



Industrielle Computertomographie

Präzise Blicke mit
Röntgenaugen in das
Innere von Materialien

|M|A|G|S|E|N|S|E|

MagSense 2026

Magnets Magnetism Sensors and Applications

17.September 2026 / Imaginata Jena

Innovent e.V. Jena, Frank Froehlich

F.Froehlich@innovent-jena.de

- Computertomographie bei Innovent
- Methodik
- Multimaterial: Von „weich“ zu „hart“
- Magnetsensoren
- Kontrolle der Auflösung mit einer JIMA Card
- Fehlersuche in der Elektrotechnik
- Künstliche und natürliche Kristalle
- Glas mit Struktur
- Festkörper mit Löchern: Poren in Polymer
- Dünne Schichten für die Medizin
- Archäologie: Ein Degen aus Jena
- Symmetrie in der Natur

Computertomographie bei Innovent

Hersteller: RX Solutions
Strahlquelle: Wolfram
Software: Volume Graphics

EasyTom 150-160 X-Ray Micro& Nano-CT

Stärken unseres Geräts:

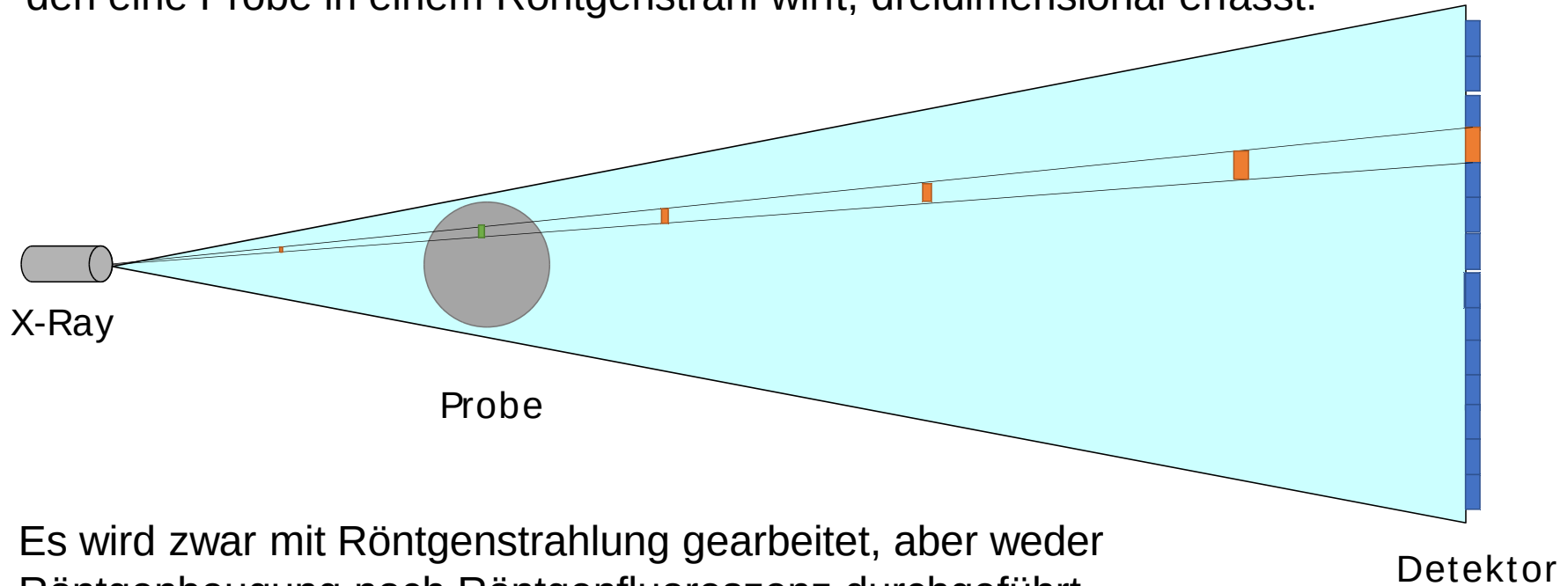
Es können relativ große Proben mit einer relativ hohen Auflösung gemessen werden.

Minimale Voxelgröße: 0,85 μm



Wie funktioniert die Computertomografie ?

Die Computertomographie ist ein bildgebendes Messverfahren, dass den „Schatten“, den eine Probe in einem Röntgenstrahl wirft, dreidimensional erfasst.

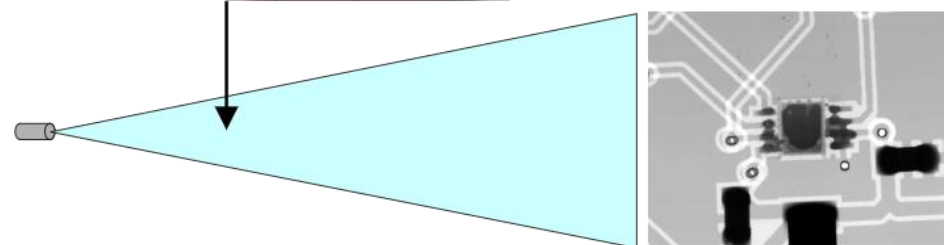
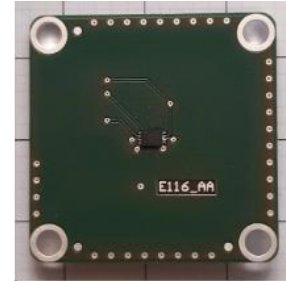
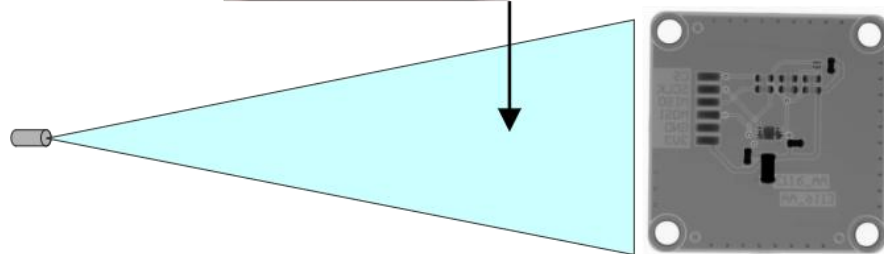
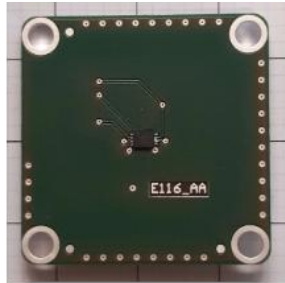


Es wird zwar mit Röntgenstrahlung gearbeitet, aber weder Röntgenbeugung noch Röntgenfluoreszenz durchgeführt.

Die Kegelstrahlgeometrie

Übersichts-Messung:

Zoom-Messung:



X-RAY Absorption

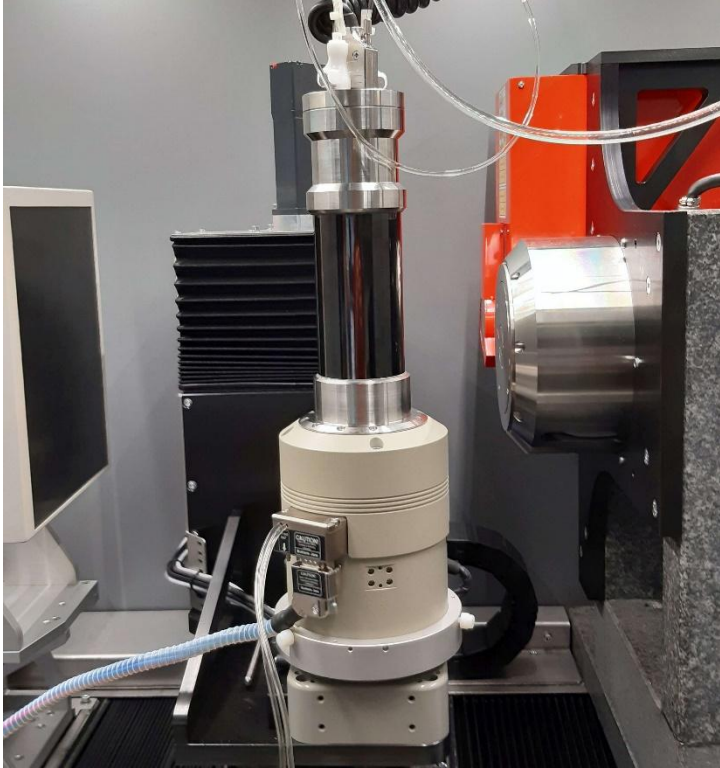
1 Hydrogen 1 H 1.01	2 Helium 2 He 4.00																
3 Lithium 3 Li 6.94	4 Beryllium 4 Be 9.01																
11 Sodium 11 Na 22.99	12 Magnesium 12 Mg 24.31																
19 Potassium 19 K 39.10	20 Calcium 20 Ca 40.08	3 Scandium 21 Sc 44.96	4 Titanium 22 Ti 47.88	5 Vanadium 23 V 50.94	6 Chromium 24 Cr 52.00	7 Manganese 25 Mn 54.94	8 Iron 26 Fe 55.85	9 Cobalt 27 Co 58.93	10 Nickel 28 Ni 58.69	11 Copper 29 Cu 63.55	12 Zinc 30 Zn 65.39	13 Aluminum 13 Al 26.98	14 Silicon 14 Si 28.09	15 Phosphorus 15 P 30.97	16 Sulfur 16 S 32.07	17 Chlorine 17 Cl 35.45	18 Argon 18 Ar 39.95
37 Rubidium 37 Rb 85.47	38 Strontium 38 Sr 87.62	39 Yttrium 39 Y 88.91	40 Zirconium 40 Zr 91.22	41 Niobium 41 Nb 92.91	42 Molybdenum 42 Mo 95.94	43 Technetium 43 Tc (98)	44 Ruthenium 44 Ru 101.07	45 Rhodium 45 Rh 102.91	46 Palladium 46 Pd 106.42	47 Silver 47 Ag 107.87	48 Cadmium 48 Cd 112.41	49 Indium 49 In 114.82	50 Tin 50 Sn 118.71	51 Antimony 51 Sb 121.76	52 Tellurium 52 Te 127.60	53 Iodine 53 I 126.90	54 Xenon 54 Xe 131.29
55 Cesium 55 Cs 132.91	56 Barium 56 Ba 137.33	57-70 Lanthanum 71 Lu 174.97	72 Hafnium 72 Hf 178.49	73 Tantalum 73 Ta 180.95	74 Tungsten 74 W 183.84	75 Rhenium 75 Re 186.21	76 Osmium 76 Os 190.23	77 Iridium 77 Ir 192.22	78 Platinum 78 Pt 195.08	79 Gold 79 Au 196.97	80 Mercury 80 Hg 200.59	81 Thallium 81 Tl 204.38	82 Lead 82 Pb 207.20	83 Bismuth 83 Bi 208.98	84 Polonium 84 Po (209)	85 Astatine 85 At (210)	86 Radon 86 Rn (222)
87 Francium 87 Fr (223)	88 Radium 88 Ra (226)	89-102 Lanthanum 103 Lr (262)	104 Rutherfordium 104 Rf (267)	105 Dubnium 105 Db (268)	106 Seaborgium 106 Sg (271)	107 Bohrium 107 Bh (272)	108 Hassium 108 Hs (270)	109 Meitnerium 109 Mt (276)	110 Darmstadtium 110 Ds (281)	111 Roentgenium 111 Rg (280)	112 Copernicium 112 Cn (285)	113 Ununtrium 113 Uut (284)	114 Ununquadium 114 Uuq (289)	115 Ununpentium 115 Uup (288)	116 Ununhexium 116 Uuh (293)	117 Ununseptium 117 Uus (294?)	118 Ununoctium 118 Uuo (294)

Der Schatten einer Probe ist umso dunkler, je schwerer die Atome des durchstrahlten Materials sind.

Anordnung Detektor – Probe – Strahlquelle



Temperatur: -20 °C bis +160 °C



In-situ-Messungen mit einer Heiz- und Kühl-Probenbühne

In-situ-Experimente unter Zug und Druck:

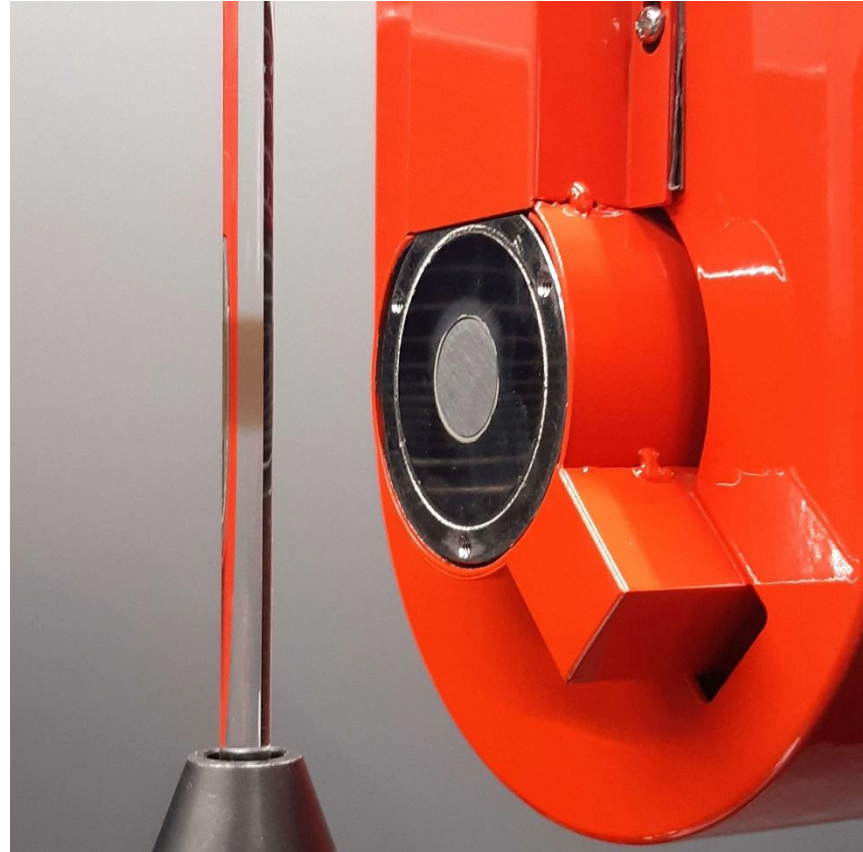
- Lastbereich bis 5kN
- Maximale Bewegung 10mm
- Auflösung von 300nm
- Geschwindigkeitsbereich von 0,1 mm/min ... 1,0 mm/min



Ist CT zerstörungsfrei ?

Empfindliche Proben können durch Röntgenstrahlung geschädigt werden:

- Glas, Keramik (Photodarkening)
- Speicherbausteine
- lebende Proben



Was für Proben können gemessen werden ?

Probenmaße:

Probenhöhe maximal 700 mm

Probendurchmesser maximal 360 mm

Messbares Volumen:

Durchmesser 320 mm

Höhe 300 mm

Probenmasse:

maximal 20 kg



Computertomographie ist eine Volumen-Methode

Kontrolle und Vermessung komplexer Bauteile, Maßhaltigkeit von Bauteilen, auch verborgene Strukturen im Probeninneren (Hinterschneidungen)

Porenverteilung in porösen Materialien

Kontrolle von Mehrschichtsystemen

Material-Fehler: Blasen, Mikrorisse, Reliktstrukturen, Textur, Kristallite, Einschlüsse

Verhalten beim Bruch unter Zug- oder Druckbelastung

Thermomechanisches Verhalten beim Aufheizen oder Abkühlen

Schwächen der Computertomographie



Probenmaterial mit hoher Röntgen-Absorption: massives Metall, z.B. Sputtertarget

Multimaterial-Proben aus sehr verschiedenen Materialien: Leiterplatte

ungünstiges Aspektverhältnis: Leiterplatte

Analyse sehr feiner Strukturen in einer großen Probe: Schaltkreis auf einer Leiterplatte

flächige und sperrige Proben > keine Rotation möglich: Glasscheibe

Proben nicht formstabil: Flüssigkeiten, feuchte Proben, trocknende Bio-Proben

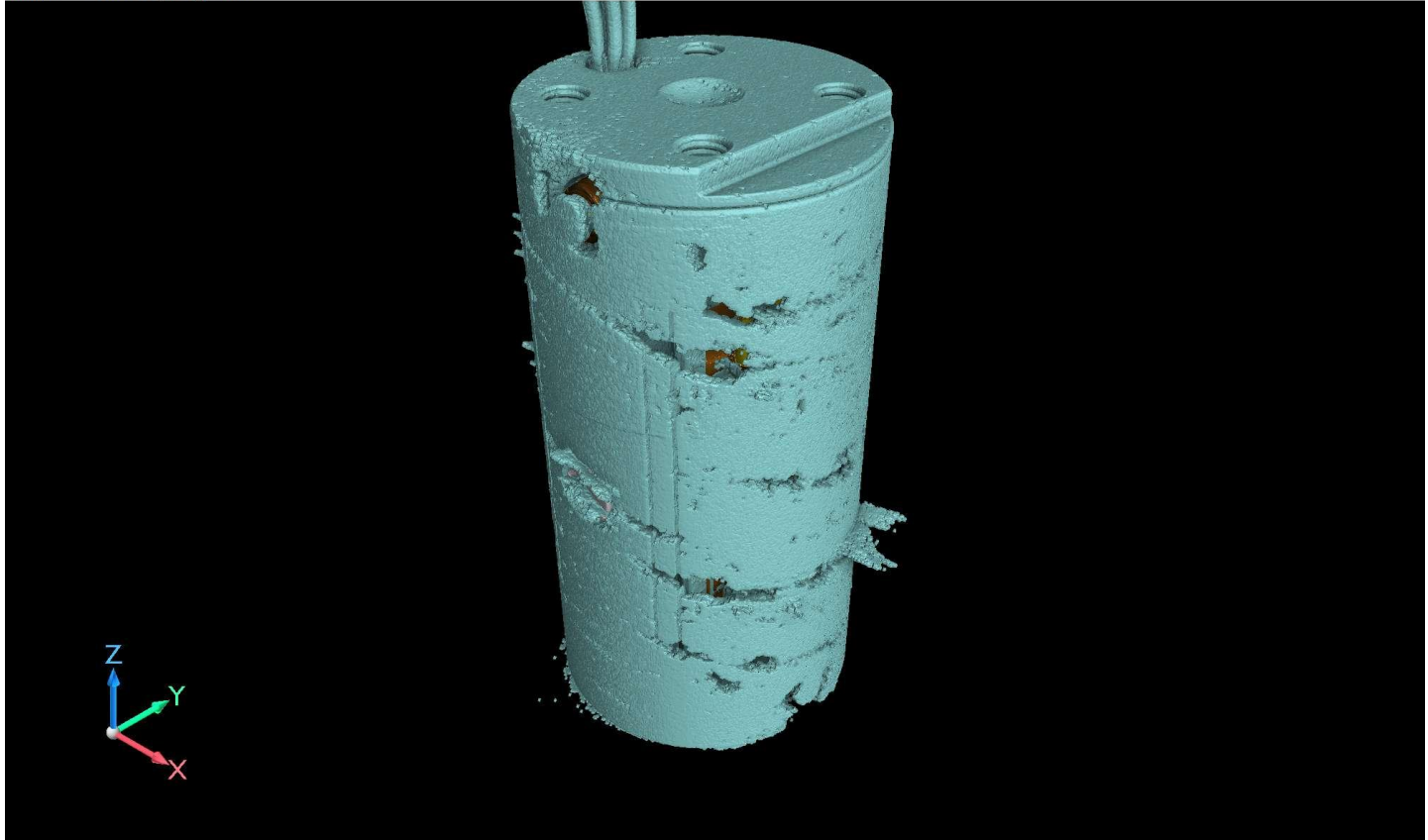
Proben schmelzen oder werden im Probenraum weich: Eis, Schokolade

Multimaterial: Von „weich“ zu „hart“

Start:

Fluxgate
Sensor im
Polymer-
Gehäuse

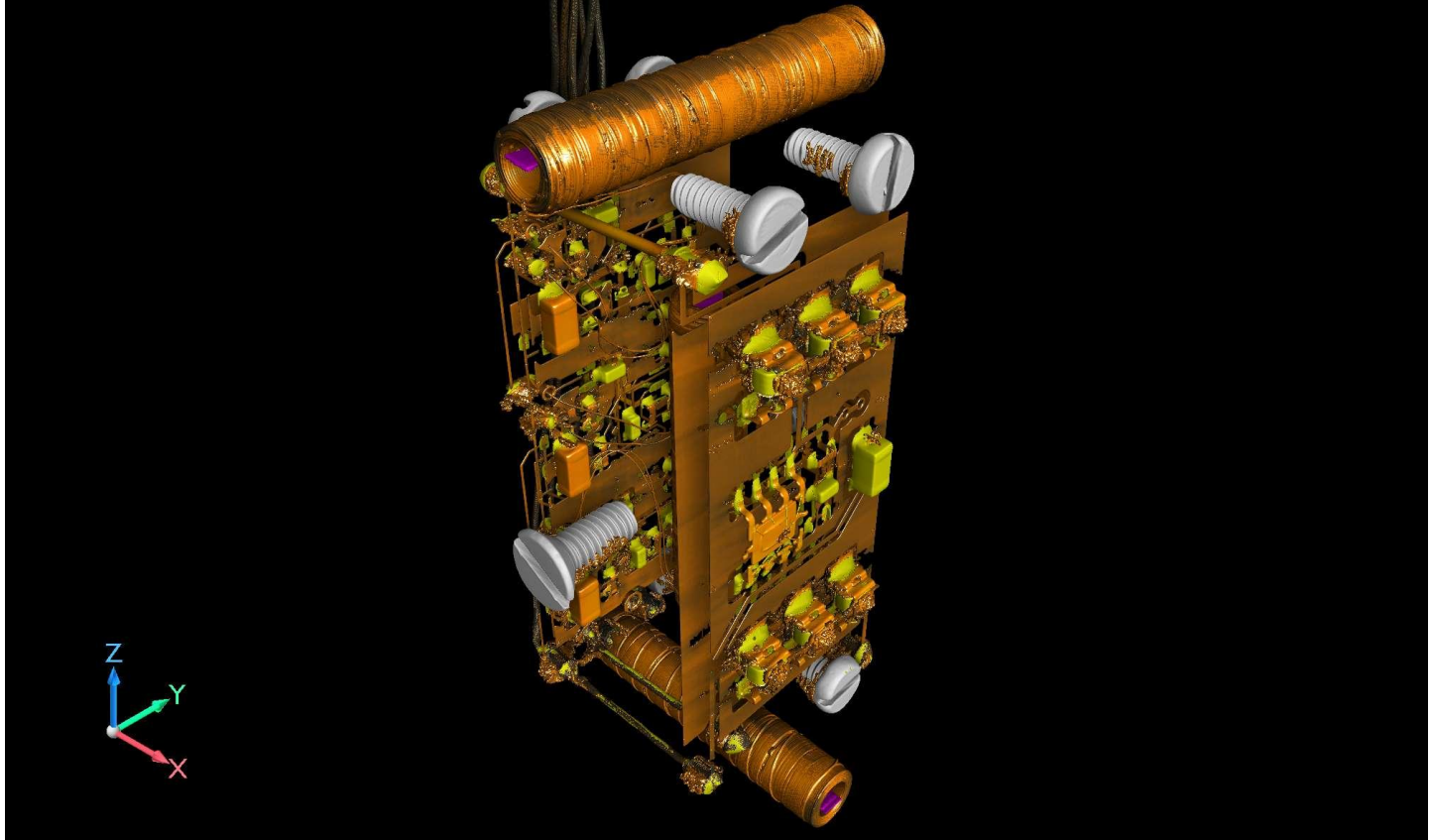
Fluxgate-Sensor: Polymergehäuse



Multimaterial: Von „weich“ zu „hart“

- Gehäuse

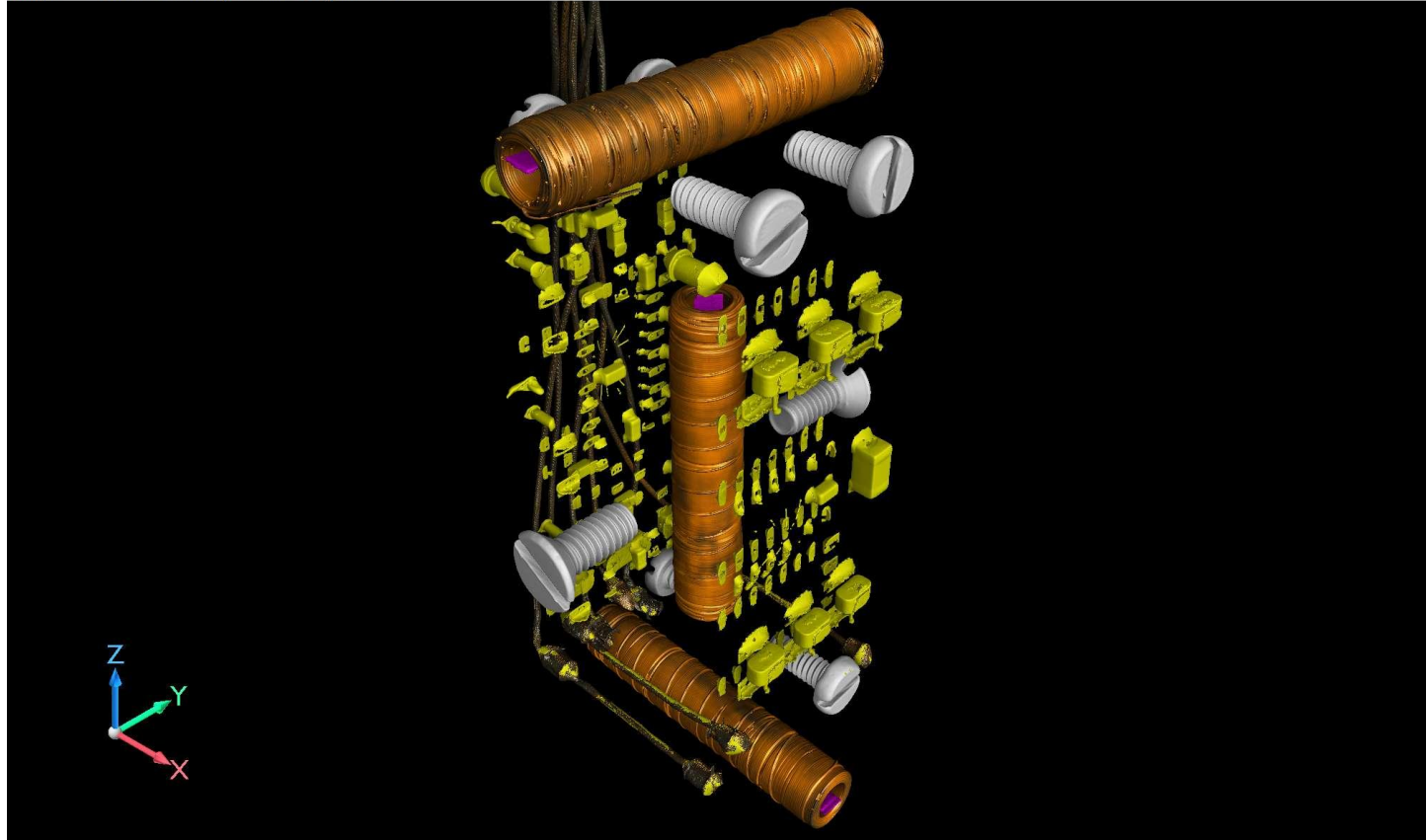
Fluxgate-Sensor: ohne Gehäuse



Multimaterial: Von „weich“ zu „hart“

- weiche
Komponenten

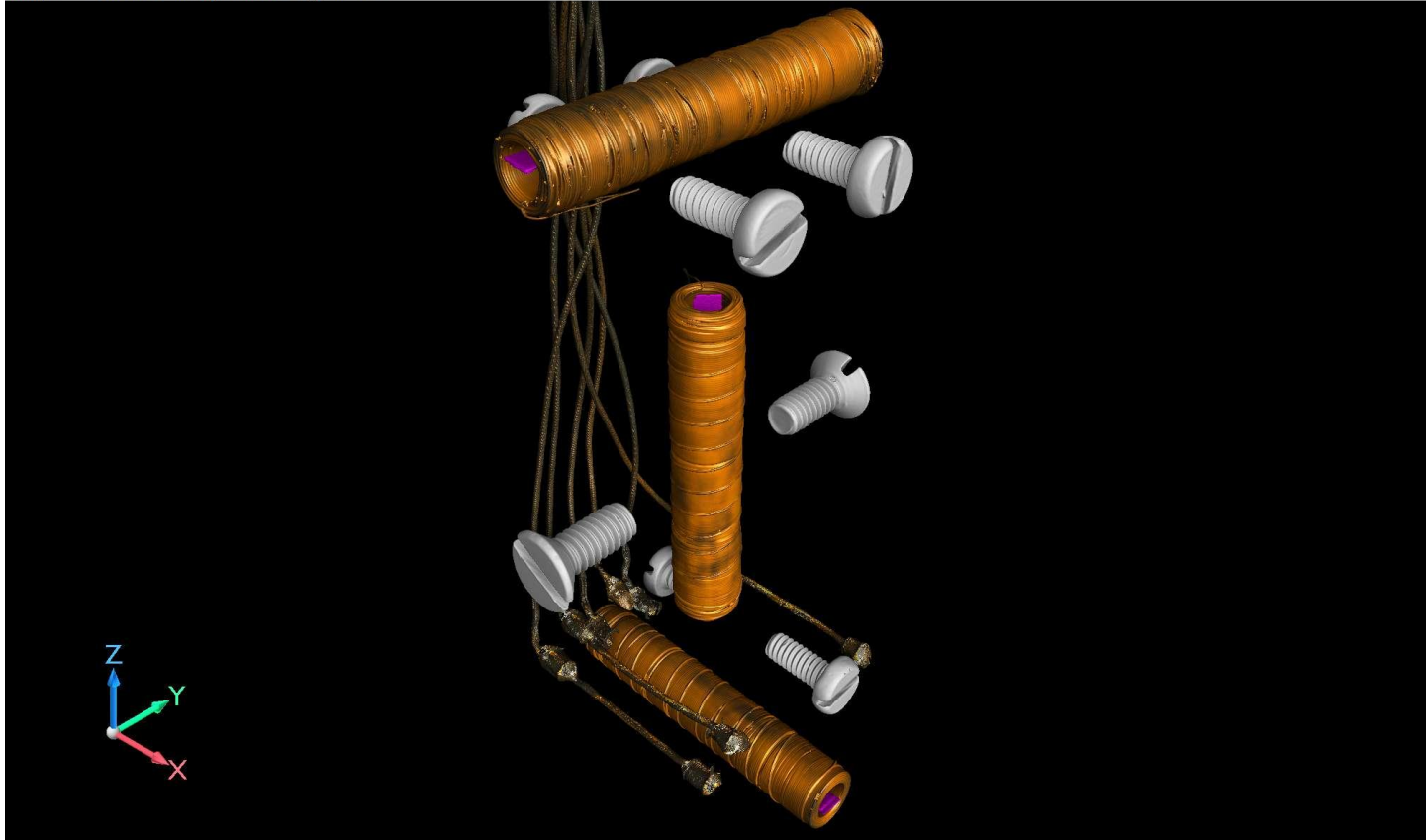
Fluxgate-Sensor: weiche Komponenten ausgeblendet



Multimaterial: Von „weich“ zu „hart“

- harte
Komponenten

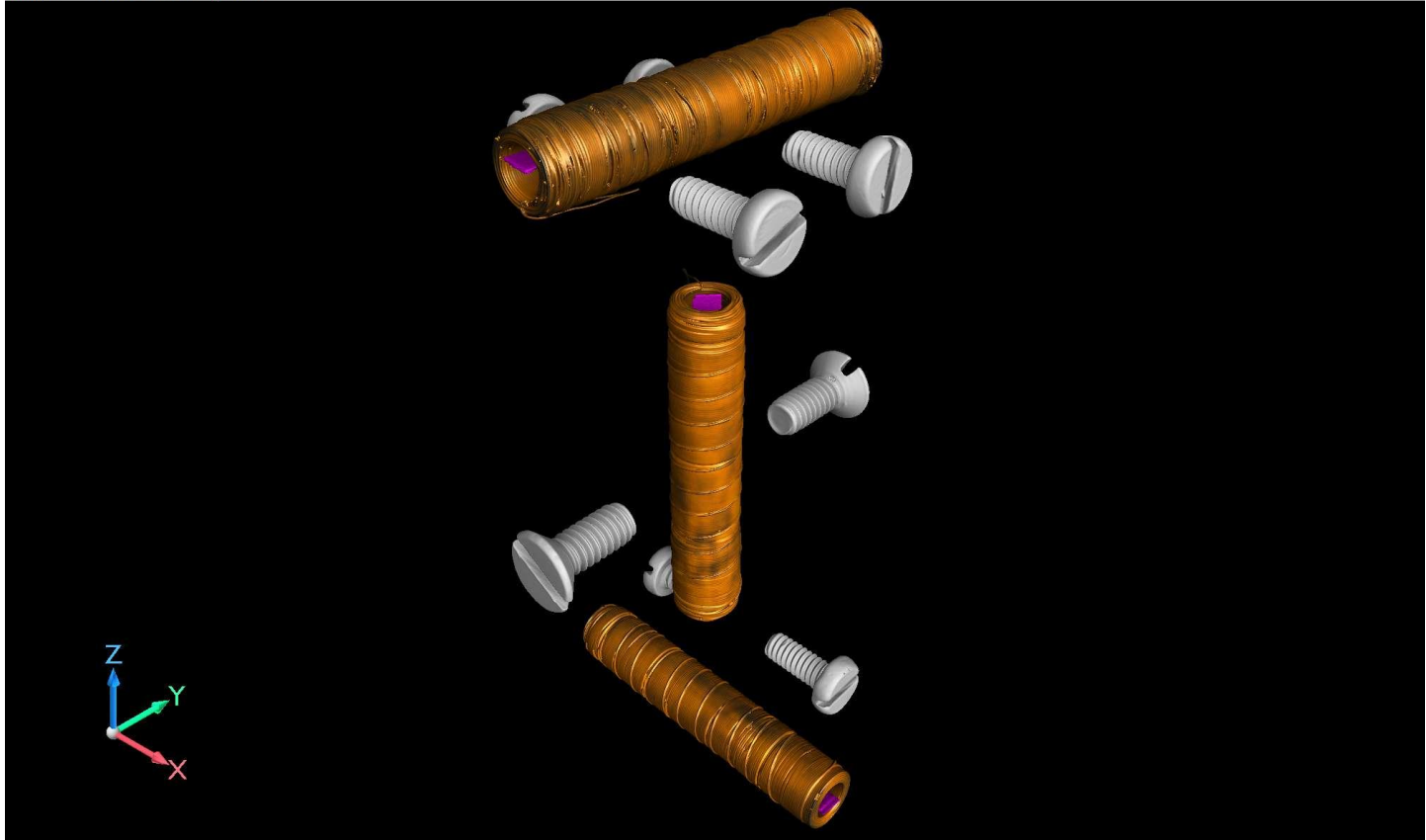
Fluxgate-Sensor: harte Komponenten ausgeblendet



Multimaterial: Von „weich“ zu „hart“

- Drähte

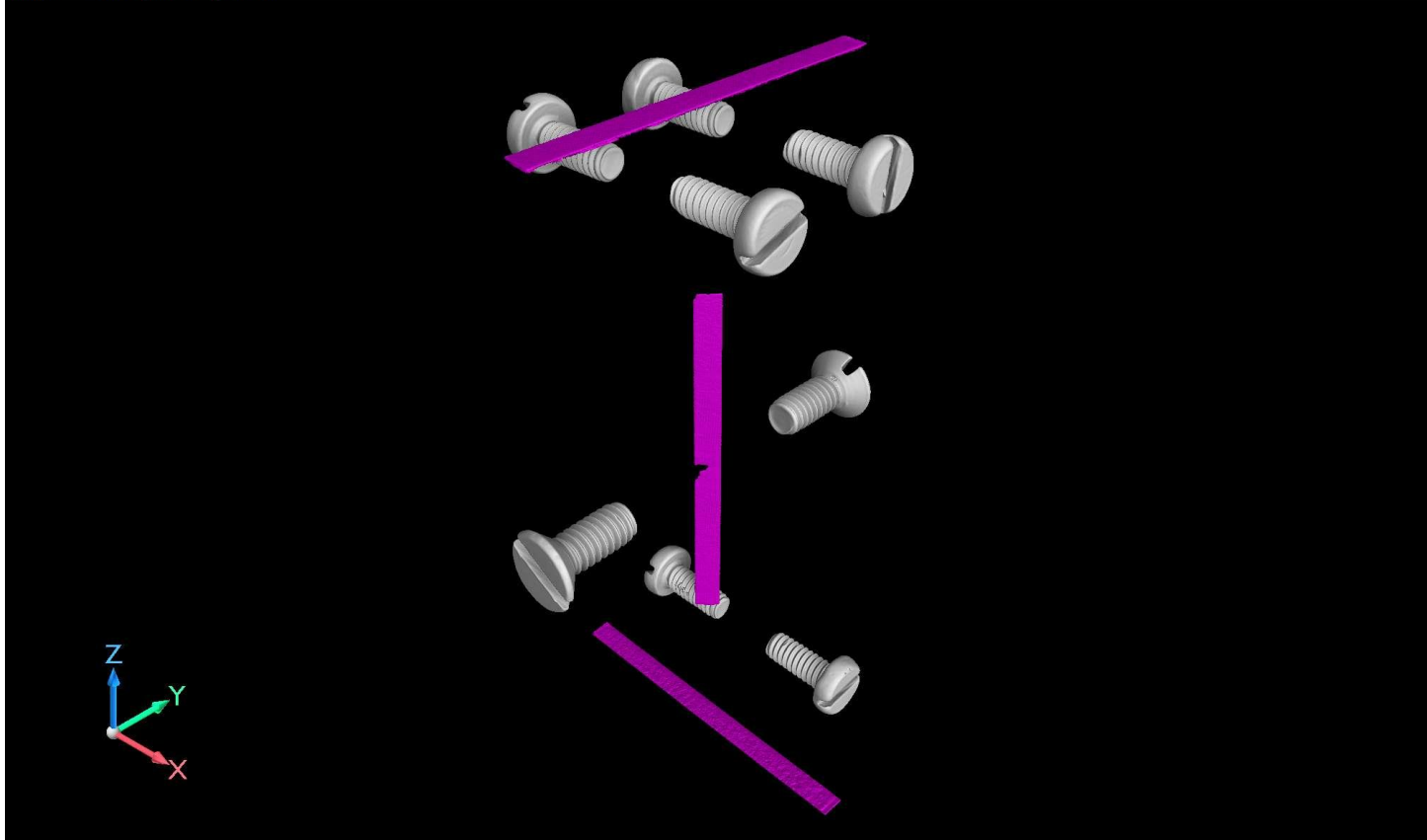
Fluxgate-Sensor: Drähte ausgeblendet



Multimaterial: Von „weich“ zu „hart“

- Spulen

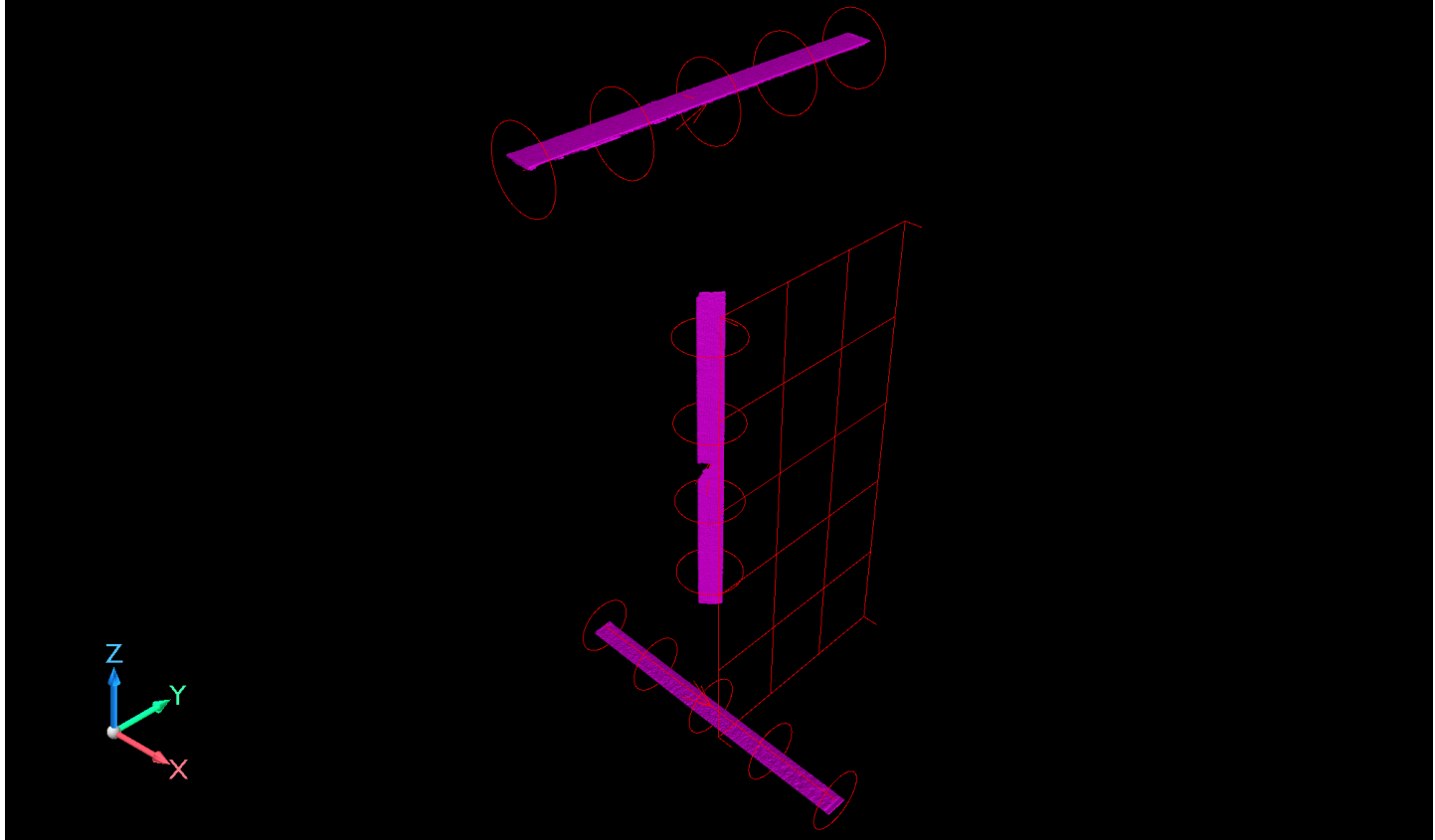
Fluxgate-Sensor: Spulen ausgeblendet



Multimaterial: Von „weich“ zu „hart“

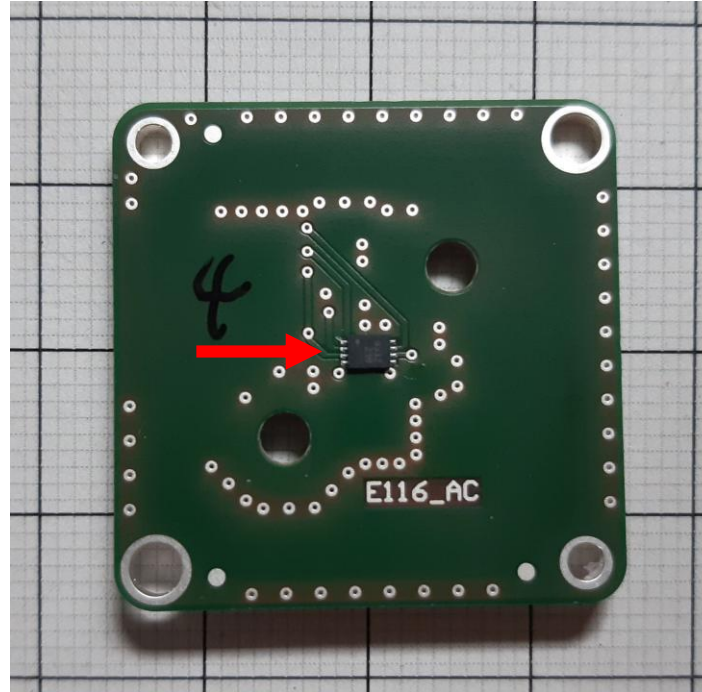
- Schrauben

Fluxgate-Sensor: Spulenkern mit den Zylindern der Spulen und der vorderen Platinenebene



