings often have the disadvantage that they contain porosities in the form of gas pores and solidification voids generated by various causes. The aim of the foundry is to minimize the amount and size of porosities in castings in such a way that they do not affect the later function of the components.

The influence of porosity on the static and dynamic component strength is significant and must not be ignored. A few examples illustrate the connections here.

The non-destructive testing method using X-ray CT for three-dimensional determination and assessment of volume deficits in castings is described in detail in BDG Reference Sheet P 203, as of December 2019.

Using an application example with a die-cast component from the automotive powertrain area, the procedure for non-destructive testing with the help of industrial CT is shown. The results of the porosity analysis according to BDG Reference Sheet P 203 are presented and also compared with porosity data from a mold filling and solidification simulation.

The statistical recording and evaluation of detected porosities as well as trend analyzes for various porosity parameters offer the caster new possibilities for timely intervention in the casting process before rejects occur.

Artificial intelligence & machine learning functions in CT systems and CT software will further advance the automation of the evaluation of volume deficits in cast parts for the benefit of all parties involved in the product development process.

1. Industrielle Computertomographie (iCT) für Gießereianwendungen

Leichtmetallgussstücke bieten bedeutende technische und wirtschaftliche Vorteile wie z.B. die Möglichkeit einer hohen Funktionsintegration, ein geringes spezifisches Gewicht und eine hohe Maßgenauigkeit. Insbesondere die mit dem Druckgießprozess hergestellten Gussstücke weisen jedoch oftmals den Nachteil auf, dass sie durch unterschiedliche Ursachen generierte Porositäten in Form von Gasporen und Erstarrungslunkern enthalten.

Das Ziel der Gießer besteht darin, die Menge und Größe von Schwindungsporositäten und Gasporositäten in Gussstücken so zu minimieren, dass diese die spätere Funktion der Bauteile nicht beeinträchtigen. Die seit Jahrzehnten etablierte 2D-Röntgentechnik ist hierbei nur ein bedingt geeignetes Werkzeug, um Gießprozessoptimierungen effektiv zu steuern. Denn die Interpretation der Ergebnisse der 2D-Inspektionen ist stark abhängig vom Erfahrungsschatz des Anlagenbedieners und/oder des Gießereitechnologen.

Die iCT bietet neben der typischen visuellen Inspektion von Werkstücken viele weitere Funktionalitäten, welche bei konsequenter Nutzung zu einer sehr zügigen Amortisation der Investitionskosten führen können. Im nachfolgenden Bild sind die typischen Möglichkeiten einer CT-Anlage der einer Standard-2D-Röntgenanalyse gegenüber gestellt.

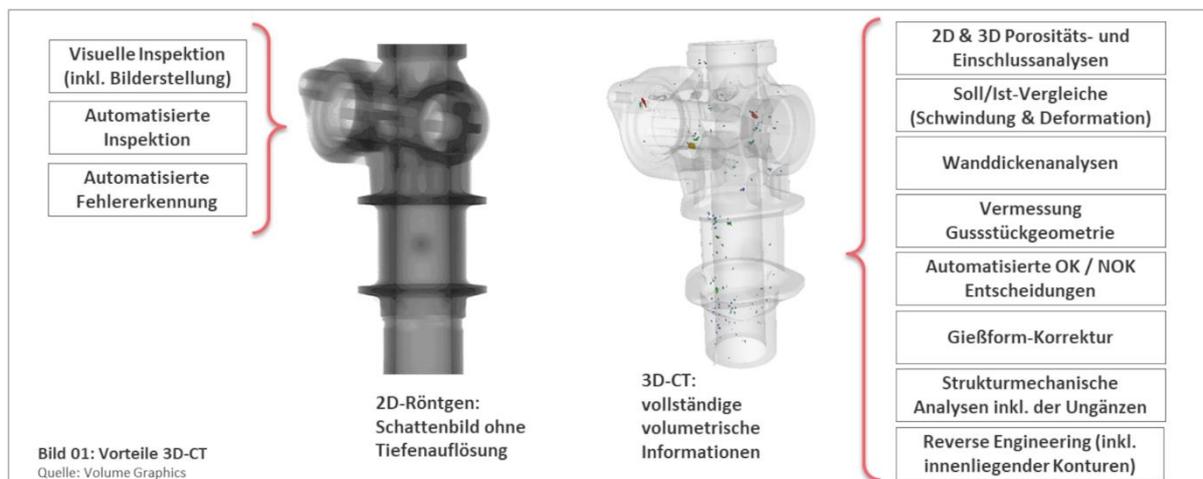


Bild 01: Vorteile 3D-CT

Dem Gießer steht mit einer 3D-CT-Anlage ein sehr gut automatisierbares Prüfmittel für serienbegleitende Stichprobenprüfungen oder sogar 100%-Serienprüfungen zur Verfügung. Ungängen jedweder Art in Gussstücken können zerstörungsfrei mit Hilfe von 2D-Porositätsanalysen nach BDG – Richtlinie P 202 und 3D-Porositätsanalysen nach BDG – Richtlinie P 203 schnell und reproduzierbar detektiert und ausgewertet werden. Zusätzlich können parallel zur Porositätsanalyse mit der CT z.B. auch eine Vermessung der Gussstückgeometrie oder eine Wanddickenanalyse vorgenommen werden.

2. Einfluss der Porosität auf statische und dynamische Festigkeiten von Gussstücken

Die Festigkeitseigenschaften eines Gussstücks sind abhängig von den Werkstoffeigenschaften der Gusslegierung, der Kerbempfindlichkeit und von den örtlichen Betriebsbeanspruchungen, bei aushärtbaren Gusslegierungen auch vom Wärmebehandlungszustand.

