



X-TEK

XT H 450

X-TEK

## Die belgische Universität Leuven nutzt die CT-Messtechnik, um die geometrische Genauigkeit innen und außen liegender Merkmale von Industriebauteilen zu analysieren

Eine komplexe Fertigung macht die Prüfung innerer Strukturen zunehmend erforderlich

Viele Komponenten und Zusammenbauten weisen interne Merkmale auf, die nur schwer zerstörungsfrei geprüft werden können. Demzufolge müssten diese bei der Prüfung mittels herkömmlicher Messtechnik zerlegt werden. Beispiele sind eine hohle innenhochdruckgeformte Nockenwelle, eine im 3D-Druck hergestellte Form mit konformer Kühlung oder ein spritzgussgeformter elektrischer Stecker mit Metalleinsätzen. Gegenwärtig setzt die PMA-Abteilung der Universität Leuven röntgencomputertomografische (CT) Geräte ein, um dreidimensionale Verfahren zur Messung der Innenstruktur dieser Bauteile zu erforschen.

Die Computertomografie (CT) wird bereits seit vielen Jahren als bildgebendes Verfahren und zu Diagnosezwecken in der Medizin eingesetzt. Ein weiterer Anwendungsbereich ist die Prüfung innen liegender Merkmale, wie beispielsweise unerwünschter Lunker in einer Gussform. Derzeit führen Prof. Jean-Pierre Kruth und sein Team an der Universität Leuven, der ältesten und größten Universität Belgiens, Forschungen durch, um den Einsatzbereich der CT auf dem Feld der dimensional Messtechnik zu erweitern. Mit der CT können Komponenten von außen – wie mit herkömmlichen berührenden Messtastern oder einem Laserscanner – untersucht werden. Mit derselben Konfiguration können jedoch auch innen liegende Geometrien gemessen werden.

Die belgische Universität Leuven (offizielle Bezeichnung „Katholieke Universiteit Leuven“ oder kurz „KU Leuven“) befindet sich ganz in der Nähe der europäischen Hauptniederlassung von Nikon Metrology. Die beiden Einrichtungen arbeiten eng zusammen, um die CT als Instrument für die Geometriemessung und die Qualitätskontrolle weiterzuentwickeln. Zwei Nikon Metrology CT-Geräte wurden vor kurzem in der KU Leuven aufgestellt, um der PMA-Abteilung von Prof. Kruth, der für die Bereiche Produktionstechnik, Maschinenbau und Automation zuständig ist, intensivere Forschungen zu ermöglichen.



Professor Jean-Pierre Kruth für die Fachrichtung Maschinenbau und Automation (PMA) der Fakultät für Maschinenbau der Katholieke Universiteit Leuven.



*Derartig komplexe Produkte bedeuteten eine Herausforderung für uns, da eine zerstörungsfreie Prüfung innen liegender Strukturen ohne Röntgentechnologie unmöglich ist.*

*Prof. Jean-Pierre Kruth, Universität Leuven*

Das XT H 225-Modell, eines der CT-Röntgenprüfsysteme der PMA-Abteilung, umfasst eine 225 kV Mikrofokusröntgenröhre, lineare Wegmesssysteme, eine bessere Kühlung und weitere Verbesserungen, die für eine höhere Genauigkeit und bessere Einsatzfähigkeit in der messtechnischen CT sorgen. Bei dem zweiten System handelt es sich um ein XT H 450-Modell mit großer Kabine und Mikrofokusröntgenröhre. Es ist das leistungsfähigste in Belgien und den Niederlanden installierte CT-Gerät und bietet eine Röntgendurchdringung, die auch für die Prüfung dickerer Metallteile ausreicht. Eine 450 kV Mikrofokusröntgenröhre kann beispielsweise 35 mm starken Stahl oder 110 mm starkes Aluminium durchstrahlen.

Die Hercules Foundation in Brüssel, die von der flämischen Regierung zur finanziellen Förderung der wissenschaftlichen Forschung gegründet wurde, unterstützte die Universität beim Kauf der Systeme. Eine Voraussetzung für die Gewährung der Mittel war, dass die Ausrüstung auf ihrem Gebiet einzigartig sein und für die Forschung durch andere Unternehmen und Einrichtungen zur Verfügung stehen sollte.

