



# diondo

x-ray systems and services

Einsatz röntgenbasierter Prüftechnologien für die nachhaltige  
Energietechnik der Zukunft

Dr. Olaf Günnewig, diondo GmbH, 12.09.2024

14

# Agenda

Einsatz röntgenbasierter Prüftechnologien für die nachhaltige Energietechnik der Zukunft

1

## diondo GmbH – Innovation durch Erfahrung

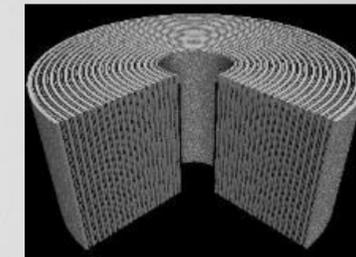
– Eine kurze Unternehmensdarstellung der CT-Systeme und CT-Dienstleistungen



2

## Applikation 1 – Li-Ionen Batterien in der Elektromobilität

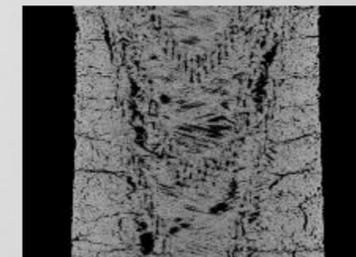
– Einsatz der CT zur Qualitätssicherung und Fehleranalyse an Li-Ionen Batteriezellen



3

## Applikation 2 – Keramische Verbundwerkstoffe (CMC)

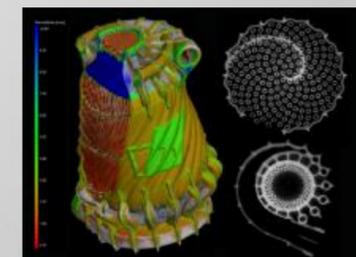
– CT-basierte Charakterisierung von CMC-Komponenten am Beispiel eines APU-Mufflers  
– Rückkopplung per CT erfasster „as-built“ Informationen in die CAx-Kette



4

## Applikation 3 – Hochenergie-Computertomographie (LINAC CT)

– Untersuchungen an metallischen Bauteilen aus der Elektromobilität  
– LINAC CT zur Qualitätssicherung in der metallischen additiven Fertigung



# Agenda

Einsatz röntgenbasierter Prüftechnologien für die nachhaltige Energietechnik der Zukunft

1

## diondo GmbH – Innovation durch Erfahrung

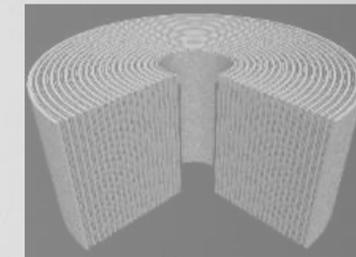
– Eine kurze Unternehmensdarstellung der CT-Systeme und CT-Dienstleistungen



2

## Applikation 1 – Li-Ionen Batterien in der Elektromobilität

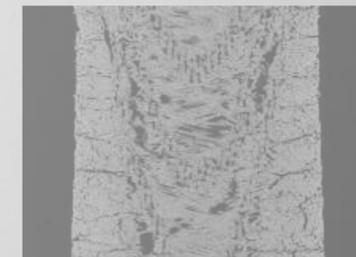
– Einsatz der CT zur Qualitätssicherung und Fehleranalyse an Li-Ionen Batteriezellen



3

## Applikation 2 – Keramische Verbundwerkstoffe (CMC)

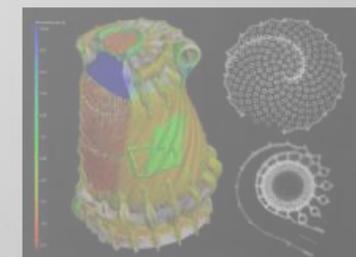
– CT-basierte Charakterisierung von CMC-Komponenten am Beispiel eines APU-Mufflers  
– Rückkopplung per CT erfasster „as-built“ Informationen in die CAx-Kette



4

## Applikation 3 – Hochenergie-Computertomographie (LINAC CT)

– Untersuchungen an metallischen Bauteilen aus der Elektromobilität  
– LINAC CT zur Qualitätssicherung in der metallischen additiven Fertigung



### Unsere Erfahrung

Mit mehr als 25 Jahren Erfahrung ist diondo der führende Hersteller innovativer Systeme für die industrielle Computertomographie (CT) in der zerstörungsfreien Werkstoffprüfung (zFP).

### Unsere Expertise

Durch unsere CT-Scandienstleistung, die sich von Mikro CT bis Linac CT erstreckt, profitieren unsere Kunden von einem ebenso breitbandigen wie tief greifenden Applikationswissen. Dieses und ein umfangreicher, sich ständig erweiternder Baukasten aus Komponenten und Funktionsmodulen führen letztendlich zu innovativen CT- und DR-Systemen.

### Unsere Kunden

Führende Automobilhersteller, Zulieferer der Automobil- und Luftfahrtindustrie, Unternehmen der Wachstumsbranchen Maschinenbau, Energie und Elektronik, additive Fertigung als auch renommierte Forschungsinstitute.



# diondo d<sub>x</sub>

Industrial Computed Tomography and X-Ray Systems



**diondo dsub μ**  
Höchstaauflösendes  
Sub-Mikro CT-System



**diondo d1**  
Hochauflösendes Sub-  
Mikro CT-System



**diondo d2**  
Leistungsstarkes  
CT-System



**diondo d4**  
Kompaktes CT-System  
für hohe  
Materialdichten



**diondo d5**  
Universelles CT-System  
mit großer  
Anwendungsvielfalt



**diondo d7**  
Hochenergie Linac CT



**diondo d!**  
Sonderlösungen für  
individuelle Anwendungen

	dsub μ	d1	d2	d4	d5	d7	d!
<b>Prüfteilgröße</b>	● ○ ○ ○ ○	● ● ○ ○ ○	● ● ● ○ ○	● ● ● ○ ○	● ● ● ● ○	● ● ● ● ●	○ ○ ○ ○ ○
<b>Materialdichte</b>	● ○ ○ ○ ○	● ● ● ○ ○	● ● ● ○ ○	● ● ● ● ○	● ● ● ● ○	● ● ● ● ●	○ ○ ○ ○ ○
<b>Genauigkeit</b>	-	● ● ● ● ●	● ● ● ● ○	● ● ● ○ ○	● ● ● ● ○	● ● ○ ○ ○	○ ○ ○ ○ ○
<b>Auflösung</b>	● ● ● ● ●	● ● ● ● ○	● ● ● ● ○	● ● ● ○ ○	● ● ● ● ○	● ○ ○ ○ ○	○ ○ ○ ○ ○
<b>Aufstellfläche</b>	● ○ ○ ○ ○	● ● ○ ○ ○	● ● ● ○ ○	● ● ● ○ ○	● ● ● ● ○	● ● ● ● ●	○ ○ ○ ○ ○

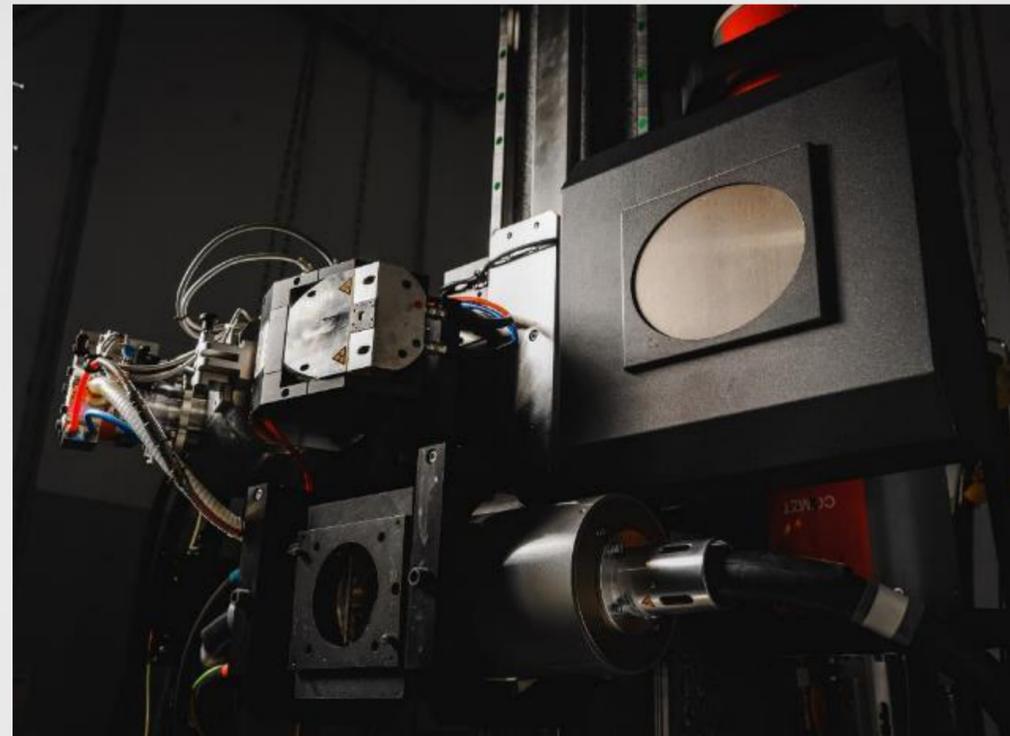
# Applikation & Dienstleistung

Unser Spektrum von Mikro bis Linac CT



## Micro CT

3D Mikro CT Untersuchungen mit höchster Präzision durch 240 kV Mikrofokus-Röntgenquelle, 3K-Flächendetektor und Granitmanipulator für Elektronik, Leichtmetalle und Kunststoffe. Es können Prüfobjekte bis 800 mm Durchmesser und 2000 mm Höhe analysiert werden.



## High Energy CT

Flexible Kombination einer 450 kV Röntgenquelle mit 3K-Flächen- und 4K-Zeilendetektor zur effektiven Prüfung dichter Materialien oder größerer Bauteile bis zu 5000 mm Höhe und 1000 mm Durchmesser.

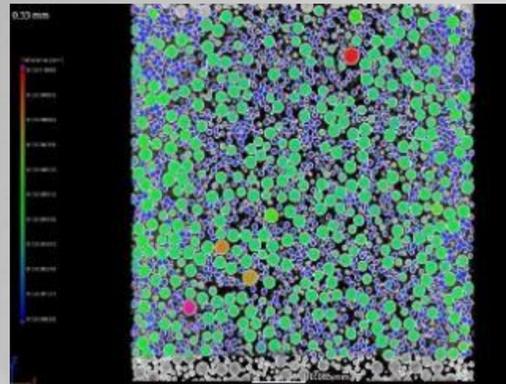


## LINAC CT

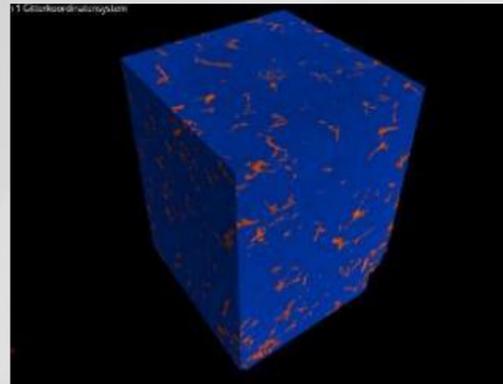
Das 6 MeV Linearbeschleuniger CT System. Aufgrund der hohen Dosisleistung ist die Linac CT perfekt geeignet für die Analyse von Prüfteilen mit höchster Dichte.

# Applikation & Dienstleistung

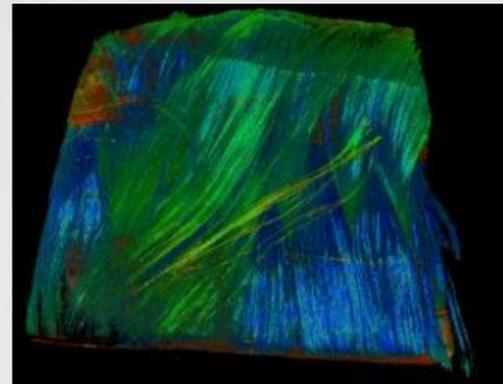
Unser Spektrum von Mikro bis Linac CT



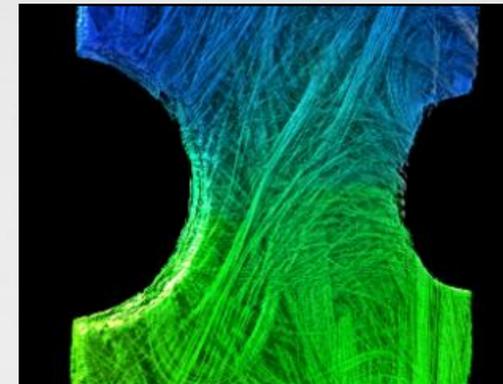
Charakterisierung von AM-Pulver



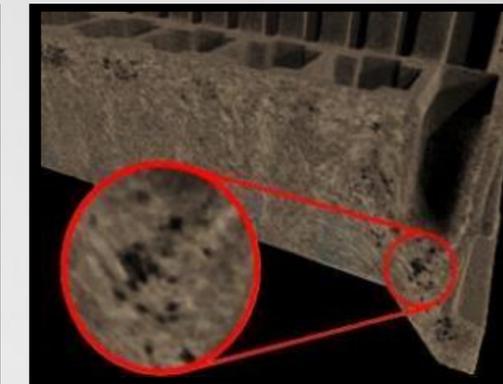
Metallografisches Gefüge von AlSi12



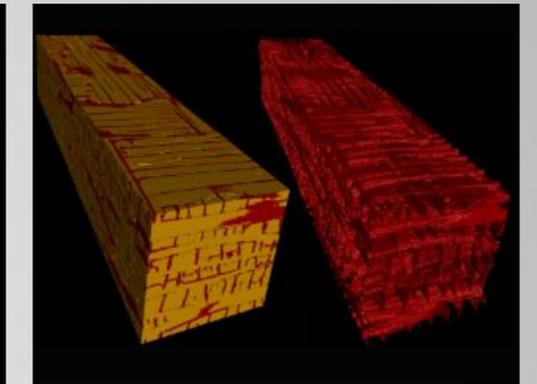
Faserorientierung in Verbundwerkstoff



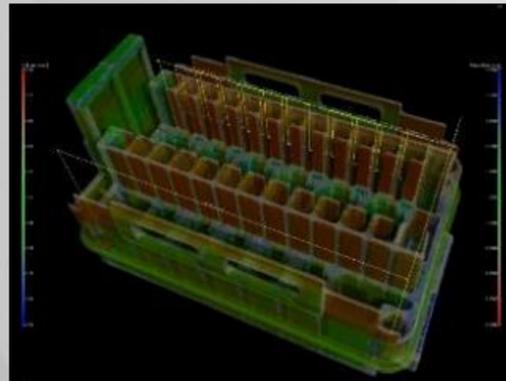
CFK-Bauteil - Digital Volume Correlation



