

Innere Werte zählen

Die fortlaufende Miniaturisierung stellt die dimensionelle Messtechnik vor neue Herausforderungen. Weltweit gefertigte Teile sollen passgenau zusammengefügt werden, wobei deren Präzision oft über den Erfolg eines Produkts entscheidet. Vermehrt sind dimensionelle Masse aus dem Innern eines Objekts gefragt, wobei die taktile Messtechnik an ihre Grenzen stösst. Deshalb entwickelte das METAS in den vergangenen drei Jahren ein Computertomographiesystem, welches es erlaubt, innere Strukturen mithilfe von Röntgenstrahlung sicht- und messbar zu machen.

BENJAMIN BIRCHER UND FELIX MELI

Wilhelm Röntgen entdeckte Ende des 19. Jahrhunderts die Röntgenstrahlung, welche Objekte durchdringen und somit deren innere Struktur sichtbar machen kann. Er erkannte sofort, dass seine Entdeckung für medizinische Zwecke eingesetzt werden kann. Nun war es möglich, innere Organe und Strukturen vom Menschen nichtinvasiv zu untersuchen, was zu grossen Fortschritten in der medizinischen Diagnostik führte. Eingeschränkt wird die klassische Röntgendiagnostik dadurch, dass die Röntgenbilder nur aus einer Richtung aufgenommen werden und sich somit hintereinander liegende Objekte überlagern und nicht unterscheidbar sind.

Eine Lösung für dieses Problem ist die Computertomographie (CT). Dabei werden Röntgenbilder aus vielen verschiedenen Richtungen aufgenommen, woraus die dreidimensionale Struktur des analysierten Objekts rekonstruiert werden kann (siehe Infografik). In der Medizin wird diese dreidimensionale Ansicht oft in Schnittbildern, welche quer oder längs durch den Körper verlaufen, dargestellt. Obschon die mathematischen Grundlagen der CT schon Anfangs des 20. Jahrhunderts erarbeitet wurden, dauerte es noch mehr als 50 Jahre bis die Methode praktisch umgesetzt werden konnte, da erst dann

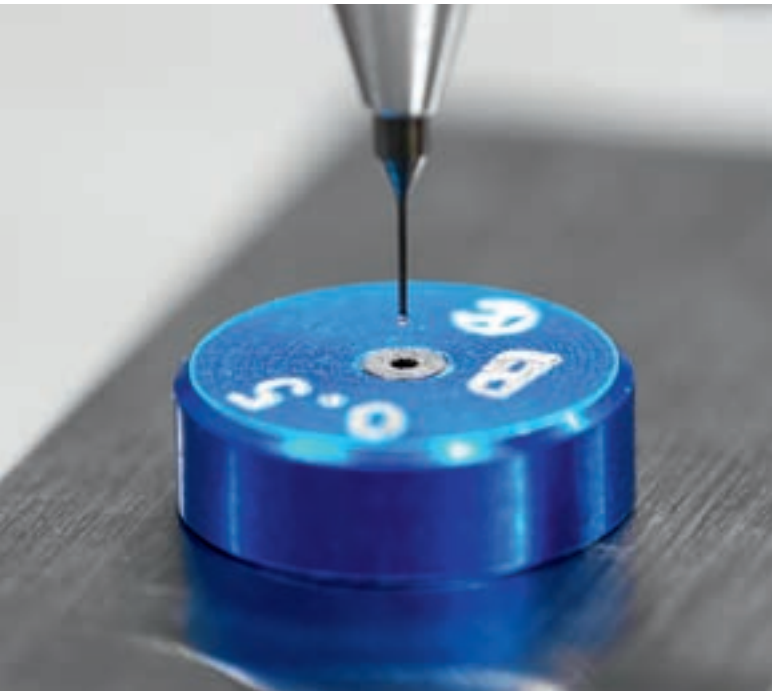
genügend leistungsfähige Computer verfügbar waren. Den ersten medizinischen CT-Scanner baute Godfrey Hounsfield in den 1960er Jahren in England [1]. Da Hounsfield bei Electric and Musical Industries, kurz EMI, beschäftigt war, welches zur selben Zeit Schallplatten produzierte und die Beatles unter Vertrag hatte, hält sich bis heute der Mythos, dass «Let it be» und Co. die Entwicklung des CT-Scanners mitfinanziert haben [2]. Heutzutage verläuft die Entwicklung der medizinischen CT-Scanner in Richtung immer kürzerer Aufnahmezeiten und geringerer Strahlenbelastung für die Patienten.

Parallel zur medizinischen CT entwickelte sich das Feld der industriellen CT [1]. Es deckt die Untersuchung von Objekten ab, deren Grösse von unter einem Millimeter, z.B. Uhrenteile, bis zu einigen Metern Grösse, z.B. Windräder, reicht. Bei der seit Jahrzehnten etablierten zerstörungsfreien Prüfung werden kritische Bauteile auf interne Risse, Lufteinschlüsse oder andere Defekte mittels CT untersucht.