Beispiel: Positionsbestimmung eines Sensorchips

Aufgabe: Vermessung der Position eines Sensorchips auf einer Platine

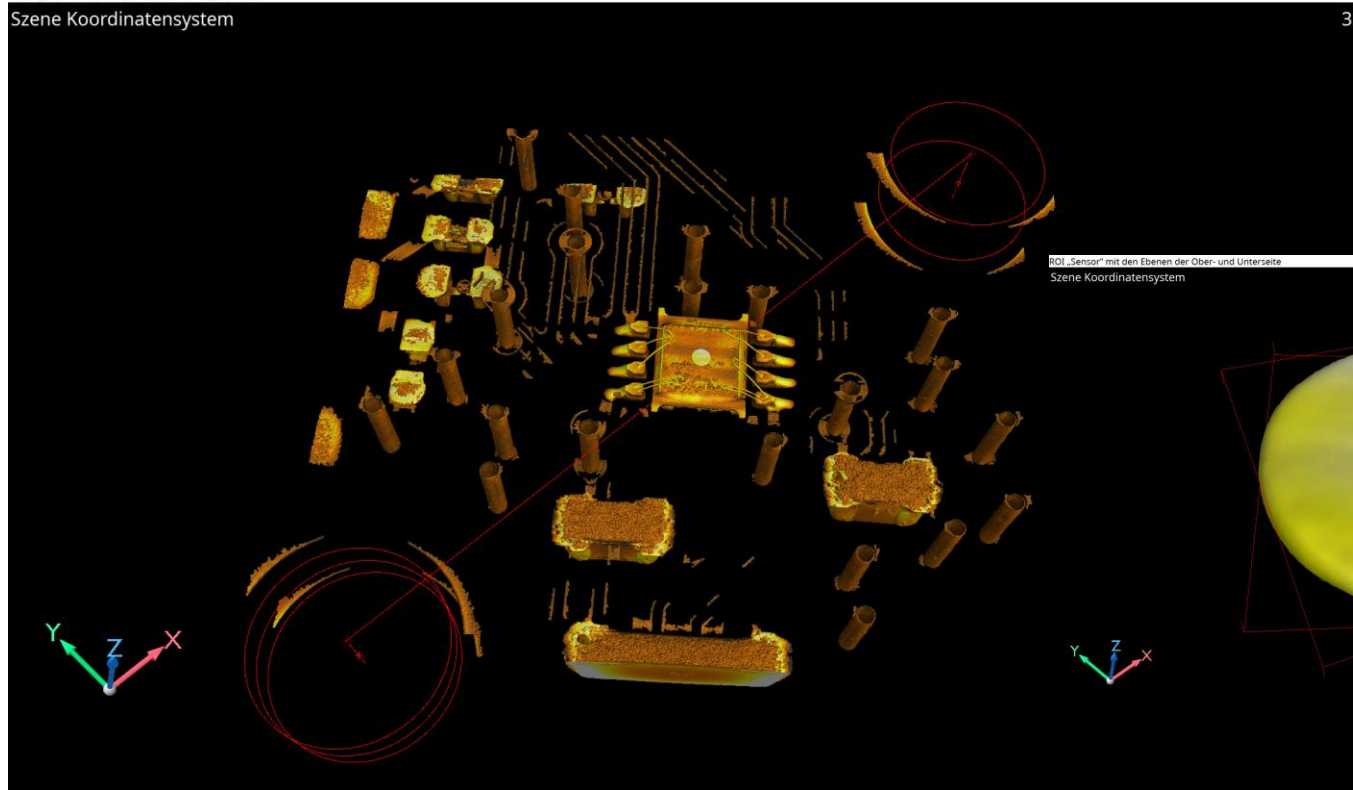


Herausforderung: Feine Struktur in einer großen planaren Probe

Positionsbestimmung relativ zu zwei Bohrungen

ROI „Leiterbahnen“ und ROI „Sensor“
Szene Koordinatensystem

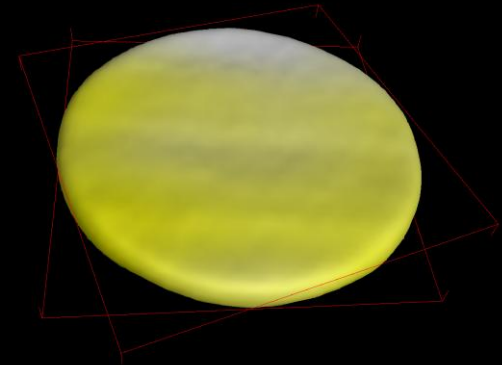
3D

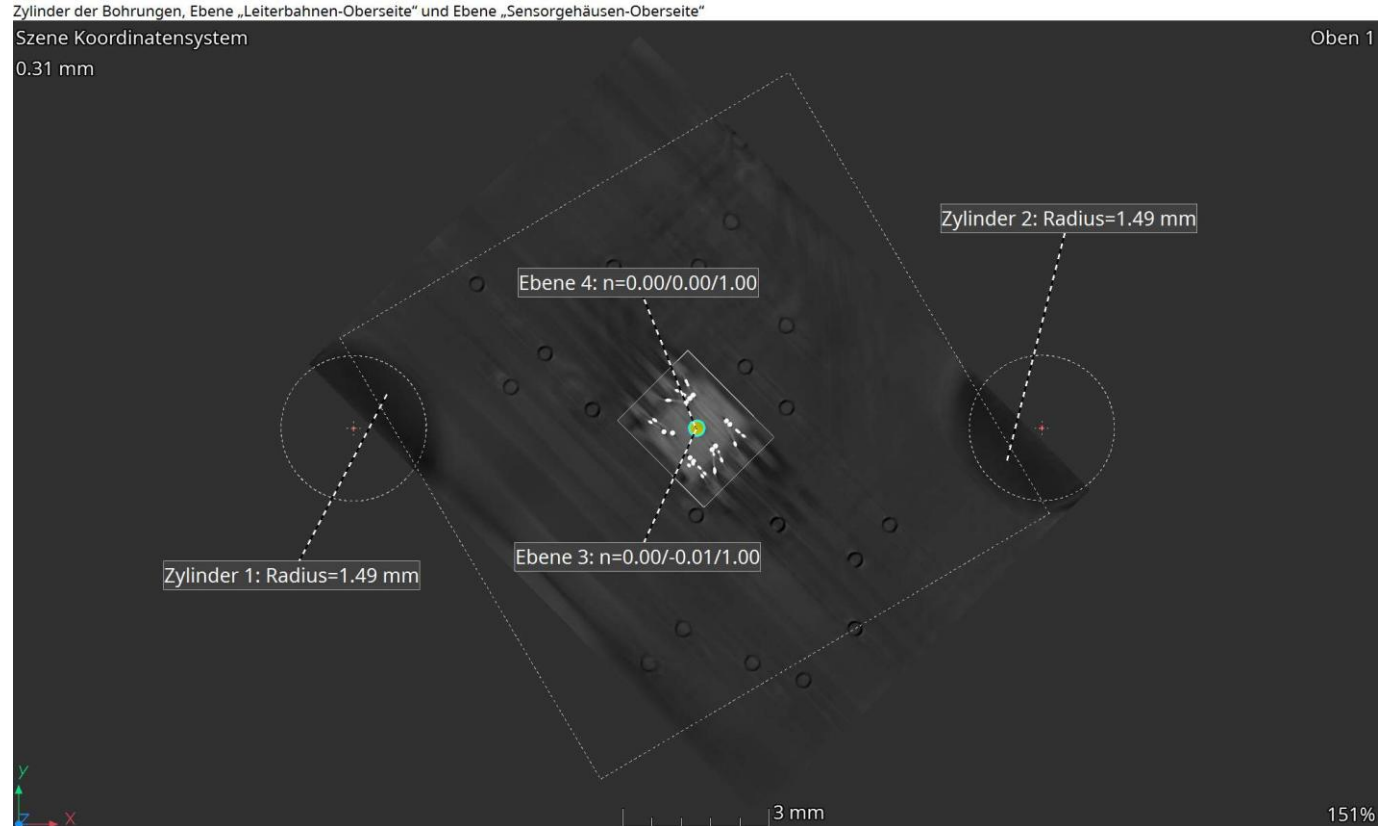


ROI „Sensor“ mit den Ebenen der Ober- und Unterseite
Szene Koordinatensystem

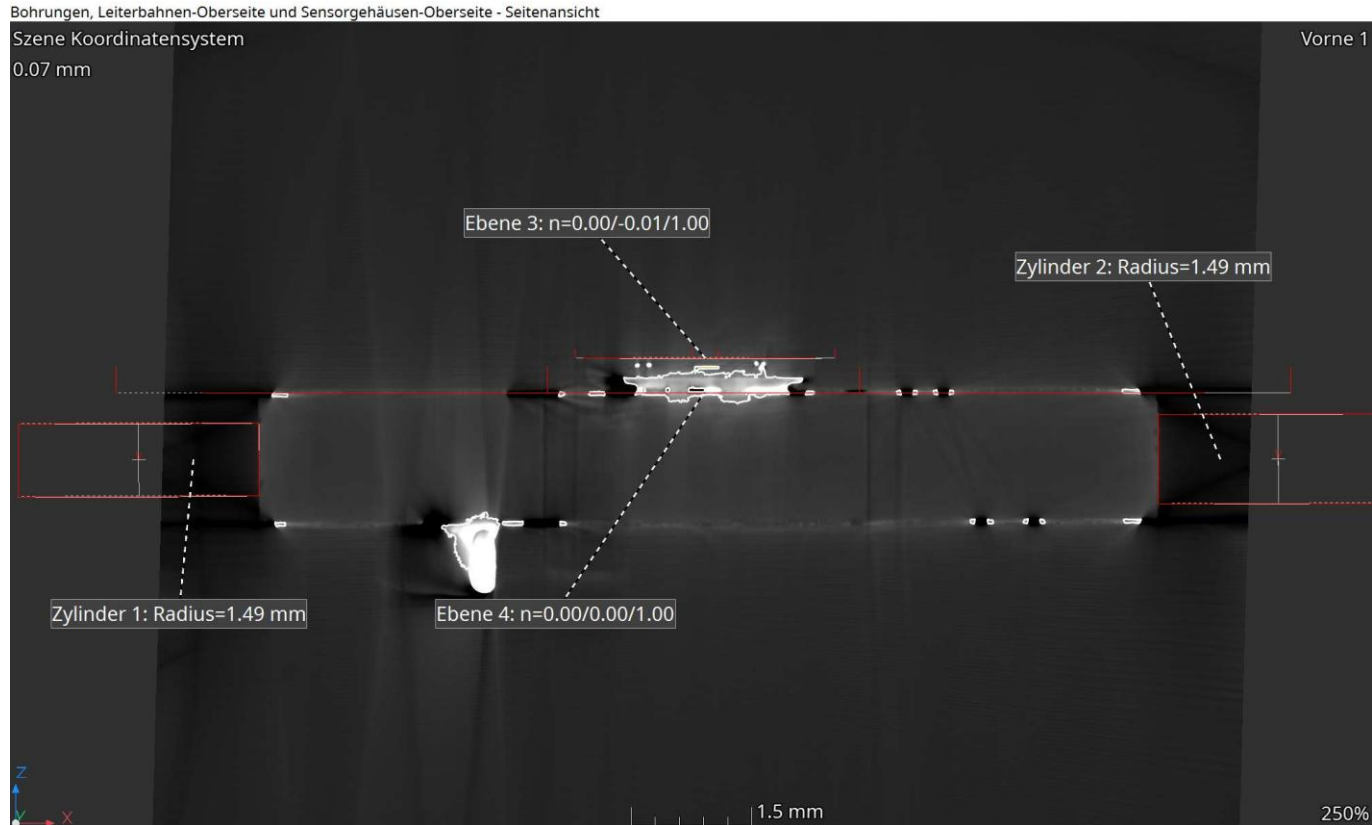
Sensorelement

3D

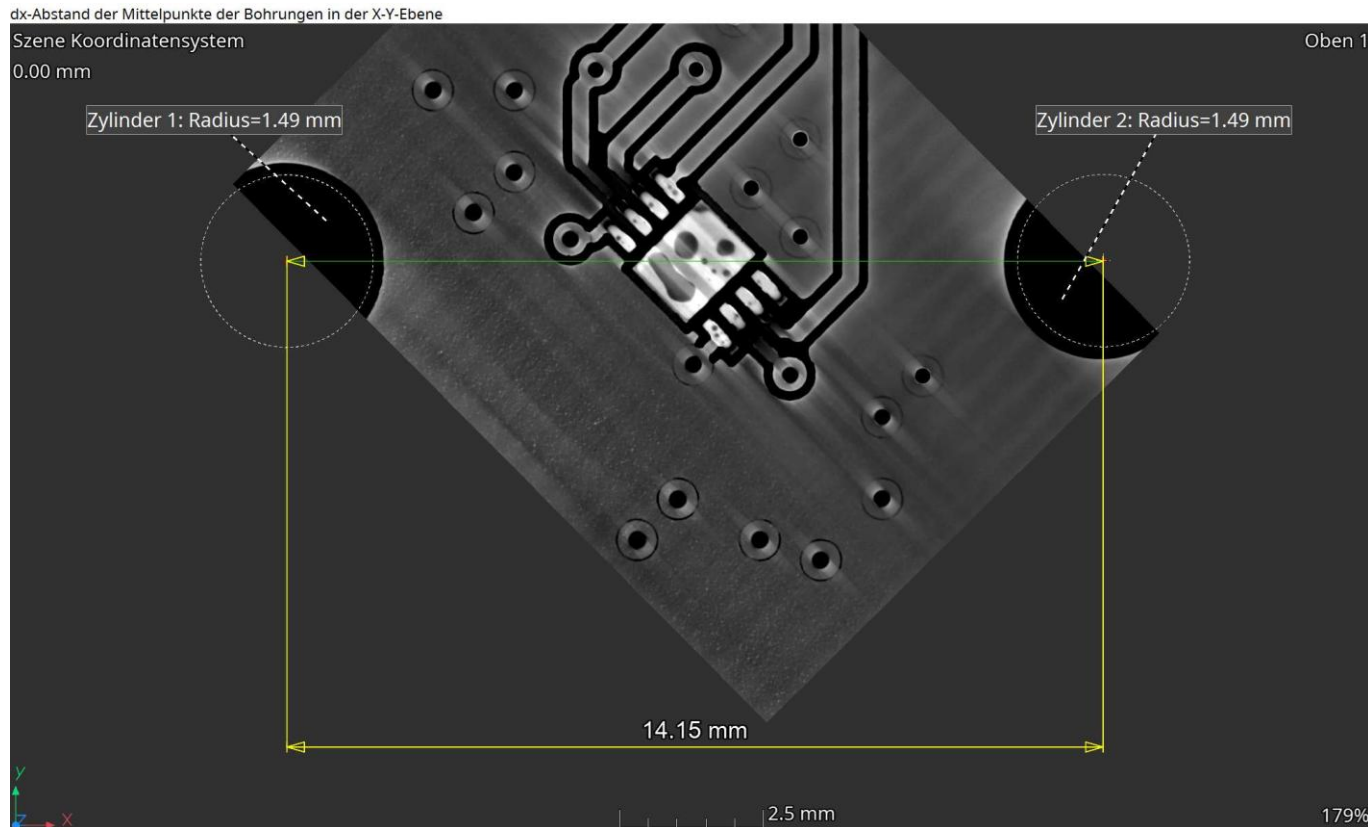




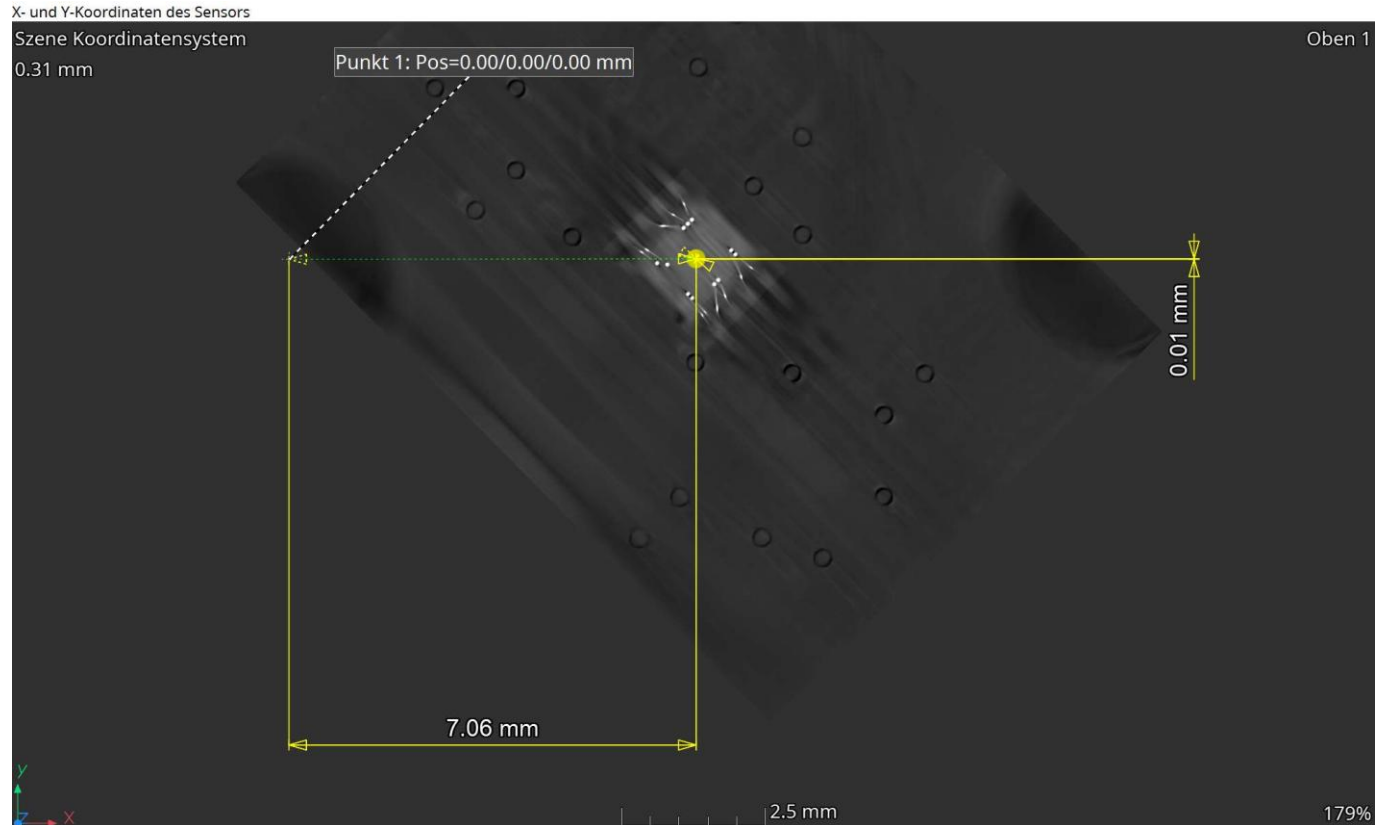
Bohrungen, Leiterbahnen-Oberseite und Sensorgehäuse-Oberseite - Seitenansicht



dx-Abstand der Mittelpunkte der Bohrungen in der X-Y-Ebene



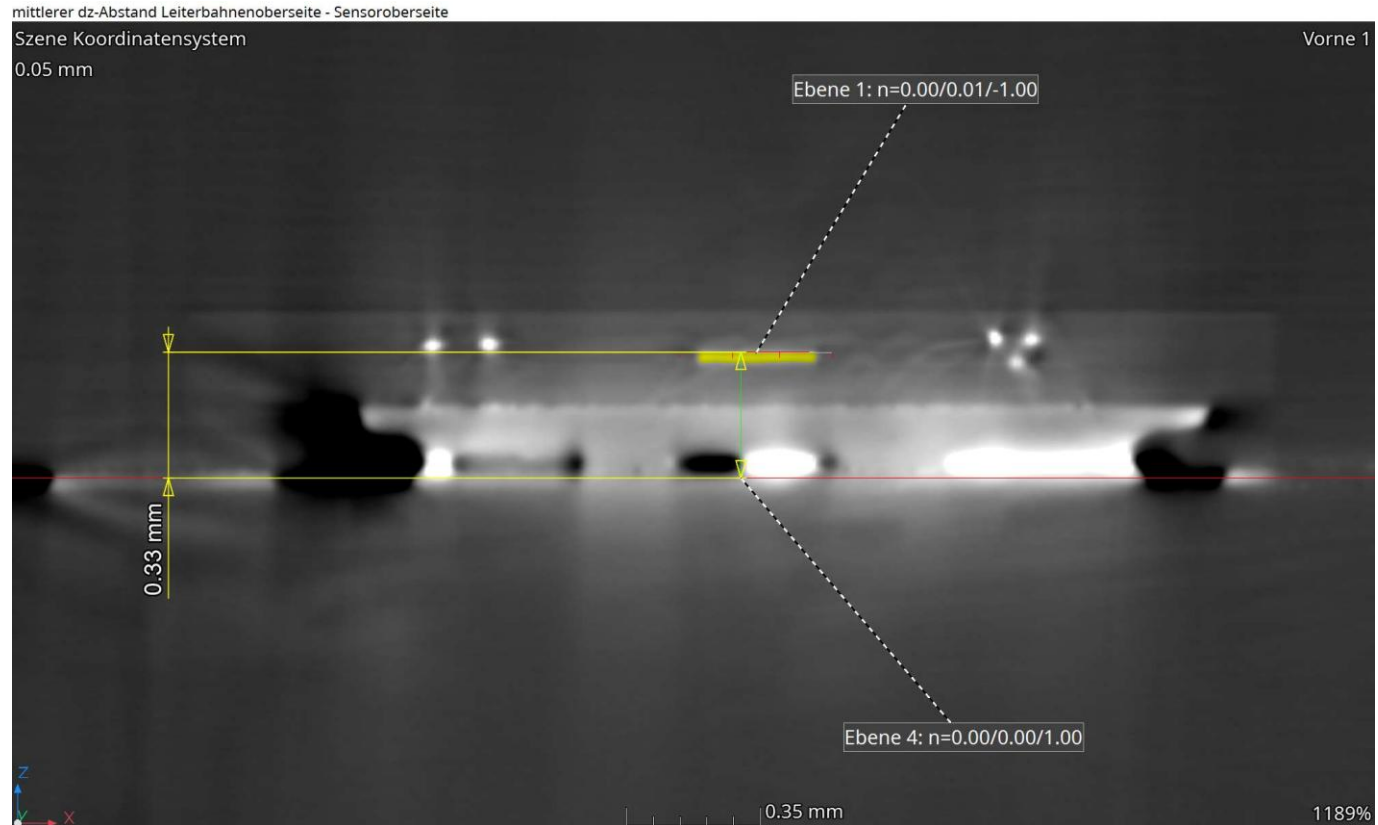
X- und Y-Koordinaten des Sensors



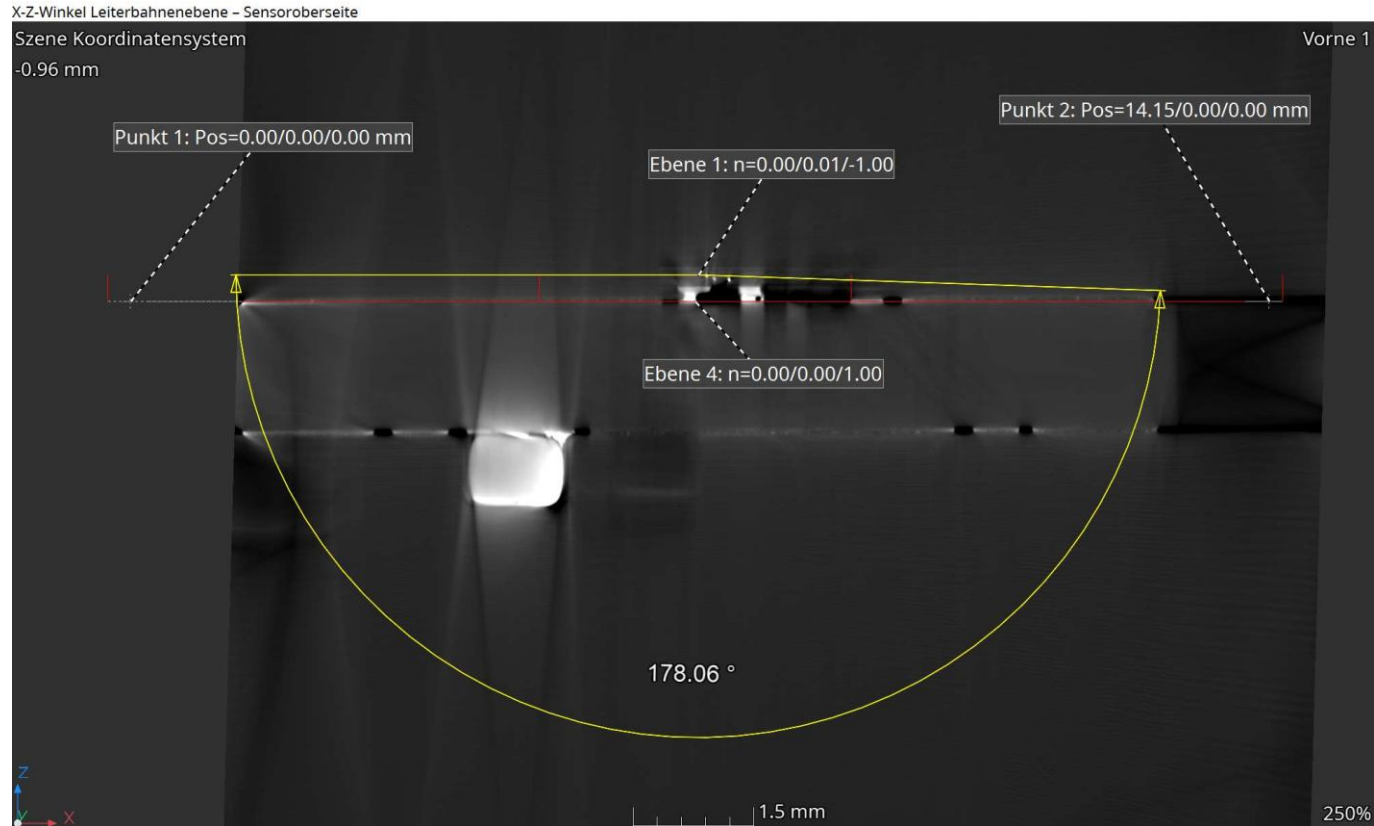
mittlerer dz-Abstand Leiterbahnenoberseite - Deckeloberkante