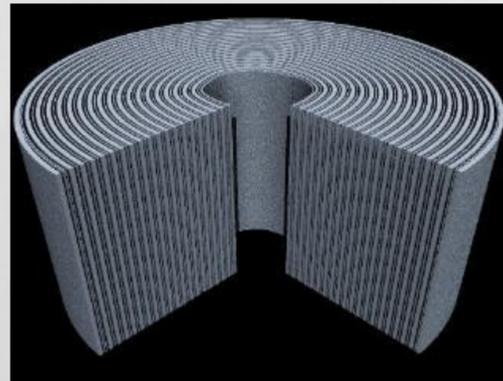
Poren und Fasern in einem Kunststoffbauteil



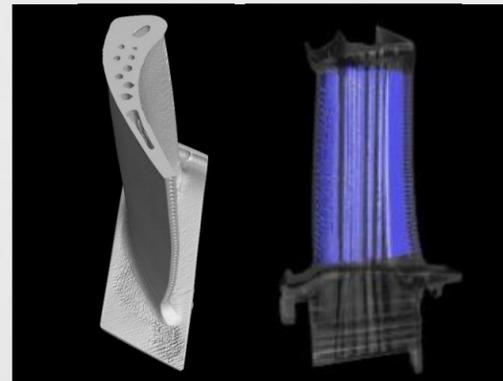
Fehler in einem CFF-Verbundwerkstoff



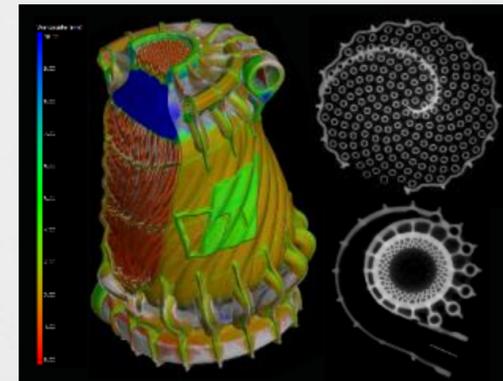
Vermessung eines Kunststoffbauteils



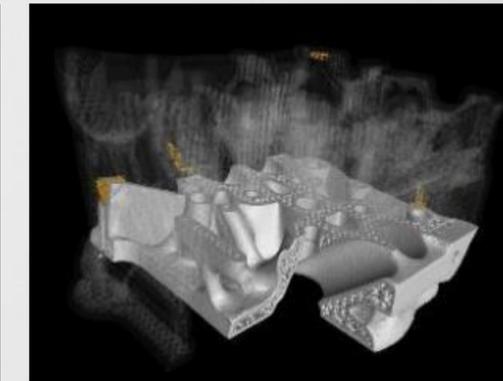
Li-Ionen Batterie eines Elektrofahrzeugs



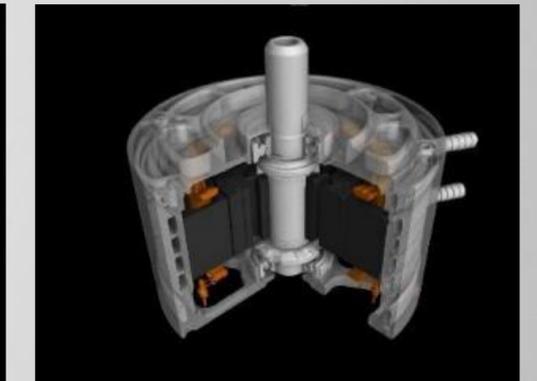
Kühlkanäle in einer Turbinenschaufel



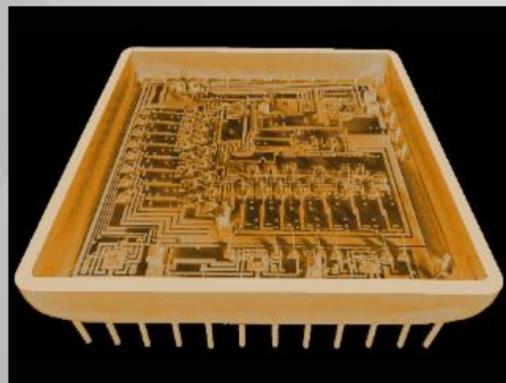
Additiv gefertigtes Metallbauteil



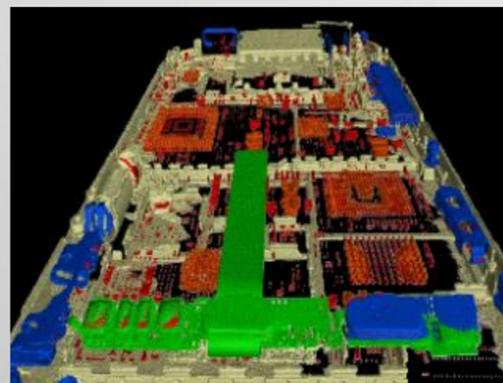
Porendetektion in metallischem AM-Bauteil



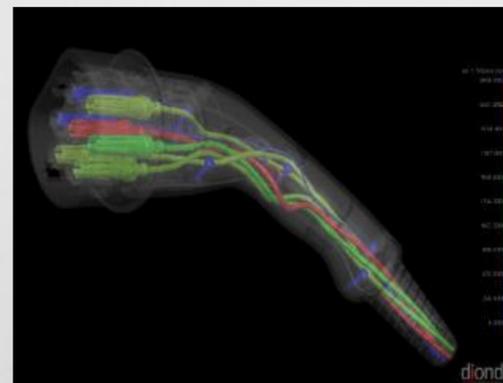
Motor eines Elektrofahrzeugs



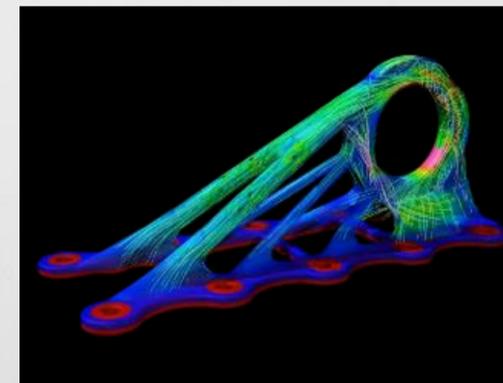
Hermetisches Multi-Chip-Modul



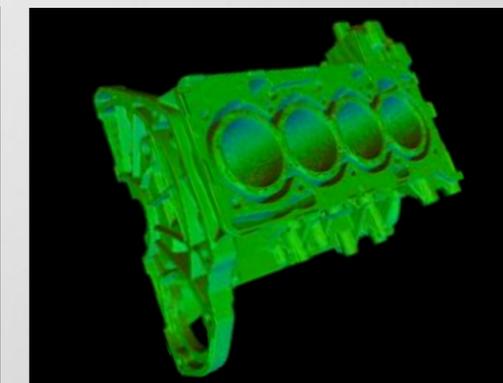
Elektronische Baugruppe



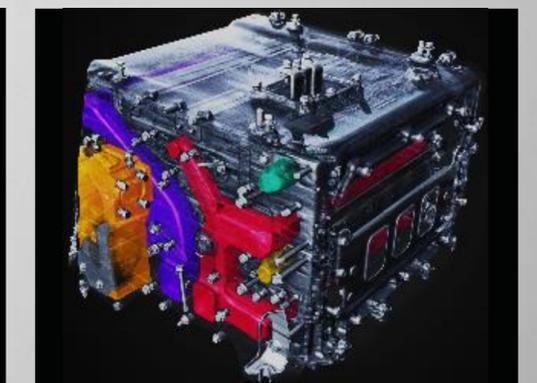
Stecker eines Elektrofahrzeugs



FEM-Simulation basierend auf CT-Daten



LINAC CT an einem Zylinderkopf



LINAC CT an einer Brennstoffzelle

# Agenda

Einsatz röntgenbasierter Prüftechnologien für die nachhaltige Energietechnik der Zukunft

1

## diondo GmbH – Innovation durch Erfahrung

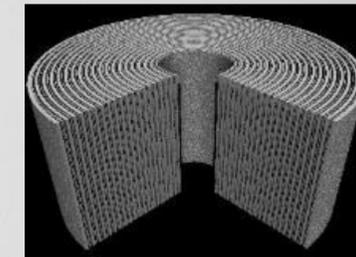
– Eine kurze Unternehmensdarstellung der CT-Systeme und CT-Dienstleistungen



2

## Applikation 1 – Li-Ionen Batterien in der Elektromobilität

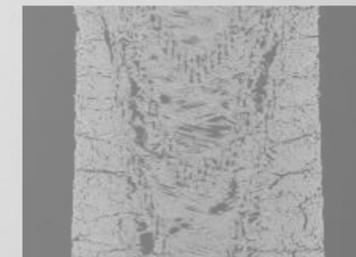
– Einsatz der CT zur Qualitätssicherung und Fehleranalyse an Li-Ionen Batteriezellen



3

## Applikation 2 – Keramische Verbundwerkstoffe (CMC)

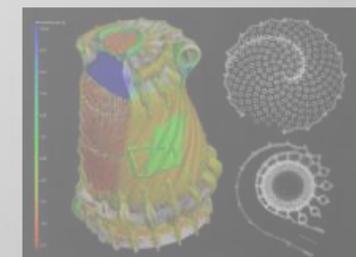
– CT-basierte Charakterisierung von CMC-Komponenten am Beispiel eines APU-Mufflers  
– Rückkopplung per CT erfasster „as-built“ Informationen in die CAx-Kette



4

## Applikation 3 – Hochenergie-Computertomographie (LINAC CT)

– Untersuchungen an metallischen Bauteilen aus der Elektromobilität  
– LINAC CT zur Qualitätssicherung in der metallischen additiven Fertigung

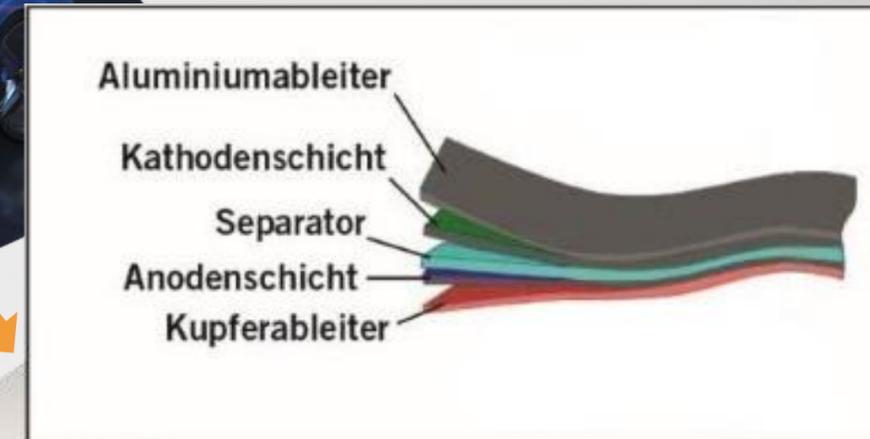
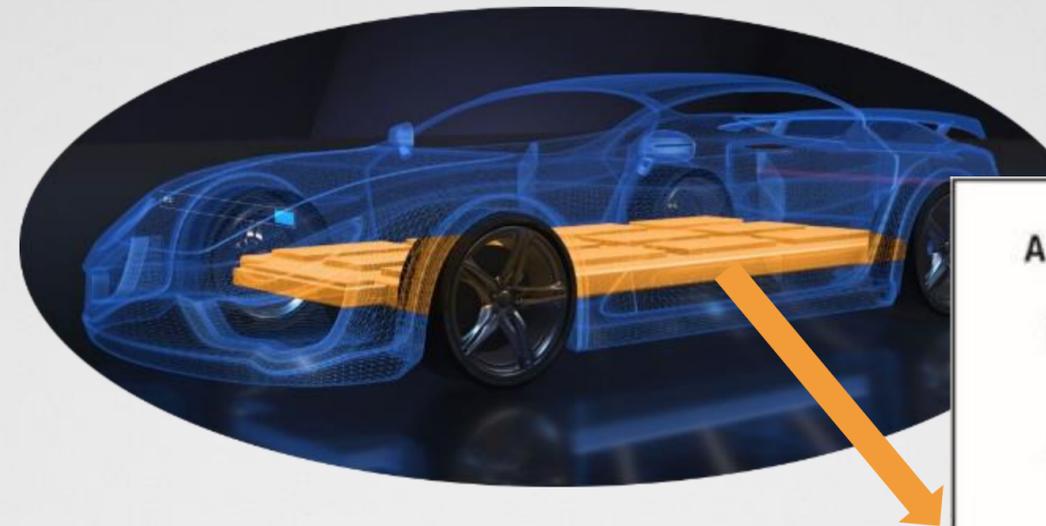


# Li-Ionen Batterien in der Elektromobilität

Ausführungen und Aufbauten typischer Varianten von Li-Ionen Batteriezellen

## Zylindrische Zellen

- In zylindrischen Zellen werden Streifen der einzelnen Materialien in einem zylindrischen Metallgehäuse aufgerollt. Vorteilhaft ist die automatisierte Fertigung, die auf der großen Produktionserfahrung mit Batterien für die Unterhaltungselektronik aufbaut, sowie die hohe Lebensdauererwartung. Nachteilig ist eine aufwendige Kühlung und der Verlust an Bauraum durch die sich ergebenden Zwischenräume.



## Pouchzellen

- In Pouchzellen werden rechteckige Lagen von negativen und positiven Elektroden und Ableitfolien mit entsprechenden Lagen von Separatoren wie in einem Sandwich gestapelt. Dadurch steigt die Kapazität gegenüber Rundzellen. Die Elektroden werden meist zu einer Seite abgeführt. Die Abdichtung erfolgt durch verschweißte Metallfolien. Pouchzellen lassen sich gut kühlen und stapeln.