### **Herkömmliche Fertigteile werden genauso gemessen wie im 3D-Druckverfahren hergestellte Komponenten (SLM-Teile).**

„Unsere PMA-Abteilung ist bereits seit Langem in der Produktionsforschung tätig. Diese Entwicklung setzte bereits in den 1960er Jahren mit den Fräs-, Bohr- und Schleifverfahren ein und erstreckt sich über das Funkenerodieren in den 70ern bis hin zur Einführung der generativen Fertigungs- (AM) und 3D-Druckverfahren (SLM) in den 90ern. Im Rahmen der Forschungen in der dimensional Messtechnik und Qualitätskontrolle für Werkstücke, die mit konventionellen Bearbeitungsverfahren hergestellt wurden, wurden Koordinatenmessgeräte (KMGs) mit berührenden Messtastern und Laserscanköpfen installiert.



*CT ist das ideale Werkzeug, um ein Servoventil mit komplizierten innen liegenden Kanälen zu untersuchen*

Die heutigen Fertigungsverfahren, wie beispielsweise Fünffachsen-Fräsen, generative Fertigung und Innenhochdruckformen (IHU oder auch „Hydroforming“ genannt), ermöglichen die Herstellung komplexer Produkte, die häufig auch besondere innen liegende Merkmale oder Kanäle aufweisen. Derartig komplexe Produkte bedeuteten eine Herausforderung für uns, da eine zerstörungsfreie Prüfung innen liegender Strukturen ohne Röntgentechnologie unmöglich ist.

Oft werden nur einmalige Prototypen oder Bauteile in kleinen Losgrößen gefertigt. Wenn man nur eine Komponente zerlegen würde, um sie im herkömmlichen Verfahren zu prüfen, würde dies prozentual gesehen einen unannehmbar hohen Ausschuss ergeben.

Die CT bietet eine Lösung, birgt aber auch ihre eigenen Probleme. Die Durchstrahlung dichter Metallteile erfordert eine hohe Stromstärke, bei der Röntgenstrahlen jedoch zu Streuung neigen.

Darüber hinaus ist die Grundkonstruktion der Standardmaschinen nicht für die für Präzisionsmessungen erforderliche Steifigkeit und Genauigkeit ausgelegt, da sie in der Regel für die Werkstoffprüfung eingesetzt werden. Tatsächlich müssen sich CT-Anwender allgemein der Problematik in puncto Genauigkeit und Wiederholbarkeit bewusst sein, die mit dem Einsatz der CT zu Messzwecken und für die Rückführbarkeit von Ergebnissen einhergehen“, erläutert Prof. Kruth. Um die Möglichkeiten zu erforschen, die sich durch den Einsatz der CT in der Messtechnik ergeben, hat die KU Leuven zwei Partner zur Unterstützung hinzugezogen: Group T, eine in Leuven ansässige Schule für Maschinenbau, und das DeNayer Institut, das im Oktober 2013 mit der KU Leuven zusammengeschlossen wurde.

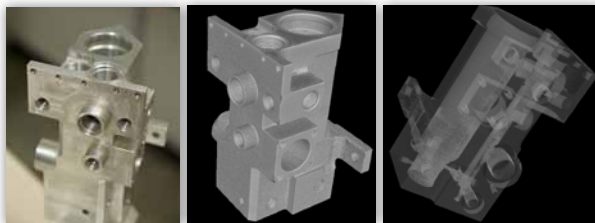
Drei Komponentengruppen waren Gegenstand der Untersuchungen – Erzeugnisse der generativen Fertigung, Präzisions- und Zusammenbauteile aus der herkömmlichen Fertigung



Die XT H 450 Mikrofokusröntgenröhre eignet sich für das Scannen kleiner Gussformen, um Einblick in die Innenstruktur des Teils zu gewinnen.



Der Curved Linear Array-Diodendetektor (CLDA) sorgt für eine optimale Erfassung der Röntgenstrahlen und verhindert, dass die Streustrahlung aufgenommen wird, die in der Regel die Verzerrung der 2D-Röntgenbilder von Turbinenschaufeln und sonstigen Metallteilen verursacht.



Die CT ermöglicht die Betrachtung eines Objekts in Schnittbildern für die Analyse des inneren Aufbaus.

und hochkomplizierte Teile, die auch mit konventionellen Bearbeitungsverfahren hergestellt wurden, wie ein Servoventil, das in einem F16 Kampffjet und einer Ariane-Rakete eingesetzt wird.

Beispielsweise hat das Ventil mehrere hundert sich überschneidende Kanten, die auf Maßhaltigkeit zu prüfen sind. Außerdem sind dort, wo die Bohrungen aufeinandertreffen, die inneren Grate zu prüfen, eine Aufgabe, die nur schwer ohne Zerstörung des Teils gelingen würde. Ganz offensichtlich ist eine hundertprozentige Inspektion, wie sie für viele dieser sicherheitskritischen Teile erforderlich ist, ohne eine Form der zerstörungsfreien Prüfung ein unmögliches Unterfangen.