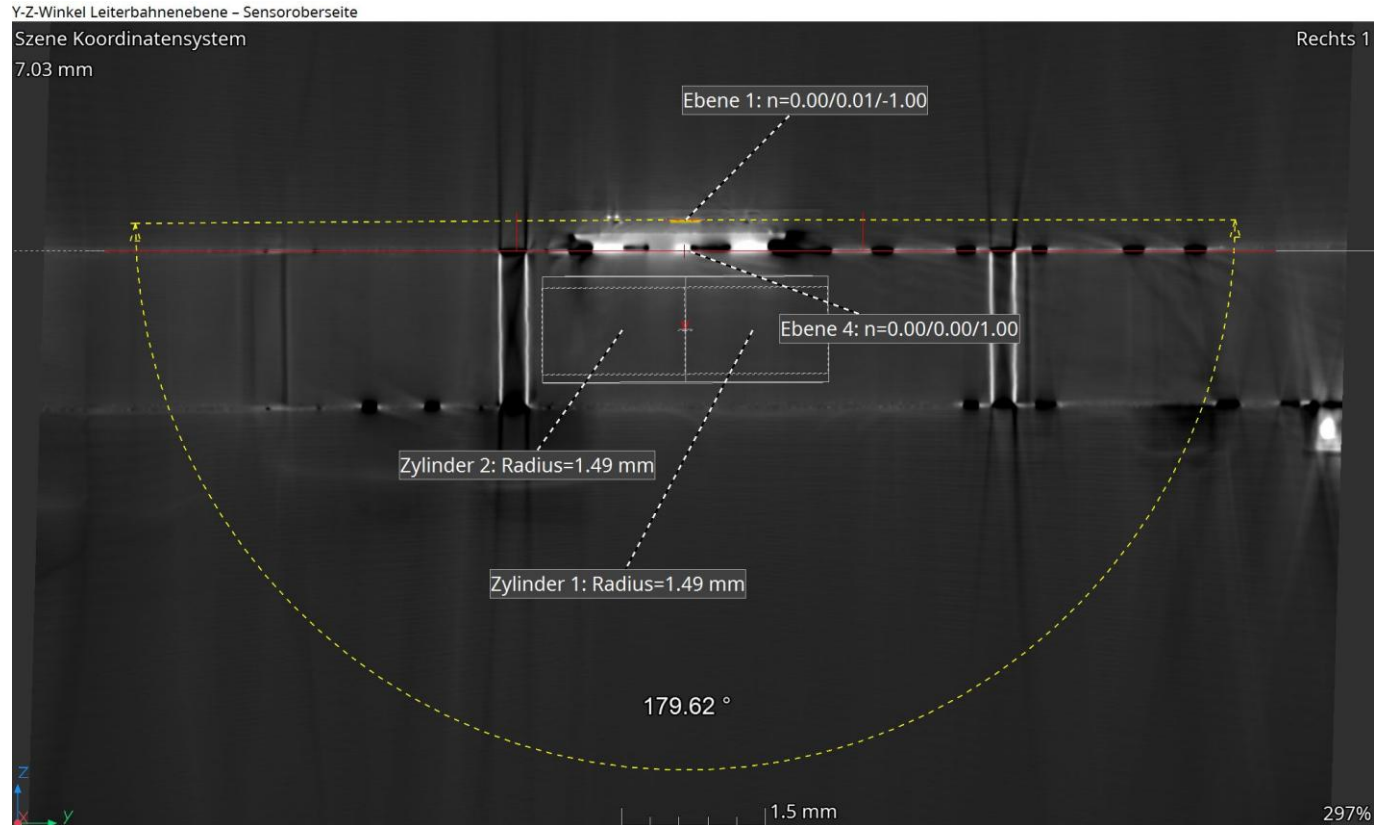
mittlerer dz-Abstand Leiterbahnenoberseite - Sensoroberseite



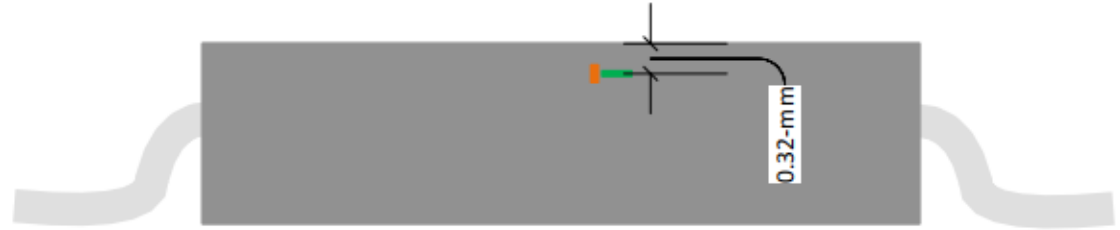
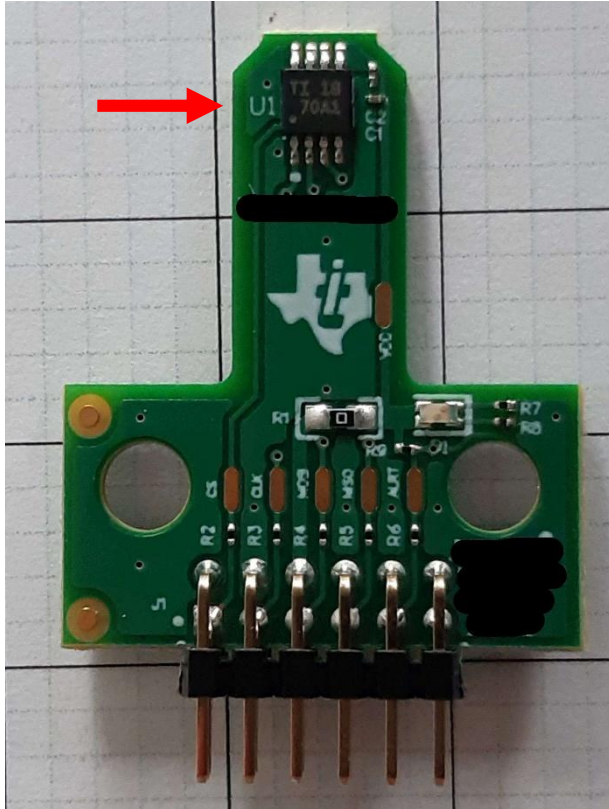
X-Z-Winkel Leiterbahnenebene – Sensoroberseite



Y-Z-Winkel Leiterbahnenebene – Sensoroberseite



Wie dünn kann ein Sensor geschliffen werden ?



Aufgabe:

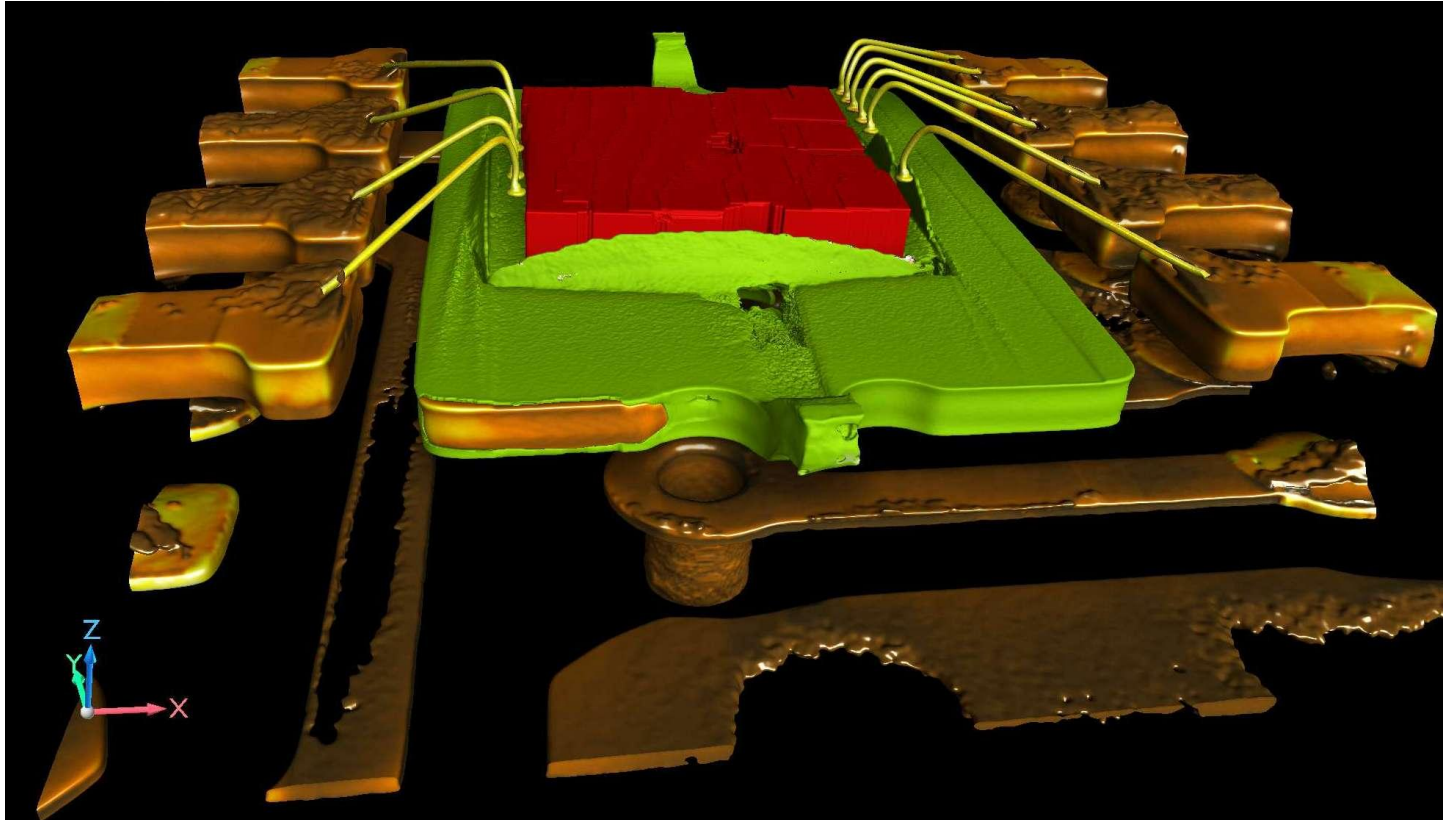
Wieviel Polymer kann vom Deckel für bessere Magnet-Messungen abgeschliffen werden ?
> Wo beginnt die Elektronik ?

Herausforderung:

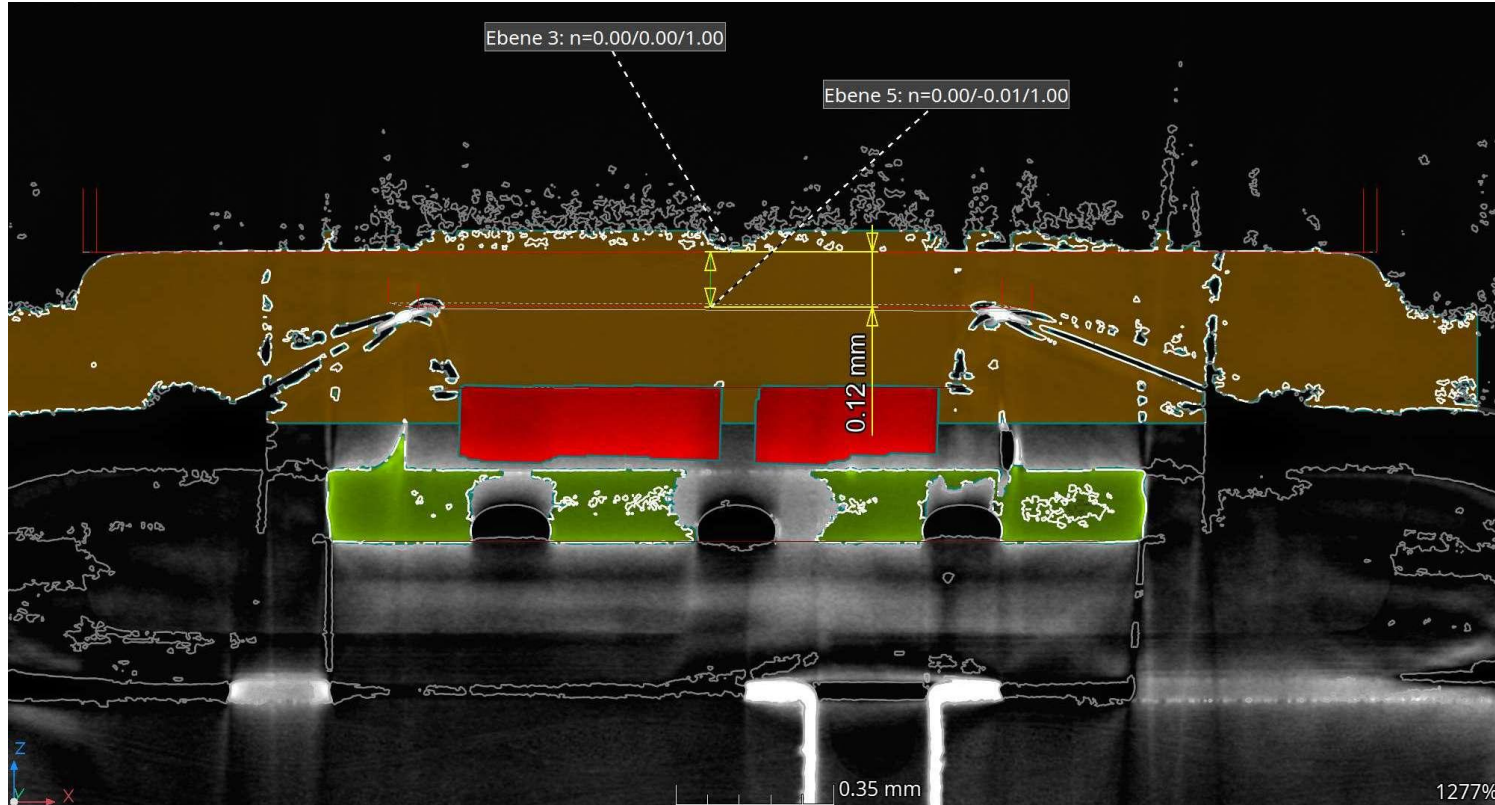
Genaue Vermessung einer feinen Struktur in einer großen Multimaterial-Probe

Mit freundlicher Genehmigung der Matesy GmbH <https://matesy.de/de/>

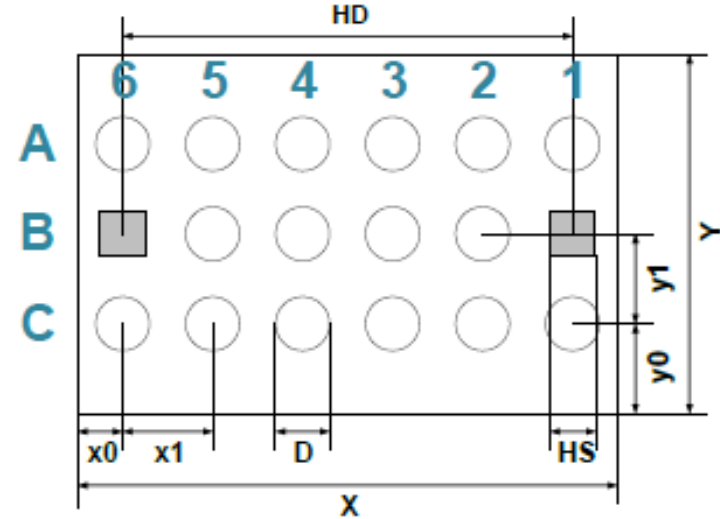
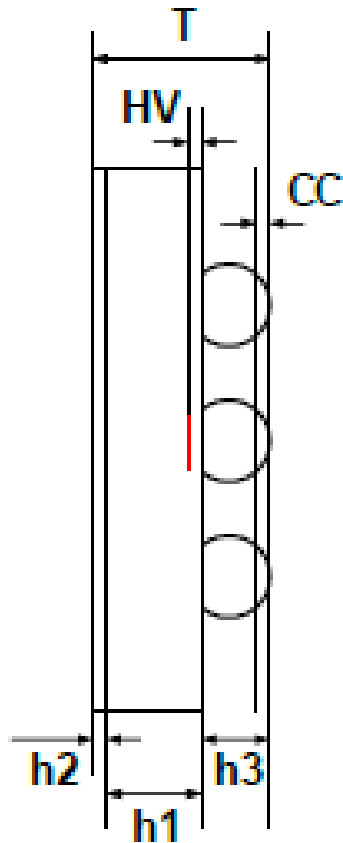
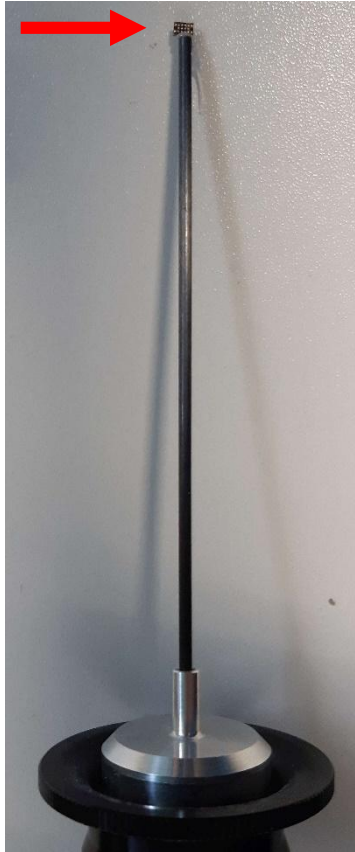
Trennung von Luft, Polymer, Silizium, Kupfer und Gold



Es können maximal 0,1 mm vom Deckel abgeschliffen werden!



Mikro-CT: Maße innerhalb eines Sensorchips



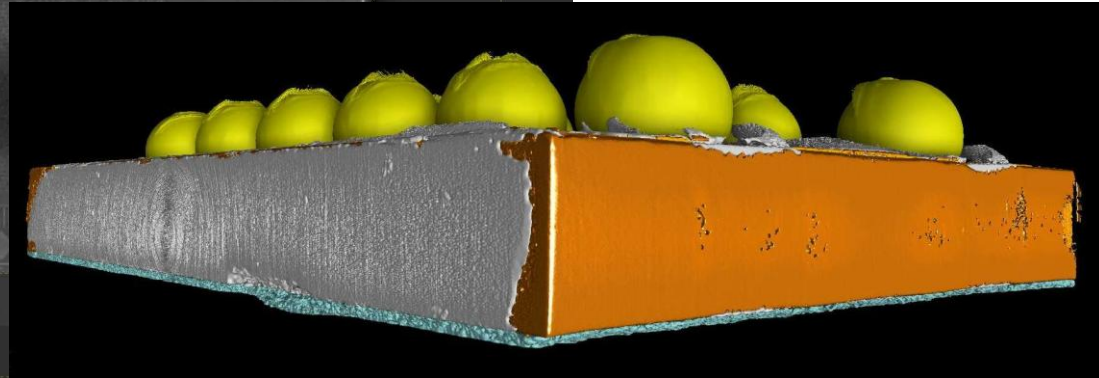
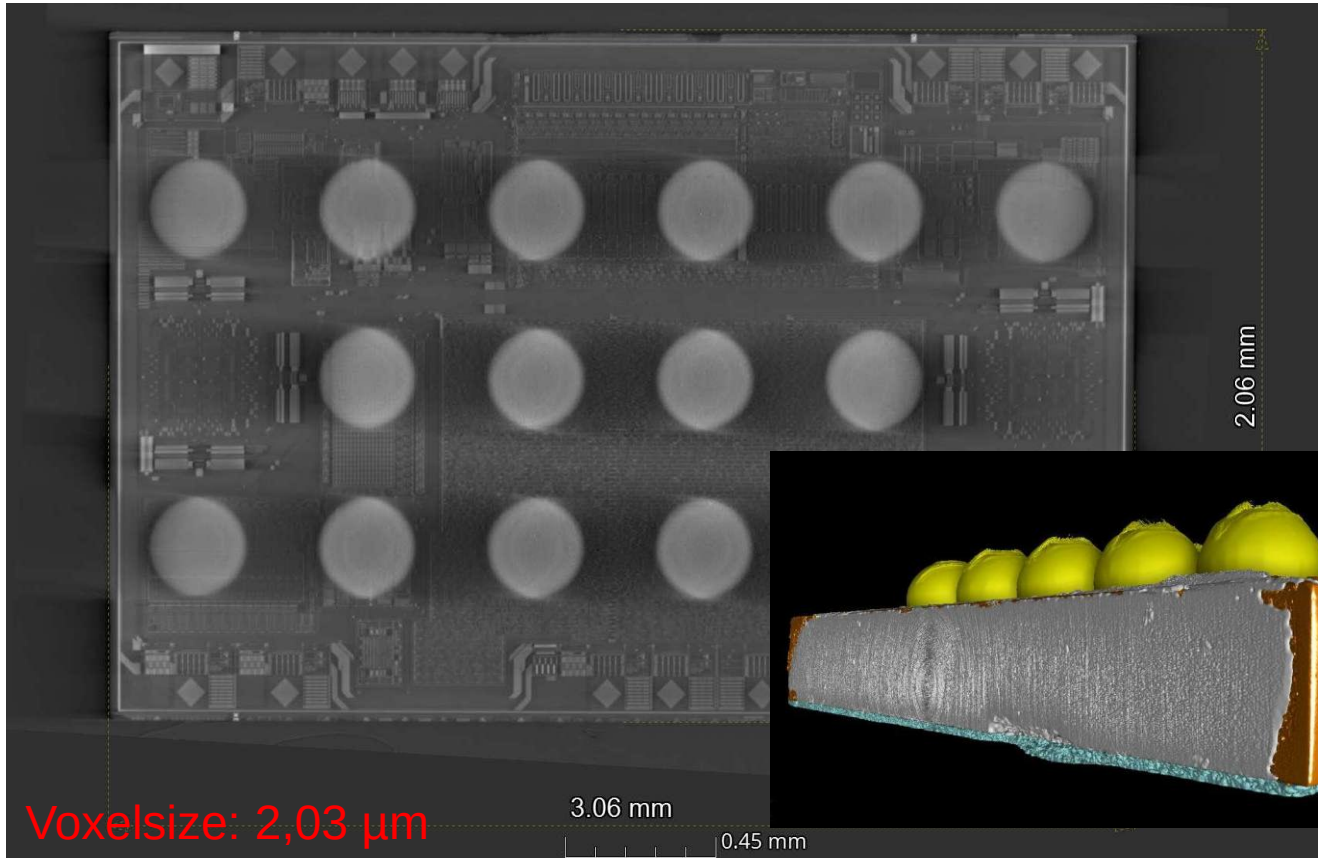
Aufgabe: Messstrecken $h1$, $h2$ und HV
Wo beginnt die Schaltung ?