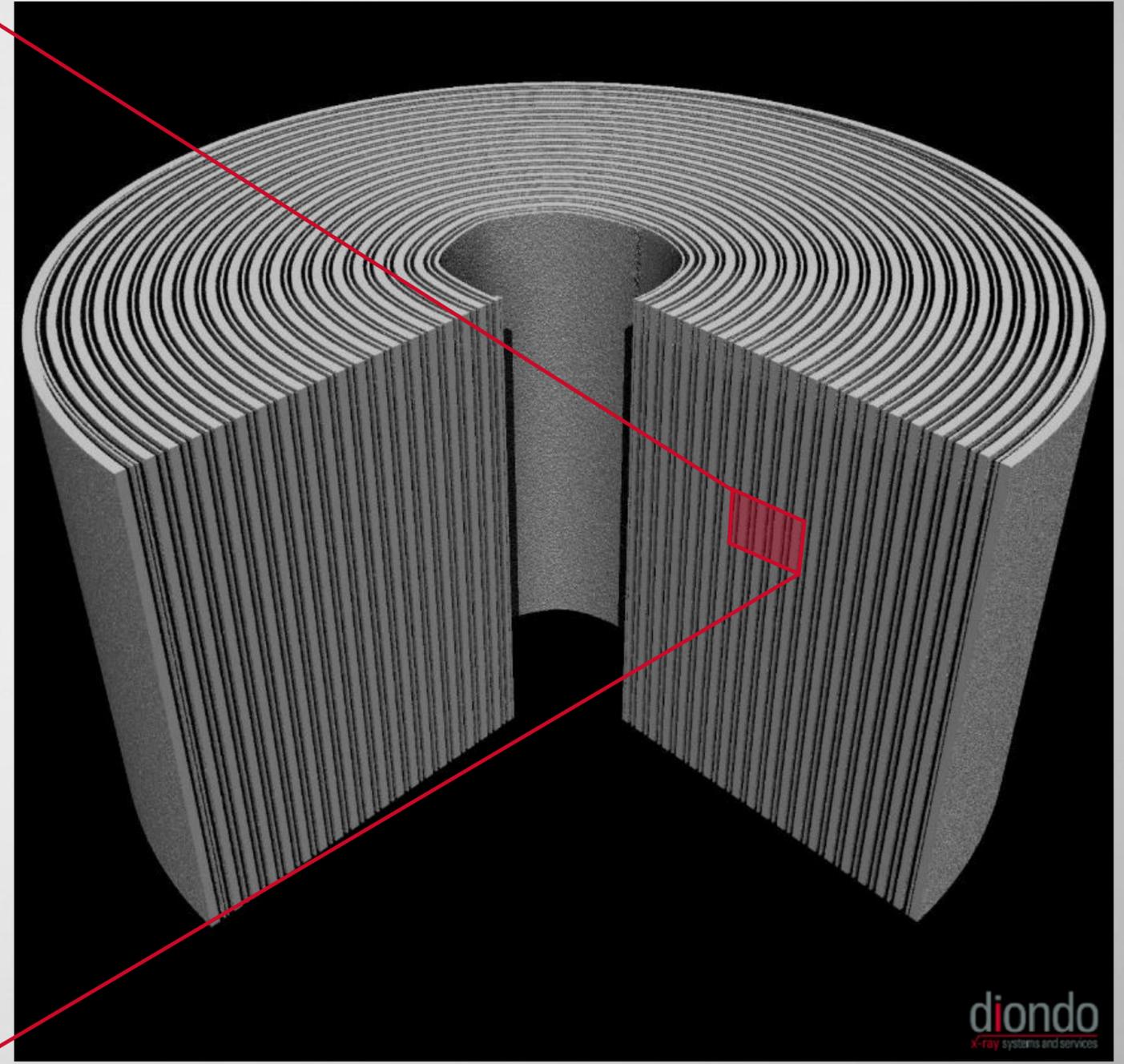
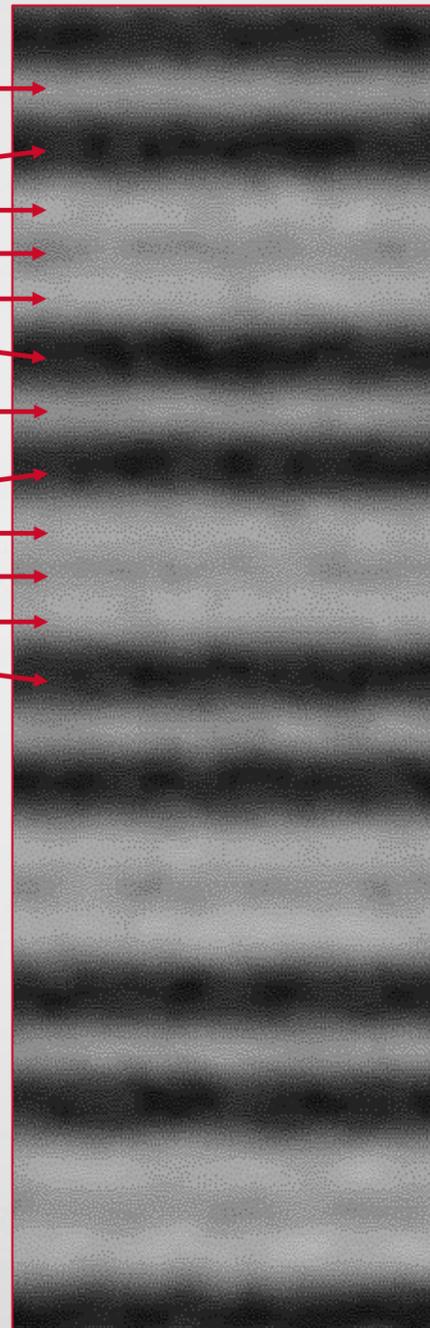
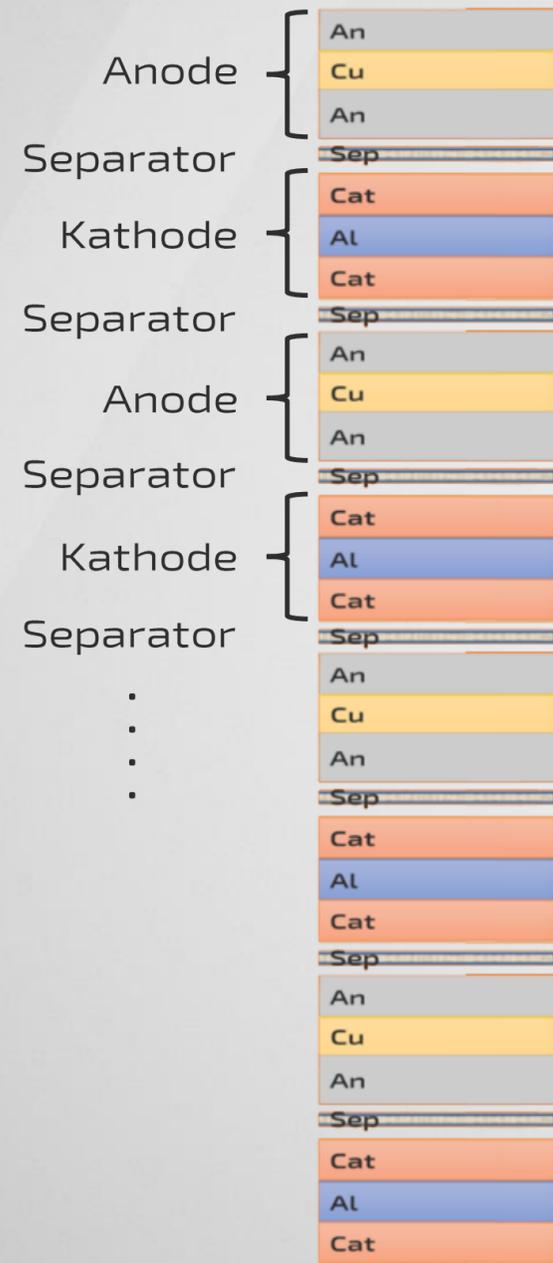
## Prismatische Zellen

- Prismatische Zellen sind ähnlich zu Pouchzellen aufgebaut. In einem Gehäuse aus einem festen Material, üblicherweise ein Metall, werden häufig mehrere Pouchzellen eingebaut und elektrisch miteinander verbunden. Der Aufbau von Batteriepaketen wird dadurch einfacher, die Kühleigenschaften sind aber schlechter.



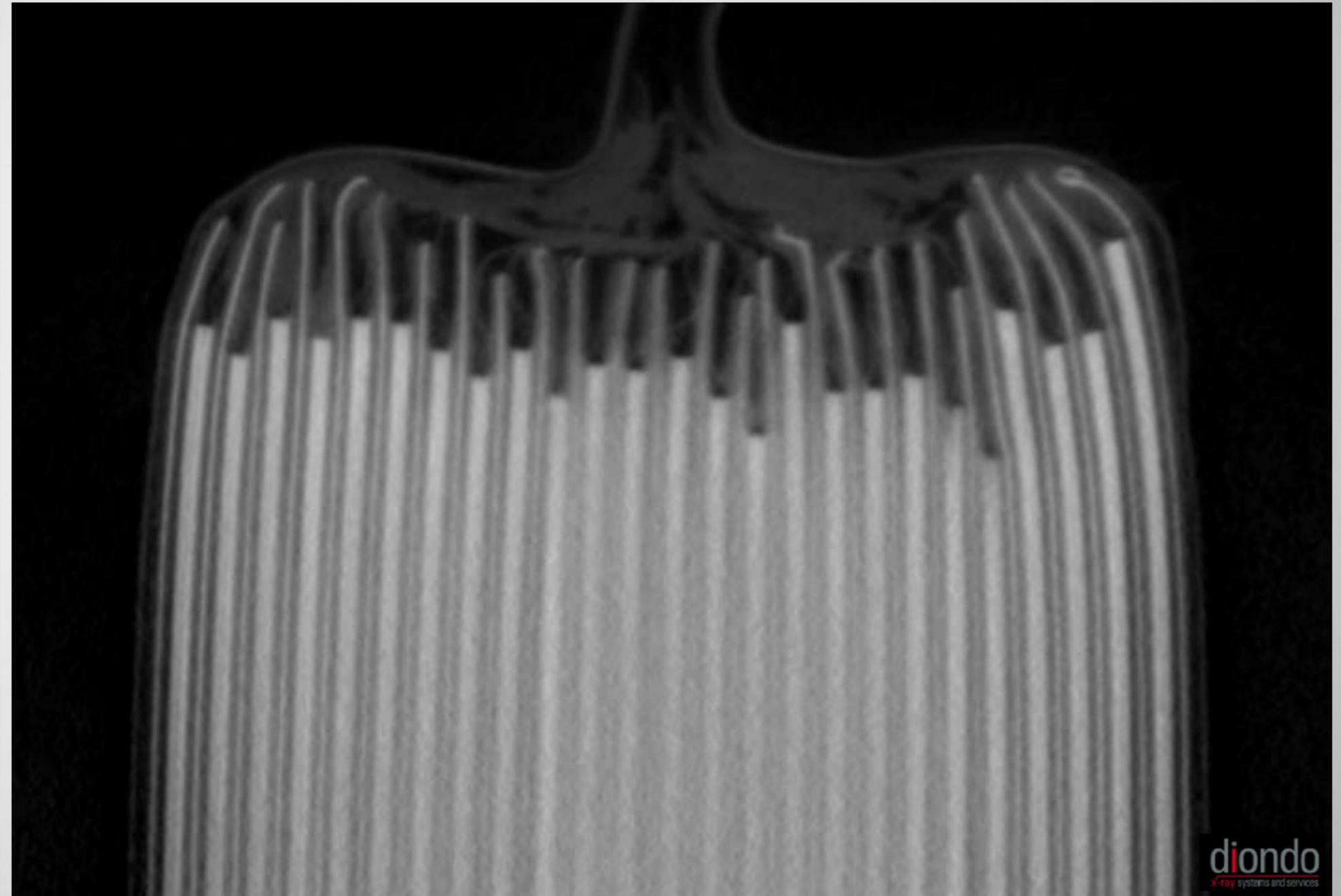
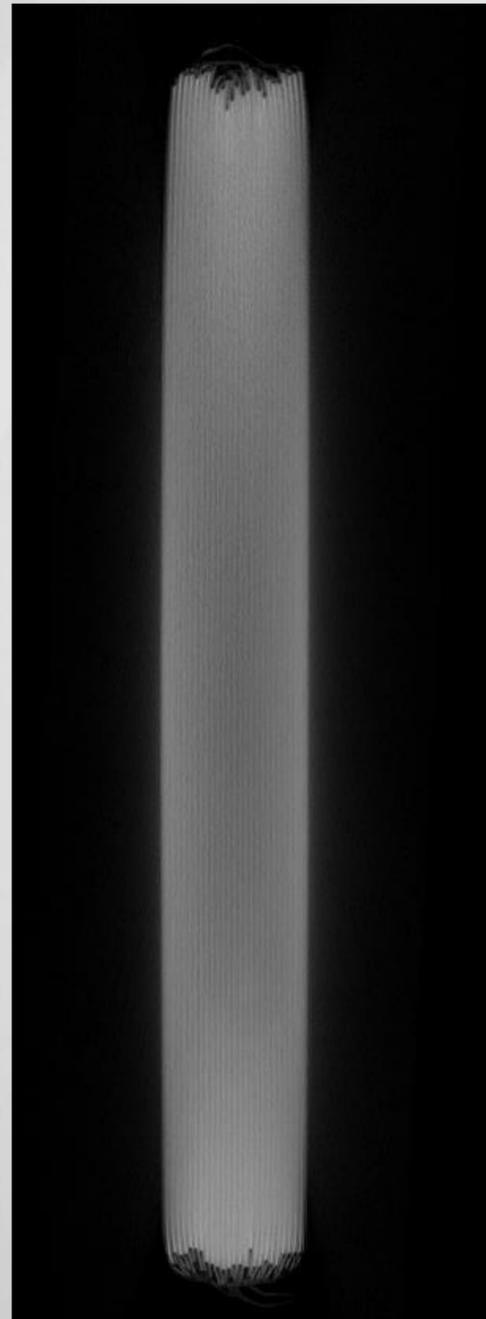
# Li-Ionen Batterien in der Elektromobilität

