



FOTO: MICROVISTA

Lagertraversen werden für den Scan im schnellen Computertomographen vorbereitet.

Schnelle Computertomographie im praktischen Einsatz

VON LUTZ HAGNER UND FRANZ MNICH,
BLANKENBURG

Die Computertomographie ist in der Industrie seit etlichen Jahren etabliert und wird von vielen Technikern im Entwicklungsprozess oder zur Problemanalyse mit hohem Nutzen eingesetzt. Auf Grund der Dauer des Scanprozesses war das Verfahren aber bisher in der stückzahlintensiven Automobilzulieferbranche nur für kleine Stichproben bzw. Bemusterungsaufgaben geeignet. Medizinische Computertomographen (CT) dagegen sind schnell. Deren geringere Strahlungsenergie wurde bisher für die Penetration von Metallen wie Aluminium als ungeeignet eingestuft. Allerdings hat man inzwischen festgestellt, dass durch die sehr hohe Strahlungsintensität (viele Photonen) trotz hoher Schwächung ausreichend Photonen den Detektor erreichen. Teile aus Aluminium und Magnesium aus den Bereichen

KURZFASSUNG:

Die schnelle Computertomographie birgt als Qualitätstool ein großes Potential, um den Herausforderungen des Leichtbaus zu begegnen. So war es zumindest in den vergangenen Jahren in verschiedenen Veröffentlichungen immer wieder zu lesen.

In diesem Beitrag wird dargestellt, wie sich die schnelle Computertomographie im praktischen Einsatz bewährt hat und welche Veränderungen sich für die Prüfstrategie gegenüber herkömmlichen Vorgehensweisen ergeben. Außerdem wird gezeigt, dass selbst für große Bauteile, wie Zylinderköpfe oder -kurbelgehäuse für 4-Zylinder-Motoren, Taktzeiten für die Computertomographie von unter einer Minute realisierbar sind. Schließlich wird die Problematik der Detektion von Poren in Dichtflächen diskutiert. Dabei ergibt sich, dass die Qualitätskosten insgesamt dann optimal gestaltet werden, wenn jeder beteiligte Partner ein Ausschussrestisiko akzeptiert.

Fahrwerk, Motor und Antriebsstrang können mit diesen Systemen wesentlich schneller als mit klassischen Labor-CT untersucht werden. Der erhebliche Geschwindigkeitsgewinn [1-3] wird jedoch von Ein-

schränkungen bezüglich der Ortsauflösung begleitet. Schon die Detektorapertur von ca. 1,2 mm ist deutlich größer als dies bei Labor-CT üblich ist. Zudem ist die Geometrie des Systems starr und ermöglicht des-

halb keine magnifikationsbedingten Auflösungsverbesserungen. Es hat sich jedoch gezeigt, dass viele Aufgaben auch in der Metrologie mit ausreichender Qualität von adaptierten medizinischen CT übernommen werden können [4].

Bei der Microvista GmbH in Blankenburg ist ein CT der Siemens AG seit eineinhalb Jahren im Dauereinsatz. In dieser Zeit wurden nicht nur große Mengen von Kundenteilen im Dienstleistungsauftrag geprüft, es fanden darüber hinaus an diesem und einem weiteren CT-System der Philips AG umfangreiche Untersuchungen zur Messmittelfähigkeit statt. Neben den im Folgenden exemplarisch erläuterten Anwendungen, die alle im Umfeld des Leichtmetallgießens einzuordnen sind, gibt es eine Vielzahl weiterer industrieller Anwendungen, die von der Suche nach Verunreinigungen in Rohkautschuk über die Analyse von Bahnschwellen aus Recyclingmaterial bis hin zur Montagekontrolle bezüglich des Vorhandenseins von Dichtungen oder Schmierstoffen reicht.

Gießereitypische Beispielapplikationen

Ein Haupteinsatzfall für industrielle Computertomographen in der Gießerei ist die Bemusterung von Entwicklungsteilen. Der schnelle CT bietet auch für diese Anwendung interessante Erweiterungsmöglichkeiten. Die schnelle und kostengünstige Bemusterung von mittleren Mengen erlaubt einen erweiterten Stichprobenumfang. Das ist z. B. dann interessant, wenn es um die Prüfung von Bauteilen aus Formen mit mehreren Nestern und deren Vergleich untereinander geht. Die Teile werden gescannt und anschließend in der bekannten Art manuell bewertet. Um die Risiken der Fehlinterpretation durch die geringere Ortsauflösung zu senken, werden Referenzkörper mit bekannten Merkmalen beigelegt. Darüber hinaus werden extreme Teile (schlechtestes, bestes) anschließend noch im Labor-CT untersucht. Die Ergebnisse werden verglichen, um die Kenntnisse über die Fehlerart (aufgelockertes Gefüge, Porennest, große Lunker) zu verbessern. Für Stichproben bis zu 100 Stück ist eine Automatisierung des Auswerteprozesses unwirtschaftlich. Das führt dazu, dass sich der Hauptaufwand der CT-Prüfung deutlich vom Scanprozess zum Auswerteprozess hin verschiebt. Eine Teilautomatisierung ist möglich, wenn das Auswertetool es erlaubt, den Prüfprozess in sogenannten Makros zu speichern, die dann mit hoher Wiederholgenauigkeit auf jedes Bauteil angewendet werden können. Das Programm VG Studio MAX von Volume Graphics besitzt diese Fähigkeit, was wesentlich zur Verbesserung der Prüfquali-