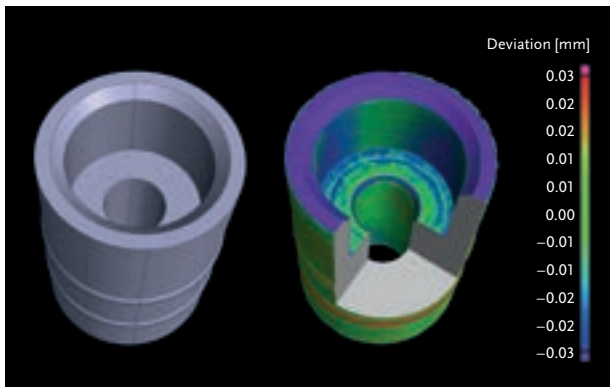
Der Einsatz der CT in der dimensionellen Messtechnik ist relativ neu und machte in den letzten 10 Jahren grosse Fortschritte. Viele Fragen betreffend der Rückführbarkeit und der Messunsicherheit sind allerdings aufgrund ihrer Komplexität noch nicht abschliessend geklärt.

1: Von der Entdeckung der Röntgenstrahlung zur Computertomographie.





2: Die Grösse der Tastkugel auf einem taktilen Koordinatenmessgerät begrenzt die Vermessung kleiner und innen liegender Strukturen.



3: Soll-Ist-Vergleich eines Computermodells (Soll, links) mit der CT-Messung (Ist, rechts), welche die ganze Oberfläche des Objekts erfasst. Die Abweichungen werden farbkodiert dargestellt.

Neue Herausforderungen in der dimensionellen Messtechnik

Die dimensionelle Messtechnik steht vor der Herausforderung, immer kleinere Objekte mit immer höheren Anforderungen an die Genauigkeit zu vermessen. Die taktile Messtechnik, welche mit Messunsicherheiten unter $0.1\ \mu\text{m}$ die Referenzmethode in der dimensionellen Metrologie darstellt, kommt dabei an ihre Grenzen. Die Grösse der Tastkugel, mit welcher das Objekt abgetastet wird und deren Durchmesser unter $0.2\ \text{mm}$ betragen kann, begrenzt die Vermessung von sehr kleinen oder innen liegenden Geometrien, wie z.B. Bohrungen mit einem Durchmesser von weniger als $0.1\ \text{mm}$. Neue Fertigungsverfahren, wie die Additive Fertigung (3D-Druck), erlauben es zudem, interne funktionelle Geometrien herzustellen, deren Vermessung und Charakterisierung aber komplex ist.

Die Computertomographie kann diese Einschränkungen überwinden. Da die Abbildung durch Röntgenstrahlung berührungsfrei erfolgt, ist die Messung kleinster Strukturen nur durch die Auflösung des Systems begrenzt. Zudem entstehen keine Tastkräfte, die fragile Strukturen deformieren können. Im Gegensatz zur taktilen Messung wird die vollständige Oberfläche des Objekts in einem einzigen Scan erfasst und abgebildet. Dies erlaubt es neben herkömmlichen Geometrien, wie z.B. einem Zylinder, beliebige Strukturen direkt mit dem entsprechenden Computermodell (CAD) zu vergleichen. Die erreichbaren Messunsicherheiten liegen wegen zahlreicher Einflussfaktoren im Moment in der Grössenordnung von einigen $10\ \mu\text{m}$. Rückführbare CT-Messungen sind aufgrund der komplexen Messunsicherheitsabschätzung noch nicht etabliert.