CT-Untersuchung zur Charakterisierung des Aufbaus einer Li-Ionen Batteriezelle – Rundzelle



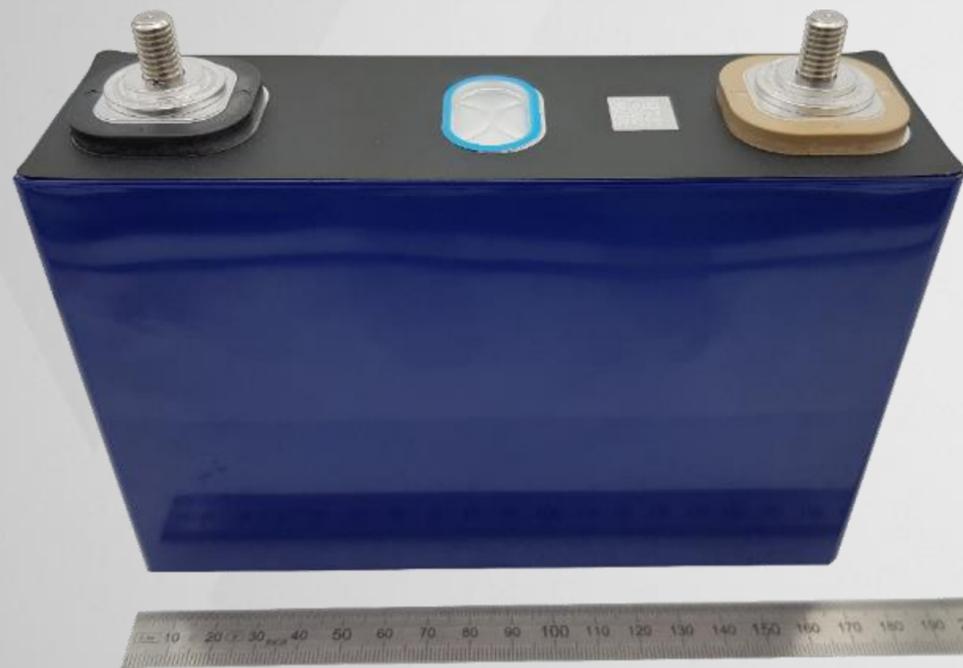
# Li-Ionen Batterien in der Elektromobilität

CT-Untersuchung zur Charakterisierung des Aufbaus einer Li-Ionen Batteriezelle – Pouchzelle



# Li-Ionen Batterien in der Elektromobilität

CT-Untersuchung zur Charakterisierung des Aufbaus einer Li-Ionen Batteriezelle – Pouchzelle

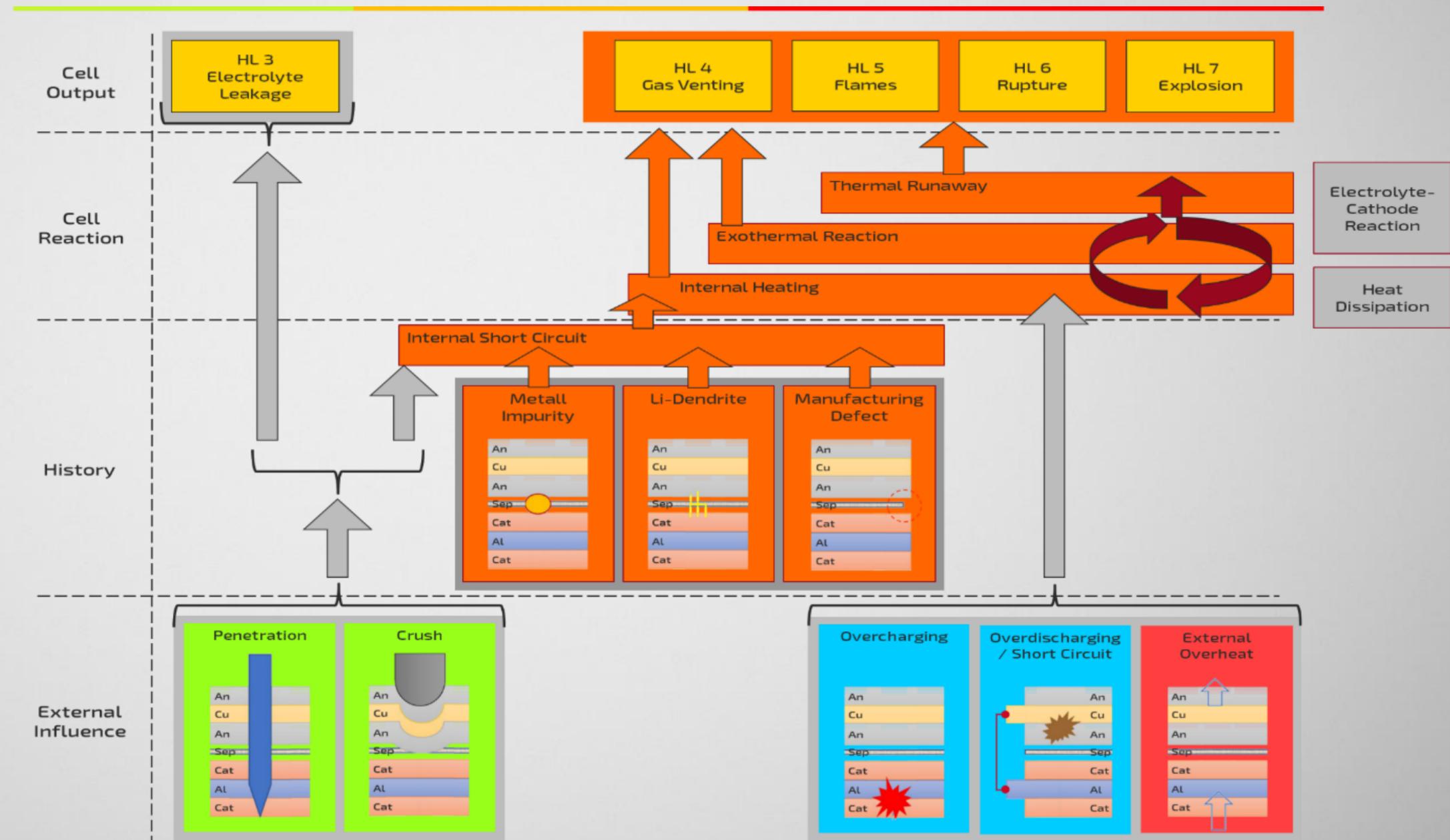


# Li-Ionen Batterien in der Elektromobilität

Die Sicherheit der Batteriezellen ist nach wie vor eine der Herausforderungen in der E-Mobilität

## Sicherheit der Batteriezellen

- Neben Reichweite, Anschaffungspreis und Ladeinfrastruktur kommt der Sicherung der Qualität von Li-Ionen Batterien für die E-Mobilität eine zentrale Bedeutung zu.
- Innere, vorwiegend produktionsbedingte und äußere, überwiegend betriebsbedingte Einflüsse können zu internen Kurzschlüssen und Überlastungen der Batteriezellen führen.
- Schlimmstenfalls bewirken diese Einflüsse eine Überhitzung der Zellen durch einen selbst verstärkenden wärmeproduzierenden Prozess („Thermal Runaway“) und letztlich zu einem Abbrand des betroffenen Fahrzeugs.
- Um produktionsbedingte Fehler möglichst auszuschließen, fordern Batteriehersteller und die Automobilindustrie zukünftig eine 100%-Kontrolle der gefertigten Batteriezellen mit der industriellen Computertomographie („High Speed Inline-CT“).

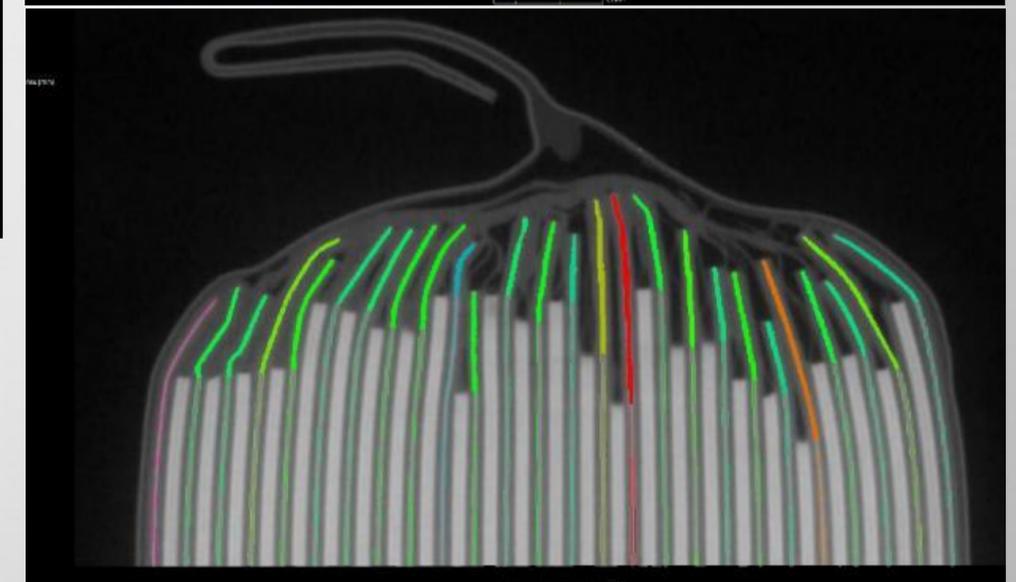
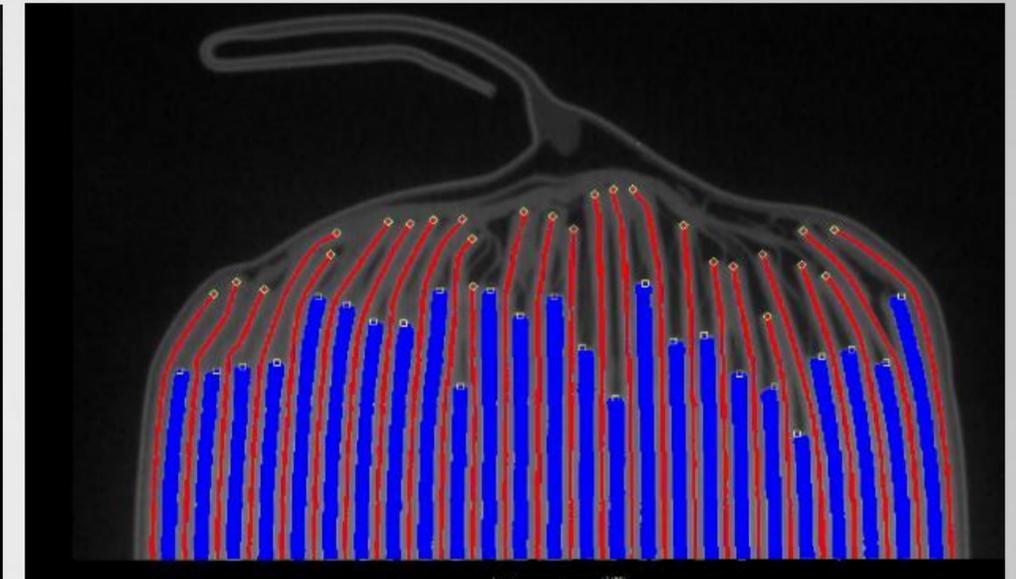
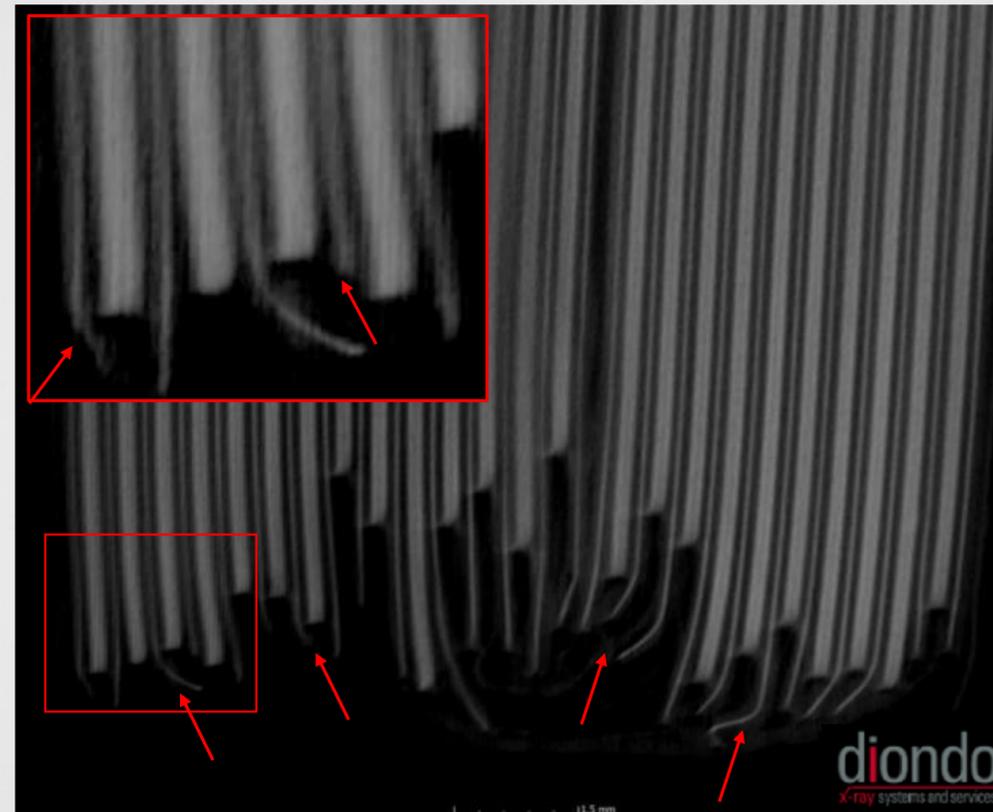


# Li-Ionen Batterien in der Elektromobilität

Fehlerbilder in Batteriezellen und deren Nachweis mittels industrieller Computertomographie

## Anodenüberhang

- Örtlich erhöhte Stromdichten an den Rändern der Anoden können zur Bildung von Dendriten und damit zu Li-Plating führen. Aus diesem Grund ist im Zelldesign ein Überhang der Anoden vorgesehen.
- In der Produktion können die Bleche aus Anoden, Kathoden und Separatoren relativ präzise gefertigt werden. Beim Stapeln der Bleche oder beim anschließenden Kalandrieren kann es jedoch zu einem translatorischen oder rotatorischen Versatz der Schichten zueinander kommen, was zu einem unterschiedlichen Überhang, geknickten Elektrodenblechen oder Abtrag führt.
- Durch CT-Untersuchungen und anschließende Vermessungen kann der Anodenüberhang charakterisiert und damit mögliche Risiken erkannt werden.