Zusätzlich zu diesen hauptsächlich von der Gusslegierung bestimmten Eigenschaften kommt der nicht zu unterschätzende Einfluss von Fremdkörpern, z.B. in Form von harten Einschlüssen, von Rissen im Gussstückgefüge und von Volumendefiziten in Form von Gasporen und Erstarrungslunkern auf die statischen und dynamischen Festigkeiten von Gussstücken. Denn Ungängen innerhalb von Gussstücken wirken wie innere Kerben und beeinflussen hochsignifikant und in ungünstiger Weise sowohl die statischen als auch dynamischen Festigkeitseigenschaften.

Aufgrund der großen Volumenänderung von flüssig nach fest bei der Erstarrung von Leichtmetallgusslegierungen (Schwindung) und der in der Produktion verwendeten Gießverfahren ist die Porosität hier der bestimmende Faktor. Volumenporosität, Art der Porenverteilung und Porenmorphologie beeinflussen deutlich die dynamischen Festigkeitseigenschaften wie Schwingfestigkeit und Bruchlastspielzahl.

Als Beispiele für den ungünstigen Einfluss von Form (Porenmorphologie) und Lage von Porositäten innerhalb eines Gussstücks werden hier zwei Porositätseigenschaften näher betrachtet: Die Zerklüftung von Poren (Sphärizität ψ) und die Porenlage (Randabstand d_a).

Die nachstehenden Diagramme und Bilder zeigen hier deutlich den Einfluss der Sphärizität und des Randabstands von Poren auf die Festigkeitseigenschaften einer Rundstabzugprobe aus der Gusslegierung AISi7Mg0.3 im Gusszustand F (ohne Wärmebehandlung) [1], [2].

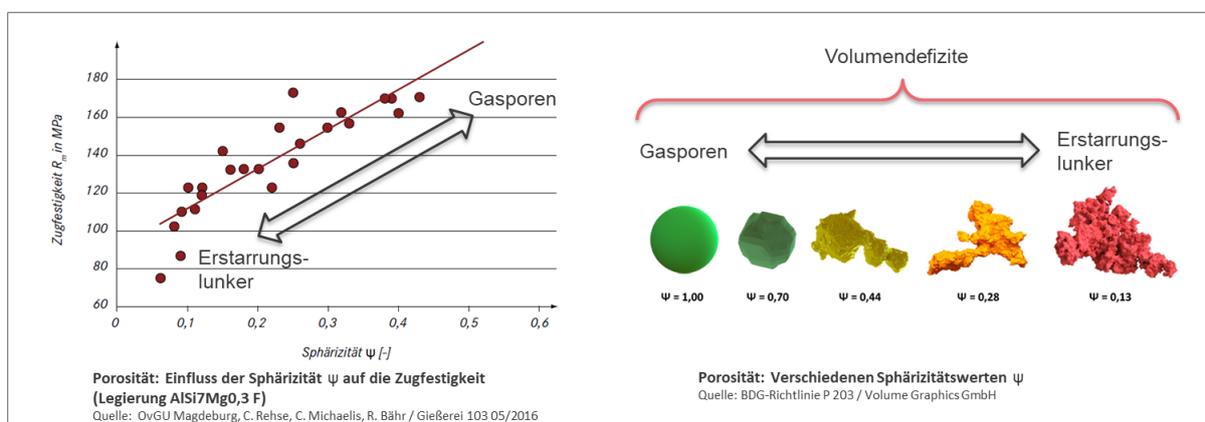


Bild 02: Einfluss der Porenmorphologie / Sphärizität ψ [1], [2]

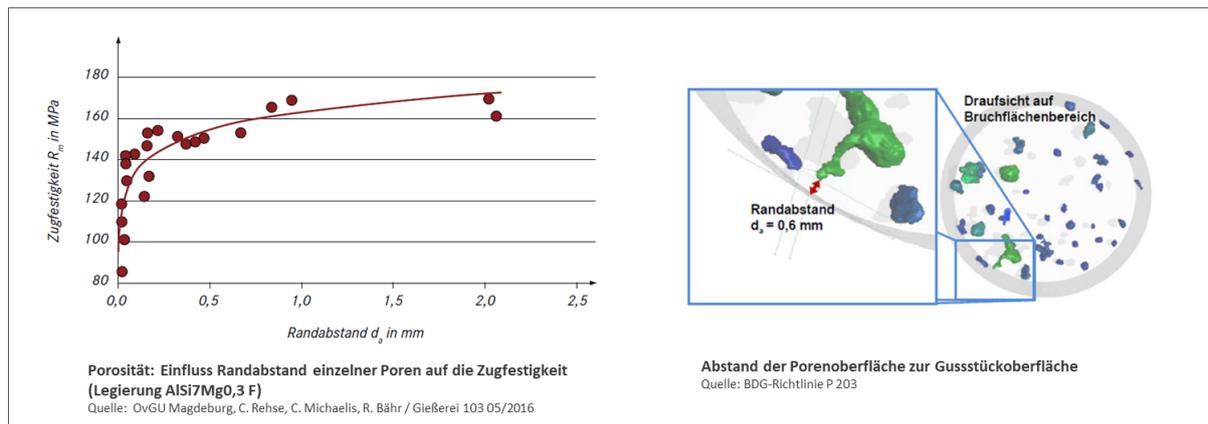


Bild 03: Einfluss der Porenlage / Randabstand d_a [1], [2]

Mit Hilfe der iCT können aufgrund der dreidimensionalen Röntgenprüfung die Porositätseigenschaften Sphärizität und Randabstand von Poren sowie viele weitere Eigenschaften von Poren mit einem sehr großen Informationsgehalt schnell und reproduzierbar innerhalb eines Gussstücks detektiert, ausgewertet und sowohl für automatisierte OK/NOK-Entscheidungen in der Serie als auch für statische und dynamische Festigkeitsuntersuchungen herangezogen werden.