Herausforderung:

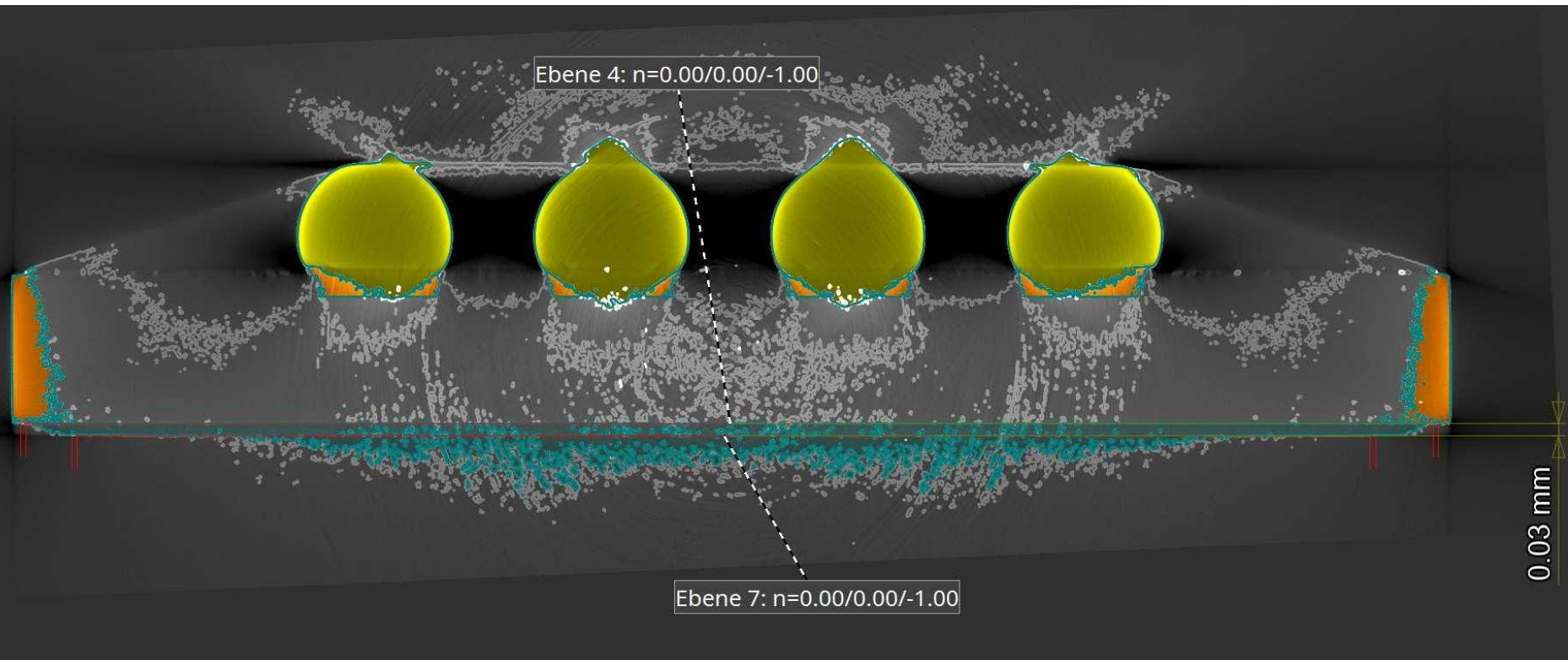
Trennung von „weichen“ Materialien:
Lack, Polymer, Silizium, Schaltung

Die Schaltung ist nur
im 2D-Grauwertbild
erkennbar.

Im 3D-Bild wurde
auch ein Metallkäfig
nachgewiesen.



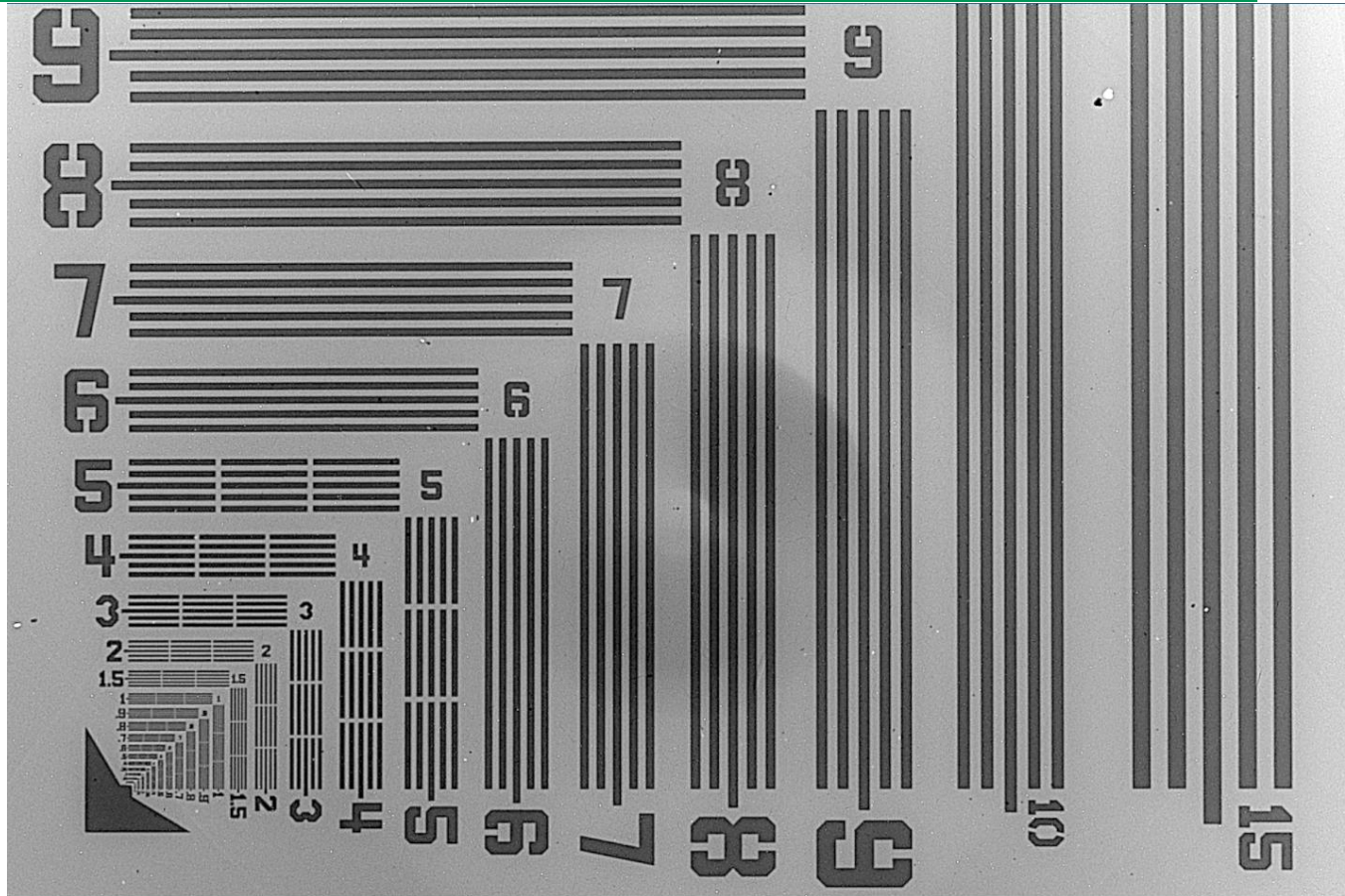
Dicken von Lackschichten, Silizium und Metallkäfig



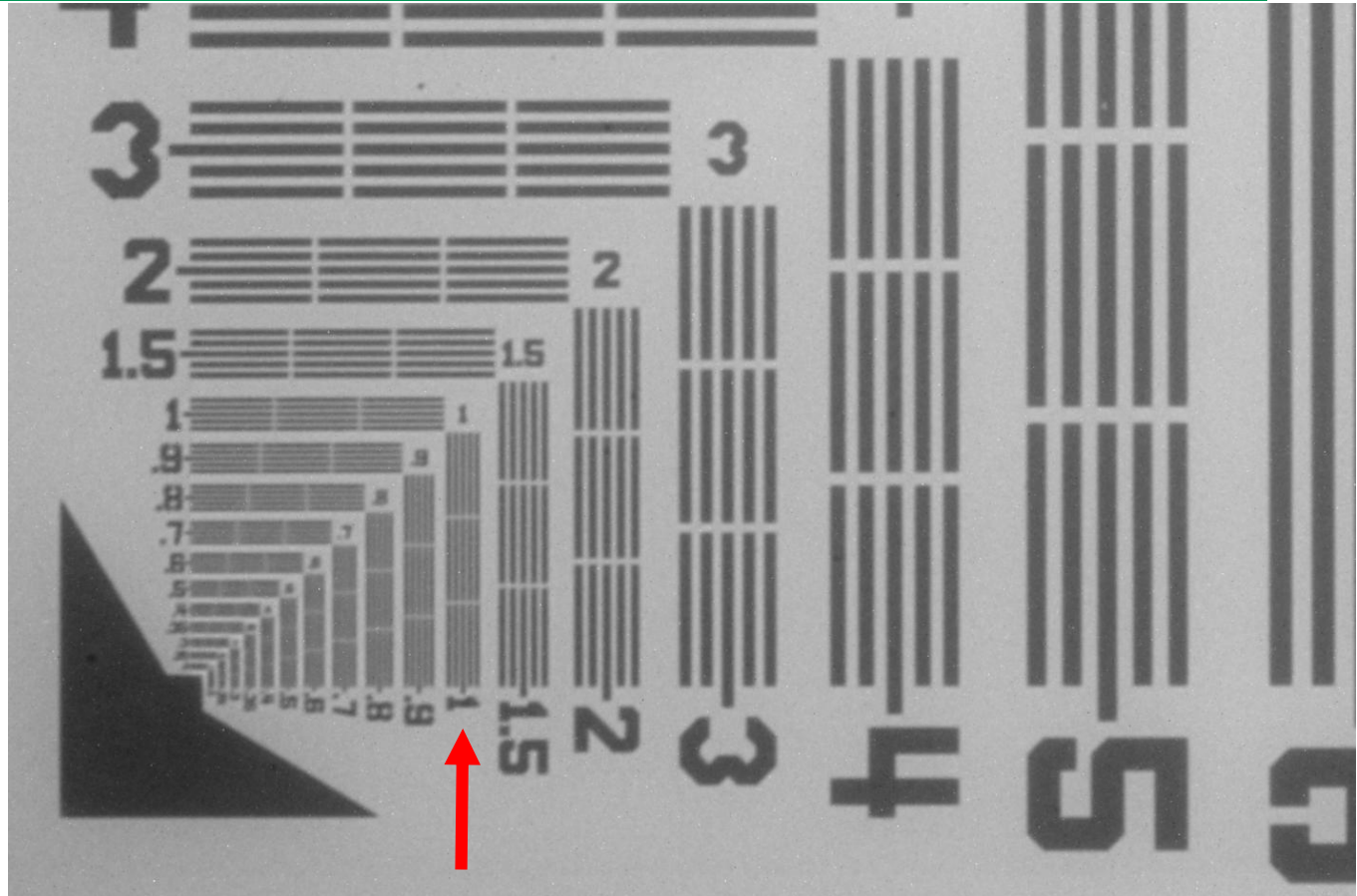
<https://www.jima.jp>



Ausschnitt 15 μm



Ausschnitt 6 μm

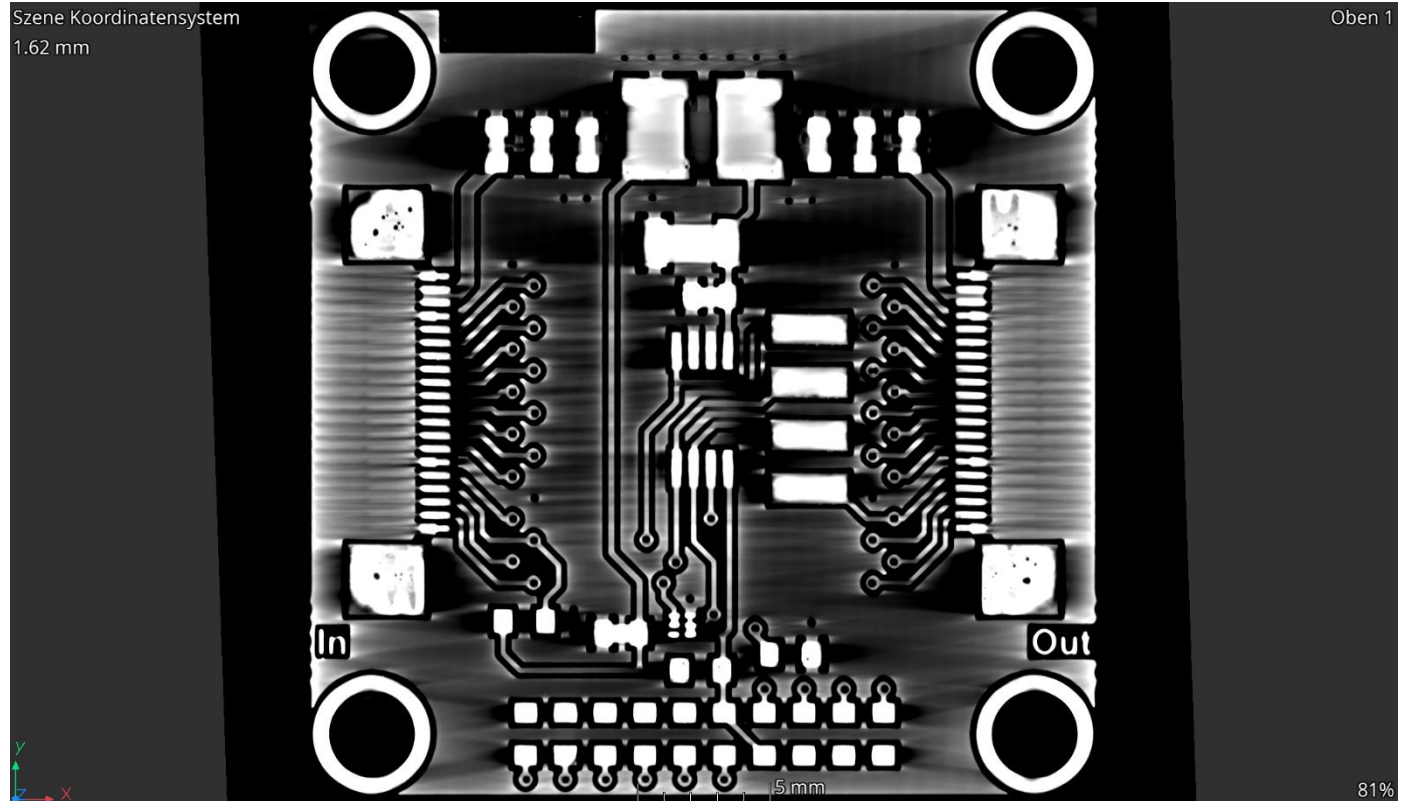


Eine einfache Fehlersuche auf einer kleinen Platine

Aufgabe:

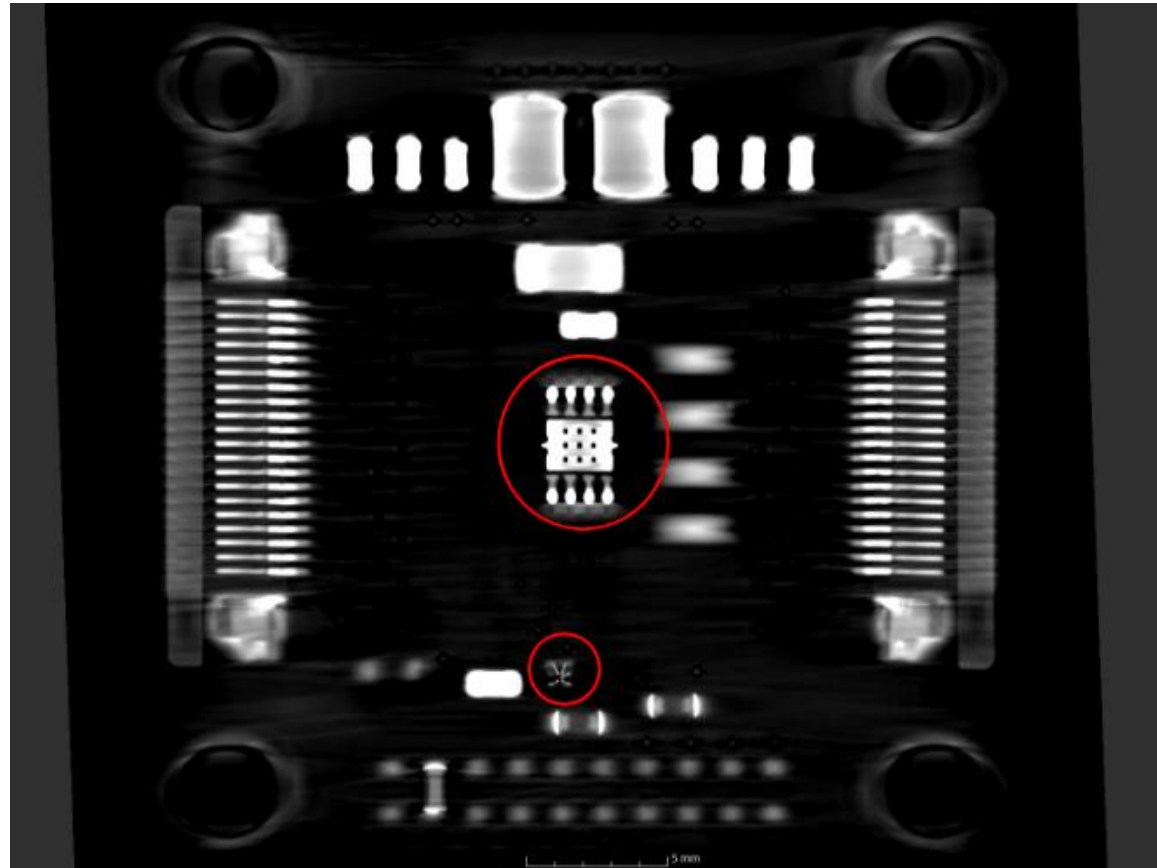
Der Widerstand zwischen den Leiterbahnen ist zu niedrig.

Gibt es ungeplante elektrische Verbindungen zwischen den Leiterbahnen ?

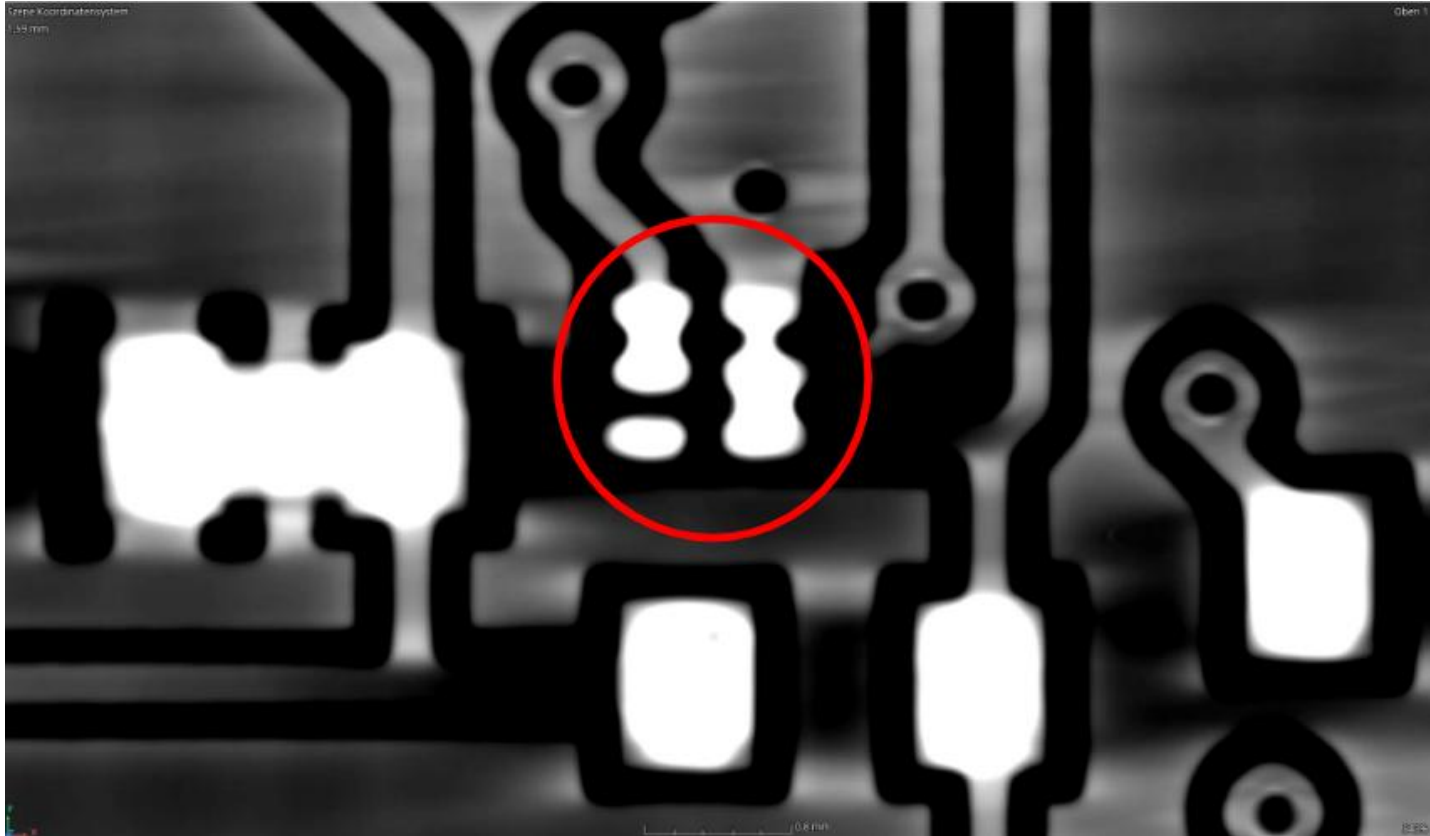


Ebene über der
Platinen-Oberseite
mit den
hochragenden
Bauelementen

Verdächtige
Schaltkreise
eingekreist

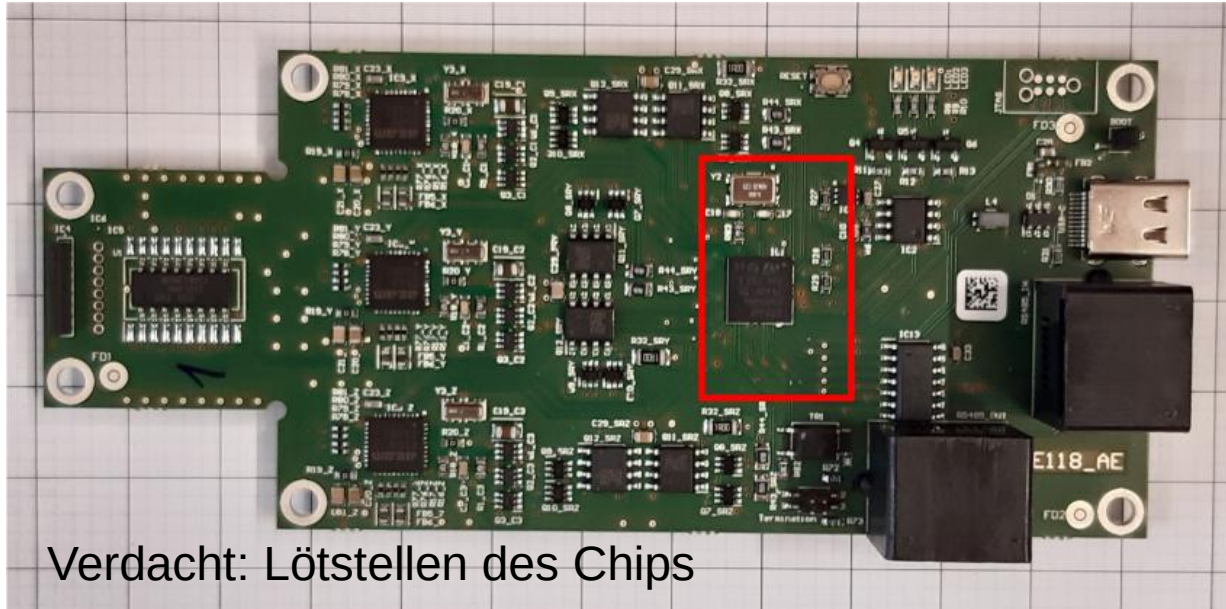


Defekte
Lötstelle
unter dem
Schaltkreis



Komplexe Fehlersuche auf einer Leiterplatte

Aufgabe: Eine komplette Fertigungsserie von Platinen funktioniert nicht.
Schaden > 10.000 €
Konstruktionsfehler oder Produktionsfehler?