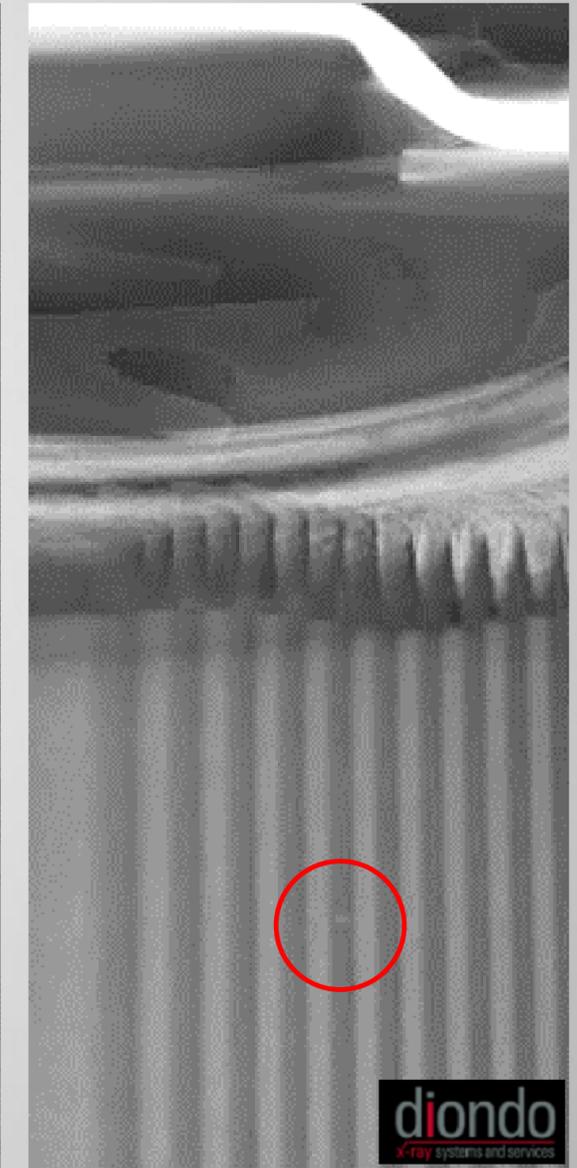
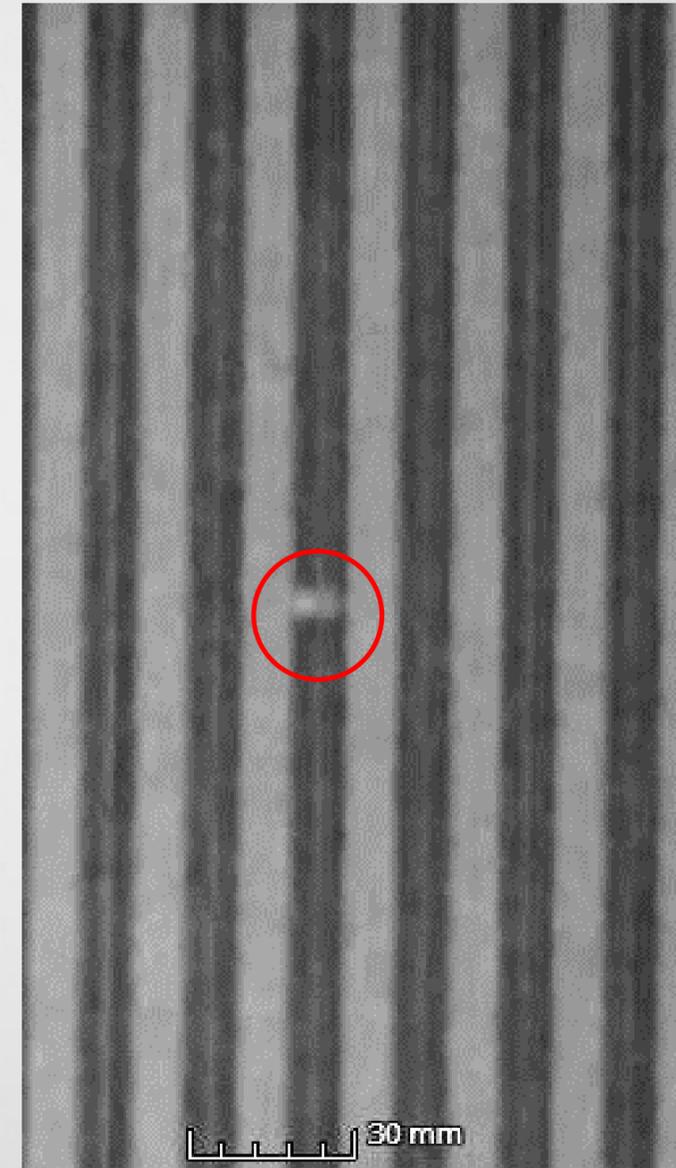
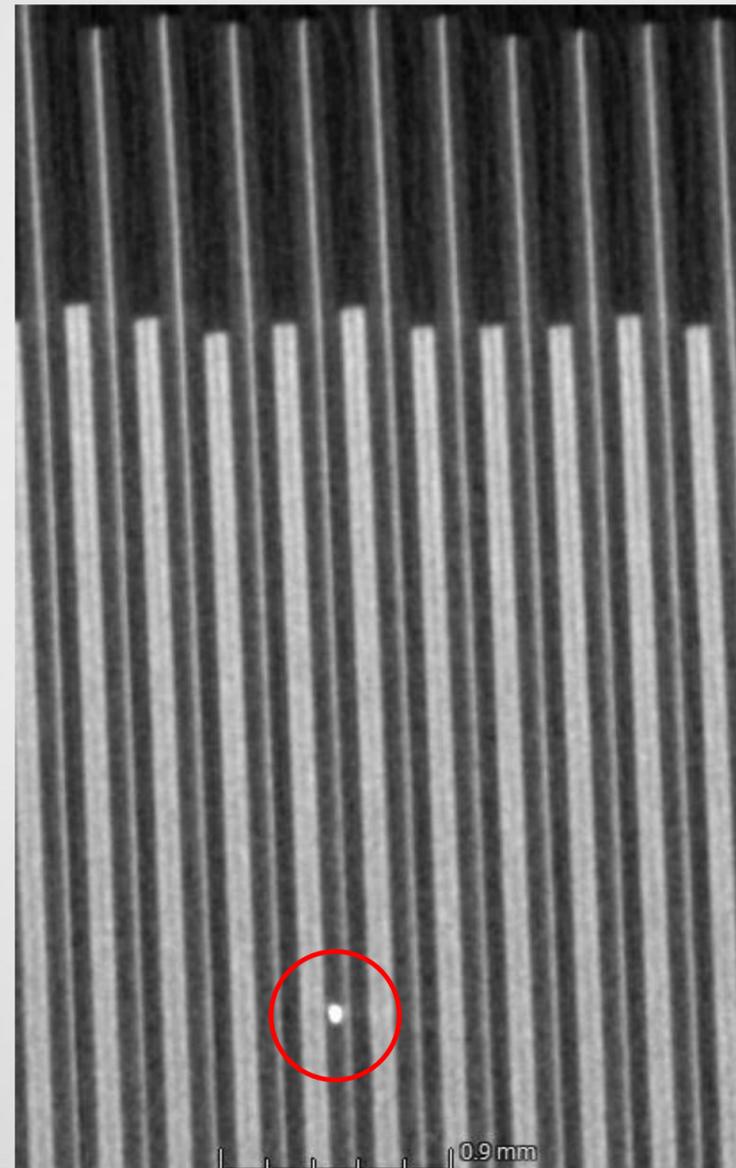


# Li-Ionen Batterien in der Elektromobilität

Fehlerbilder in Batteriezellen und deren Nachweis mittels industrieller Computertomographie

## Fremdmaterialpartikel

- Der Eintrag von Partikeln aus der Produktionsumgebung stellt ein sehr hohes Risiko für die Batteriezellen dar.
- Gelangen Partikel zwischen die Stapel von Anoden, Separatoren und Kathoden, kann ein Separator beschädigt werden. Leitfähige Partikel können der Ausgangspunkt für die Bildung von Dendriten sein. In beiden Fällen kann es im späteren Betrieb zu Kurzschlüssen in der betroffenen Zelle kommen.
- Die Fremdstoffpartikel bestehen häufig aus den in der Zellproduktion vorkommenden Materialien, zu denen in der Regel Aluminium, Kupfer, Edelstahl, NMC-Material aus der Kathoden-beschichtung und Kunststoffe gehören. Die Partikel können durch abrasive Prozesse der Werkzeuge oder als Ergebnis der mechanischen Trennung der Bänder entstehen.
- Partikel mit einer Größe von etwa 50-100  $\mu\text{m}$  sind als kritisch anzusehen.

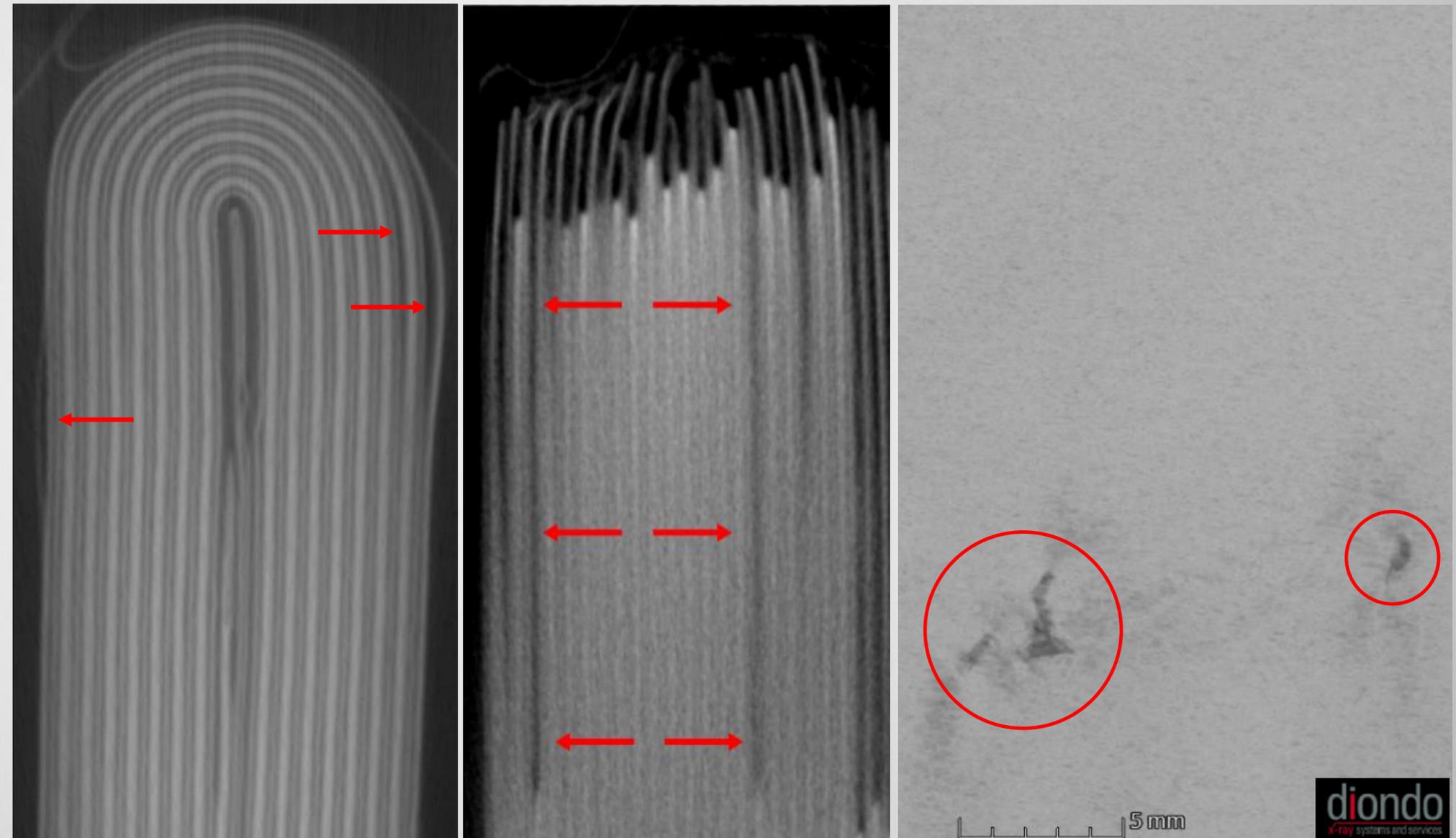


# Li-Ionen Batterien in der Elektromobilität

Fehlerbilder in Batteriezellen und deren Nachweis mittels industrieller Computertomographie

## Beschichtungsdefekte / Delaminationen

- Durch prozessbedingte Einflüsse wie z. B. die Parameter bei der Trocknung oder mögliche Verunreinigungen der metallischen Oberflächen von Anoden- und Kathodenblechen kann es zu Delaminationen der Beschichtungen kommen, die durch Umformprozesse oder Temperaturwechsel im späteren Betrieb verstärkt werden können.