Die Prüfmethode mittels Röntgen-CT zur dreidimensionalen Bestimmung und Beurteilung von Volumendefiziten in Gussstücken aus Aluminium-, Magnesium- und Zinkgusslegierungen ist in der BDG - Richtlinie P 203, Stand Dezember 2019 ausführlich beschrieben.

3. BDG – P 203 Anwendungsbeispiel / Spezifikation Porosität

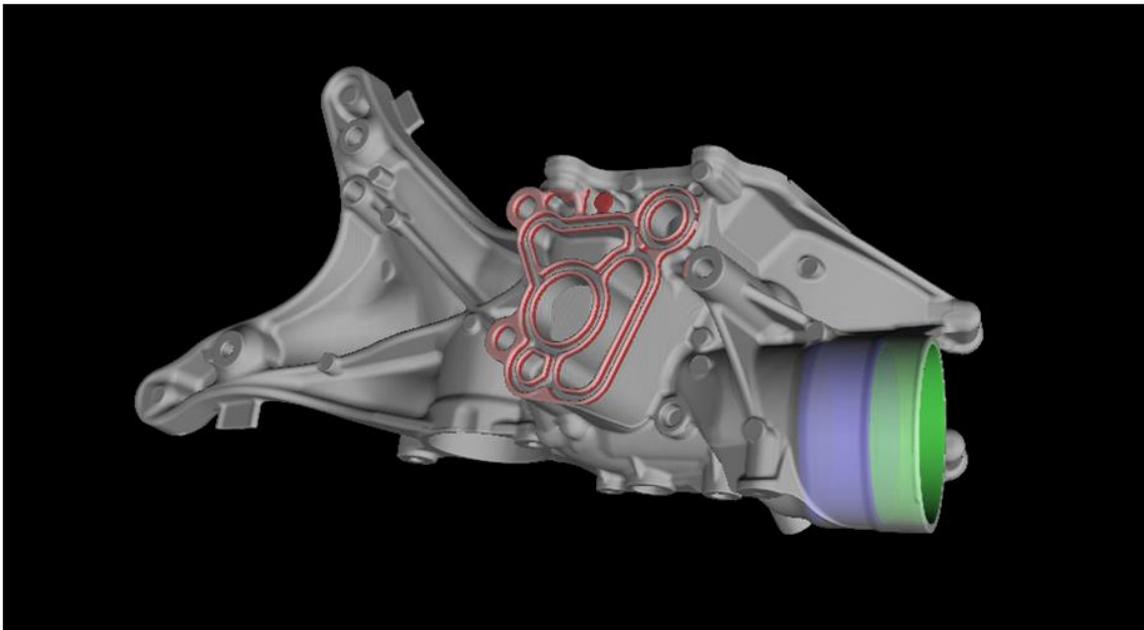
Anhand eines Anwendungsbeispiels mit dem Druckgusswerkstück „Halter NA“ aus dem Automotive-Bereich wird gezeigt, wie die Prüfmethode zur dreidimensionalen Bestimmung und Beurteilung von Volumendefiziten gemäß BDG – Richtlinie P 203 in der Praxis angewendet werden kann.

Bevor die eigentliche CT-Porositätsanalyse in der Gießerei durchgeführt werden kann, bedarf es jedoch vorbereitender Tätigkeiten durch den Konstrukteur des Gussstücks, d.h. es muss eine Spezifikation für die maximal zulässigen Porositäten im Gussstück erstellt werden.

Die Anforderungen an die maximale Gesamtporosität eines Gussstücks sowie ggf. lokal davon abweichende Anforderungen für funktionale und/oder festigkeitsrelevante Gussstückbereiche werden im 3D-CAD und/oder in der 2D-Zeichnung durch entsprechende Einträge spezifiziert.

Ideal ist es, wenn der Konstrukteur die Porositätsspezifikation durch die zusätzliche Erstellung von 3D-CAD-Volumendaten in dem Fertigteilmodell (fertig bearbeitetes Gussstück) unterstützt und die Porositätsschlüssel nach BDG – P 203 über entsprechende Einträge im 2D/3D-CAD vorgibt.

Diese CAD-Volumendaten zur Porositätsspezifikation können dann zusammen mit dem 3D-CAD-Datensatz des Gussstücks von Beginn des Produktentstehungsprozesses an für Anfragen des Kunden an den Lieferanten verwendet werden. Weiterhin können diese CAD-Volumendaten später über eine Importfunktion auf einfache Weise für die CT-Porositätsanalysen nach BDG – Richtlinie P 203 verwendet werden.



Rohteil Halter NA inkl. importierter und eingefärbter 3D-CAD Daten „Porenspezifikation“

Quelle: Volume Graphics GmbH

Bild 04: Rohteil inkl. importierter und eingefärbter 3D-CAD Daten „Porositätsspezifikation“

Die Porositätsschlüssel nach BDG – Richtlinie P 203 beschreiben die Porositätsparameter wie z.B. die maximal zulässige Größe von Poren, den Mindestabstand von Poren zueinander oder zur Gussstückoberfläche, die maximale Gesamtvolumenporosität etc. für jede durch den Konstrukteur definierte Prüfregion im Gussstück.

Gleichzeitig kann mit einem Porositätsschlüssel auch festgelegt werden, welche Form oder Größe von Porositäten für die zu untersuchende Prüfregion nicht weiter analysiert werden müssen, z.B. könnten alle Poren mit einem Durchmesser ≤ 0.5 mm von der Porositätsanalyse ausgeschlossen werden, da ggf. diese Porengröße in der zu untersuchenden Region für die erforderliche Funktion des Gussstückes unkritisch ist.

Eine näher spezifizierte Gussstückregion wird im Bereich der iCT-Anwendungen Prüfregion oder auch oft „Region-von-Interesse“, in Englisch „Region-of-Interest“, kurz „ROI“ genannt.