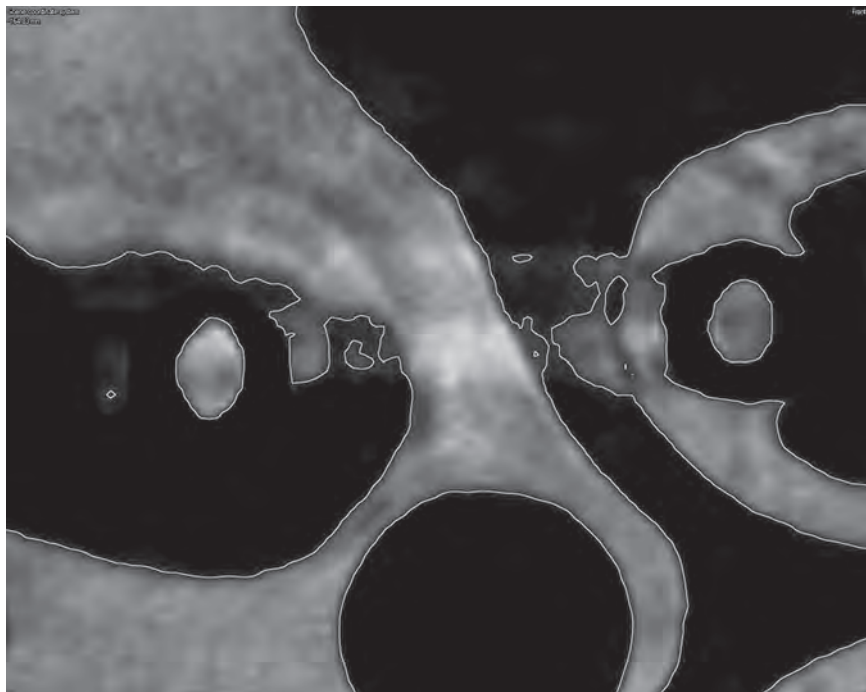


Bild 1: Die Oberflächenfindung wird durch Artefakte bei $z = 164,8$ mm (z-Koordinate des am CAD-Modell ausgerichteten Untersuchungsobjektes) stark gestört.

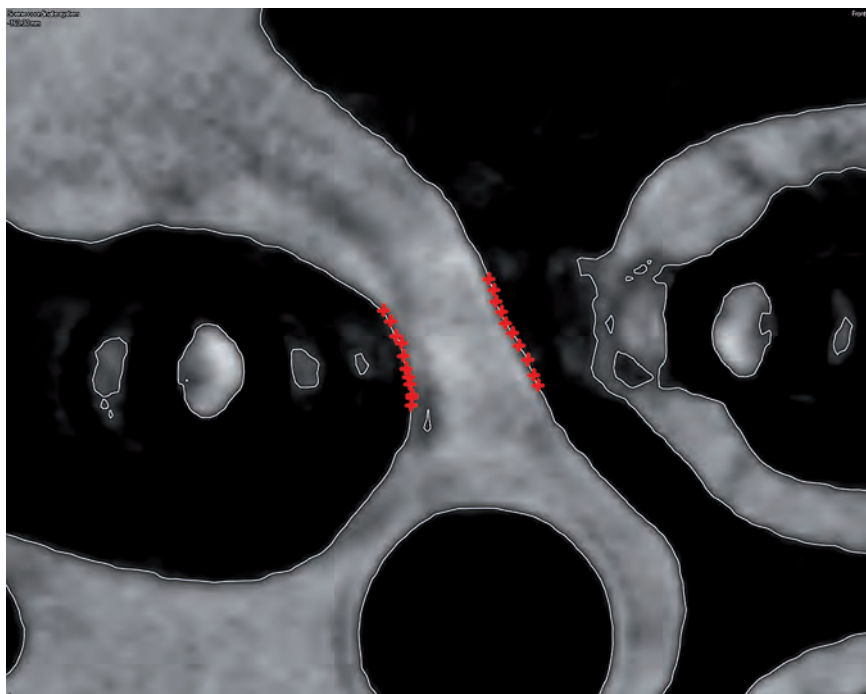


Bild 2: Auf $z = 163,3$ mm kann die Messung ohne artefaktbedingte Fehler erfolgen; rote Kreuze zeigen die verschiedenen Messpunkte an.

tät beiträgt und die Auswertzeiten verringert.