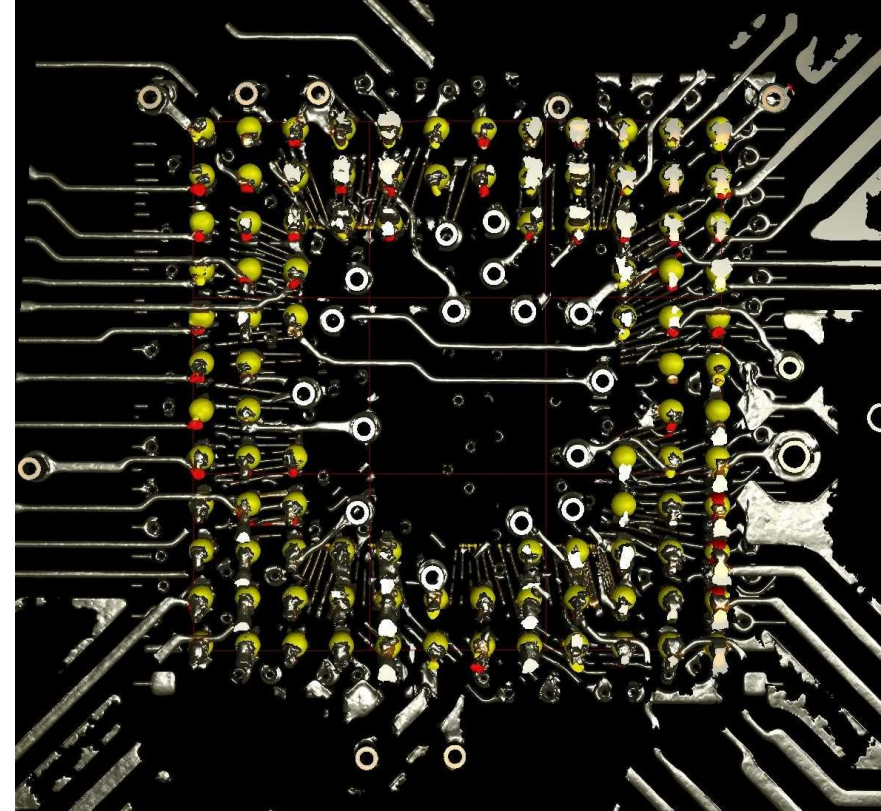
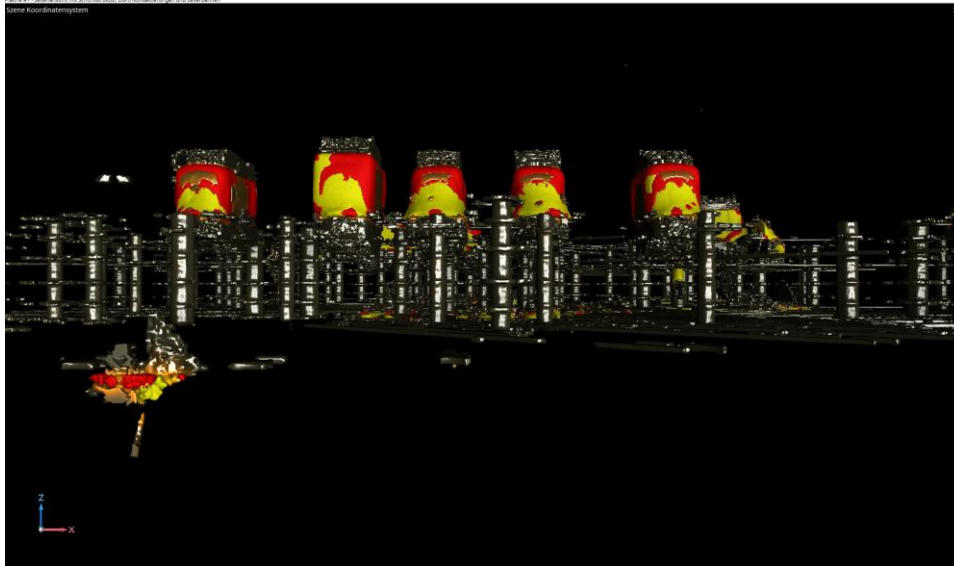


Verdacht: Lötstellen des Chips

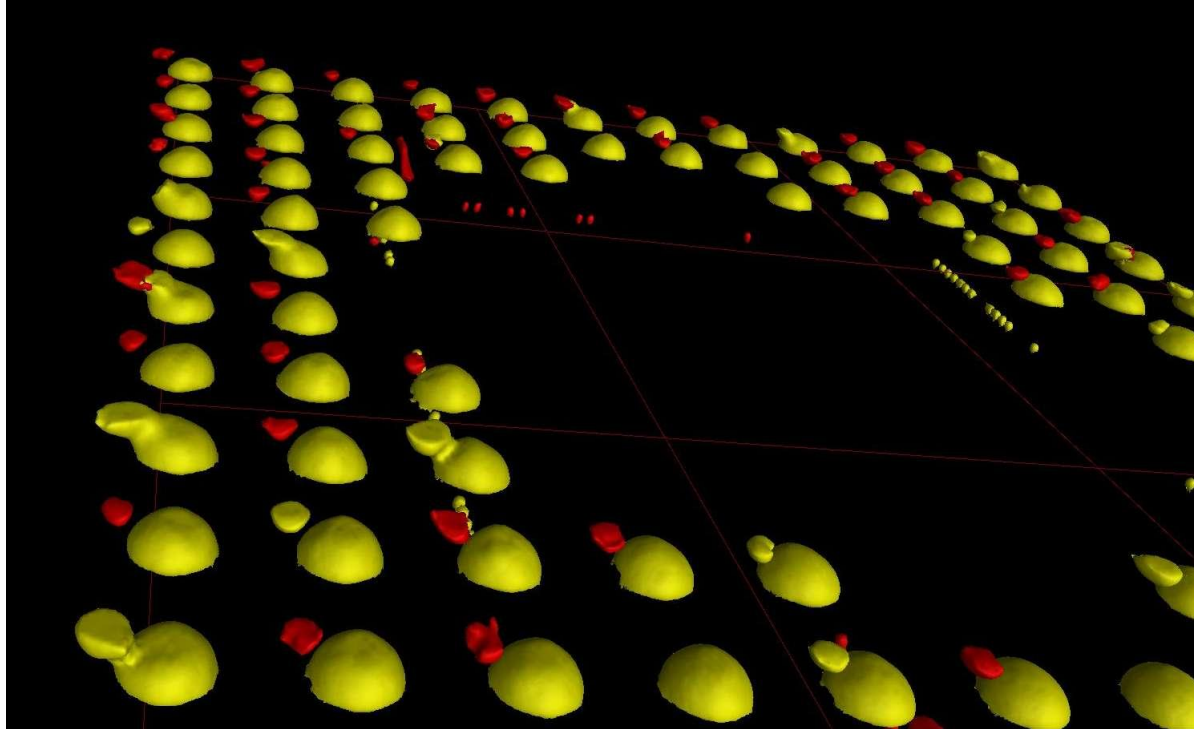
Herausforderung: Feine Struktur in einer großen komplexen Probe

Durchführung

Extraktion der Lötstellen aus einem Stack aus 6 Leiterbahn-Ebenen und 5 Polymer-Ebenen



Fast unversehrte Lötperlen des Chips und abgetropftes Lot auf der Platine
Seitlicher Versatz von Chip und Platine



Künstlicher Kristall: YIG aus Innovent von MOS

Aufgabe:

Welche Bereiche des Kristalls sind verwertbar ?

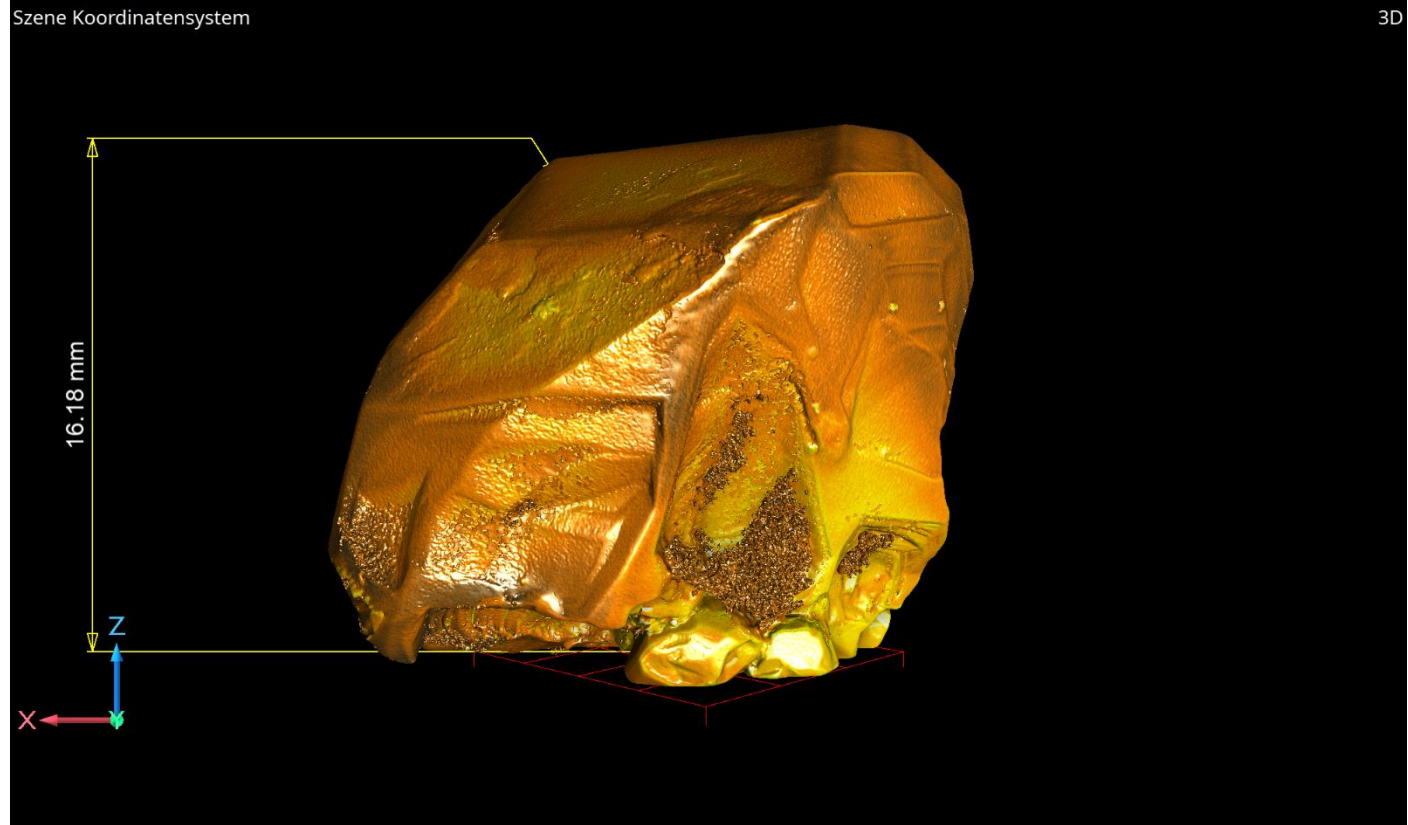
Herausforderung:

Für das Zersägen des Kristall
passende Schnittbilder erzeugen



Position von
Domänen, Poren
und Fremdmaterial
über einer Fläche
zum Aufkitten des
Kristalls beim
Sägen

YIG-Kristall von hinten mit Grundfläche und Höhe
Szene Koordinatensystem



351
Schnittbilder

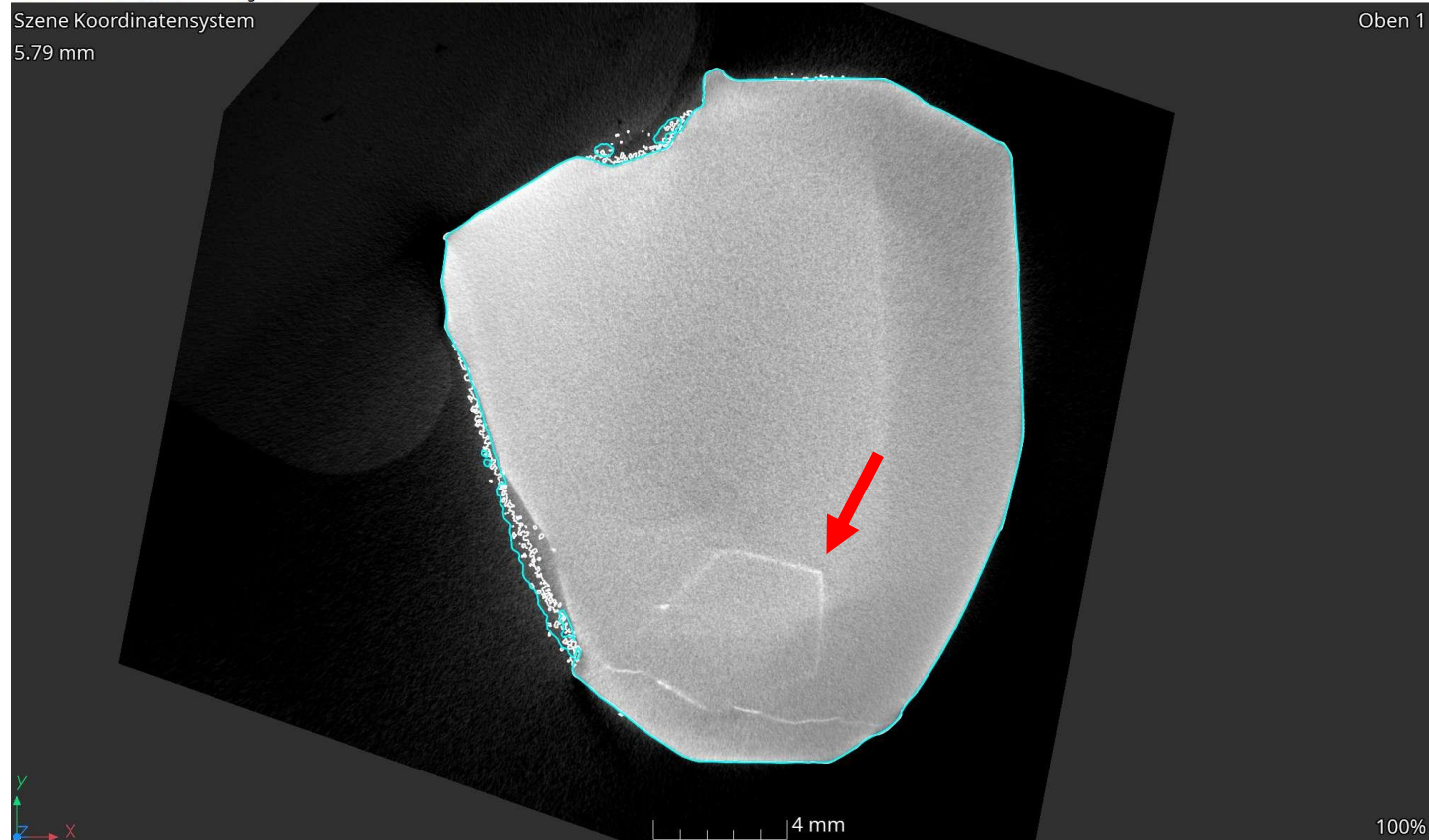
Abstand:
0,05 mm

YIG-Kristall: Schichtbild mit Korngrenzen einer Domäne im Inneren

Szene Koordinatensystem

5.79 mm

Oben 1



Das Geheimnis einer Geode: Verborgene Kristalle

Geode aus Marokko:

Vor ca. 40 Mio Jahren in einem Lavastrom entstanden

Aufgabe:

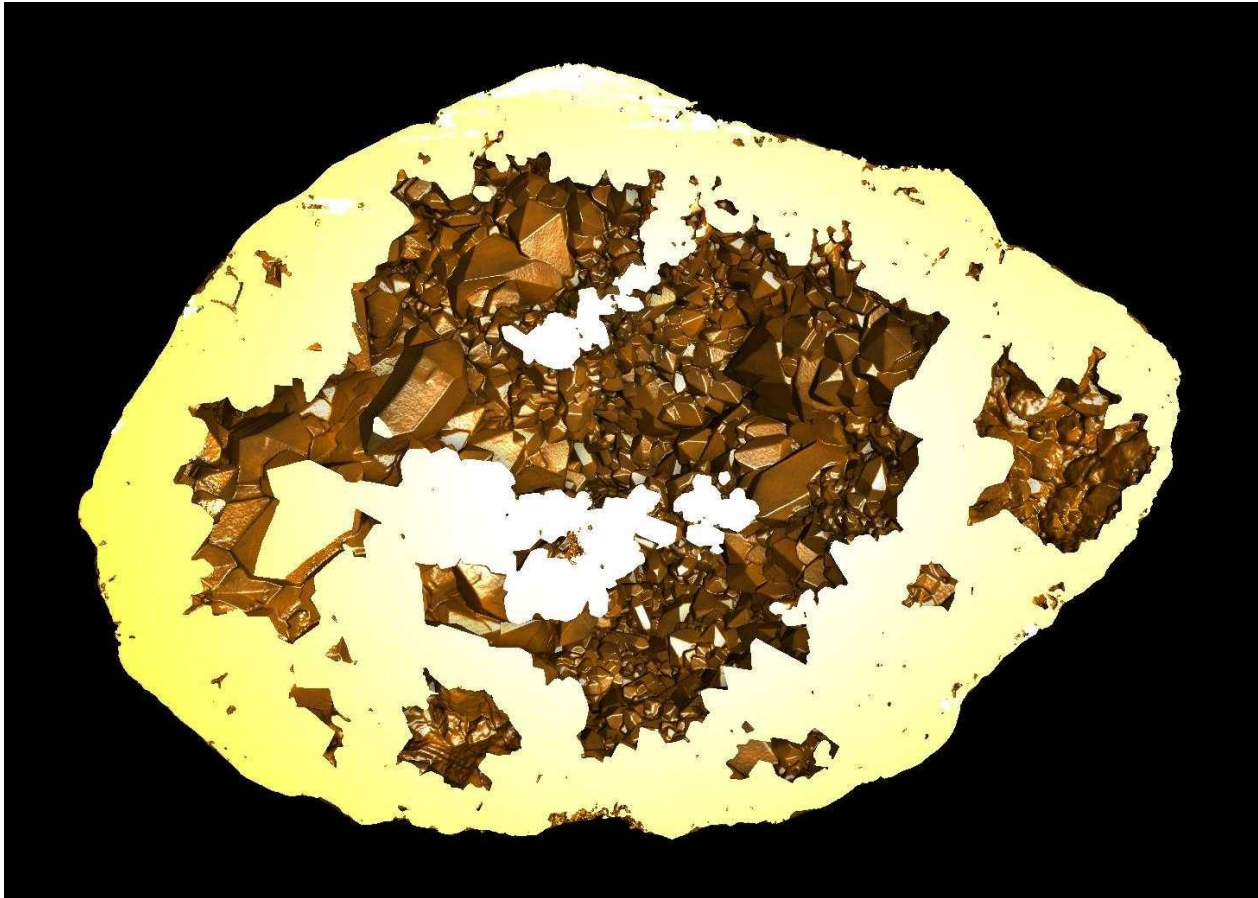
Kann die Mineralart im Inneren der Geode ohne Aufsägen bestimmt werden ?
3D-Druck der verborgenen Kristalle ?