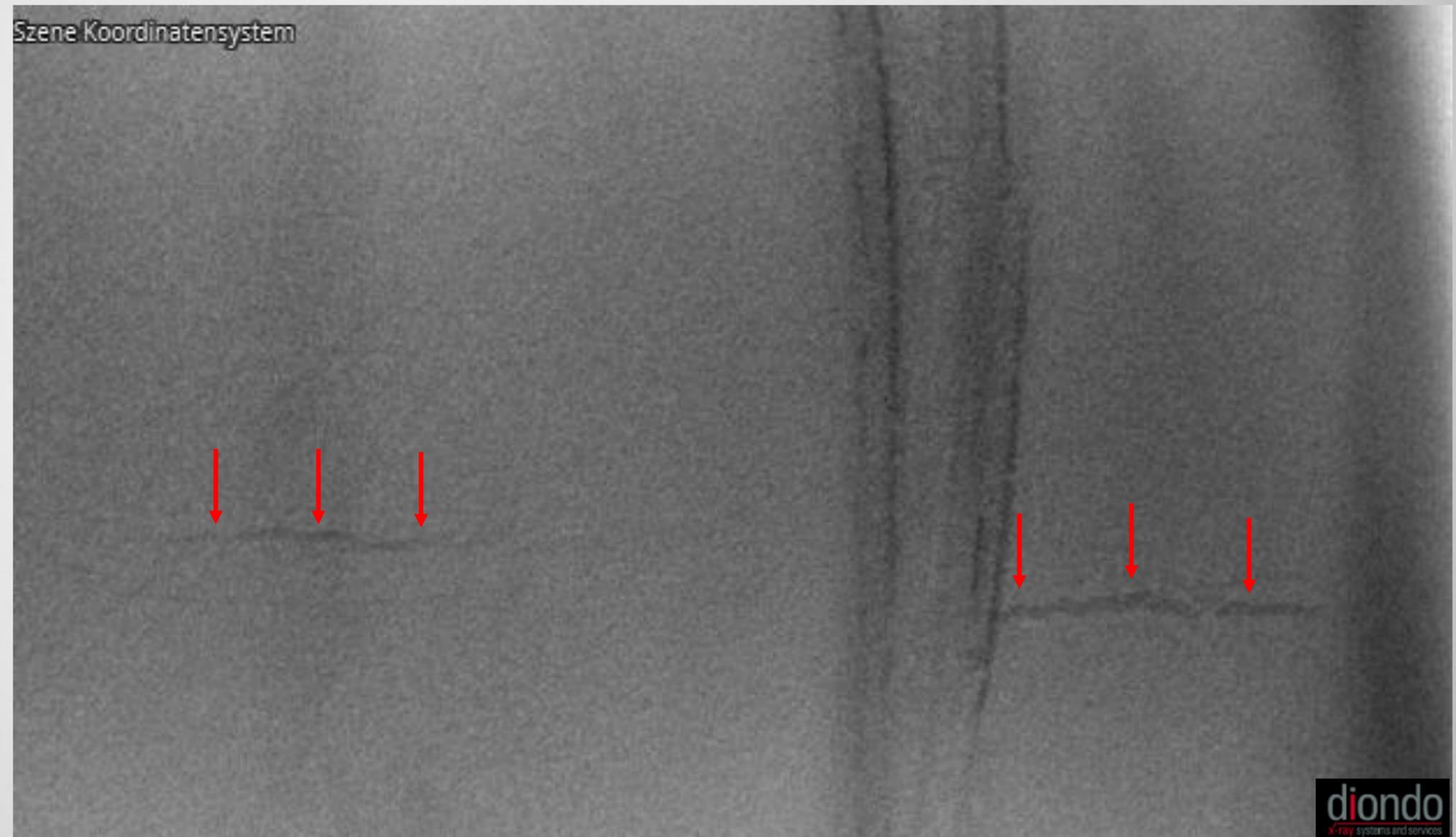


# Li-Ionen Batterien in der Elektromobilität

Fehlerbilder in Batteriezellen und deren Nachweis mittels industrieller Computertomographie

## Risse in der NMC-Beschichtung:

- In der Produktion können Risse in der NMC-Beschichtung der Kathode durch Trocknungsprozesse der nass abgeschiedenen Beschichtung oder durch Umformungsprozesse nach der Trocknung entstehen.
- Risse können auch durch zyklische Belastungen während der Lade-/Entladezyklen oder durch thermische Ausdehnung im späteren Betrieb der Zelle entstehen.

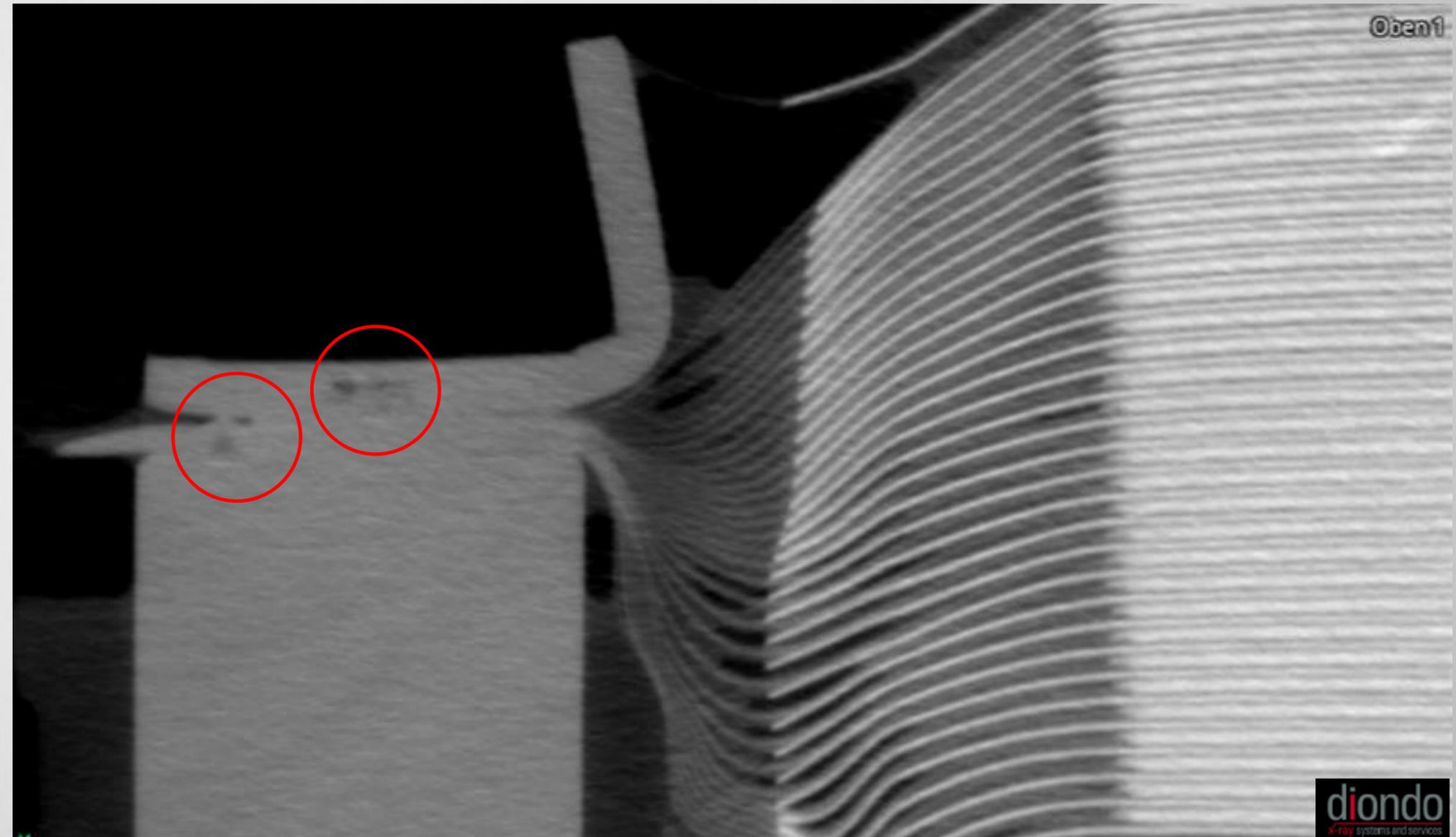


# Li-Ionen Batterien in der Elektromobilität

Fehlerbilder in Batteriezellen und deren Nachweis mittels industrieller Computertomographie

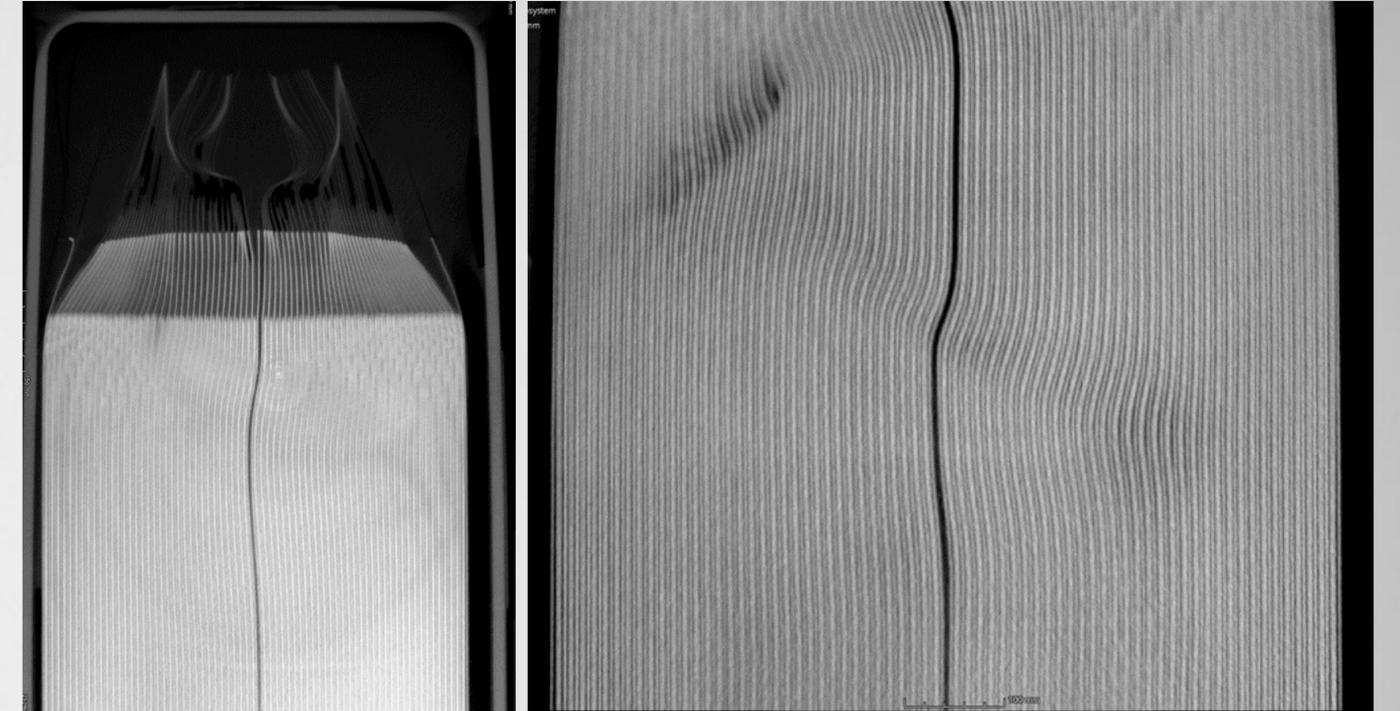
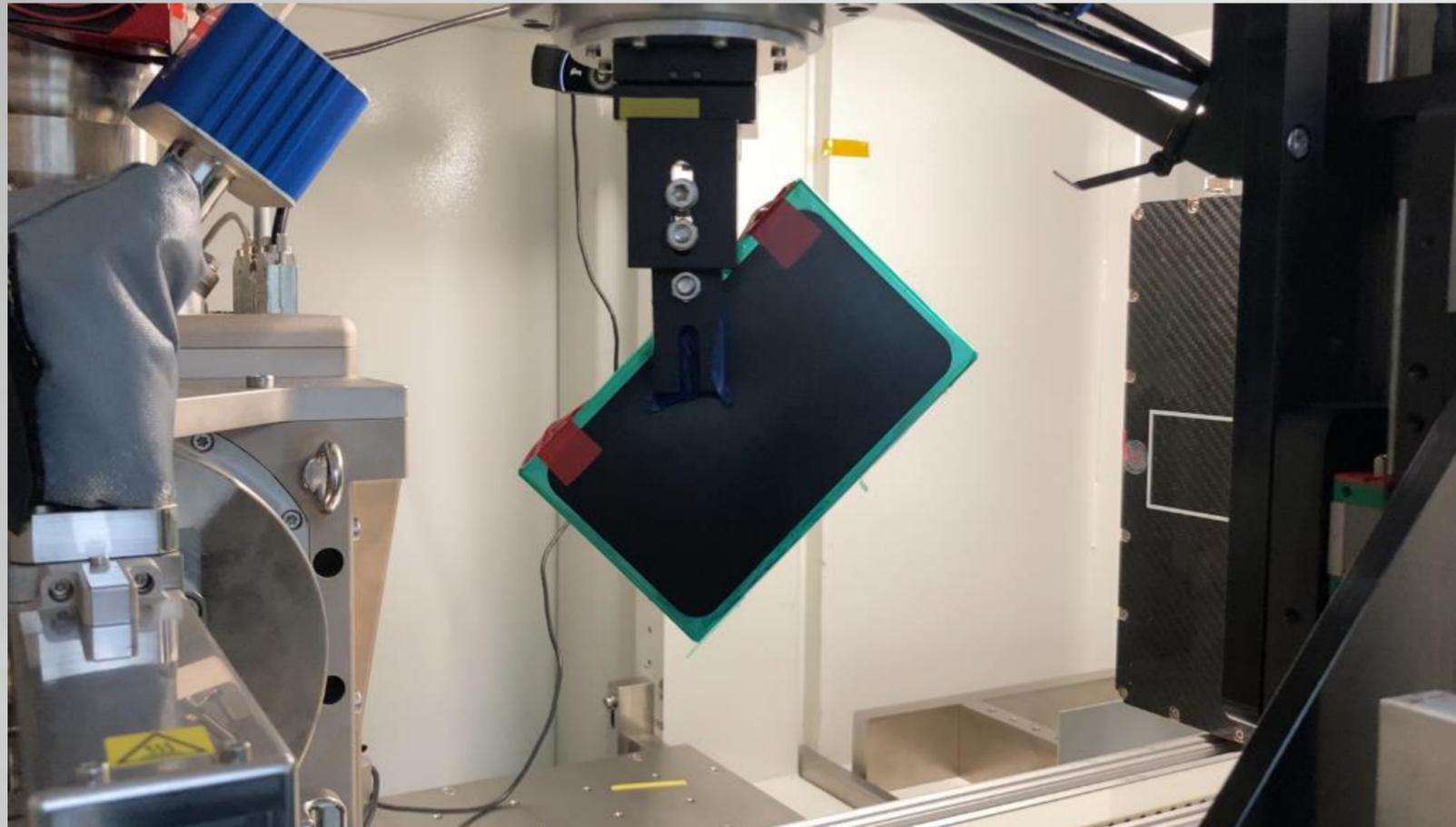
## Schweißfehler an Kontaktfahnen:

- Die Kontaktfahnen der Batteriezelle sind entscheidend für die elektrische Verbindung der einzelnen Schichten in der Zelle.
- Schweißfehler können zu einer Erhöhung des elektrischen Widerstands und damit zu Wärmeproblemen durch elektrischen Leistungsverlust führen.
- Mechanische Belastungen durch Vibrationen oder mechanische Stöße können zu Rissen oder Brüchen in den fehlerhaften Schweißnähten führen.
- Im schlimmsten Fall können durch Fehler in den Schweißnähten Kurzschlüsse entstehen, die zu erhöhtem Stromfluss und Überhitzung führen können.