Ein anderer Einsatzfall der schnellen Computertomographie, der einen wesentlich höheren Anteil an der Auslastung des Systems hat, ist die Krisenintervention. In diesem Fall werden Teile in der Regel in den dem Gießen nachfolgenden Verarbeitungsstufen auffällig, was zur Sperrung ganzer Lieferlose führen kann. Insbesondere Schäden, die bei der Montage zu Systemen z. B. im Motorenwerk erst in der Endphase der Fertigung entdeckt werden, führen

oft zu erheblichen Kosten. Aus diesem Grund müssen verdächtige Lieferlose mitunter einer geeigneten Sonderprüfung unterzogen oder eben verschrottet werden. In einem konkreten Fall wurden an mehr als 2500 Zylinderköpfen Wanddicken am Wasserraum untersucht, nachdem ein Motor auf dem Prüfstand wegen zu geringer Wanddicke ausgefallen war. Eine besondere Herausforderung war in diesem Fall die Tatsache, dass bereits eine Reihe von Messingteilen (z. B. Ventilführungen) am Bauteil verpresst waren. Diese Elemente ver-

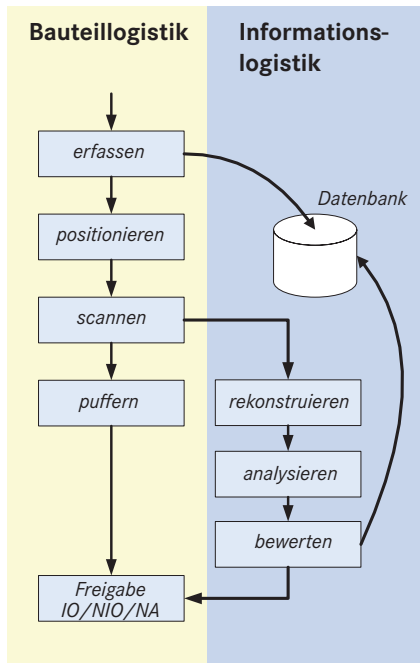


Bild 3: Ablauf des Scanprozesses
(IO – in Ordnung; NIO – nicht in Ordnung; NA – Nacharbeit).

ursachen erhebliche Artefakte, sodass die Auswahl einer geeigneten Messstelle von großer Bedeutung war (Bilder 1 und 2). Die Erfahrung zeigt, dass die Messstelle und die Messstrategie so gewählt werden müssen, dass verfahrensbedingte Besonderheiten ausreichend berücksichtigt werden, ohne das Ziel (hier die Bestimmung der kleinsten Wanddicke in einem bestimmten Bereich) aus dem Auge zu verlieren.

Da im Rahmen einer Voruntersuchung eine porositätsbedingte Undichtheit ausgeschlossen werden konnte und als Ursache für die fehlerhafte Wanddicke Kernlage und „Kernwachstum“ erkannt wurden, war keine komplette Untersuchung des fraglichen Bereiches erforderlich. Zudem konnte man von einer stetigen Veränderung der Wanddicke ausgehen. Aus diesem Grund wurde ein linienförmiger Bereich definiert, an dem die Wanddicke er-

mittelt wurde und der einen Rückschluss auf die Entwicklung der Wanddicke im gesamten relevanten Bereich zuließ. Das Prüfverfahren wurde mit dem Gießer und dem Motorenwerk abgestimmt, so dass alle Beteiligten den Ergebnissen vertrauen konnten. Aber dem alten Sprichwort „Vertrauen ist gut, Kontrolle ist besser“ folgend, wurden auch zerstörende Prüfungen durchgeführt, um die CT-Ergebnisse zu validieren. Dabei wurde eine ausreichend gute Übereinstimmung mit den taktilen Messergebnissen festgestellt. Die Abweichungen waren an den einzelnen Messstellen unterschiedlich groß und lagen zwischen 10 und 170 µm. Bei zulässigen Toleranzen von ±800 µm war damit eine ausreichende Genauigkeit gewährleistet.

Nach der Theorie des Total Quality Management kann Qualität nicht erprüft werden, sie muss erzeugt werden! Dennoch sind auch fähige und beherrschte Prozesse nicht in der Lage, zu 100 % fehlerfreie Produkte zu liefern [5]. Ein typisches Beispiel hierfür ist die Problematik von Poren in Dichtflächen. Da insbesondere Gasporen mehr oder weniger zufällig im Guss entstehen, ist es praktisch unmöglich, das gelegentliche Auftreten von Poren in Bearbeitungsflächen zu verhindern. Auch dieses gelegentliche Auftreten ist nicht akzeptabel, wenn dadurch verlorene Wertschöpfung von jeweils mehreren Tausend Euro verursacht wird. In diesem Fall kann durch CT-Prüfung verhindert werden, dass fehlerhafte Teile veredelt werden. Für verschiedene Kunden wurden Zylinderköpfe auf Poren an den Ein- und Auslassflanschen und Lagertraversen im Bereich der Sitzfläche des Wellendichtringes in großen Stückzahlen erfolgreich untersucht.

Ablauf eines automatischen Prüfprozesses

Der Scan selbst macht nur einen kleinen Teil eines automatischen Prüfprozesses

aus. Der Ablauf für ein einzelnes Teil kann Bild 3 entnommen werden. Die Erfassung der Seriennummer und das Teilehandling nehmen nur wenige Sekunden in Anspruch.