### Die CT-Messgenauigkeit macht der konventionellen Messtechnik den Rang streitig

Die ersten Ergebnisse bei der Messung derartiger Bauteile unter Verwendung der Röntgen-Computertomografie erzielt wurden, haben sich als sehr vielversprechend erwiesen, berichtet Prof. Kruth. Die im PMA-Labor ausgeführten Forschungen belegen, dass unter Verwendung des Nikon Metrology CT-Systems – bei einigen Metallteilen und je nach Anwendung – sowohl für die Innen- als auch die Außenabmessungen des untersuchten Teils eine Messunsicherheit (maximal zulässige Abweichung) erreicht werden kann, die weniger als 10 Mikrometer beträgt. Die Genauigkeit dieses Systems ist der eines typischen Koordinatenmessgeräts somit nahezu ebenbürtig. Eines der im Labor installierten KMGs weist beispielsweise eine Messunsicherheit von 5 Mikrometern plus 5 Mikrometern pro Bauteillänge in Metern auf.

Um dieses Genauigkeitsniveau beim CT-Scannen zu erreichen, hat das PMA-Team die beiden Nikon Metrology Geräte in einer temperaturkontrollierten Umgebung aufgestellt. Jedes Gerät verfügt über ein eigenes Kühlsystem, das die Temperaturstabilität gewährleistet.

### Arbeitsprinzip

Bei der Inbetriebnahme werden Röntgenstrahlen von einer Röntgenquelle erzeugt, die Elektronen auf ein Target projiziert. Wenn die Röntgenstrahlen das Werkstück durchdringen, werden diese aufgrund von Faktoren wie Absorption und Streuung abgeschwächt. Der Grad, um den die Röntgenstrahlen gedämpft werden, wird anhand der Strecke, die im Material zurückgelegt wird, seiner Zusammensetzung und Dichte (des Schwächungskoeffizienten) sowie anhand des Energiepegels (keV) der Röntgenstrahlen ermittelt. Nachdem sie das Werkstück durchdrungen haben, werden die abgeschwächten Röntgenstrahlen normalerweise von einem Flachdetektor erfasst und ein 2D-Graustufenbild entsteht. Solche 2D-Bilder werden aus vielen Drehwinkeln des Werkstücks aufgenommen.

Aus der Rekonstruktion einer Industriekomponente auf Basis projizierter Schnittbilder resultiert ein Voxelmmodell (ein Voxel ist die dreidimensionale Entsprechung eines Pixels). An den Grauwerten der Voxel lässt sich dann der lineare Schwächungskoeffizient des Materials messen. Zur Identifizierung der Kanten und Merkmale des Werkstücks, Durchführung dimensionaler Messungen und Qualitätskontrolle werden die Voxeldaten mit Algorithmen nachbearbeitet.

Das im Labor der PMA-Abteilung installierte XT H 450 System wartet neben dem herkömmlichen 2D-Flachdetektor außerdem mit einem gekrümmten 1D-Lineardetektor auf. Bei Verwendung eines Lineardetektors muss das Werkstück entlang der Rotationsachse bewegt werden, damit nacheinander Querschnitte des Objekts vermessen werden können, vergleichbar mit dem Verfahren bei medizinischen CT-Scannern. In der Regel ermöglicht der Lineardetektor eine höhere Leistung (höhere Spannung, Stromstärke oder Belichtungszeit und somit tiefere Materialdurchdringung) und ist weniger empfindlich für Streustrahlung.





*Oft werden nur einmalige Prototypen oder Bauteile in kleinen Losgrößen gefertigt. Wenn man nur eine Komponente zerlegen würde, um sie im herkömmlichen Verfahren zu prüfen, würde dies prozentual gesehen einen unannehmbar hohen Ausschuss ergeben.*

Derzeit werden in der PMA-Abteilung Forschungen durchgeführt, um festzustellen, ob der Lineardetektor nicht besser für die genaue Messung großvolumiger, dichter Komponenten geeignet ist als der Flachdetektor.