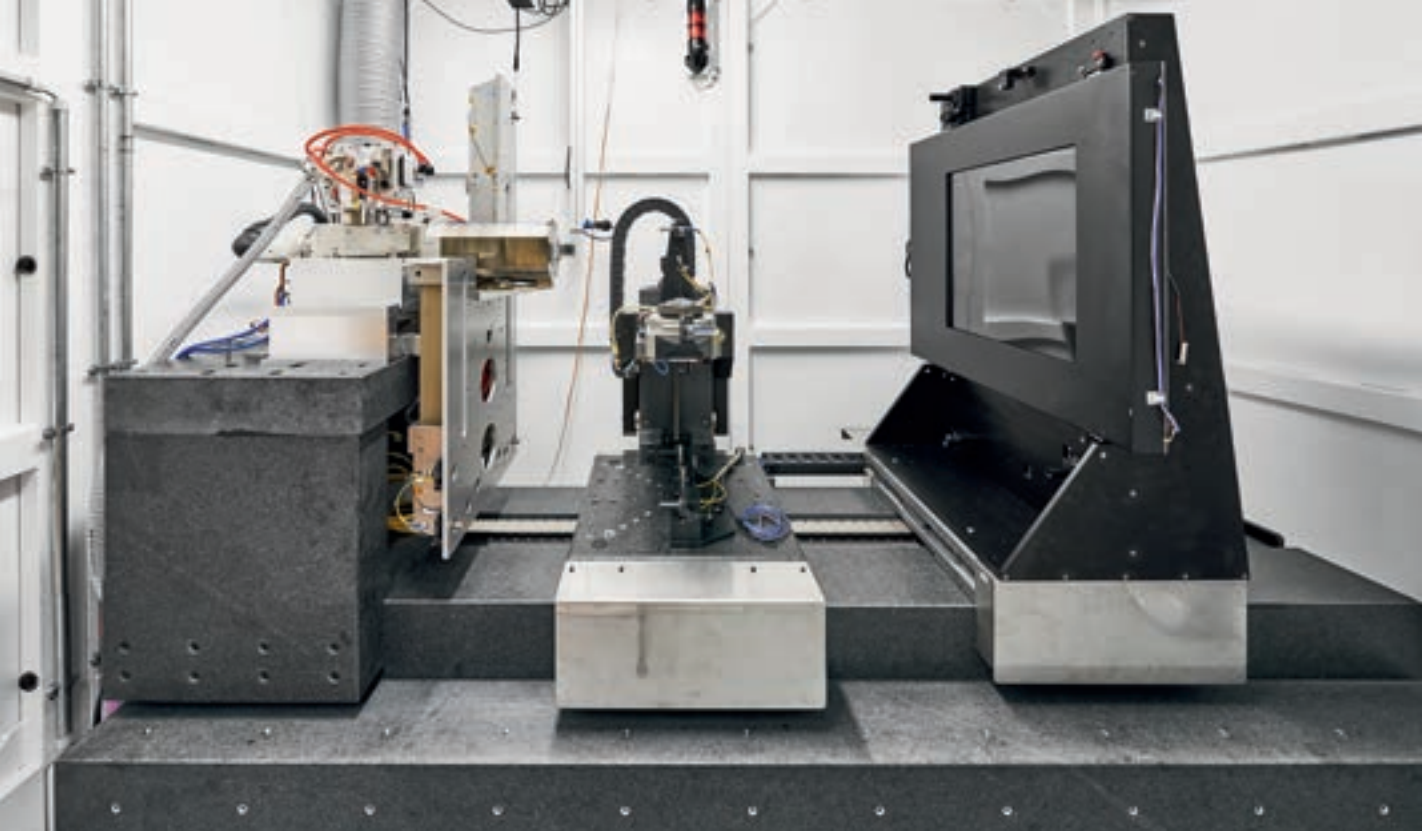
Das METAS μCT Projekt

Im Jahr 2015 hat das METAS ein Projekt zum Kompetenzaufbau auf dem Gebiet der Computertomographie gestartet. Es umfasste die Entwicklung und den Aufbau eines hochpräzisen, industriellen μCT -Systems, genannt METAS-CT, und lieferte die Grundlage, um an mit Drittmitteln finanzierten Forschungsprojekten teilzunehmen und CT-Messdienstleistungen anzubieten.

Das METAS-CT wurde konzipiert, um kleinste Teile mit höchster Genauigkeit zu vermessen [3, 4] und dabei die taktilen Messungen des METAS-Mikrokoordinatenmessgerätes zu ergänzen, das schon seit mehr als 15 Jahren hochpräzise Messungen für Forschungsprojekte und Kalibrierdienstleistungen liefert. Damit wird spezifisch auf den Bedarf an Schweizer Präzision in der Mikrotechnikindustrie eingegangen.

Das METAS-CT ist eine Eigenentwicklung und besteht aus einer hochauflösenden Röntgenröhre, einem präzisen Positioniersystem, um das Objekt zu verschieben und zu drehen, und einem Röntgendetektor, der die Röntgenstrahlung auffängt und als digitales Bild ausgibt. Die von der Röntgenröhre ausgesendete Strahlung durchdringt das Objekt, wird je nach Materialdicke und -dichte mehr oder weniger stark absorbiert und erzeugt so ein «Schattenbild» des Objekts. Höchste Auflösung und Genauigkeit zu erreichen ist anspruchsvoll: Die Strahlungsintensität hochauflösender Röntgenröhren, mit einer Auflösung unter $1\ \mu\text{m}$, ist sehr tief. Wer schon im Dunkeln von Hand fotografiert hat, kennt die Herausforderung, die Kamera möglichst stabil zu halten, um verwackelte Bilder zu vermeiden.

Das METAS-CT muss über mehrere Stunden auf wenige tausendstel Millimeter stabil stehen. Das System zeichnet sich zwar durch eine sehr hohe mechanische und thermische Stabilität aus, die jedoch für höchstauflösende Scans noch nicht ausreichend ist. Deshalb verfügt das METAS-CT zusätzlich über ein weltweit einzigartiges Geometriemesssystem, welches die Positionen der Röntgenröhre, des Objekts und des Detektors kontinuierlich und sehr präzise verfolgen und korrigieren kann. Das Geometriemesssystem besteht aus 8 Laserinterferometern und 5 selbstentwickelten Lasergeradheitsensoren und ist eine wichtige Voraussetzung für genaue, rückführbare Messungen.

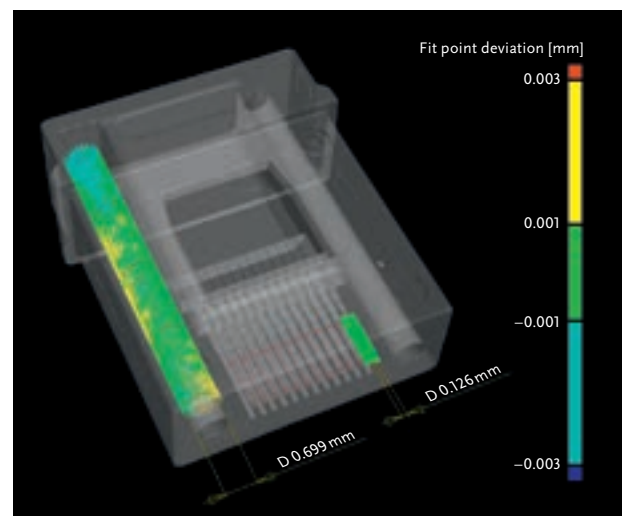
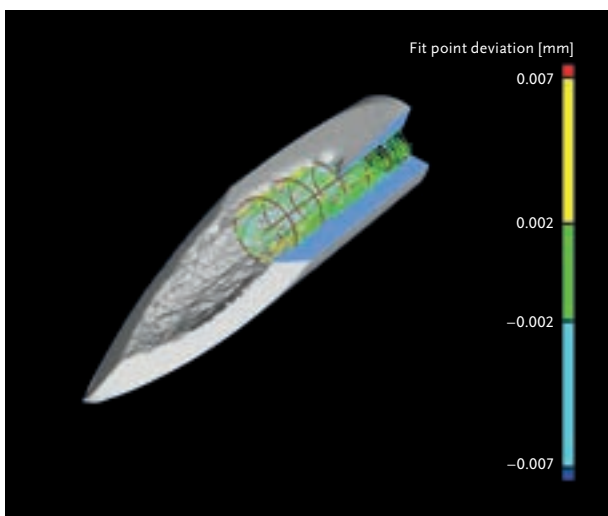


4: METAS-CT: Ein hochpräzises Computertomographie-System, welches es erlaubt, kleinste Teile zu charakterisieren. Es besteht aus einer Submikrofokus-Röntgenröhre (links), einem präzisen Rotationstisch (Mitte) und einem hochauflösenden Röntgendetektor (rechts).

Das METAS-CT-System kann Strukturen von unter $1\ \mu\text{m}$ auflösen. Die Messunsicherheiten sind stark von der Messaufgabe abhängig und betragen im Idealfall wenige Mikrometer. Durch die hohe Auflösung fallen enorme Datenmengen an: ein kompletter Datensatz ist 128 GB gross und bringt somit handelsübliche Computer schnell an ihre Grenzen. Deshalb wird spezielle Software und Recheninfrastruktur eingesetzt, um die Daten zu verarbeiten.

Während taktile Messungen direkt eine rückführbare Längenmessung ausgeben können, ist der Messprozess beim CT indirekter und komplexer: Aufnahme der Röntgenbilder, Rekonstruktion zum 3D-Modell, Bestimmung der Objektfläche, sogenannte Segmentierung, und schliesslich virtuelle Vermessung des Objekts am Computer. Jeder dieser Schritte

hat einen Einfluss auf das Resultat der Messung, weshalb sie bei der Messunsicherheitsabschätzung berücksichtigt werden müssen. Entscheidende Einflussfaktoren sind unter anderem die Geometrieabweichungen des CT-Systems, die Eigenschaften und Betriebsparameter der Röntgenröhre und des Detektors, die Grösse und Materialzusammensetzung des untersuchten Objekts, sowie die eingesetzte Rekonstruktions- und Analysesoftware. Um all diese Effekte zu erfassen, ist ein klassischer Ansatz zur Abschätzung der Messunsicherheit nicht ausreichend. Deshalb wird am METAS auf Simulation des gesamten Messprozesses gesetzt. Solche Simulationen sind jedoch aufgrund der Komplexität und des benötigten Rechenaufwandes sehr zeitintensiv und noch in Entwicklung. Zu ihrer Verbesserung trägt die umfangreiche Charakterisierung des METAS-CT bei.



5: Per CT vermessene Teile aus der Medizin- und der Telekommunikationstechnik, welche nur wenige Millimeter gross sind: Injektionsspritze (Innendurchmesser 0.1 mm) und Glasfaserstecker (Länge 8 mm).

Was bewirkt das METAS auf dem Gebiet der dimensionellen Computertomographie?

Das METAS beteiligt sich zurzeit an drei Europäischen Forschungsprojekten. In zwei Projekten im Rahmen des EMPIR, AdvanCT und NanoXSpot, werden unter anderem Methoden untersucht, um präzisere CT-Daten zu generieren, simulationsgestützte Messunsicherheiten abzuschätzen, sowie hochauflösende Röntgenröhren zu charakterisieren. An beiden Projekten beteiligen sich gesamthaft über 30 Industriepartner, Metrologie- und Forschungsinstitute.

MANUELA ist ein europäisches Forschungs- und Innovationsprojekt im Rahmen von Horizon 2020, das sich zum Ziel setzt, eine offene Pilotanlage für additiv gefertigte (3D-Druck) Metallteile aufzubauen. Das METAS-CT unterstützt dabei Prozessoptimierungsschritte und dimensionelle Qualitätskontrollen.

Parallel zu den laufenden Forschungsprojekten wurden erste Dienstleistungen und Demonstrationsmessungen durchgeführt. Anwendungen für die hochauflösende CT finden sich unter anderem in der Uhren- und Automobilzulieferindustrie, sowie in der Medizin- und Telekommunikationstechnik.

In den nächsten Jahren liegt der Schwerpunkt der Arbeiten am METAS weiterhin in der Erforschung und Verbesserung dieser vielfältigen Messmethode.

Literatur

- [1] Leach, R., Carmignato, S., & Dewulf, W. (2018). Industrial X-Ray Computed Tomography. Springer International Publishing. DOI: 10.1007/978-3-319-59573-3
- [2] Maizlin, Z. B., Vos, P. M. (2012) Do We Really Need to Thank the Beatles for the Financing of the Development of the Computed Tomography Scanner? Journal of Computer Assisted Tomography 36
- [3] Bircher, B. A., Meli, F., Küng, A., & Thalmann, R. (2018). Characterising the Positioning System of a Dimensional Computed Tomograph (CT). MacroScale – Recent developments in traceable dimensional measurements. DOI: 10.7795/810.20180323C
- [4] Bircher, B. A., Meli, F., Küng, A., & Thalmann, R. (2018). A geometry measurement system for a dimensional cone-beam CT. 8th Conference on Industrial Computed Tomography, Wels, Austria.



Kontakt:

Dr. Felix Meli
 Laborleiter Länge,
 Nano- und Mikrotechnik
 felix.meli@metas.ch
 +41 58 387 03 46

Dr. Benjamin Bircher
 Projektleiter Computertomographie
 benjamin.bircher@metas.ch
 +41 58 387 02 42

Les dimensions internes sont inestimables – La tomographie à rayons X dimensionnelle

Un mesurage tridimensionnel, à la fois exact et traçable, est essentiel pour l'industrie de précision. Les pièces sont fabriquées sur des sites répartis dans le monde entier et doivent s'assembler parfaitement. Le mesurage des structures intérieures d'un composant est particulièrement complexe. En 2015, METAS a commencé à développer ses compétences en matière de tomographie à rayons X. Les applications de la tomographie à rayons X en métrologie dimensionnelle sont relativement récentes et présentent un grand potentiel d'avenir.

Le système de tomographie à rayons X de METAS a été conçu pour mesurer les micro-pièces avec une exactitude extrême. Le système a été développé en interne et peut reproduire des structures avec une résolution de moins de 1 µm. Il se compose d'un tube à rayons X à haute résolution, d'un système de positionnement qui permet de déplacer l'objet et de le faire tourner, ainsi que d'un détecteur de rayons X qui capte le rayonnement X et le convertit en image numérique. Une reconstruction très complexe sur le plan mathématique permet de transformer les radiographies en un objet tridimensionnel dont on peut ensuite déterminer les dimensions.

La tomographie à rayons X à haute résolution s'utilise notamment dans l'industrie horlogère, chez les équipementiers automobiles ainsi que les secteurs des technologies médicales et du matériel de télécommunication. Ces prochaines années, l'accent sera mis sur l'étude et l'amélioration de cette méthode de mesure polyvalente dans le cadre de projets de recherche européens.

Contano i valori interni – tomografia computerizzata dimensionale

Per l'industria di precisione è fondamentale disporre di misurazioni di lunghezza tridimensionali accurate e riferibili. I componenti sono fabbricati in tutto il mondo e devono combaciare perfettamente. Le misurazioni delle strutture interne di un componente sono particolarmente esigenti. Nel 2015 il METAS ha iniziato a sviluppare competenze nel campo della tomografia computerizzata (CT). Le applicazioni della tomografia computerizzata nella tecnologia di misurazione dimensionale sono relativamente nuove e hanno un grande potenziale per il futuro.

Il METAS-CT è stato progettato per misurare i componenti più piccoli con la massima precisione. Il sistema è uno sviluppo in-house e può misurare strutture con una risoluzione inferiore a 1 µm. Il METAS-CT è costituito da un tubo a raggi X ad alta risoluzione, da un sistema di posizionamento per spostare e ruotare l'oggetto e da un rivelatore di raggi X, che cattura tali raggi e li rivela come immagine digitale. Attraverso una ricostruzione matematicamente molto complessa le immagini radiografiche vengono trasformate in un oggetto tridimensionale, di cui si possono successivamente determinare le dimensioni.

La CT ad alta risoluzione trova tra l'altro applicazione nell'industria orologiera e nell'industria della componentistica per autoveicoli nonché nella tecnologia medica e delle telecomunicazioni. Nei prossimi anni, l'attenzione si concentrerà sulla ricerca e sul miglioramento di questo versatile metodo di misurazione nell'ambito di progetti di ricerca europei.

Inner values count – dimensional computed tomography

Accurate and traceable three-dimensional length measurements are vital for the precision industry. Parts produced in different locations all over the world must fit together perfectly. Measurements of a component's internal structures are particularly challenging. In 2015, METAS set about building up its expertise in the field of computed tomography (CT). Computed tomography applications in dimensional metrology are relatively new and have enormous potential for the future.

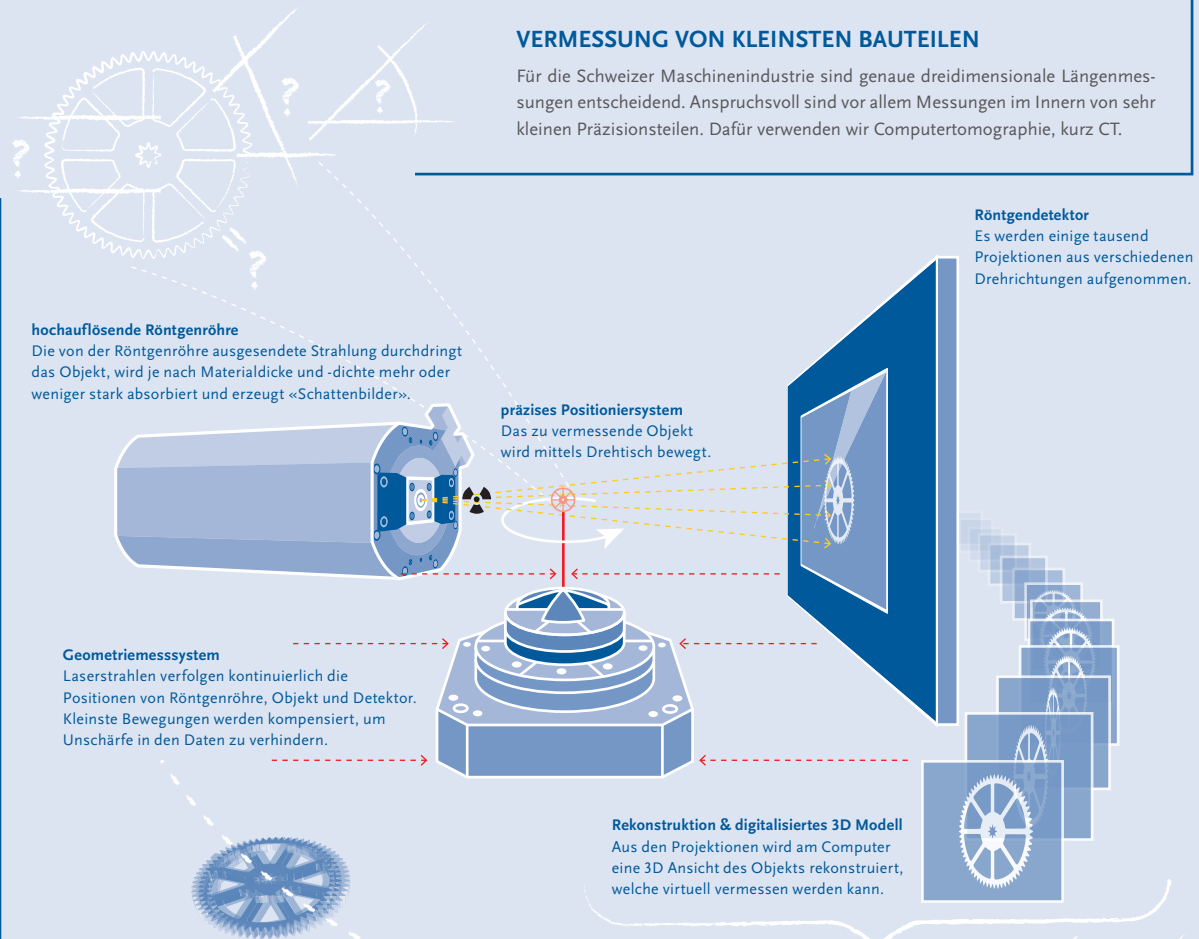
The METAS-CT was designed to be able to measure exceedingly small parts with the utmost precision. The system is an in-house development and can resolve structures of less than 1 µm. It consists of a high-resolution X-ray tube, a positioning system with which to move and rotate the object and an X-ray detector that captures the X-ray radiation and depicts it as a digital image. With the aid of a mathematically very complex reconstruction, the X-ray images are transformed into a three-dimensional object on which dimensions can then be determined.

Applications for the high-resolution CT are to be found among others in the watch and automotive supply industries as well as in medical and telecommunications technology. The focus for the coming years lies in research and improvement of this versatile measurement method within the framework of European research projects.

Der METAS-Computertomograph (METAS-CT)

VERMESSUNG VON KLEINSTEN BAUTEILEN

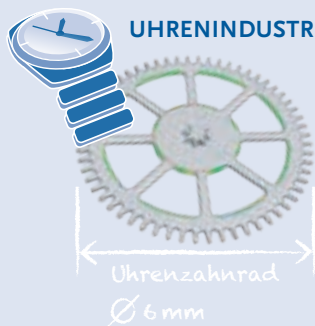
Für die Schweizer Maschinenindustrie sind genaue dreidimensionale Längenmessungen entscheidend. Anspruchsvoll sind vor allem Messungen im Innern von sehr kleinen Präzisionsteilen. Dafür verwenden wir Computertomographie, kurz CT.



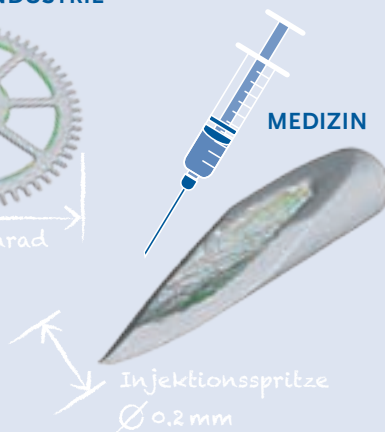
DAS METAS µCT PROJEKT

Im Jahr 2015 hat das METAS ein Projekt zum Kompetenzaufbau auf dem Gebiet der Computertomographie gestartet. Es umfasste die Entwicklung und den Aufbau eines hochpräzisen, industriellen µCT-Systems, genannt METAS-CT, und liefert die Grundlage, um an drittfinanzierten Forschungsprojekten teilzunehmen und CT-Messdienstleistungen anzubieten.

UHRENINDUSTRIE

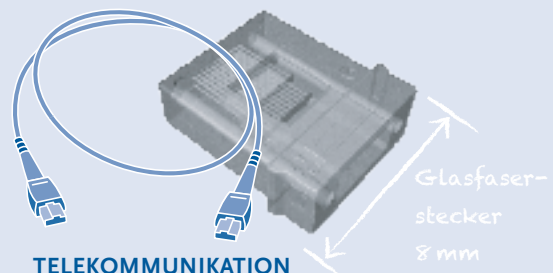


MEDIZIN



ANWENDUNGSGEBIETE

Das METAS-CT wurde konzipiert, um kleinste Teile mit höchster Genauigkeit zu vermessen und dabei die taktilen Messungen des METAS Mikrokoordinatenmessgerätes zu ergänzen, welches schon seit mehr als 15 Jahren hochpräzise Messungen zu Forschungsprojekten und Kalibrierdienstleistungen liefert. Damit wird spezifisch auf den Bedarf an Schweizer Präzision in der Mikrotechnikindustrie eingegangen.



www.metas.ch

Eidgenössisches Institut für Metrologie METAS

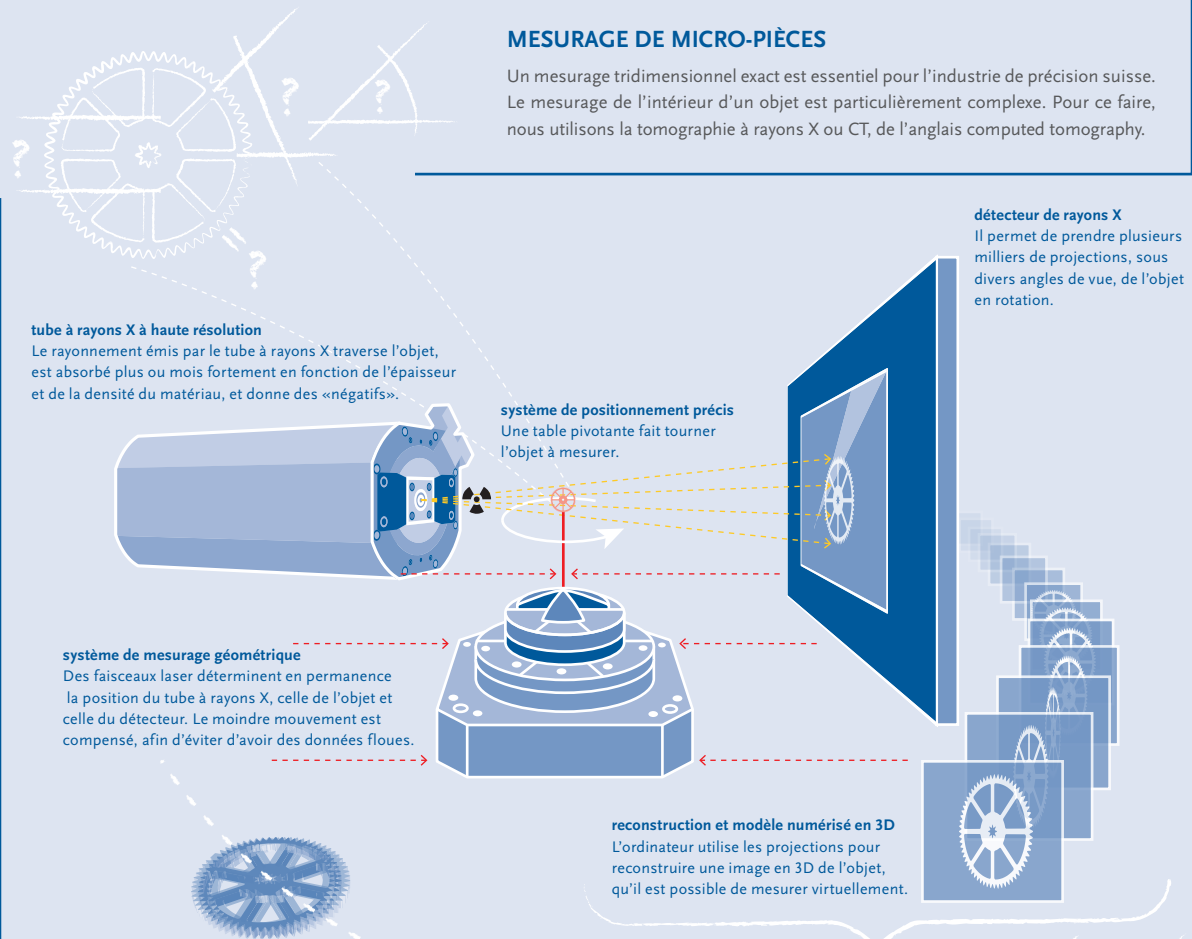
Illustration: Nadja Stadelmann

TELEKOMMUNIKATION

Le tomographe à rayons X de METAS (METAS-CT)

MESURAGE DE MICRO-PIÈCES

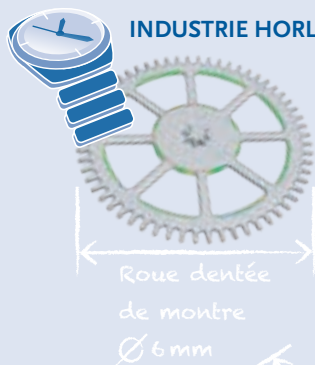
Un mesurage tridimensionnel exact est essentiel pour l'industrie de précision suisse. Le mesurage de l'intérieur d'un objet est particulièrement complexe. Pour ce faire, nous utilisons la tomographie à rayons X ou CT, de l'anglais computed tomography.



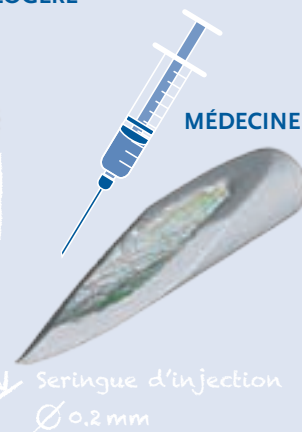
LE PROJET DE MICRO-TOMOGRAPHIE RX DE METAS

En 2015, METAS a lancé un projet de développement de ses compétences en matière de tomographie à rayons X. Le projet prévoyait de développer et de construire un système de micro-tomographie Rx industriel de haute précision, baptisé METAS-CT. Il permet aujourd'hui de proposer des prestations de mesurage par tomographie Rx et de participer à des projets de recherche financés par des tiers.

INDUSTRIE HORLOGÈRE

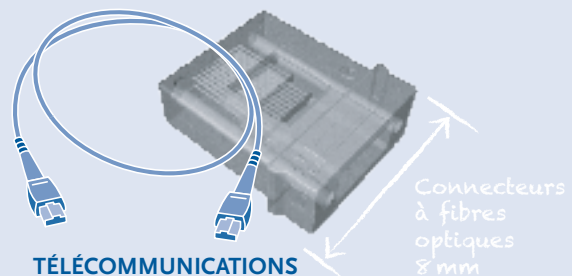


MÉDECINE



DOMAINES D'APPLICATION

METAS CT a été conçu pour mesurer les micro-pièces avec une exactitude extrême, venant ainsi compléter les possibilités de mesurages tactiles de la machine à mesurer tridimensionnelle (micro-MMT) de METAS, qui fournit depuis plus de 15 ans des mesurages de haute précision pour des prestations d'étalonnage et pour des projets de recherche. Ceci répond spécifiquement aux besoins en précision de l'industrie microtechnique suisse.



www.metas.ch

Institut fédéral de métrologie METAS

Illustration: Nadja Stadelmann

TÉLÉCOMMUNICATIONS