Anders sieht es mit der Rekonstruktions-, Analyse- und Bewertungszeit aus. Kann der Scan eines Zylinderkopfes noch in ca. 10 s abgeschlossen sein, so braucht die anschließende Analyse über fünf bis zehn Merkmale schnell mehrere Minuten. Man kann deshalb grob abschätzen, dass ein Teil bis zu seiner Freigabe zwei bis drei Minuten im Prüfsystem verbleibt. Diese Zeit ist jedoch nicht bestimmend für die erreichbare Taktzeit. Ausschlaggebend für diese wichtige Kenngröße sind ausschließlich die Scanzeit und die anschließend erforderliche Abkühlzeit des Strahlers. Für den Scan von Zylinderköpfen und Zylinderkurbelgehäusen sind hohe Leistungen erforderlich. Von geeigneten CT werden 80, 100 oder sogar 120 kW zur Verfügung gestellt. Selbst wenn man annimmt, dass die Wärmekapazität der Röhre ausreichend ist, um die während eines Scans anfallende Wärmeenergie komplett aufzunehmen, muss die gespeicherte Wärme nach jedem Scan zunächst abgeführt werden. Erst danach ist der Röntgenstrahler und damit der CT bereit für den nächsten Scan. Leider ist die bei einem Scan eingetragene Energie in der Regel deutlich größer als die pro Zeiteinheit vom Kühlsystem abgeführte Energie.

Da das Kühlsystem eines gegebenen CT als feste Größe betrachtet werden muss, bleibt zur Beeinflussung der Taktzeit lediglich die eingetragene Energie, die also möglichst gering sein sollte. Da die Härte der Strahlung nicht weiter reduziert werden darf, verbleibt als Steuergröße nur die Strahlungsintensität, die sich proportional zum Röhrenstrom verhält. Diese Kenngröße muss adäquat zur Prüfaufgabe bestimmt werden. So fordert die Suche nach Kernresten oder Grat in Kanälen wesentlich ge-

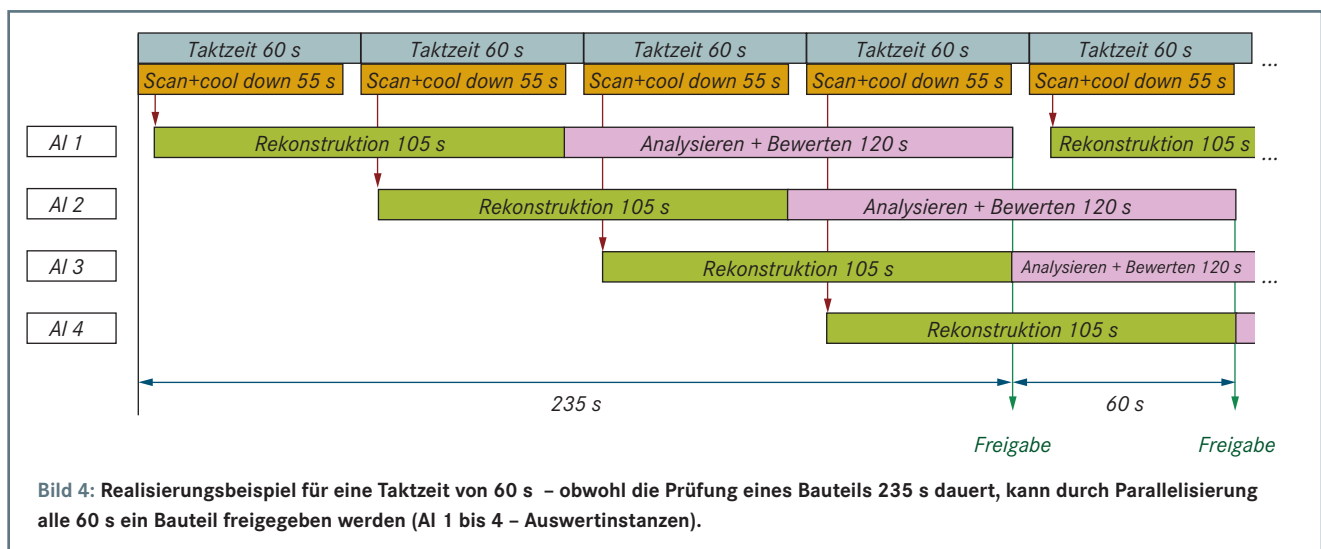


Bild 4: Realisierungsbeispiel für eine Taktzeit von 60 s – obwohl die Prüfung eines Bauteils 235 s dauert, kann durch Parallelisierung alle 60 s ein Bauteil freigegeben werden (AI 1 bis 4 – Auswertinstanzen).

ringere Strahlungsintensität als eine Poranalyse. Für die Taktzeit sind aber auch technische Parameter des Gerätes von entscheidender Bedeutung:

Die Detektorbreite bestimmt unmittelbar die Scandauer und damit auch die Größe des Energieeintrages. Ein mit 64 Sensorzeilen bestückter Detektor überdeckt an einem Bauteil etwa 40 mm. Dementsprechend wird für einen 400 mm langen Zylinderkopf dann eine Scanzeit von 10 s benötigt. Dabei werden ungefähr 70 kW elektrische Leistung in Wärme verwandelt. Bis die gesamte Wärmeenergie durch das Kühlsystem abgeführt ist, vergehen ca. 2,5 min! Wird die Anzahl der Detektorzeilen auf 128 verdoppelt, halbieren sich automatisch die Scanzeit und damit die eingetragene Energie sowie die Abkühlzeit.