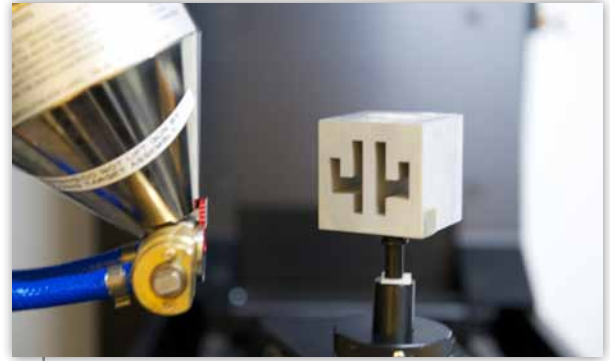
### Technische Herausforderungen

Verschiedene Probleme werden von Prof. Kruth und seinem Team erforscht, wie beispielsweise Optimierung der Beleuchtungswerte beim Röntgen und Anpassung der Grauwert-Grenzwertbildung für rückführbare dimensionale Messungen, Verringerung der Brennfleckgröße, um eine höhere Genauigkeit zu erreichen, sowie Erhöhung der Röntgenleistung, um eine bessere Durchdringung bei großen Metallteilen zu erzielen.

Ein weiterer Forschungsgegenstand ist die Strahlaufhärtung, ein allgemeines Problem bei polychromatischen CT-Röntgenquellen, das dazu führt, dass niederenergetischere Photonen leichter vom Material des Werkstücks absorbiert werden. Dies führt zu einer chromatischen Aberration und Verformung des Bildes, vor allem an den Kanten, und dazu, dass ein falscher Grauwert ermittelt wird. Dieser lässt den Eindruck entstehen, dass die Oberfläche der Komponente aus einem anderen Material besteht als der Kern. Damit kann auch eine fehlerhafte Kantenerkennung einhergehen. Die Strahlaufhärtung ist bei der Untersuchung von Materialverbindungen unerwünscht und wird mithilfe von Strahlenfiltern und Software korrigiert. Bei messtechnischen Anwendungen kann der Strahlaufhärtungseffekt jedoch hilfreich sein, um die Kantendefinition zu verbessern, da sich so die äußeren Abmessungen eines Werkstücks präziser vermessen lassen.

### Zusammenarbeit

Die enge Zusammenarbeit zwischen der KU Leuven und Nikon Metrology, die sich aus einer früheren Ausgliederung einer Einrichtung der Universität zur kommerziellen Nutzung ihrer Arbeit ergeben hat, wurde unlängst gefeiert: Die Einweihung der in der PMA-Abteilung installierten CT-Systeme erfolgte durch Herrn Kenji Yoshikawa, CEO von Nikon Metrology, persönlich. Weitere Unternehmensgründungen der Universität, wie LayerWise, die auf generative Schmelzverfahren von Metallen spezialisiert sind, und Materialise, ein international führendes Unternehmen in den Bereichen Rapid Prototyping und 3D-Druck, erforschen derzeit in Zusammenarbeit mit der Universität,



*Ein Referenzobjekt wird zu Testzwecken eingesetzt, um die dimensionale Genauigkeit der messtechnischen CT zu überprüfen.*



*Kenji Yoshikawa, CEO von Nikon Metrology, weiht die CT-Systeme in der PMA-Abteilung der KU Leuven ein.*

wie die messtechnische CT für die Analyse komplexer Bauteile aus der generativen Fertigung eingesetzt werden kann. Es sagt alles, dass Prof. Kruth Gründungsmitglied aller drei Unternehmensvorstände ist.

Dies sind nur einige wenige Beispiele für die gemeinschaftliche Zusammenarbeit, die die PMA-Abteilung mit vielen Unternehmen und internationalen akademischen Einrichtungen, vor allem in Europa, aber auch in den USA und Japan, eingegangen ist. Die Forschungsaktivitäten werden in hohem Maße von der Industrie vorangetrieben und sind daher praktisch orientiert.

An einer jüngsten europaweiten Kooperation im Bereich der CT-Messtechnik waren 15 Unternehmen und Labore beteiligt, welche die gleichen Objekte vermessen und ihre Ergebnisse verglichen haben. Ziel dieses Austauschs von Kenntnissen und Best Practice-Verfahren in der Messtechnik war, die Genauigkeit und Rückführbarkeit von Messungen zu optimieren.

Eine weitere europäische Kooperation wurde gerade mit finanzieller Unterstützung des Marie Curie Programms der Europäischen Union gestartet. Die KU Leuven hat sich Nikon Metrology, dem metrologischen Staatsinstitut NPL (National Physical Laboratory) in Großbritannien, der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt, Materialise und einigen anderen Unternehmen und Universitäten angeschlossen, um Ingenieure und Forscher im Bereich der messtechnischen CT auszubilden.