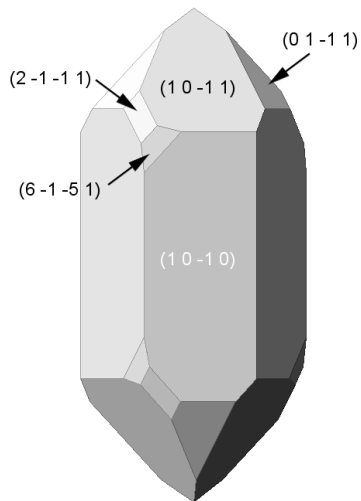
Herausforderung:

Keine optische Kontrolle



Virtueller Schnitt durch die Geode





Tiefquarz (Wikipedia)

Dichte: $2,612\text{ g/cm}^3$

Zum Vergleich:

Tiefquarz $2,65\text{ g/cm}^3$

Hochquarz $2,51\text{ g/cm}^3$

Calcit $2,715\text{ g/cm}^3$

Geode: Ausgewählter Kristall mit Kristallflächen im Inneren der Geode
Volumen 1: Gitterkoordinatensystem

Identifikation der Kristallflächen



Glas: Vermessung einer Preform für eine Glasfaser

Aufgabe:

Durchmesser der verschiedenen Strukturen

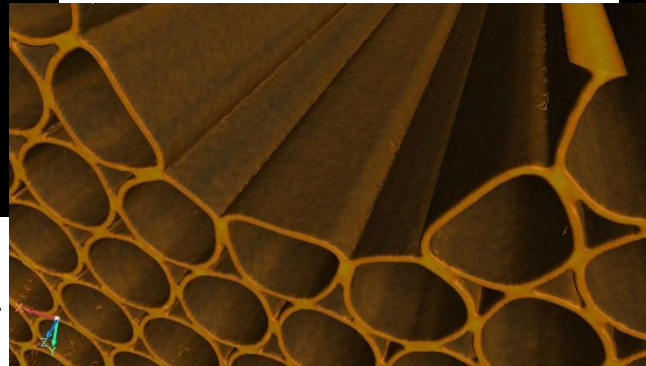
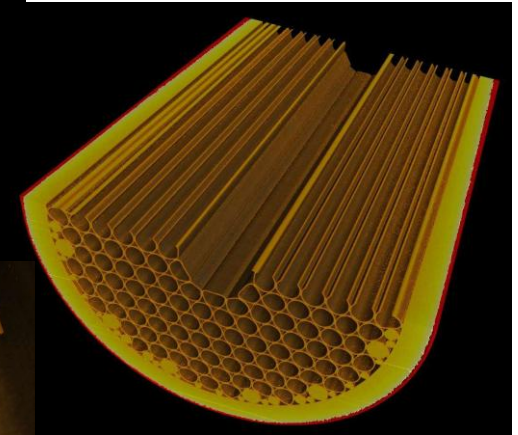
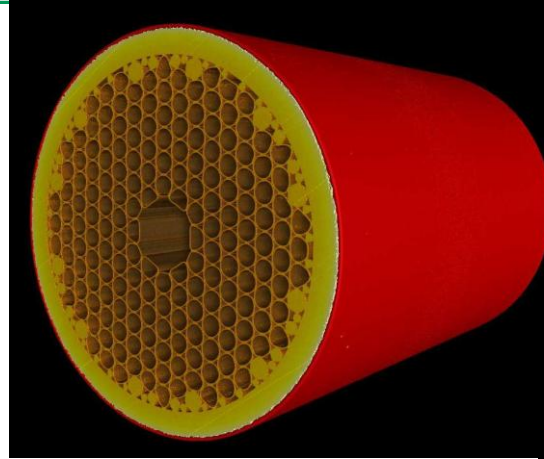
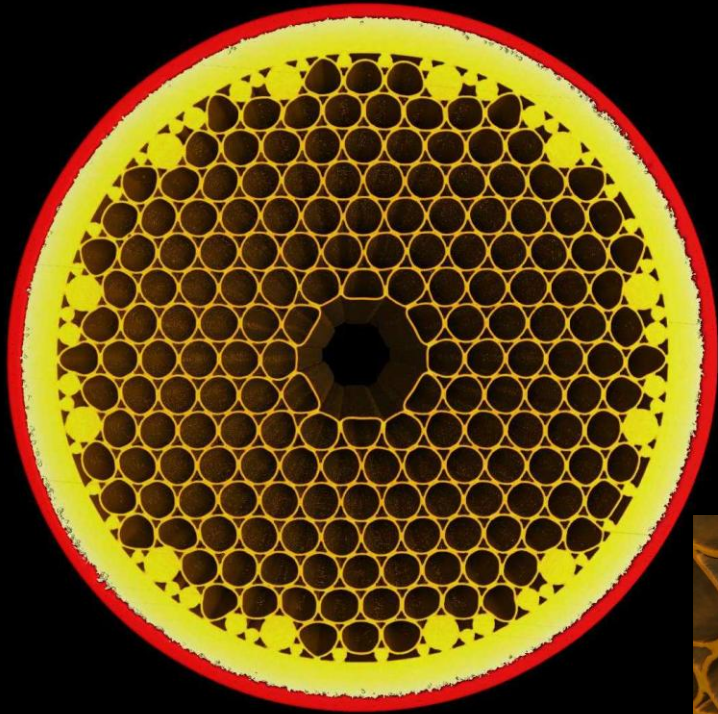
Herausforderung:

„Eindimensionale“ Probe

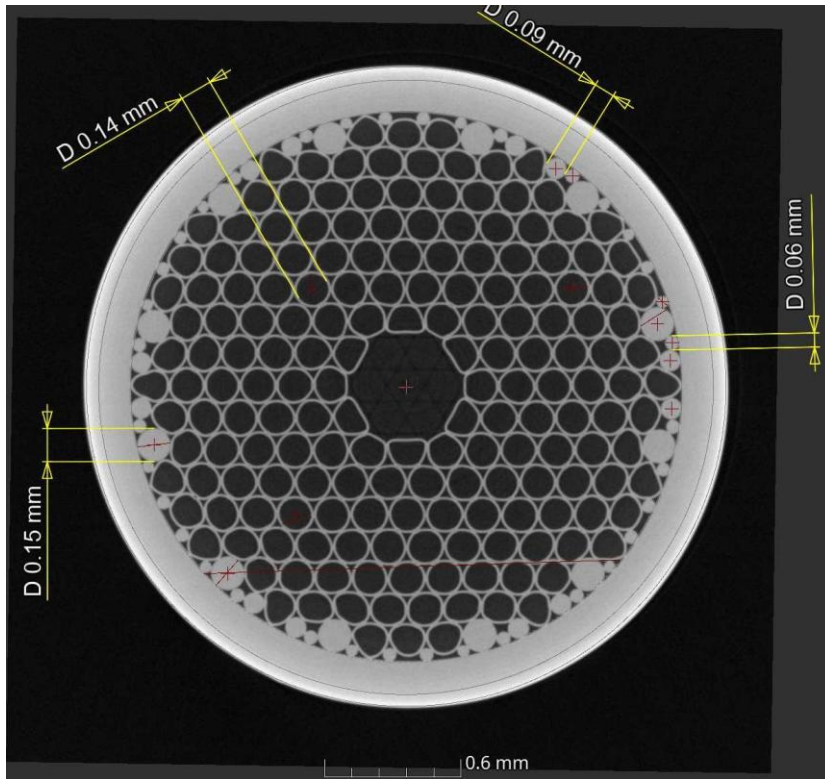
Materialien mit geringen Dichteunterschieden

Mit freundlicher Genehmigung des
Leibniz-Instituts für Photonische Technologien e.V.
Kompetenzzentrum für optische Spezialfasern (KSF)

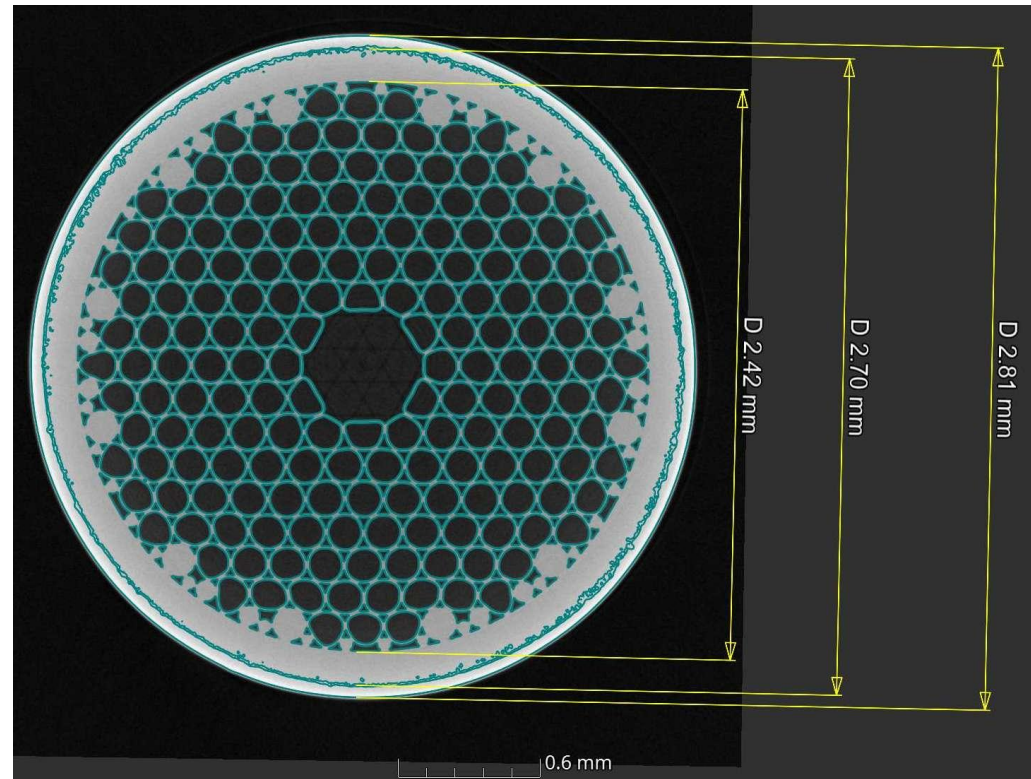




Innenmaße



Außenmaße



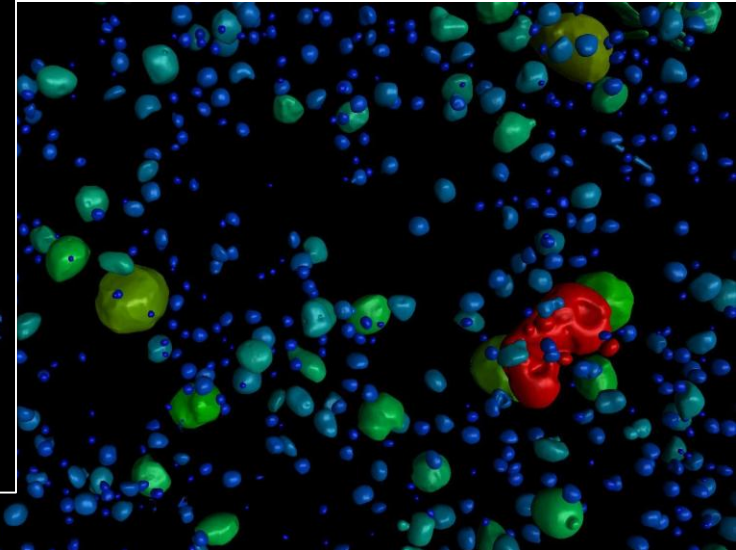
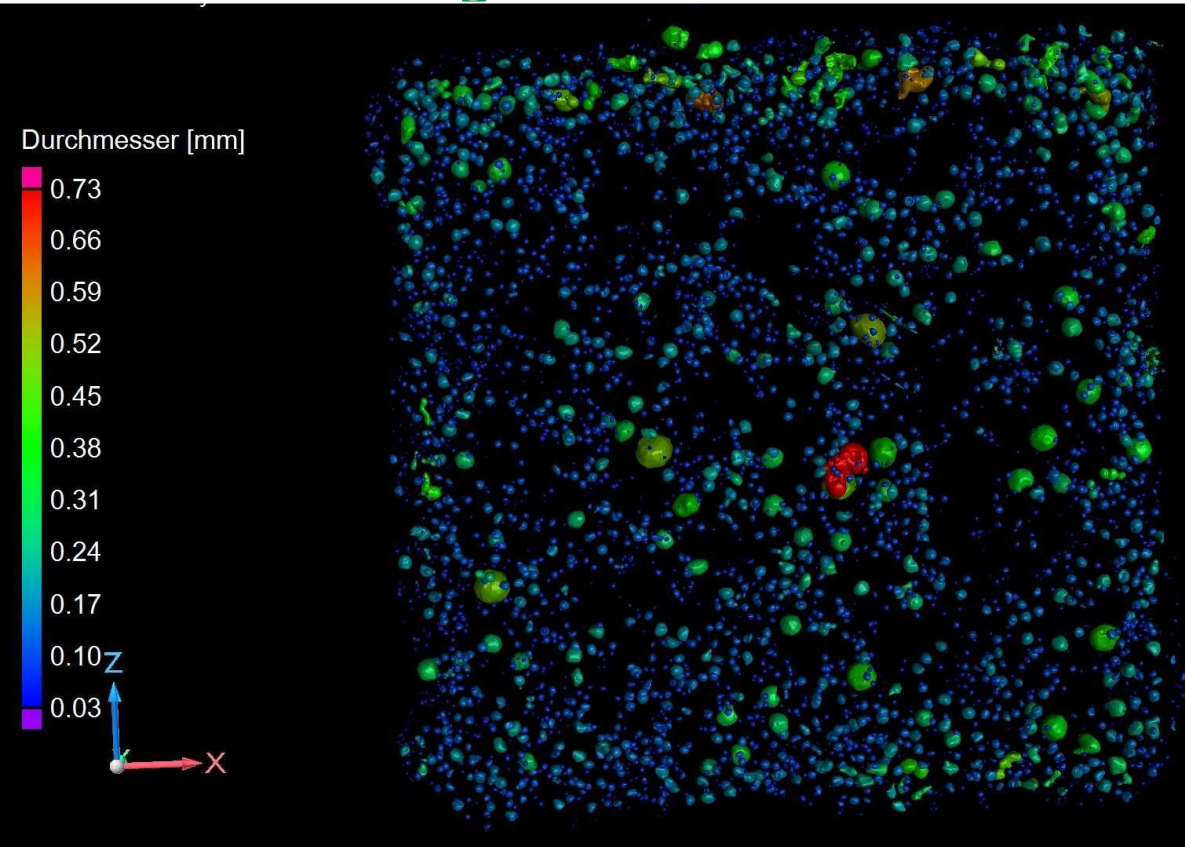
Aufgabe: Quantitative Charakterisierung der Porosität von Polymerproben

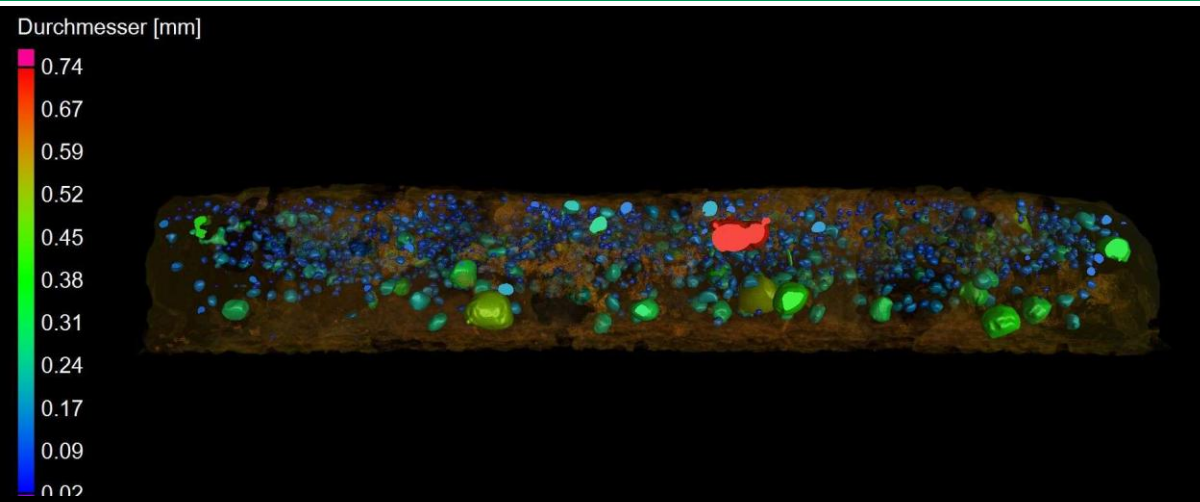


Herausforderung: Irreguläre Porengeometrie
Unterscheidung von offenen und geschlossenen Poren

Farbcodierte geschlossene
Poren in transparenter
Polymermatrix

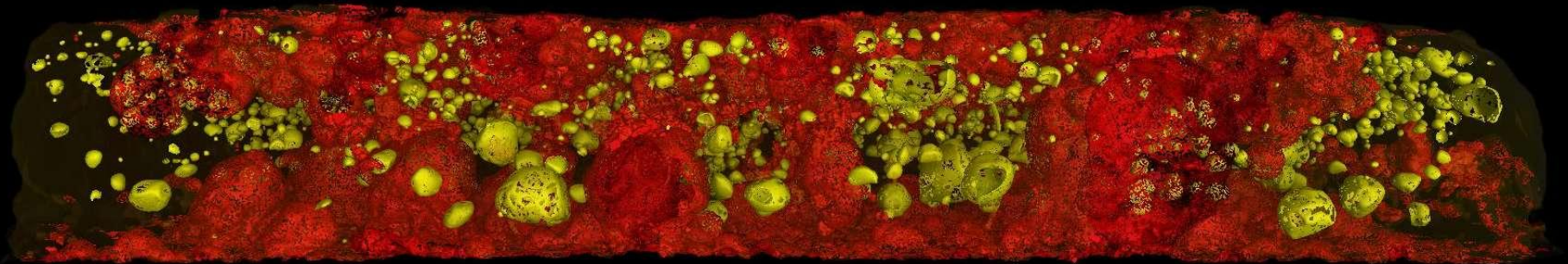
Zoom



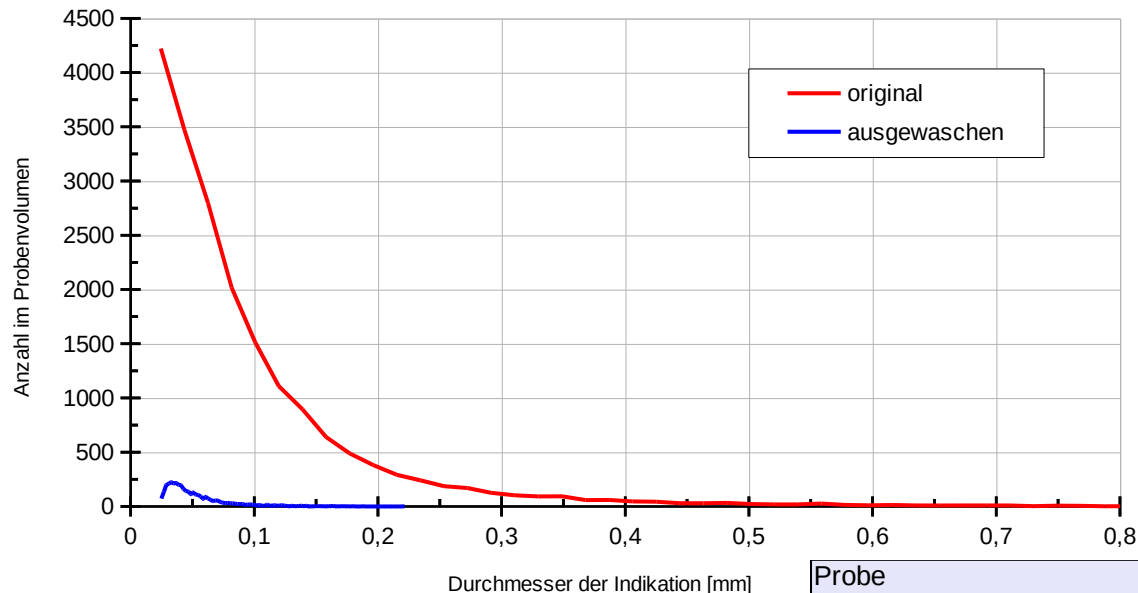


Farbcodierte Verteilung der geschlossenen Poren in der Probe

Geschlossene (gelb) und offene (rot) Poren in der Probe



Anzahl geschlossene Poren = $f(\text{Porendurchmesser})$



Probe	Volumenanteil [%]			offene innere Oberfläche [mm ² /mm ³]
	Polymer inkl. innere Poren	Poren offen	geschlossen	
original	88,25 %	11,75 %	9,03 %	1,06
ausgewaschen	40,94 %	59,06 %	0,04 %	14,33

Dünne Schichten aus dem Plasma /Jun Xu

PEEK-Tablette mit zwei anorganischen Schichten:

- 1) $\approx 60 \mu\text{m}$ Hydroxylapatit
- 2) $\approx 4\text{...}5 \mu\text{m}$ ZnO

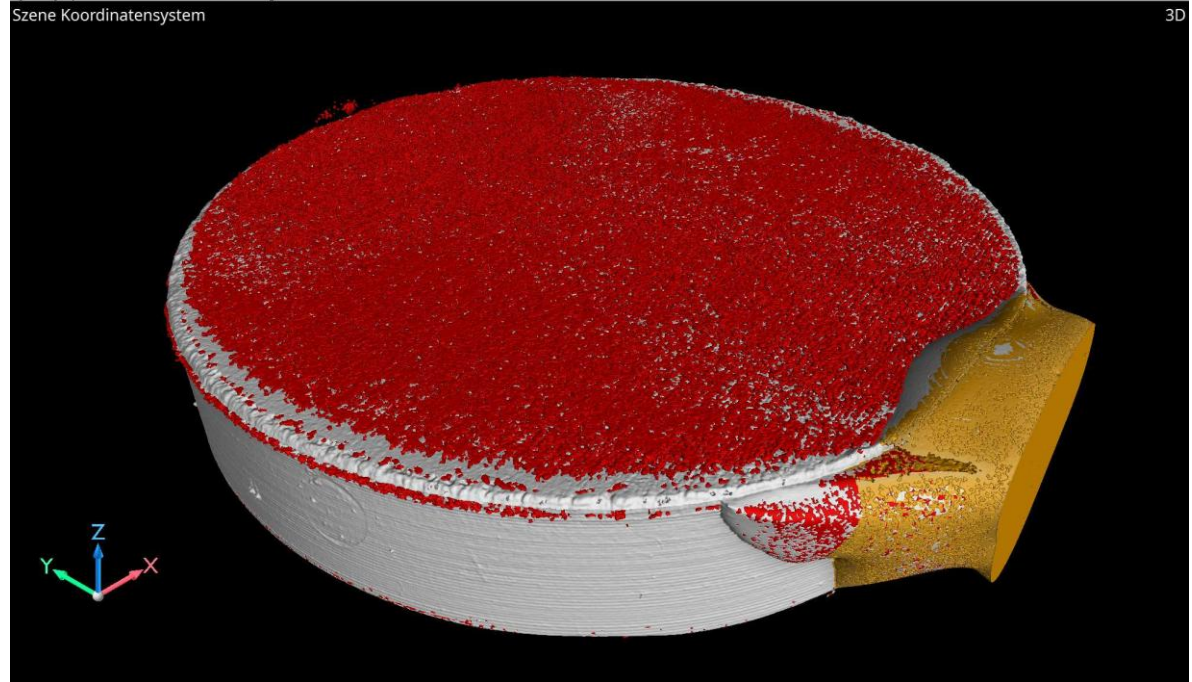
Aufgabe:

Struktur von Schicht und Unterlage
nach dem Plasma-Prozess

Herausforderung:

Ungünstiges Aspektverhältnis:
Dünne Schicht auf großer Probe

Hydroxylapatit-Schicht auf einem PEEK-Träger: Gesamtansicht
Szene Koordinatensystem

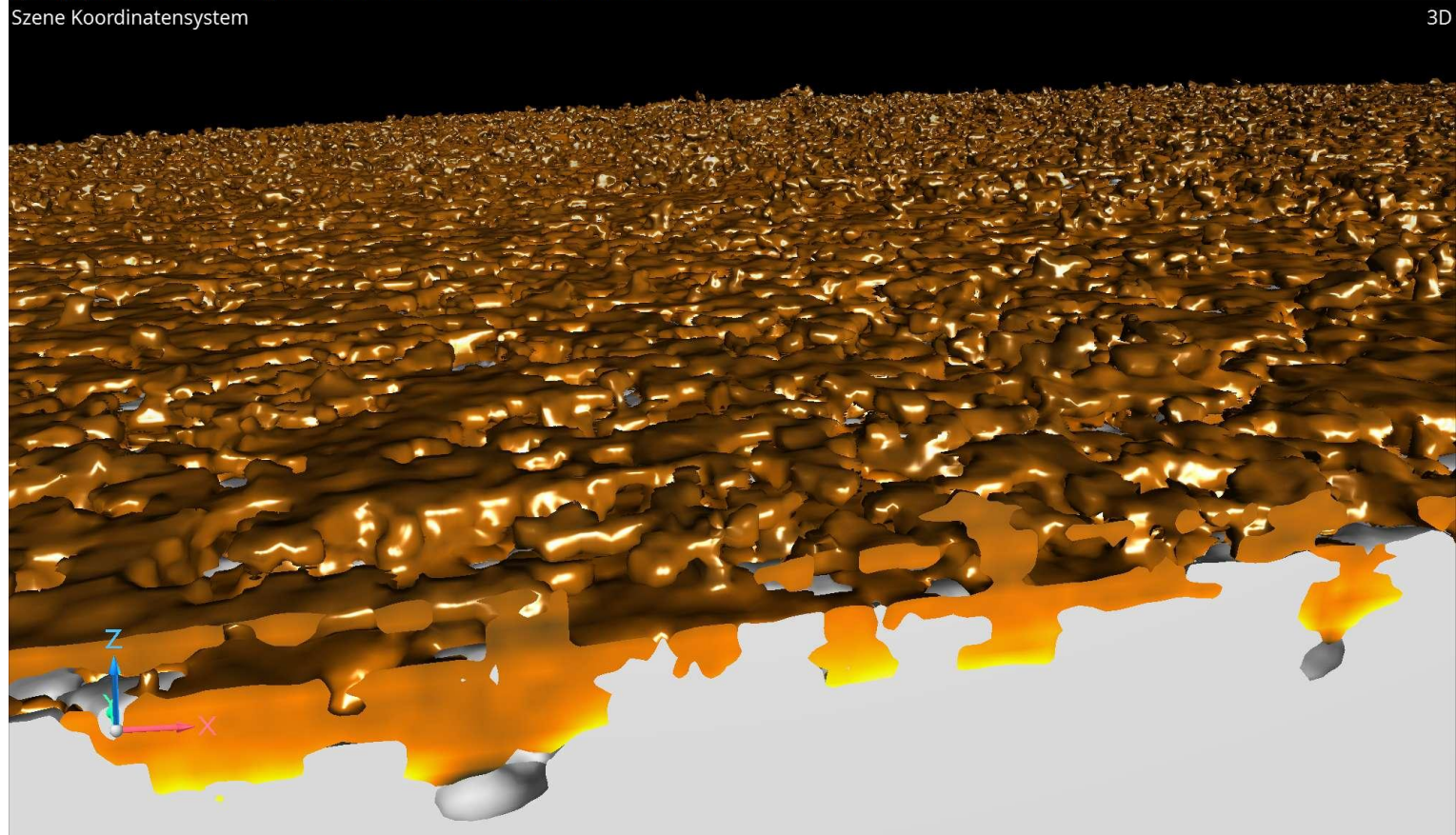


Hydroxylapatit auf PEEK: Schmelzstrukturen und Blasen

Hydroxylapatit auf einem PEEK-Träger: Schnittfläche mit Schmelzstrukturen und Blasen