Die Rekonstruktion der Scandaten zu einem 2-D/3-D-Modell erfolgt üblicherweise mit dem mathematischen Instrument der gefilterten Rückprojektion. Diese Methode zeichnet sich durch eine brauchbare Berechnungsgeschwindigkeit aus, führt aber auch zu Bildfehlern.

Mit dem Aufkommen immer schnellerer Rechner kann heute jedoch auf bessere, aber aufwendigere Rekonstruktionsverfahren zurückgegriffen werden. Die sogenannte iterative Rekonstruktion wird aktuell von allen Herstellern medizinischer CT angeboten. Praktische Untersuchungen haben gezeigt, dass die eingesetzte Energie um ca. 1/3 reduziert werden kann, ohne dafür eine Verschlechterung der Bildqualität in Kauf nehmen zu müssen. Entsprechend führt der Einsatz der iterativen Rekonstruktion zu einer weiteren Reduzierung der Abkühlzeit. Schließlich sind mit einem 128-zeiligen Detektor so Abkühlzeiten von 50 s und somit Taktzeiten von 55 s für Zylinderköpfe mit vier Zylindern möglich. **Tabelle 1** fasst diese Ergebnisse zusammen.

Nachdem der Scan erfolgt ist, können die Rekonstruktion sowie die verschiedenen Aufgaben der Analyse separaten Rechnerinstanzen zugewiesen werden. Durch diese Parallelisierung können die Zuverlässigkeit erhöht sowie die Auswertzeit verkürzt werden. Während dieser, auch mit hochwertigster Rechentechnik oft Minuten währenden Auswerteprozedur kann bereits das nächste Teil gescannt werden. Sowie freie Rechenkapazitäten zur Verfügung stehen, werden Auswerteaufgaben dieses zweiten Scans übergeben. **Bild 4** zeigt den Ablauf an einem vereinfachten Beispiel (alle Auswertungen eines Objektes werden nur auf einer Auswerteeinstanz ausgeführt). Es wird deutlich, dass die Auswertzeit nicht die Taktzeit bestimmt, sondern lediglich die Größe eines nachgeordneten Puffers.

Paradigmenwechsel – passende Messstrategie erforderlich

In der Fertigungstechnik haben sich Koordinatenmesssysteme als klassische Messmittel fest etabliert. Der CT dagegen ist als Prüfmittel bekannt, der sowohl strukturelle als auch dimensionelle Prüfaufgaben übernehmen kann. Deshalb ergibt sich die Frage, ob im Zuge schneller Bauteilscans trotz geringerer Genauigkeit auch Teilaufgaben der Fertigungsmesstechnik bearbeitet werden können. Das ist insbesondere deshalb interessant, weil der CT Maße erfassen kann, die für Koordinatenmessmaschinen zerstörungsfrei nicht zugänglich sind. Allerdings stellt sich der Versuch, die Messstrategien der klassischer Längenmesstechnik auf das Messsystem CT zu übertragen, als problematisch heraus.

Ohnehin bekannt ist die Tatsache, dass die Oberflächenrauheit von Rohgussteilen zu Abweichungen zwischen Koordinatenmesstechnik und CT führen muss, weil der



Bild 5: Durch den Quantisierungseffekt wird eine gerade Wand wellig.