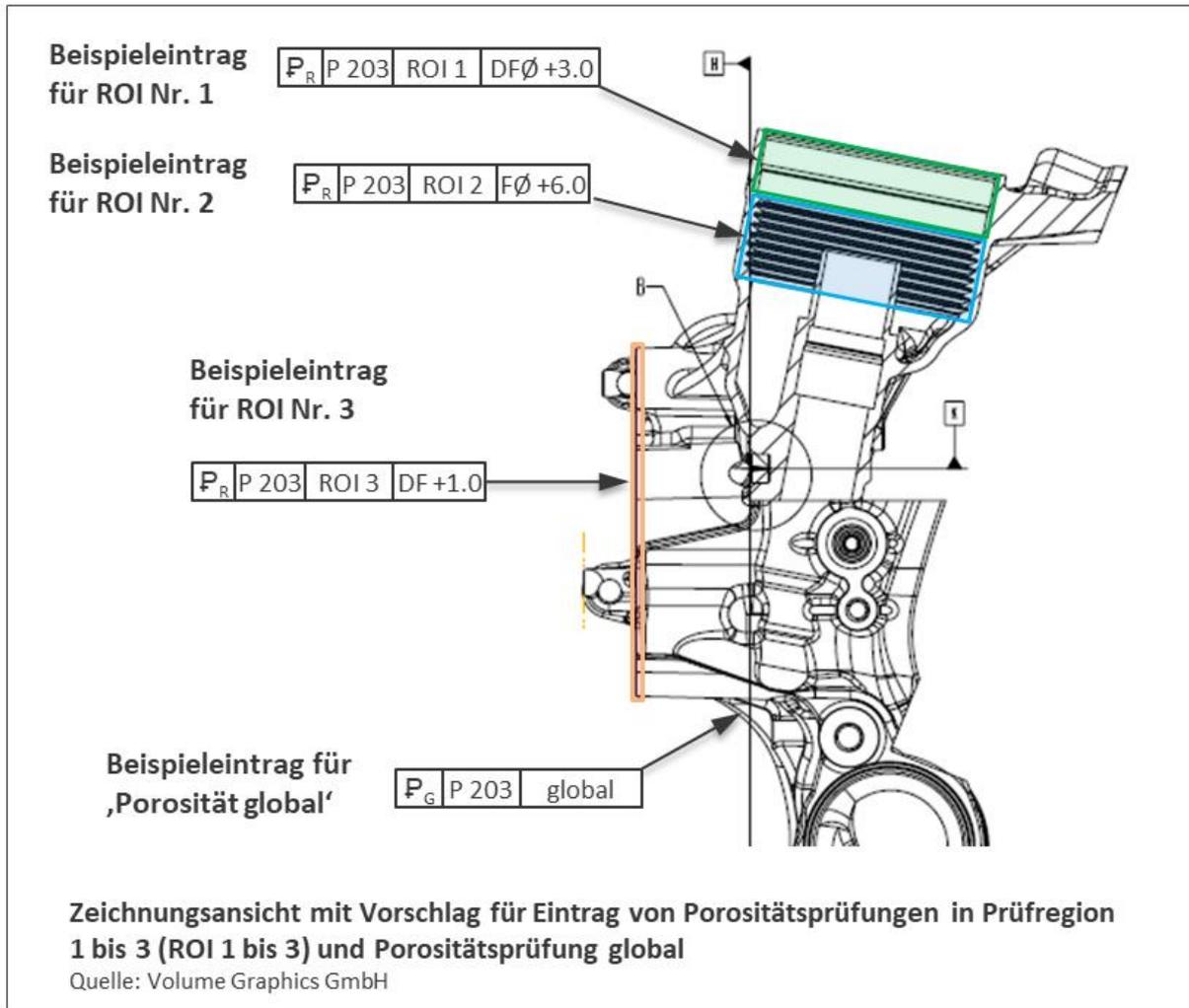


Bild 05: 2D Zeichnungsansicht mit Vorschlag für Eintrag von Prüfregionen 1 bis 3

Sowohl die Definition von Porositätsschlüsseln nach BDG – P 203 für das gesamte Gussstück sowie auch für gesondert zu berücksichtigende Prüfregionen hierin, als auch die genaue Zuordnung dieser Porositätsschlüssel zu den Prüfregionen über Angaben in 2D-CAD in Form einer Tabelle (siehe Bild 06) oder die direkte Zuordnung zu einem als Prüfregion gekennzeichneten 3D-CAD-Volumendatensatzes, ermöglichen transparente Prüfvorschriften für den Kunden (Abnehmer der Gussstücke) und den Lieferanten (Gießerei).

BDG - P 203		Halter NA			
Teilbereich (ROI)	Anzahl (ROI)	Name	Symbol	Funktion+ ROI-Tiefe	Porositätsschlüssel
Global	1	Gussstück global	P_G	---	P_G 0.15 / Øaq 4 / ψ 0.4 / da 0.5 / UØp 0.6
ROI 1	1	Dichtfläche Ø69.5	P_R	DFØ +3.0	P_{ROI} 0.15 / Øp 0.5 / Gap 4 / Z 4 / UØp 0.3
ROI 2	1	Gewinde S68x3	P_R	FØ +6.0	P_{ROI} 0.15 / Øp 2 / Gap 2 / Z 10 / UØp 0.5
ROI 3	1	Dichtfläche	P_R	DF +1.0	P_{ROI} 0.15 / Øaq 0.5 / Gap 4 / Z 4 / UØp 0.3
ROI 4.1 bis 4.6	6	Gewinde M8	P_R	FØ +3.0	P_{ROI} 0.5 / Øp 4 / Gap 2 / Z 4 / UØp 0.6
ROI ...					