# Li-Ionen Batterien in der Elektromobilität

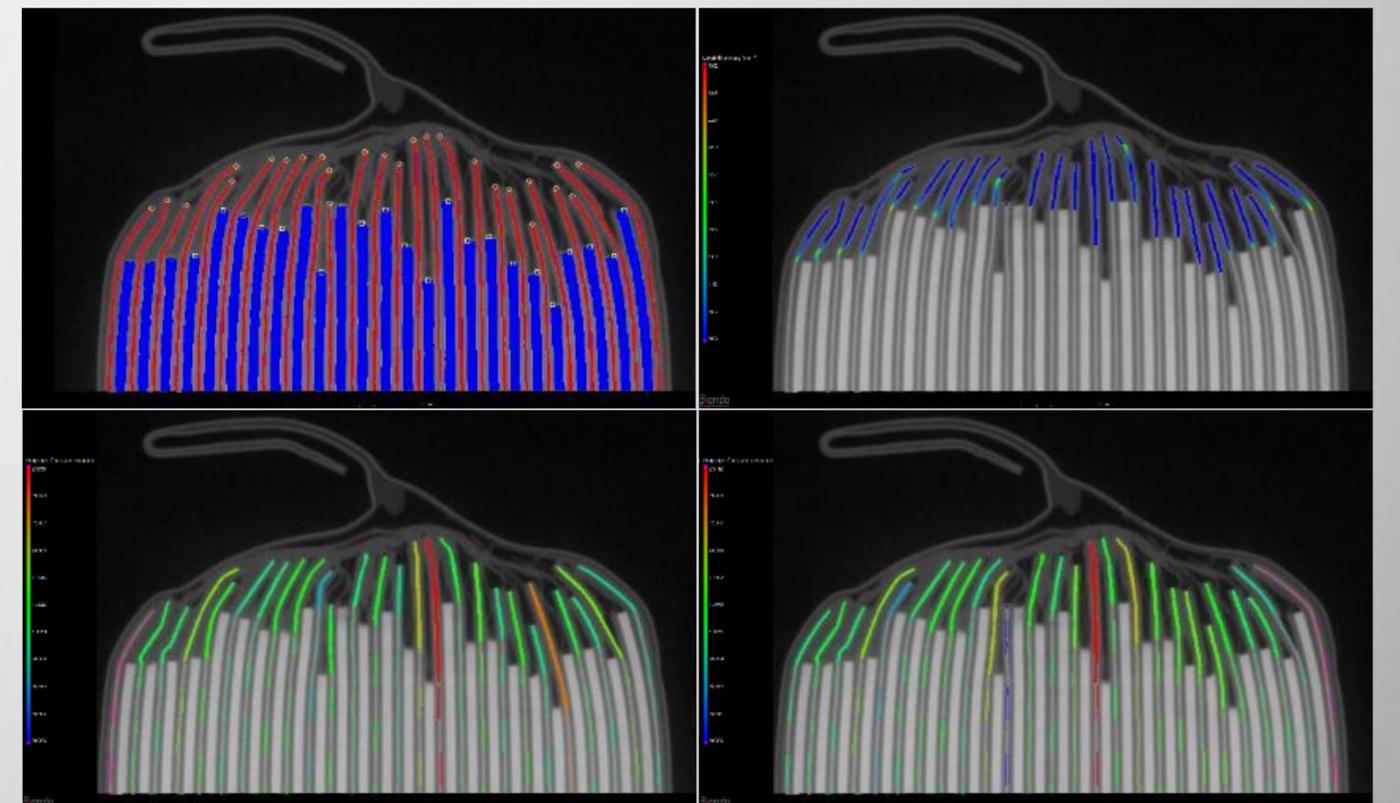
High-Speed InLine-CT zur 100%-Prüfung von Batteriezellen in der Serienproduktion



## Beispiel für eine High-Speed CT an einer prismatischen Batteriezelle

- Röntgenquelle: Metaljet-Röntgenquelle mit  $E = 160 \text{ keV}$  und  $P = 1.000 \text{ W}$
- Röntgendetektor: Photon Counting Detektor (PCD)
- Framerate: 1.000 Röntgenprojektionen pro Sekunde
- Dauer der CT: 1-2 Sekunden für einen Corner Scan zur Bewertung des Anodenüberhangs

Die Arbeiten zur High-Speed InLine-CT laufen in Kooperation mit unserem Gesellschafter:



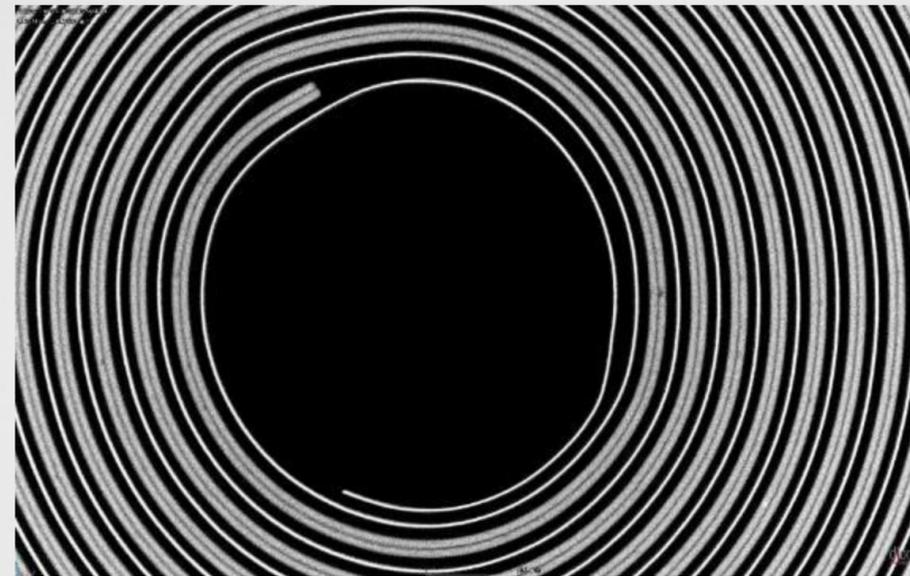
# Li-Ionen Batterien in der Elektromobilität

Recycling – Veränderungen in Batteriezellen auf Grund von Alterungseffekten

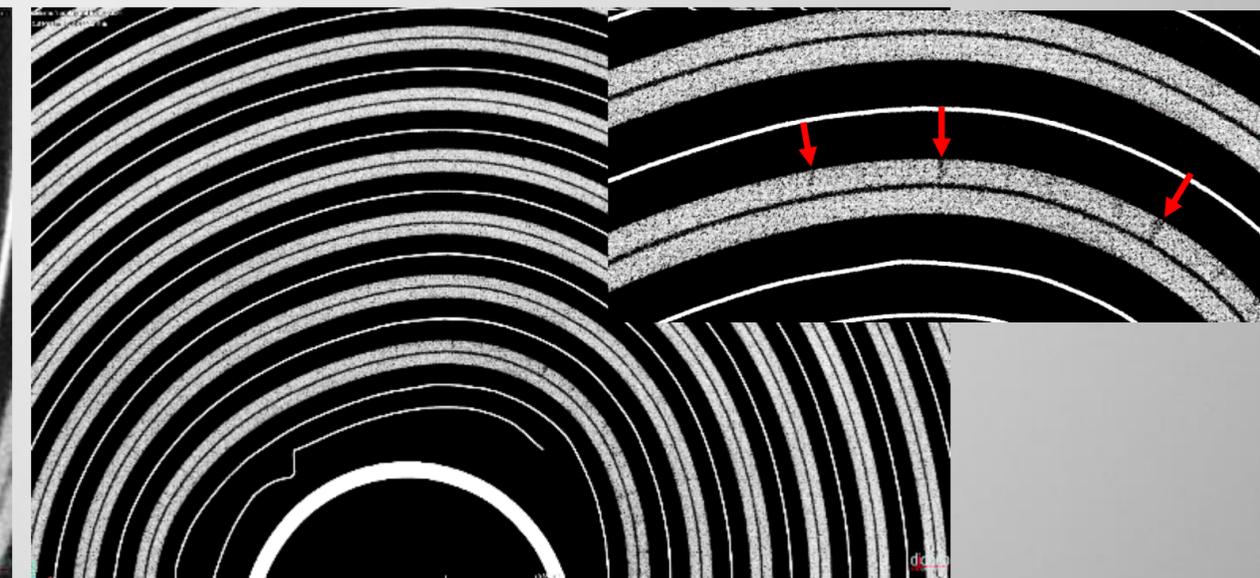
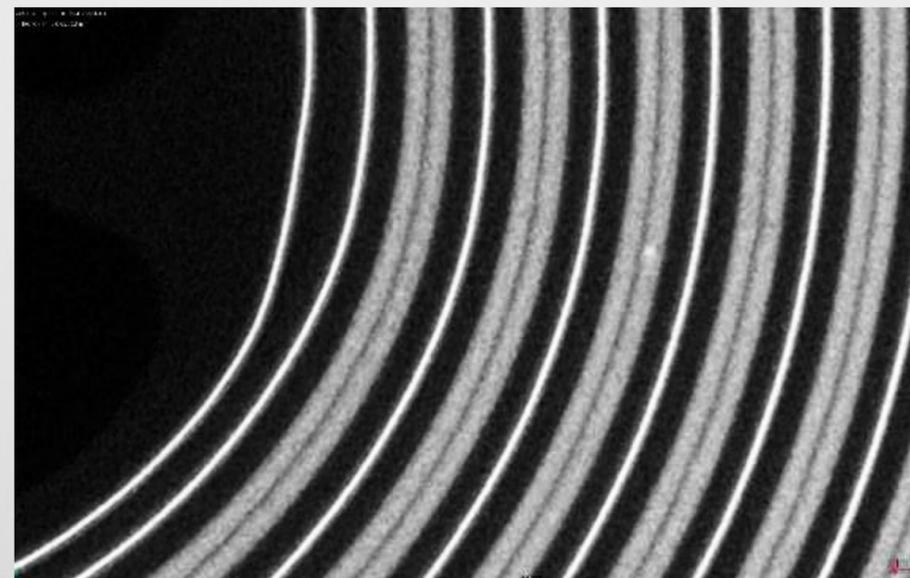
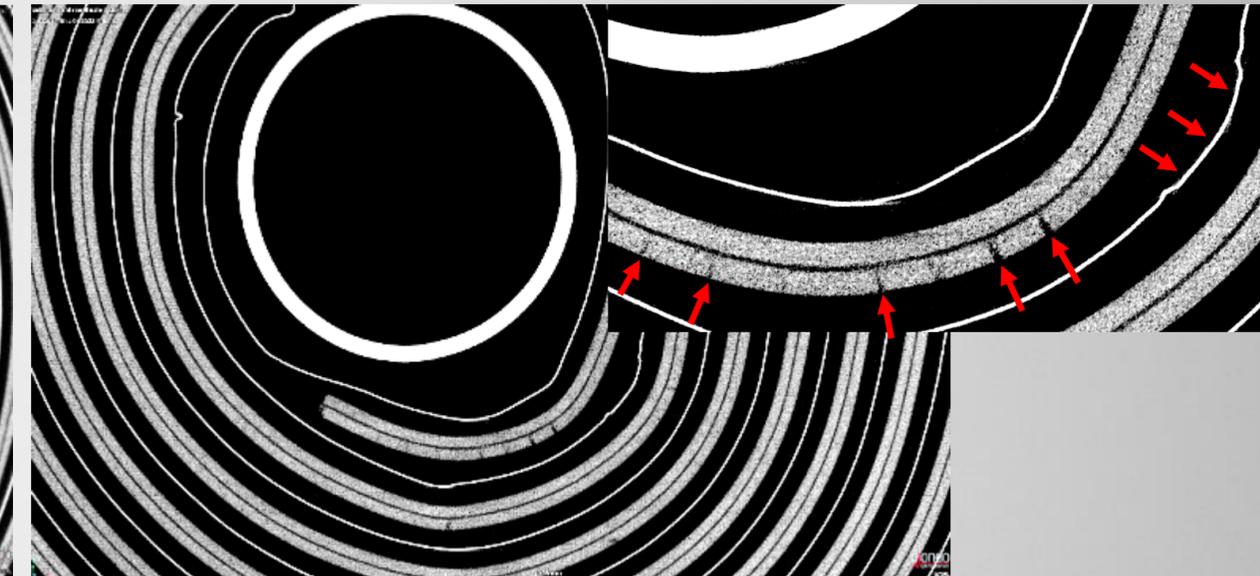
## Mögliche Alterungseffekte sind:

- Kapazitätsverlust  
→ durch Verluste an aktivem Lithium sowie Zunahme des Innenwiderstandes
- Erhöhung des Innenwiderstandes  
→ durch Wachstum der SEI-Schicht (Solid Electrolyte Interface), Bildung von Nebenprodukten und Abbau des Elektrolyten
- Mechanische Degradation  
→ durch zyklische Expansion und Kontraktion der Elektroden während des Lade-/Entladevorgangs
- Verlust von aktivem Material  
→ durch Degradation und Elektrolytzersetzung
- SEI-Schichtbildung  
→ Erhöhung des Innenwiderstandes
- Lithium-Plating  
→ insb. bei Überladung und Tieftemperaturladung
- Dendriten-Bildung  
→ Li-Dendriten auf Anode bewirken Kurzschlüsse
- Elektrolyt-Zersetzung  
→ führt zu Gasbildung und Druckerhöhung

Neue 18650-Rundzelle



Rundzelle nach Alterung zeigt Beschichtungsrisse und Verformungen



# Agenda

Einsatz röntgenbasierter Prüftechnologien für die nachhaltige Energietechnik der Zukunft

1

## diondo GmbH – Innovation durch Erfahrung

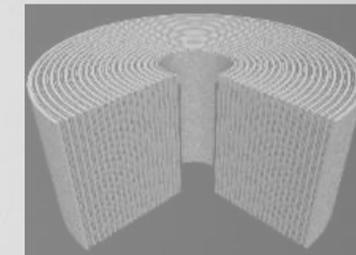
– Eine kurze Unternehmensdarstellung der CT-Systeme und CT-Dienstleistungen



2

## Applikation 1 – Li-Ionen Batterien in der Elektromobilität

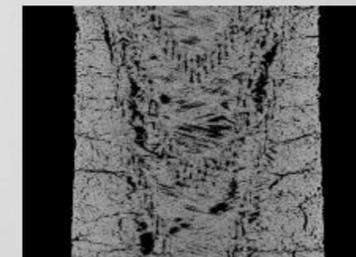
– Einsatz der CT zur Qualitätssicherung und Fehleranalyse an Li-Ionen Batteriezellen



3

## Applikation 2 – Keramische Verbundwerkstoffe (CMC)

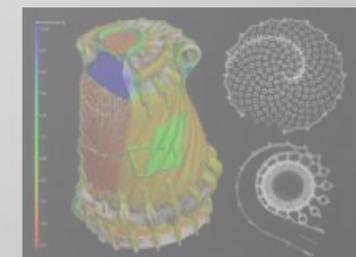
– CT-basierte Charakterisierung von CMC-Komponenten am Beispiel eines APU-Mufflers  
– Rückkopplung per CT erfasster „as-built“ Informationen in die CAx-Kette



4

## Applikation 3 – Hochenergie-Computertomographie (LINAC CT)

– Untersuchungen an metallischen Bauteilen aus der Elektromobilität  
– LINAC CT zur Qualitätssicherung in der metallischen additiven Fertigung



# CT-Untersuchungen an keramischen Verbundwerkstoffen (CMC)

Was sind keramische Verbundstrukturen (CMC = Ceramic Matrix Composites)?