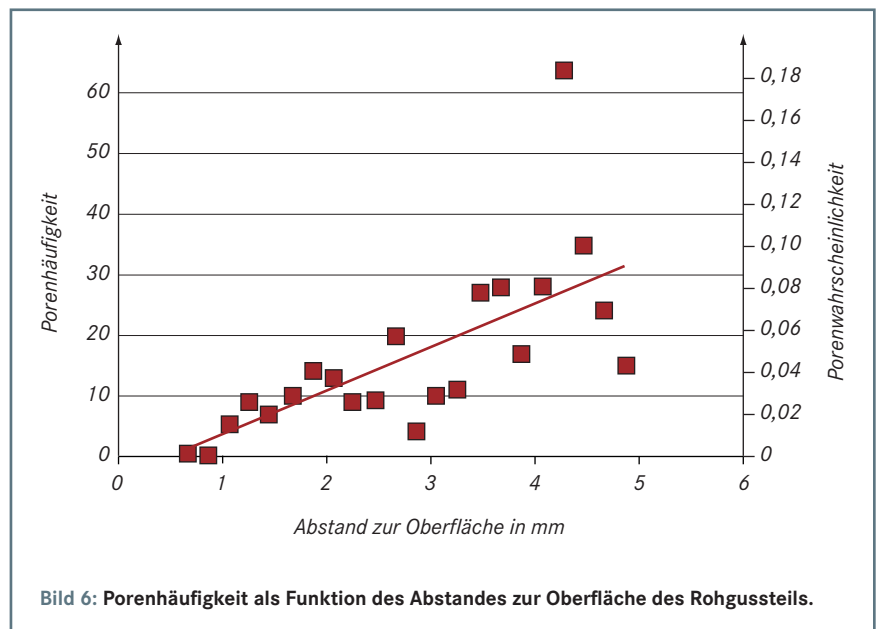
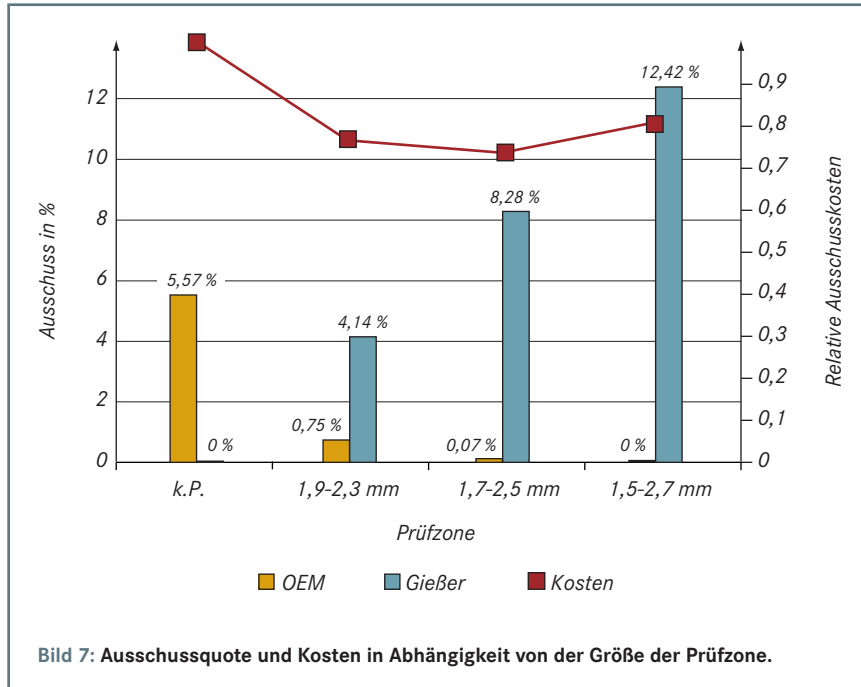


Bild 6: Porenhäufigkeit als Funktion des Abstandes zur Oberfläche des Rohgussteils.

Tabelle 1: Einfluss von Detektorbreite und Rekonstruktionsmethode auf die Scan- und Abkühlzeit (GRP – gefilterte Rückprojektion; IR – iterative Rekonstruktion).

	64	128	128
Detektorzeilen	64	128	128
Zeit pro Rotation in s	1	1	1
Pitch*	1	1	1
Röhrensorgung in kV	140	140	140
Dosis (Röhrenstrom)			
in mAs	500	500	333
Rekonstruktion	GRP	GRP	IR
Scanzeit in s	10	5	5
Cool-down-Zeit in s	152	76	50
Min. Taktzeit in s	162	81	55

*Pitch – Verhältnis von Objektivorschub während einer 360°-Umdrehung des Strahlers zur Detektorbreite



CT im Rahmen seines Auflösungsvermögens direkt an der Oberfläche des Bauteils misst. Die Koordinatenmessmaschine kann demgegenüber, bedingt durch die Tastkopfgröße, nicht in Riefen eindringen. Allein hieraus lässt sich schon die Forderung nach einer Flächenbetrachtung durch

Mehrfachantastung ableiten. Dadurch ließe sich der beschriebene Fehler systematisieren und bei bekannter Oberflächenrauheit auch teilkompensieren.

Es gibt aber noch weitere Gründe, warum CT-Messungen nicht punktbezogen erfolgen sollten. Die Oberfläche des digitali-

sierten Volumens ist auch bei absolut glatten Flächen nicht eben. Dafür sind zwei Ursachen wesentlich verantwortlich:

Die Oberfläche steht in der Regel schräg zur Durchstrahlungsrichtung der Röntgenstrahlen. Da sich das digitalisierte Volumen aus kleinen quadratischen bzw. rechteckigen Volumenelementen zusammensetzt, ergibt sich eine gleichmäßige Welligkeit an der Oberfläche (Bild 5), die wie eine künstliche Rauheit die real vorhandene Rauheit überlagert.