Szene Koordinatensystem

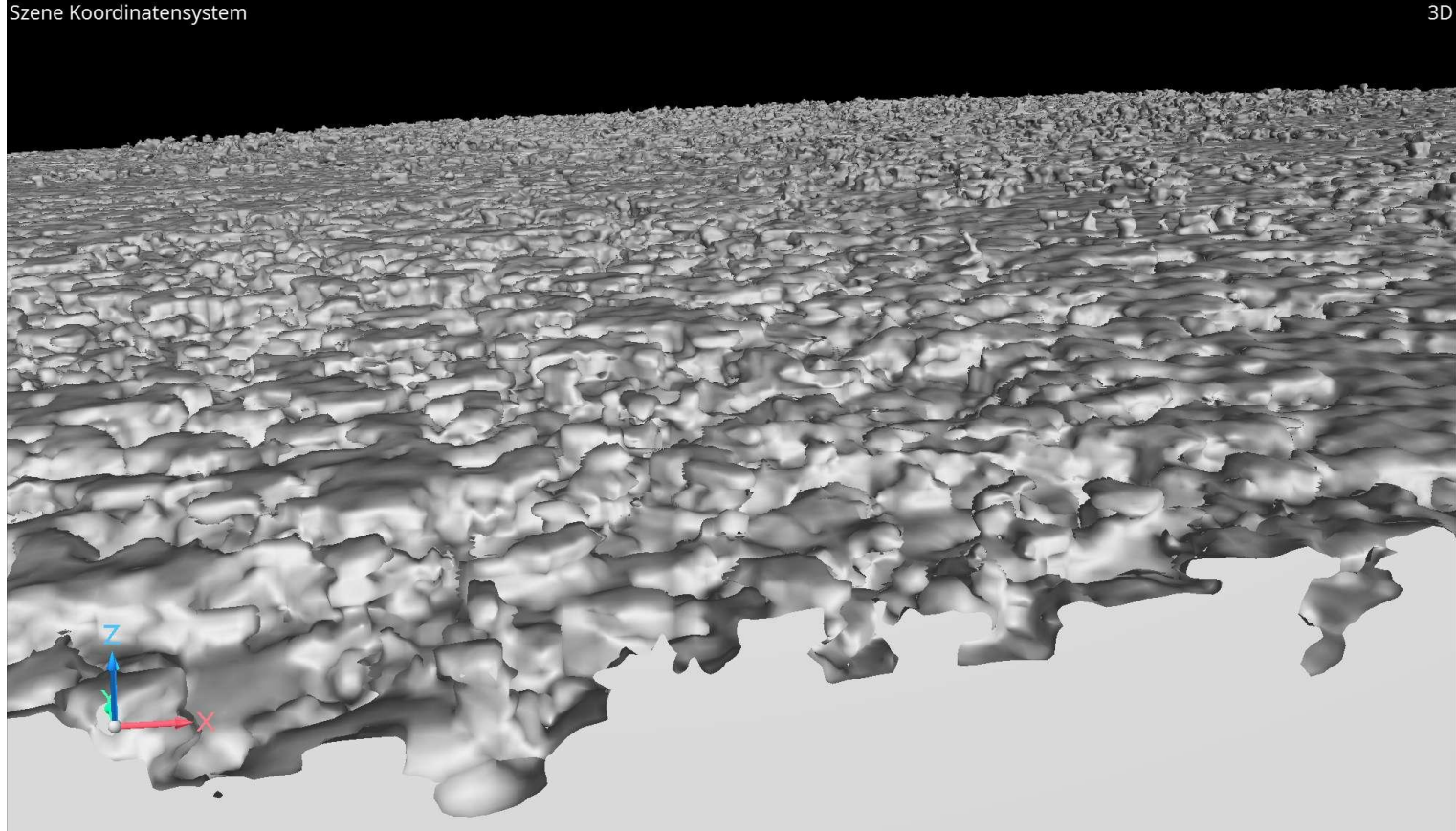
3D



Hydroxylapatit auf einem PEEK-Träger: Schnittfläche mit aufgeschmolzenem PEEK-Substrat
Szene Koordinatensystem

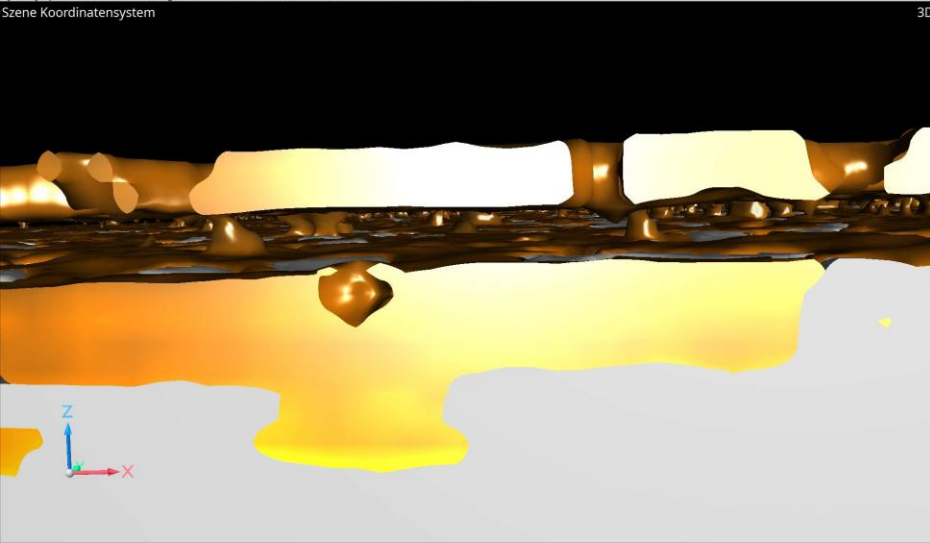
3D

Aufgeschmolzenes
PEEK unter der
HAp-Schicht an
derselben Stelle
(HAp ausgeblendet)



Ergebnis

Hydroxylapatit auf einem PEEK-Träger: Schnittfläche durch die Schicht - Hohlräume unter der Schicht
Szene Koordinatensystem



Hydroxylapatit auf einem PEEK-Träger: Ober- und Unterseite der HAp-Schicht in der 2D-Ansicht - Zoom
Szene Koordinatensystem



Schichtdicke 40...120 μm

Doppelschichten und Hohlräume

Voxelsize 11 μm :

- > 60 μm Hydroxylapatit-Schicht nachweisbar
- > 5 μm ZnO-Schicht dünner als Auflösung

Archäologie: 400 Jahre alter Degen

Aufgabe:

Kann eine unter einer Korrosionsschicht vermutete Inschrift aus Kupfer entziffert werden ?

Sind auch Reste der Scheide aus Leder und Holz erkennbar ?

Herausforderung:

- Kleines Detail in einer großen sperrigen Probe
- Metall in Metall
- Multimaterial aus harten und weichen Materialien
- Korrosionsschicht

Mit freundlicher Genehmigung der Sammlung Ur- und Frühgeschichte der Friedrich-Schiller-Universität

<https://www.gw.uni-jena.de/11495/sammlung>

www.innovent-jena.de

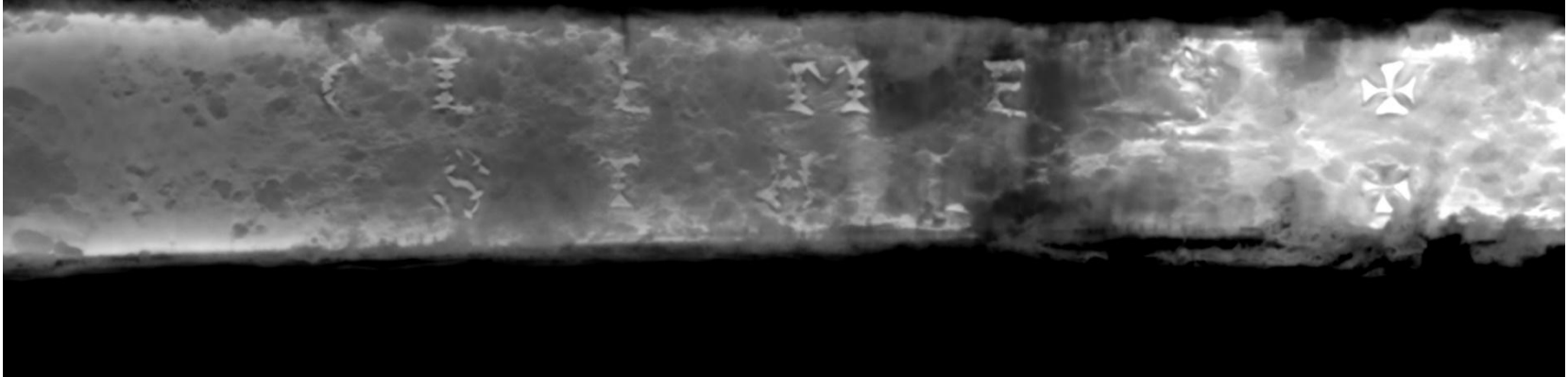


Oberseite



Unterseite

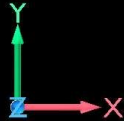
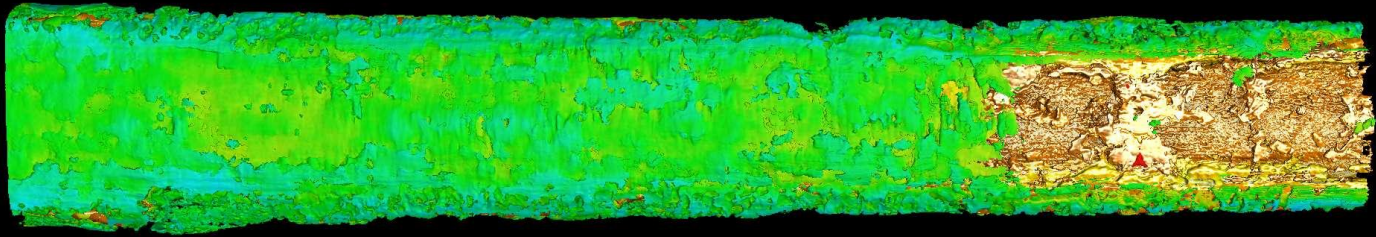
„Clemes Stam“



Auspacken des Degens: Metalle mit Korrosionsschicht und Scheide

Szene Koordinatensystem

3D

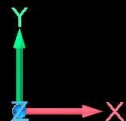


Korrodiertes Metall in der Degenhülle

Auspacken des Degens: Schrift auf Metall ohne Korrosionsschicht

Szene Koordinatensystem

3D



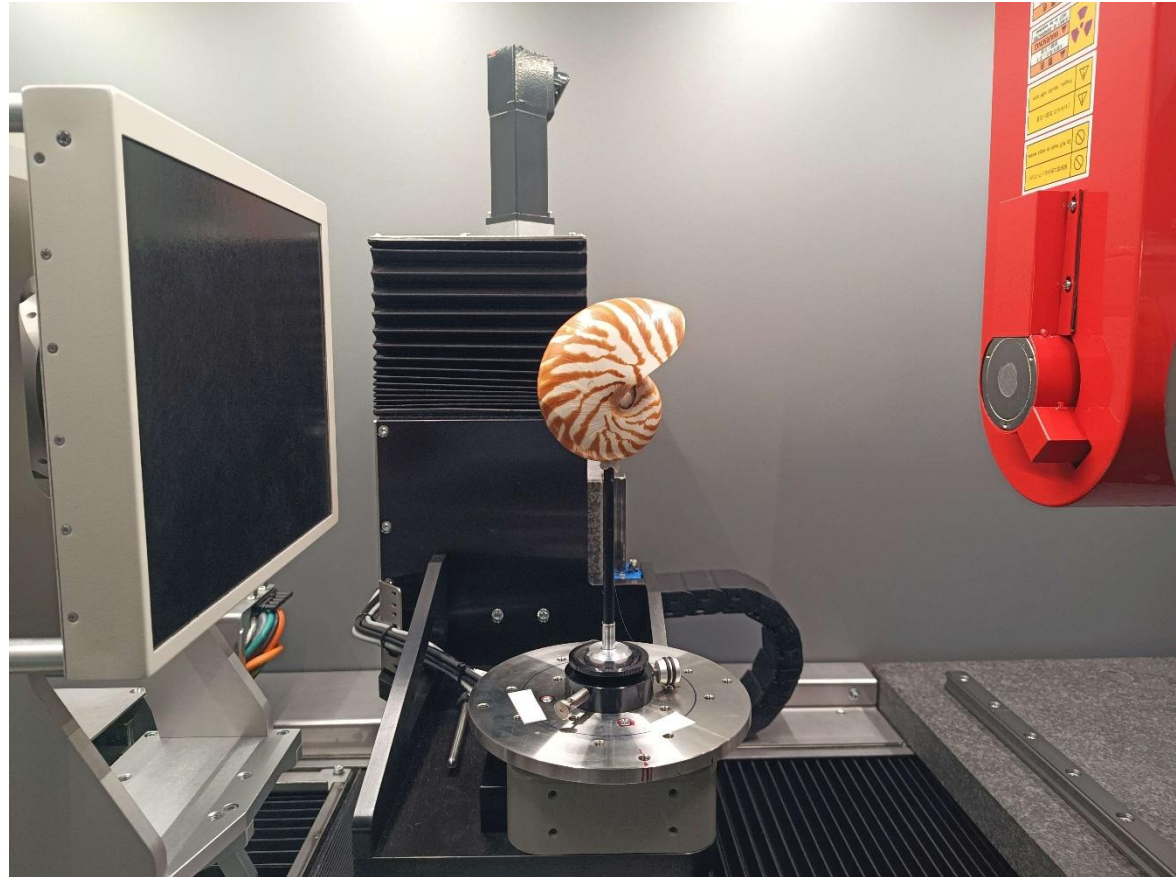
Harter Klingenstahl und elastischer Kernstahl mit Tauschierung

Aufgabe:

Verborgene Struktur

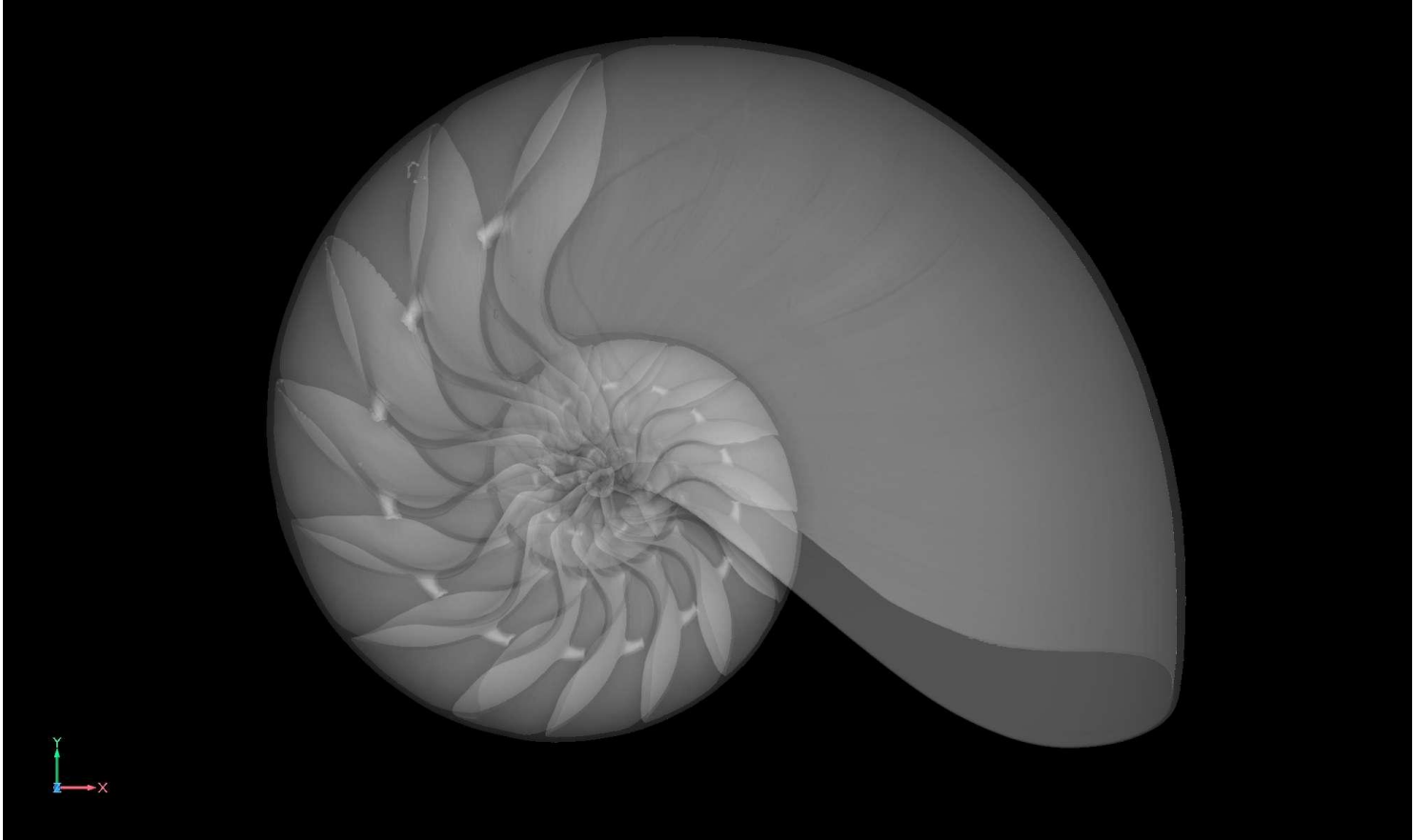
Herausforderung:

Irreguläre Struktur:
Schatten in jeder
Richtung

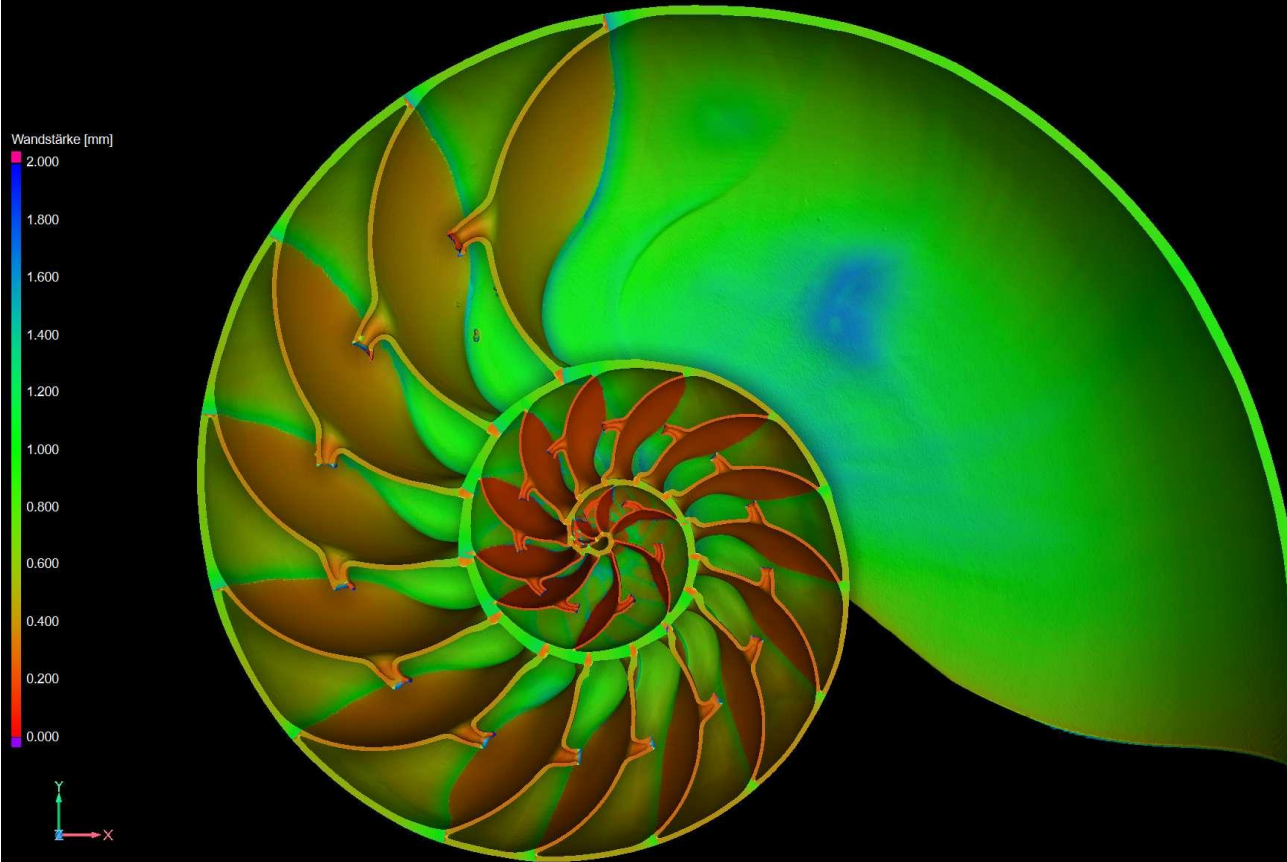


Schale
mit 50%
Transpa-
renz

Gemeines Periboot (Nautilus pompilius) - teiltransparent



Wand- stärken- analyse



Dank

BMBF

Bundesministerium für Bildung und Forschung
Förderkennzeichen: 03WIR07IL1

Beispiele

Matesy GmbH

<https://matesy.de/de/>

Sammlung „Ur- und Frühgeschichte“ der Friedrich-Schiller-Universität

<https://www.gw.uni-jena.de/11495/sammlung>

Leibniz-Institut für Photonische Technologien e.V.

Kompetenzzentrum für optische Spezialfasern (KSF)

<https://www.leibniz-ipht.de/en/departments/competence-center-for-special-fiber-optics/>

So erreichen Sie uns:



Hauptgebäude und Technikum

(Prüssingstraße 27B, 07745 Jena)



INNOVENT

Technologieentwicklung Jena

Zweigstelle (Ilmstraße 18, 07743 Jena) Elektrochemie und Galvanik



Telefon:

+49 (0)3641 282510

E-Mail:

innovent@innovent-jena.de

Follow us on:

