

Industrielle Computertomographie: Präzise Bauteilprüfung und Porenanalyse

■ A. Polt, Wien

Die industrielle Computertomographie (CT) hat sich als unverzichtbares Werkzeug in der modernen Fertigung etabliert. Mit ihrer Fähigkeit, Bauteile zerstörungsfrei und hochpräzise zu prüfen, bietet sie eine umfassende Analyse von inneren Strukturen und Materialfehlern. Besonders bei der Poren- und Lunker Prüfung zeigt die CT ihre Stärken, indem sie kleinste Unregelmäßigkeiten im Material aufdeckt, die mit herkömmlichen Methoden oft unentdeckt bleiben.

Funktionsweise der industriellen Computertomographie

Computertomographen für industrielle Anwendungen bestehen aus mindestens einer Röntgenquelle, einem Detektor und einem Drehteller (auch Manipulator genannt), auf welchem das zu untersuchende Objekt rotiert [1], [2]. In Abbildung 1 ist die Funktionsweise beispielhaft dargestellt. Die Röntgenstrahlung durchdringt das Objekt und wird, je nach Materialdicke und Materialdichte, unterschiedlich stark abgeschwächt. Die Abschwächung kann durch das Lambert-Beer'sche Gesetz wie folgt beschrieben werden:

$$I = I_0 \cdot e^{-\mu \cdot x} \quad (1)$$

mit I = Intensität des Strahlungsdurchganges [W/m^2]

I_0 = gerichtete Strahlungsintensität [W/m^2]

μ = Schwächungskoeffizient [$1/\text{m}$]

x = Schichtdicke [m] [1], [4], [5], [6]

Die Abbildung 2 zeigt eine schematische Darstellung des Lambert-Beer'schen Gesetz.

Die Elektronen werden anschließend auf einem Flachdetektor detektiert und über einen Algorithmus zu einem dreidimensionalen Bild rekonstruiert [1], [2], [5]. Die Darstellung am Computer erfolgt als Voxel. Dies ist ein Volumen-Pixel, also ein dreidimensionaler Pixel. Die Strahlgeometrie kann in Fächerstrahl und in Kegelstrahl unterschieden werden. Die Strahlgeometrie in Abbildung 1 ist eine Kegelstrahlgeometrie. Für diese wird ein Flachdetektor verwendet. Mit Hilfe eines Kollimators,

welcher den Röntgenstrahl beschneidet, ist eine Fächerstrahlgeometrie möglich. Für diese wird ein Zeilendetektor benötigt. Der Vorteil liegt hierbei bei einer Abbildung mit deutlich weniger Artefakten als bei der Kegelstrahlgeometrie. Der Nachteil ist jedoch die deutlich längere Scanzeit.

Poren- bzw. Lunker Analyse eines Gussbauteils mittels industrieller Computertomographie

Bei dem beispielhaften Bauteil handelt es sich um einen Kühlwasserauslauf Stutzen aus Aluminiumguss mit den ungefähren Abmessungen von $160 \times 65 \times 185 \text{ mm}$. Ein Bild des Originals zeigt Abbildung 3.

In Abbildung 4 sind die wichtigsten verwendeten Scanparameter aufgelistet.

Hier ist auch die sehr niedrige Scandauer von nur 5,5 Minuten ersichtlich.

Das Ergebnis der computertomographischen Durchstrahlung ist in Abbildung 5 dargestellt.

An diesem digitalen Zwilling des Kühlwasserauslauf Stutzen können nun sämtliche Analysen durchgeführt werden. Nachfolgend wird die Poren- bzw. Lunker Analyse gezeigt.

Im ersten Schritt wird die Oberfläche des Bauteils bestimmt, damit eine klare Trennung zwischen Material und Luft besteht. Anschließend kann die eigentliche Analyse begonnen werden.