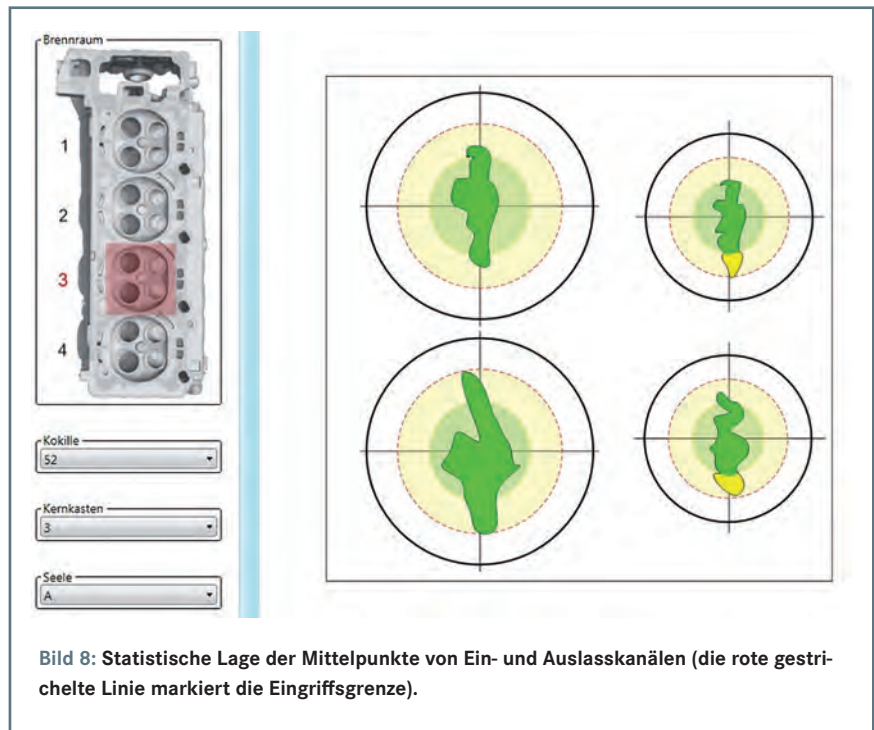
Hinzu kommt, dass die Penetration mit Röntgenstrahlen entlang einer Oberfläche nicht an jeder Stelle gleich ist. Gerade bei massiven Bauteilen, wie Kurbelgehäusen und Zylinderköpfen gibt es sogar Stellen, an denen die Durchstrahlbarkeit so problematisch wird, dass systematische Abweichungen zur wirklichen Oberfläche von 1 mm und mehr entstehen.

Aus den genannten Gründen führt die einfache Messung in einem Punkt leicht zu unbefriedigenden Ergebnissen. In der Praxis hat es sich bewährt, grundsätzlich Gauß-Flächen in die Oberfläche zu legen und dann diese Ersatzoberfläche als Ausgangspunkt für Messungen zu wählen. Auf diese Weise sind Messungen mit einem Messfehler von 150 µm möglich, was für viele Maße an kokillengegossenen Rohgussteilen ausreicht.

Fertigungstoleranzen und die Folgen

Eine interessante Anwendung des schnellen CT ist die Überprüfung von Dichtflächen auf relevante Porosität. Dabei wird das Ziel verfolgt, nur solche Teile zu veredeln, bei denen nicht mit Auffälligkeiten nach der Bearbeitung zu rechnen ist. In das digitalisierte Volumen eines Bauteils wird ein virtueller Schnitt auf Höhe der Dichtfläche gelegt und geprüft, ob sich in dieser Fläche Poren unzulässiger Größe befinden. Teile mit auffälligen Merkmalen werden aussortiert. In der Praxis lässt sich diese Idee jedoch nicht eins zu eins umsetzen, weil auf Grund von Fertigungstoleranzen die Lage der zukünftigen Dichtfläche nicht genau bekannt ist.

Bei Microvista wurde an mehr als 6000 Zylinderkurbelgehäuseunterteilen die Sitzfläche des Wellendichtringes auf Poren mit einem Porendurchmesser von $d \geq 0,4$ mm untersucht. Die Bearbeitungszugabe betrug 2,1 mm. Die Untersuchung durfte sich jedoch nicht nur auf die nominale Dichtfläche beschränken, sondern musste mögliche Fertigungstoleranzen von $\pm 0,6$ mm berücksichtigen. In der Konsequenz führt diese Vorgehensweise zunächst dazu, dass alle Teile, in denen im fraglichen Bereich Porosität mit



$d \geq 0,4$ mm auftritt, als Ausschuss deklariert werden. Viele dieser NIO-Teile würden aber in der Weiterverarbeitung nicht auffällig werden, z. B. weil die Pore weit vom nominalen Bearbeitungsbereich entfernt liegt und deshalb nur mit geringer Wahrrschein-

lichkeit in der Dichtfläche aufgedeckt werden würde. Die Ausschussquote ist also höher als im Falle einer prüfungsfreien Weiterverarbeitung. Mit Prüfung gelangen jedoch nahezu keine NIO-Teile in die Motorenproduktion, was gerade bei Teilen mit

großem kaufmännischen Schadenspotential eine oft gehörte Forderung ist.

Anhand einer Stichprobe von 310 Traversen wurde dieses Problem näher untersucht. Die Teile stammen aus einem beherrschten und fähigen Prozess, sodass allgemeine Schlussfolgerungen zulässig waren. Von den untersuchten Teilen waren 33 % im fraglichen Bereich komplett porenfrei. An den verbleibenden Teilen wurde die Häufigkeit der Poren in Abhängigkeit von ihrem Abstand zur Oberfläche des Rohteils ermittelt (siehe **Bild 6**).

Es wird deutlich, dass die Wahrscheinlichkeit einer Pore mit dem Abstand zur Oberfläche steigt. Im einfachen Fall kann man die Häufigkeitsverteilung durch eine lineare Gleichung interpolieren und diese Gleichung durch Normierung als Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion interpretieren. Damit ist es möglich, eine Wahrscheinlichkeit zu benennen, mit der in einer bestimmten Tiefe eine Pore auftreten wird. Nimmt man jetzt an, dass der angegebene Bearbeitungszuschlag von 2,1 mm als mittlere Bearbeitungsebene gelten kann, um die die wahren Werte mit einer statistischen Sicherheit von 99,7 % im 3σ -Intervall $\pm 0,6$ mm streuen, so sei $\sigma = 0,2$ mm. Unter der Annahme einer Normalverteilung kann dann auch eine Wahrscheinlichkeit für die Bearbeitung in einem bestimmten Abstand von der Bauteiloberfläche angegeben werden. Die Wahrscheinlichkeit der Bearbeitung in einem bestimmten Abstand und die Wahrscheinlichkeit, dass gerade im Bearbeitungsbereich eine Pore auftritt, sind voneinander völlig unabhängige Ereignisse. Um also die Wahrscheinlichkeit für das Anschneiden einer Pore zu ermitteln, müssen beide Wahrscheinlichkeiten multipliziert werden.

Was die Anwendung dieser Theorie über die zu erwartende Ausschussquote aussagt, kann **Bild 7** entnommen werden. Der abnehmende Kunde, in diesem Fall das Motorenwerk (OEM), muss ohne Prüfung mit einem Ausschuss von >5 % rechnen. Wird im Bereich der maximalen Fertigungstoleranz geprüft, geht für den OEM der Ausschuss auf 0 % zurück. Beim Gießer dagegen schlagen immerhin 12 % Ausschuss zu Buche. Bei eingeschränkten Bewertungsbereichen relativieren sich diese Aussagen entsprechend. Darüber hinaus ist gut zu erkennen, dass die minimalen Qualitätskosten (hier Ausschuss- und Prüfkosten bei beiden Parteien!) dann erreicht werden, wenn beide Parteien eine Restausschussquote akzeptieren.

Mehrwert durch statistische Prozesskontrolle

Von vielen Gießereien ist bekannt, dass sie Methoden der statistischen Prozesskontrolle einsetzen [6]. Ein typisches Problem bei der Umsetzung derartiger Projekte ist das Aufschreiben von Informationen, die nicht aus den eingesetzten Bearbeitungs- und Prüfmaschinen abgerufen werden können. Die manuelle Erfassung ist aufwendig und fehleranfällig zugleich. Eine schnelle computertomographische Prüfung kann zur Verbesserung der automatisch erfassten Datenbasis wesentlich beitragen. Während eines Bauteilscans entstehen nicht nur Volumendaten, ganz nebenbei liegen auch Informationen über die Form, die Kernkästen und die Seelen vor. Gemeinsam mit der Seriennummer und dem darin üblicherweise verschlüsselten Gießzeitpunkt können alle ermittelten Produktinformationen jederzeit den anderenorts erfassten Prozessinformationen, wie z. B. der Schmelzetem-

peratur, zugeordnet werden. Neben den vom CT bereitgestellten Qualitätsentscheidungen zu einzelnen Merkmalen können diese Informationen verwendet werden, um den Herstellungsprozess auch statistisch zu überwachen [7]. Bei der Untersuchung einer größeren Anzahl von Zylinderköpfen wurden unter anderem jeweils die Lage der Einlass- und Auslasskanäle im Brennraumbereich ermittelt. Gleichzeitig wurde eine Auswertung entwickelt, mit deren Hilfe die Streuung der Austrittspunkte für eine auszuwählende Menge (Gießdatum, Kokille, Kernkasten, Seele) von Zylinderköpfen dargestellt wird (**Bild 8**). Damit wird es möglich, Grenzwertannäherungen schnell zu entdecken, die Ursachen einfach zu analysieren und Kokillen wie Kernkästen verschleißorientiert zu warten.

Dr.-Ing. Lutz Hagner und Dr.-Ing. Franz Mnich, Microvista GmbH, Blankenburg

Literatur:

- [1] *Giesserei* (2010), [Nr. 10], S. 64-67.
- [2] *Giesserei* (2012), [Nr. 9], S. 87.
- [3] *Giesserei-Erfahrungsaustausch* (2012), [Nr. 3+4], S. 6-11.
- [4] *Hagner, L.; Mnich, F.: Inline-Computertomographie als Qualitätstool in der Serienfertigung. In: Johann Kastner, Industrielle Computertomographie. Tagung 2010, Proceedings.*
- [5] *OZ* (2006), [Nr. 09], S. 38-41.
- [6] *Dörmann Osuna, H. W.: Ansatz für ein Qualitätsregelsystem für nicht stabile Prozesse. Universitätsverlag Ilmenau, 2009.*
- [7] *Hagner, L.; Kahn, D.; Bett, G.: Nachhaltige prozesssichere Fertigung mit Inline-Computertomographie. In VDI Berichte 2122, Gießtechnik im Motorenbau – Anforderungen an die Automobilindustrie, 2011.*