Tabelle der Porositätsschlüssel nach BDG - P 203 für Beispiel Halter NA
 Quelle: Volume Graphics GmbH

Bild 06: Tabelle der Porositätsschlüssel nach BDG – P 203 für Beispiel Halter NA

4. BDG – P 203 Anwendungsbeispiel / Porositätsanalyse

Wenn eine Porositätsspezifikation mit Porositätsschlüsseln nach BDG – Richtlinie P 203 für ein zu untersuchendes Gussstück seitens des Kunden (Gussstückabnehmer) vorliegt, kann der Lieferant (Gießer) einen Prüfplan erstellen, eine CT-Porositätsanalyse inkl. der Eingabe der Porositätsschlüssel nach BDG – Richtlinie P 203 in der CT-Software in kurzer Zeit konfigurieren und dann automatisch mit einer beliebigen Anzahl von Gussstücken die Porositätsanalyse mit identischen Einstellungen wiederholt durchführen.

Zu jedem gescannten Gussstück werden für die einzelnen Prüfregionen in einer 3D-Ansicht die Ergebnisse der Analyse mit informativen Ergebnismarkern angezeigt. Abweichungen von der Porositätsspezifikation werden im Ergebnismarker rot markiert. Liegen keine Abweichungen vor, sind die Ergebnisse grün unterlegt.

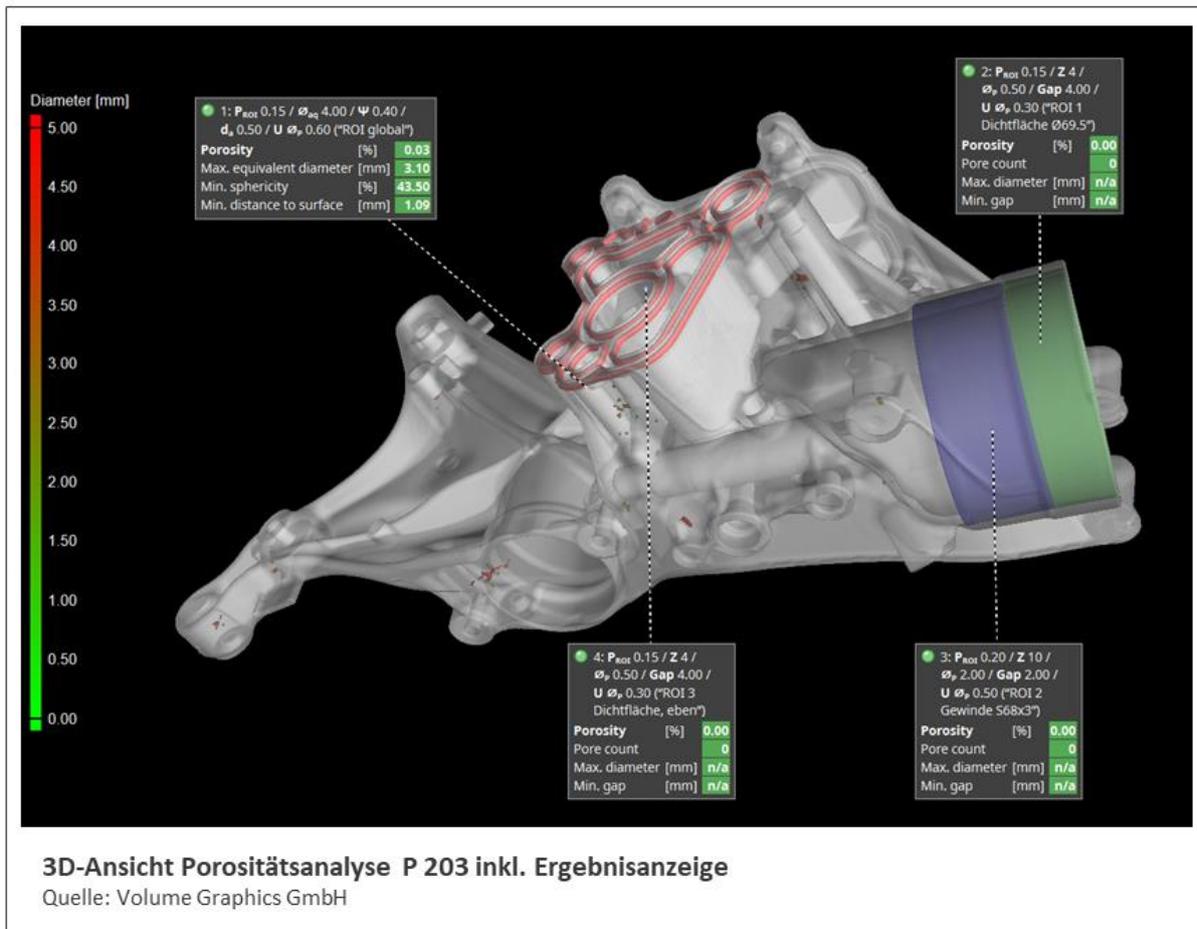


Bild 07: 3D-Ansicht Porositätsanalyse P 203 inkl. Ergebnisanzeige

Zu jeder Porositätsanalyse kann manuell oder automatisch ein Prüfbericht inkl. Listung aller verwendeten Porositätsschlüssel nach BDG – Richtlinie P 203, inkl. dem automatisch ermitteltem Q-Faktor (Aussage über die Bildqualität des CT-Scans) und inkl. zuvor festgelegter 2D/3D Gussstückansichten erstellt werden.

Die Ergebnisse der CT-Porositätsanalyse können zusätzlich verwendet werden für automatisierte OK/NOK-Entscheidungen, für eine statistische Erfassung und Auswertung einzelner Porositätsparameter, für strukturmechanische Untersuchungen (statische und

dynamische Festigkeiten), für Zerspanungssimulationen und für Vergleiche mit Ergebnissen aus Gießsimulationen.

5. Statistische Erfassung und Auswertung von Porositäten

Die mit einer 3D-CT-Porositätsanalyse ermittelten Porositätsdaten können inkl. der zugehörigen Porositätsschlüssel nach BDG – Richtlinie P 203 gussstückbezogen für eine statistische Erfassung aus der CT-Software heraus in ein Statistikprogramm zur weiteren Auswertung exportiert werden. Dies ermöglicht sodann z.B. die Auswertung fertigungsrelevanter Prüfmerkmale (besondere Merkmale), die Führung von diversen Gussstückstatistiken inkl. Rückverfolgbarkeit, die Abbildung von Trendverläufen inkl. Nutzung von Eingriffsgrenzen zur Alarmausgabe und die Durchführung von Analysen zur Prozessfähigkeit Cp/CpK zu einzelnen Prüfmerkmalen etc.

6. Interpretation der Ergebnisse

Die Ergebnisse aus der CT-Porositätsanalyse aus dem BDG – P 203 Anwendungsbeispiel in Kapitel 4 werden nun als Beispiel für eine in einer Gießerei durchaus typische, weiterführende Untersuchung mit Ergebnissen aus einer Formfüll- und Erstarrungssimulation verwendet.

Für das Beispiel des Gussstücks Halter NA wird einmal angenommen, dass der Gießer im Serienanlauf die gewünschte Prozessfähigkeit zu dem Prüfmerkmal Volumenporosität „global“ $P_G \leq 0.15\%$ aufgrund von zu viel Restlufteinschluss im Druckgießformhohlraum (Kavität) noch nicht abschließend bestätigen konnte.

Über die 3D-CT-Porositätsanalysen nach BDG – Richtlinie P 203 konnte der Gießer aus den Ergebnissen jedoch ableiten, dass es sich trotz Optimierung der Gießprozesse, hier insbesondere der 1. Druckgießphase (Vorfüllphase „Metall bis Gießlaufanschnitt“) und der Verwendung einer passiv arbeitenden Druckentlüftung über Entlüftungsblöcke (auch im Gießerei-Jargon „Waschbretter“ genannt) primär um Einschluss von Restluft handelt: Trotz der größeren Anzahl von Poren in den Gussstücken wurden nur verhältnismäßig wenige Poren mit einer Sphärizität $\psi \leq 0.4$, also nur wenige Porositäten mit einer stärkeren Zerklüftung, gefunden.

Hintergrund: Beim Druckgießverfahren können Porositäten mit nur einer geringen Sphärizität mit hoher Wahrscheinlichkeit als Schwindungsdefizite (Schwindungslunker) eingestuft werden. Im vorliegenden fiktiven Fall wurden auch die vorhandenen Porositäten mit geringer Sphärizität und tolerierbaren Abmessungen (Äquivalenzdurchmesser $\varnothing_{aq} \leq 4$) wiederholt nur in gießlaufanschnittfernen Materialanhäufungen an immer wieder gleichen Positionen detektiert. Mit diesen Erkenntnissen aus den CT-Porositätsanalysen konnte der Gießer die Druckgießformentlüftung über eine Formfüll- und Erstarrungssimulation entsprechend optimieren. Die simulierten Optimierungen wurden dann in der Druckgießform in Form von Entlüftungsblöcken mit vergrößerten Entlüftungsquerschnitten umgesetzt.

Das neue Produktionslos mit der überarbeiteten Druckgießform wurde wiederum mit CT-Porositätsanalysen nach BDG – Richtlinie P 203 geprüft und statistisch ausgewertet. Der Vergleich der Porositäten in den Bildern „CT-Scan (iO-Rohteil)“ mit „Simulation optimierte Entlüftung“ zeigt den Erfolg der durchgeführten Maßnahmen. Zugleich konnte die Prozessfähigkeit für das Prüfmerkmal Volumenporosität „global“ bestätigt werden.

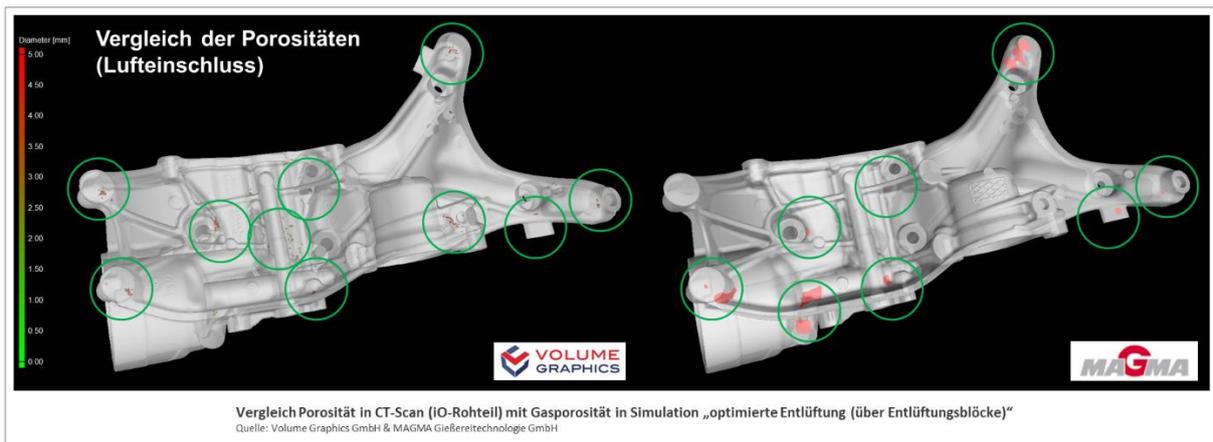


Bild 08: Vergleich Porosität eines CT-gescannten iO-Rohteils mit Porosität gemäß Simulation

Ein zusätzlicher Vergleich der Schwindungsporositäten (Erstarrungslunker) in den Bildern „CT-Scan (iO-Rohteil)“ und „Simulation Wahrscheinlichkeit für Schwindungsporosität“ zeigt eine gute Übereinstimmung der Simulationsergebnisse mit der über die CT detektierten Lage der Schwindungsporositäten im Gussstück. Zugleich zeigen die Bilder auch, dass die Optimierungsmaßnahmen in der Druckgießform tendenziell auch einen positiven Einfluss in Form einer reduzierten Menge und Größe von Erstarrungslunker haben.

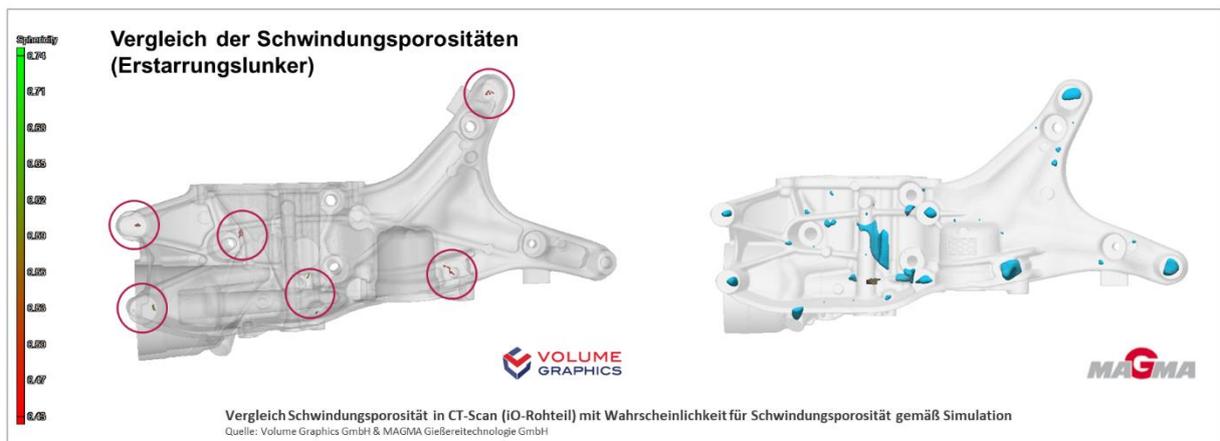


Bild 09: Vergleich Schwindungsporosität eines CT-gescannten iO-Rohteils mit der Auftretenswahrscheinlichkeit für Schwindungsporosität gemäß Simulation

Die Möglichkeit der 3D-Charakterisierung von Porositäten mittels iCT und Porositätsanalyse nach BDG – Richtlinie P 203 ermöglicht dem Gießer eine genauere Eingrenzung der Ursachen für ggf. vorliegende gießtechnische Probleme und empfiehlt sich daher als eine praktikable Ausgangsbasis für Prozessoptimierungen.

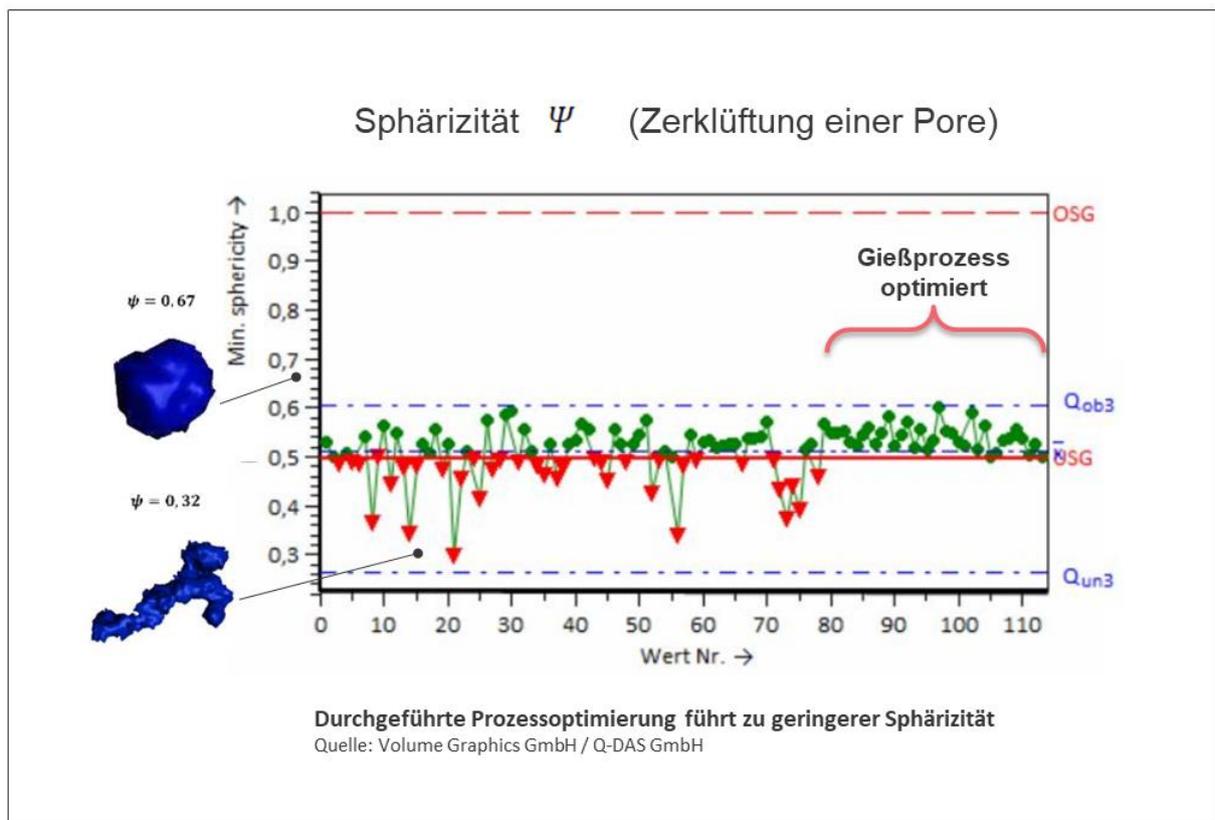


Bild 10: Durchgeführte Prozessoptimierung führt zu geringerer Sphärizität

7. Zusammenfassung

In Leichtmetallgießereien ist der Trend zu einer zunehmenden Automatisierung in Produktion und Qualitätssicherung erkennbar. Die industrielle 3D-Computertomografie kann dies sowohl in der Produktentwicklung und Produktion als auch in der Qualitätssicherung optimal unterstützen. In den kommenden Jahren wird die dreidimensional arbeitende iCT die etablierte 2D-Röntgentechnologie in den Leichtmetallgießereien immer mehr ergänzen oder sogar substituieren.

Industrielle 3D-CT-Inspektionen ermöglichen, neben der automatisierten Vermessung von Gussstückgeometrien, insbesondere eine schnelle, zerstörungsfreie und sehr gut automatisierbare Porositätsprüfung. Sie bietet eine genaue und reproduzierbare Lokalisierung und Quantifizierung von Porositäten und in Verbindung mit der Porositätsanalyse und Porositätsbeurteilung nach BDG – Richtlinie P 203 die dreidimensionale Erfassung und Beschreibung von Volumendefiziten.

Die Porositätsschlüssel nach BDG – Richtlinie P 203 vereinfachen die Definition von Porositätsparametern, sind integrierbar in 2D- und 3D-CAD und ermöglichen transparente Prüfvorschriften für den Gussabnehmer (Kunde) und dem Gießer (Lieferant). Das Anwendungsbeispiel mit dem Druckgusswerkstück Halter NA, inklusive der Erläuterung der Ergebnisse aus der Porositätsanalyse nach BDG – Richtlinie P 203 und die Vergleiche mit Ergebnissen aus einer Formfüll- und Erstarrungssimulation, zeigen die sehr großen Potenziale der iCT für die Verbesserung der Produktivität in Leichtmetallgießereien.

Zusätzlich bietet die Erfassung und Beschreibung der realen 3D-Porenmorphologie in Gussstücken mit Hilfe der iCT und der BDG – Richtlinie P 203 über nur einige wenige Porositäts-

parameter die Möglichkeit auch erste qualitative Untersuchungen der Porositäten hinsichtlich des Einflusses auf die statischen und dynamischen Festigkeiten vorzunehmen.

Die statistische Auswertung von detektierten Porositäten bietet hier neue Möglichkeiten, z.B. können Trendanalysen erstellt und für Gießprozessoptimierungen herangezogen werden, bevor Ausschuss produziert wird. Der Anstoß von automatischen oder halbautomatischen Gießprozessoptimierungen ist denkbar.

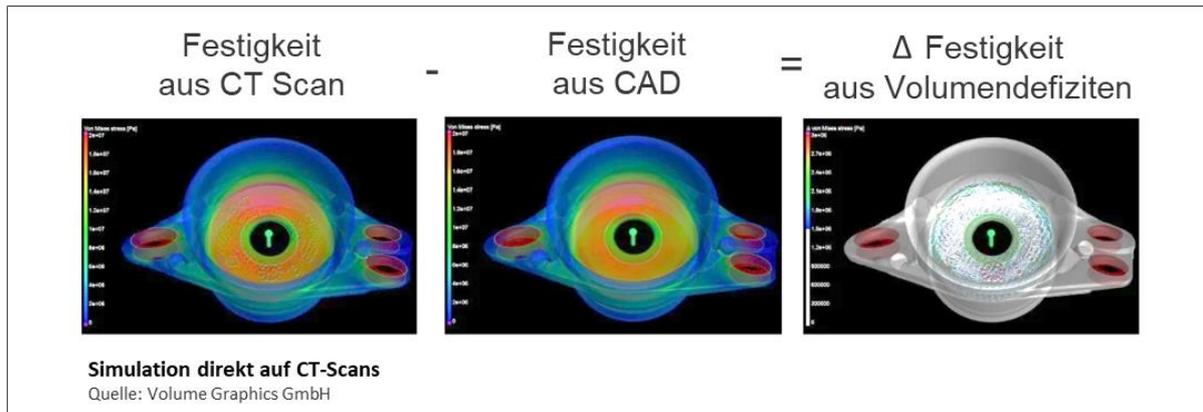


Bild 11: Simulation direkt auf CT-Scans

Künstliche Intelligenz & Machine Learning Funktionen in CT-Systemen und CT-Software werden die Automatisierung der Auswertung von Volumendefiziten in Gussteilen zugunsten aller am Produktentstehungsprozess beteiligten Parteien weiter voranbringen. In Verbindung mit den Werkstoffeigenschaften von Gusslegierungen können aus einer 3D-Porositätsanalyse, zusammen mit den quantitativen Analyseergebnissen, auch qualitative Bewertungen abgeleitet werden.

Insgesamt eine sehr interessante Perspektive für die industrielle CT in Leichtmetallgießereien.
Glück auf!

VOLUME GRAPHICS GmbH

Product Manager Casting

Dipl.-Ing. (FH) Gifa-Ing. (VDG) Andreas Harborth

[1] Bähr, R., Rehse, C., Stroppe, H., (2016): OvGU Magdeburg / Computertomografisch ermittelte Porosität und ihre Wirkung auf die Festigkeitseigenschaften von Al-Gusslegierungen, Gießerei-Zeitung 103 05/2016

[2] BDG – Richtlinie P 203, Bundesverband der Deutschen Gießerei-Industrie e.V., Düsseldorf, www.bdguss.de, www.guss.de