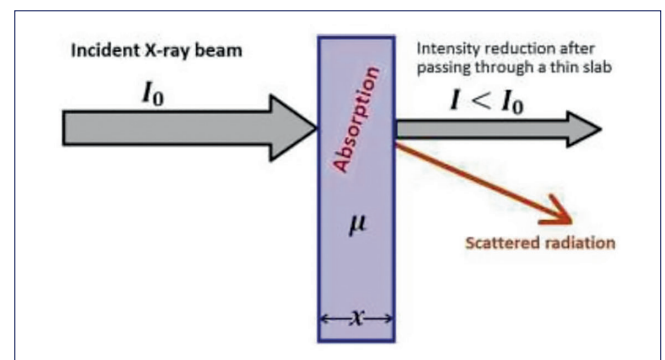


Abbildung 2: Schematische Darstellung des Lambert-Beer'schen Gesetz [4]

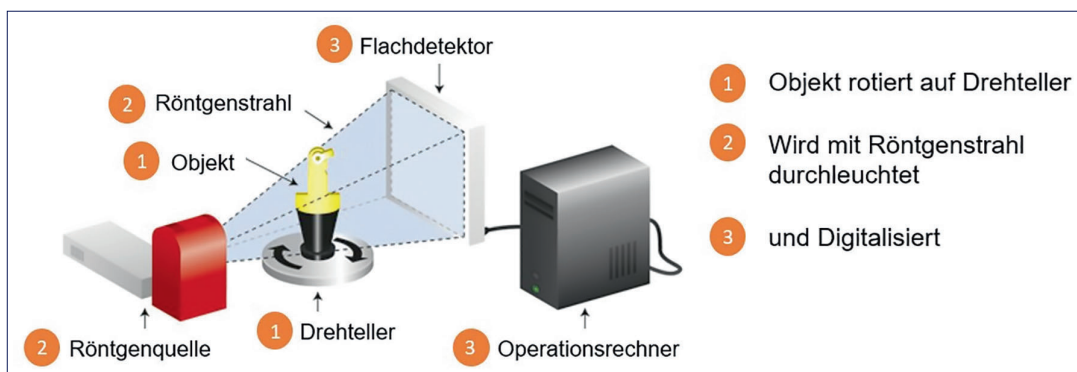


Abbildung 1: Funktionsweise eines Computertomographen [3]



Abbildung 3: Original Aluminium Stutzen

Röhrenspannung	160.0 kV
Röhrenstromstärke	4100.0 μ A
Scandauer	00:00:05:30
Rekonstruktionsdauer	00:01:39:4079660
Gesamtverarbeitungszeit	00:07:09:4079660
Rekonstruktionsalgorithmus	Feldkamp
Scanmethode	Kegelstrahl kontinuierlich
Geometrie	FOD=614.001 mm / FDD=1088.000 mm
Integrationszeit	0.14 s
Filer	—
Projektionsanzahl	2300

Abbildung 4: verwendete Scanparameter



Abbildung 5: 3D Modell des Stutzen

TÜV
AUSTRIA

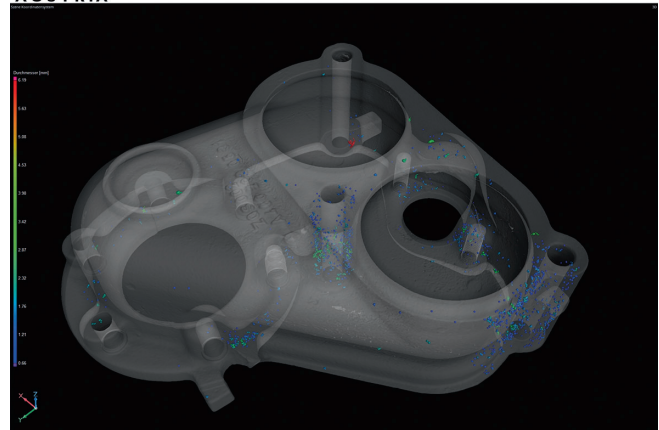


Abbildung 6: 3D Modell mit Poren- bzw. Lunker Analyse

TÜV
AUSTRIA

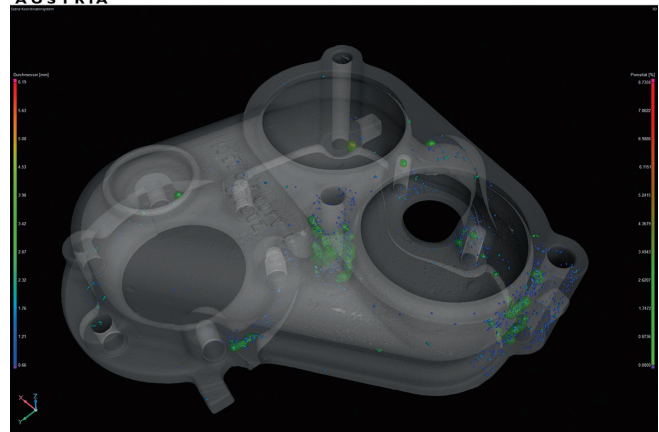


Abbildung 7: Hot-Spots im 3D Modell

Das Ergebnis der Poren- bzw. Lunker Analyse ist in Abbildung 6 zu sehen. Die Durchmesser der Poren bzw. Lunker sind, je nach Größe, unterschiedlich gefärbt. Kleine Durchmesser sind blau abgebildet und große Durchmesser rot. Sehr deutlich erkennbar sind viele kleine Poren bzw. Lunker in der Nähe von zwei Durchführungen. Dies ist auch anhand der grünen Hot-Spots in Abbildung 7 erkennbar.

Die 25 größten Indikationen sind in Abbildung 8 aufgelistet. Die Indikationen lassen sich neben dem Durchmesser noch nach folgenden Kriterien auflisten:

- Äquivalenzdurchmesser (Abbildung 9)
- Volumen
- Oberfläche
- Abstand zur nächsten Inhomogenität bzw. zur Oberfläche (Abbildung 10)
- Sphärizität (Abbildung 11)
- usw....

Der Äquivalenzdurchmesser entspricht dem Durchmesser einer Kugel mit dem gleichen Volumen [7].

Durchmesser [mm]	Äquivalenzdurchmesser [mm]	Mittelpunkt x [mm]	Mittelpunkt y [mm]	Mittelpunkt z [mm]	Volumen [mm ³]	Voxel	Oberfläche [mm ²]
6.19	2.09	27.40	-45.99	-24.61	4.7837	1192	46.7668
3.93	1.49	-25.25	8.95	-14.99	1.7396	426	15.2726
3.66	1.28	74.04	54.45	-33.95	1.0968	289	13.0816
3.60	1.26	-15.92	7.58	-12.49	1.0560	253	8.9681
3.44	1.78	-88.14	-18.44	-31.85	2.9724	654	14.3530
3.40	1.18	-82.94	-34.22	13.83	0.8668	219	8.1077
3.21	1.71	-19.73	-48.73	7.75	2.6276	602	14.1159
3.10	1.41	-21.89	20.64	-8.59	1.4559	346	11.6317
3.09	1.60	-90.11	-16.63	-32.20	2.1248	484	12.4105
3.04	1.32	-15.36	67.77	-34.81	1.2054	293	9.9018
3.04	1.60	-83.07	-34.02	-33.57	2.1319	500	12.1729
3.03	1.22	-18.07	6.06	-17.10	0.9501	219	7.7494
2.96	1.34	-72.89	-35.95	-24.40	1.2644	322	10.7127
2.95	1.15	-51.21	-38.39	-18.11	0.7874	199	7.9007
2.89	1.37	-20.17	20.58	-6.33	1.3608	330	11.1816
2.88	1.54	-17.46	20.51	-13.73	1.9203	450	13.7586
2.86	1.27	-3.07	-53.25	7.73	1.0762	265	8.8126
2.85	1.14	-96.34	0.22	19.08	0.7731	191	8.0145
2.85	1.50	-94.75	-17.21	-21.99	1.7586	400	12.3436
2.81	1.39	-62.76	-40.65	-27.34	1.4102	339	12.5712
2.80	1.07	-13.82	9.75	-22.19	0.6347	156	6.0747
2.76	1.16	-16.63	63.22	-34.09	0.8088	195	6.7278
2.69	1.24	-20.88	5.82	-18.44	1.0014	244	9.5833
2.67	1.15	-52.42	-45.78	-31.92	0.7900	204	7.5325
2.64	1.17	-18.43	63.92	-34.13	0.8317	205	7.2704

Abbildung 8: Auflistung der 25 größten Indikationen

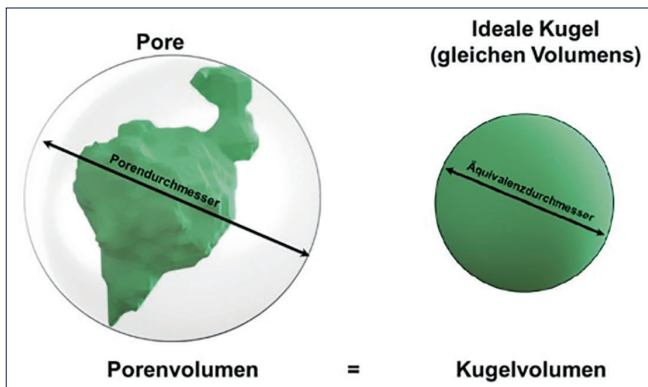


Abbildung 9: Poren- und Äquivalenzdurchmesser [7]

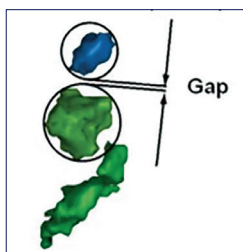


Abbildung 10: Abstand zur nächsten Inhomogenität [7]

Die Sphärität ist ein Wert zwischen 1 und 0. Der Wert 1 beschreibt eine perfekte Kugel, welche meist weniger problematisch ist. Je niedrigerer der Wert für die Sphärität ist, umso mehr zerklüftet ist diese.

Abbildung 12 zeigt die Verteilung der Sphärität über den Porendurchmesser. Es ist ersichtlich, dass der Großteil der Inhomogenitäten eine hohe Sphärität aufweisen und somit die vorhandenen Inhomogenitäten weniger problematisch sind, da diese fast runde Form einen Anstieg der Zugfestigkeit, im Vergleich zu zerklüfteten Poren, aufweist [8].

Zusammenfassung

Zusammenfassend lässt sich über die Poren- und Lunker Analyse mittels industrieller Computertomographie sagen, dass diese sehr präzise Ergebnisse liefert und diese Ergebnisse gut interpretierbar sind.

Mittels der Bestimmung der Sphärität ist es unter anderem möglich, eine gute Einschätzung der Kerbwirkung dieser Inhomogenitäten abzuliefern. Diese Art der Auswertung von Inhomogenitäten ist nicht nur auf Gussbauteile be-

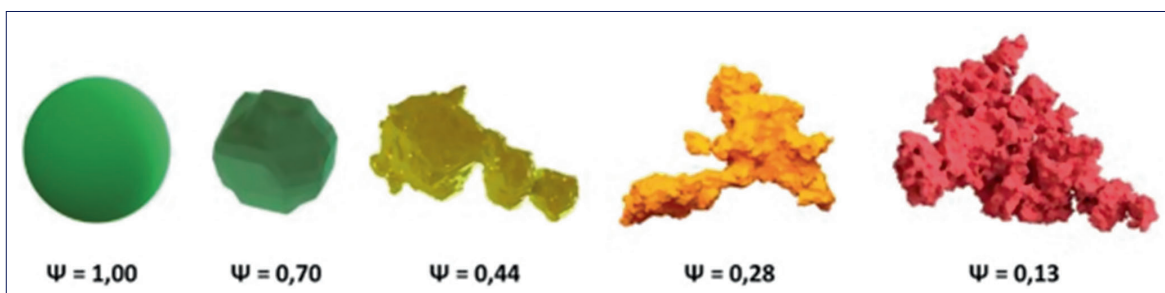


Abbildung 11: Sphärität [7]

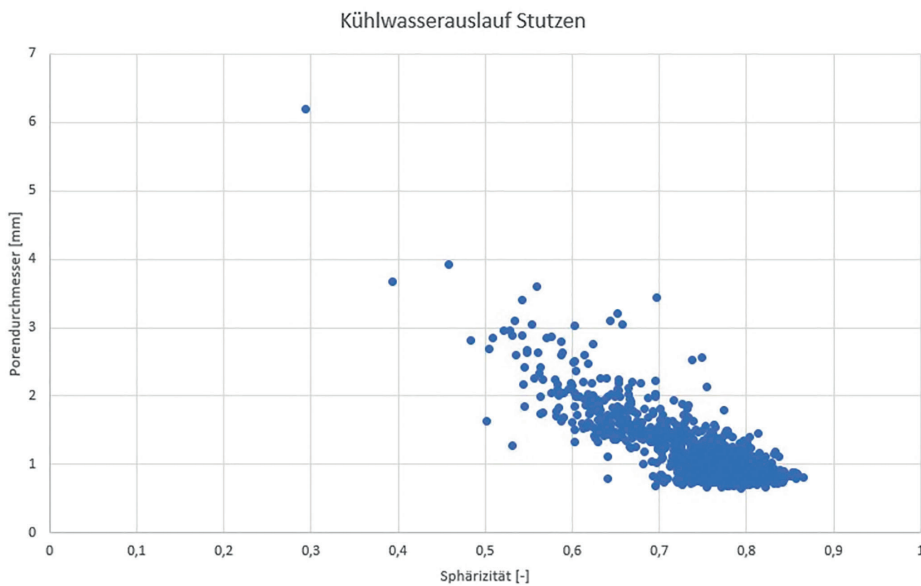


Abbildung 12: Verteilung der Sphärizität

alle Abbildungen: © TÜV AUSTRIA

schränkt, sondern lässt sich bei allen anderen Herstellungsverfahren und Materialien anwenden, auch bei Schweißnähten.

Literatur

- [1] J. Kroll, Aufgabenangepasste, kontrollierte Oberflächenextraktion aus 3D-Computertomographiedaten, Stuttgart: Fraunhofer Verlag, 2014.
- [2] H. Villarraga Gómez, „X-ray Computed Tomography for Dimensional Measurements,“ Conference: Digital Imaging 2016, An ASNT Topical conference at Mashantucket, ISBN: 978-1-57117-384-3, pp. 44-57, 2016.
- [3] „www.hamamatsu.com,“ [Online]. Available: https://ndt.hamamatsu.com/eu/en/app-industrial/industrial_ct.html. [Zugriff am 12 2021].
- [4] H. Villarraga Gómez, Studies of Dimensional Metrology with X-ray CAT Scan, Charlotte, 2018.
- [5] B. Wenzl, Bestimmung der Aufnahmegrenzen bei Computertomographie, Leoben, 2008.

- [6] M. Höflinger, Computertomographie im Bauwesen, Wien, 2009.
- [7] Bundesverband der Deutschen Gießerei-Industrie e. V. (BDG), „Porositätsanalyse und -beurteilung mittels industrieller Röntgen- Computertomographie (CT) – P203,“ BDG, Düsseldorf, 2019.
- [8] Proguss Austria, „Gießerei Rundschau“, Wien, 2017.

Der Autor



Dipl.-Ing. Andreas POLT
TÜV AUSTRIA GMBH, Wien
Zerstörungsfreie Prüfung

78th Annual Assembly and International Conference
June 22-27, 2025 - Genoa, Italy
www.iiw2025.com

Giornate Nazionali di Saldatura
GNS
Genova. 26-27 Giugno 2025
Porto Antico
Centro Congressi