Bild-Quellen: Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.

„Der typische Einsatzbereich keramischer Verbundwerkstoffe liegt dort, wo Metalle (z.B. Superlegierungen) aufgrund der hohen thermomechanischen Belastungen nicht mehr in Betracht kommen“ (Walter Krenkel)

## Werkstoffklassen

### Oxidische CMC-Werkstoffe

- WHIPOX® (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Fasern, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Matrix)
- OXIPOL® (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Fasern, SiOC-Matrix)
- Herstellung:  
Polymerinfiltration & Pyrolyse (PIP)

### Nichtoxidische CMC-Werkstoffe

- C/C-SiC (C-Fasern, C-SiC-Matrix)
- SiC/SiC (SiC-Fasern mit Beschichtung (BN, SiC, C),  
SiC- oder SiCN-Matrix)
- Herstellung:  
Flüssigsilizierverfahren (LSI)  
Polymerinfiltration & Pyrolyse (PIP)

## Eigenschaften von CMC-Werkstoffen

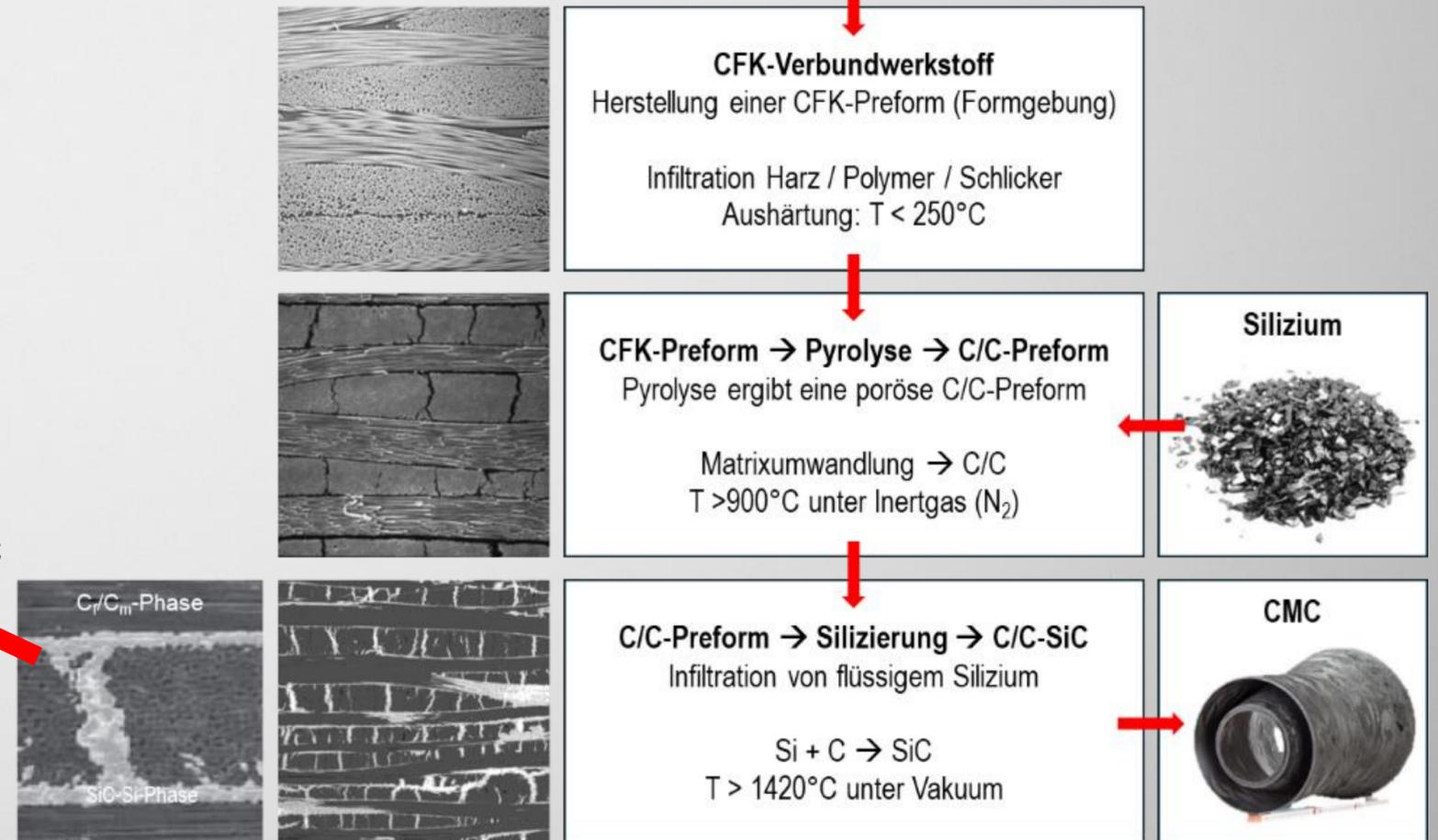
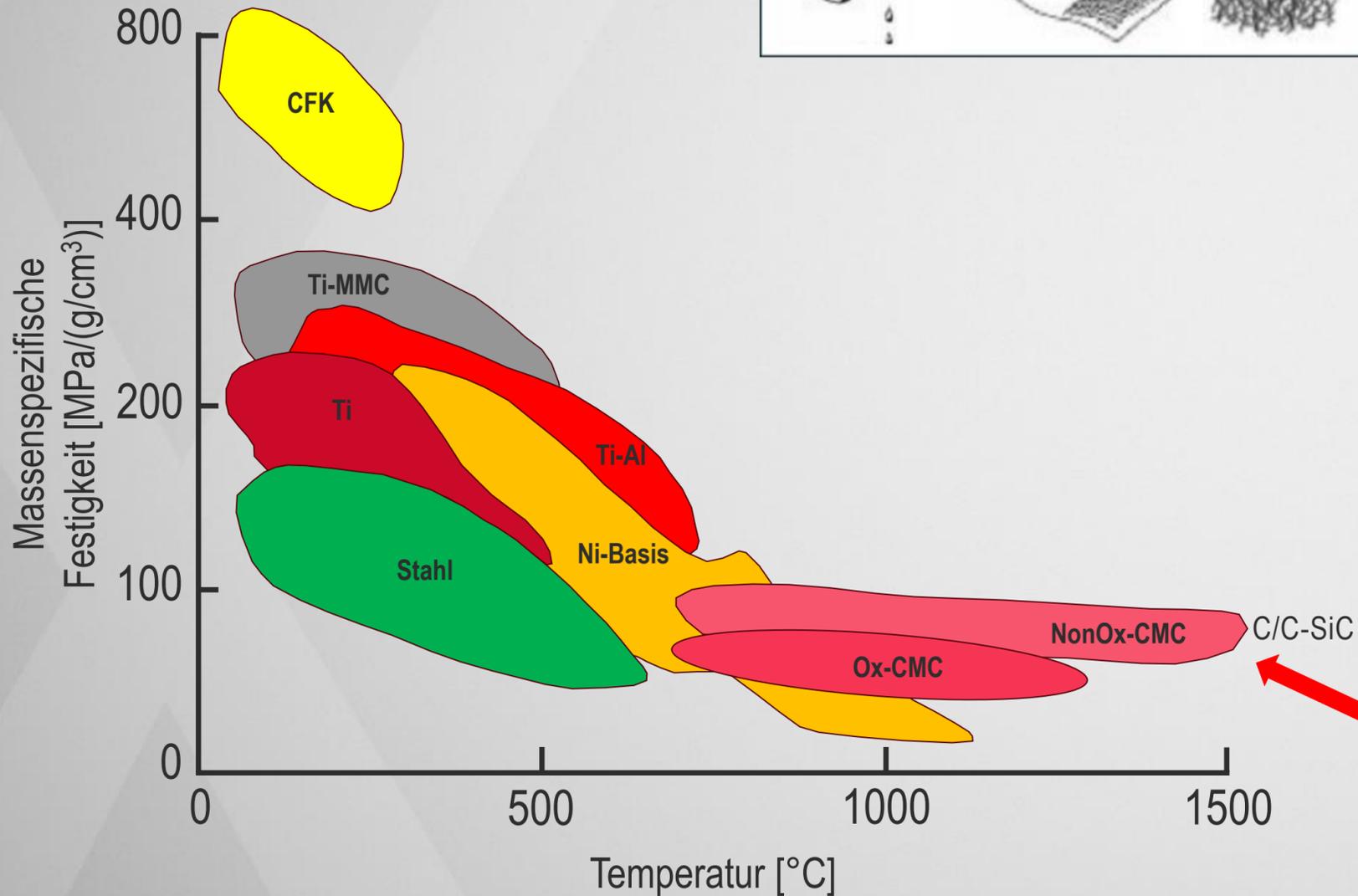
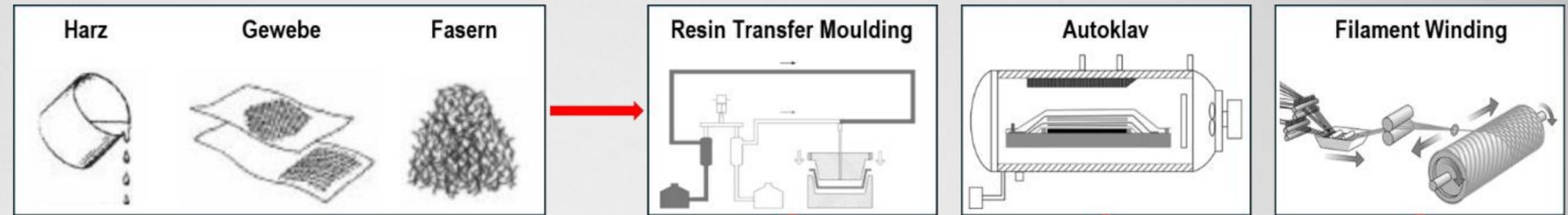
- Hochtemperatur Beständigkeit
- Schadenstoleranz
- Thermoschockbeständigkeit
- Oxidationsbeständigkeit (Ox-Ox)
- niedrige thermische Ausdehnung
- Abrasionsbeständigkeit
- konstante mechanische Eigenschaften über weiten T-Bereich

# CT-Untersuchungen an keramischen Verbundwerkstoffen (CMC)

Was sind keramische Verbundstrukturen (CMC = Ceramic Matrix Composites)?

## Prozess zur Fertigung eines CMC-Bauteils

(Beispiel: LSI-Prozess zur C/C-SiC Herstellung)



# CT-Untersuchungen an keramischen Verbundwerkstoffen (CMC)

KermiHt-Projekt – Substitution eines Metallrohres im Airbus APU-Muffler durch ein CMC-Innenrohr

Supported by:



on the basis of a decision  
by the German Bundestag



# CT-Untersuchungen an keramischen Verbundwerkstoffen (CMC)

Darstellung innerer Merkmale, Bestimmung von Faseranteil und Faserorientierung, In-Situ CT



Mikro CT

240 keV, 3k x3k Detektor, Auflösung ~1  $\mu\text{m}$ ,  $\varnothing$ : 800 mm



High Energy CT

450 keV, 3k x3k Flachdetektor, 4k-Zeile, H: 5 m,  $\varnothing$ : 1 m

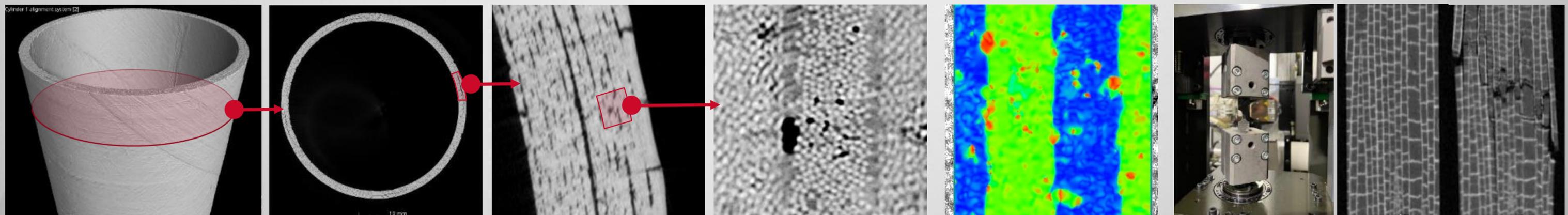


Linac CT

6 MeV, 3k x3k Detektor, Durchdringung: 200 mm (Fe)

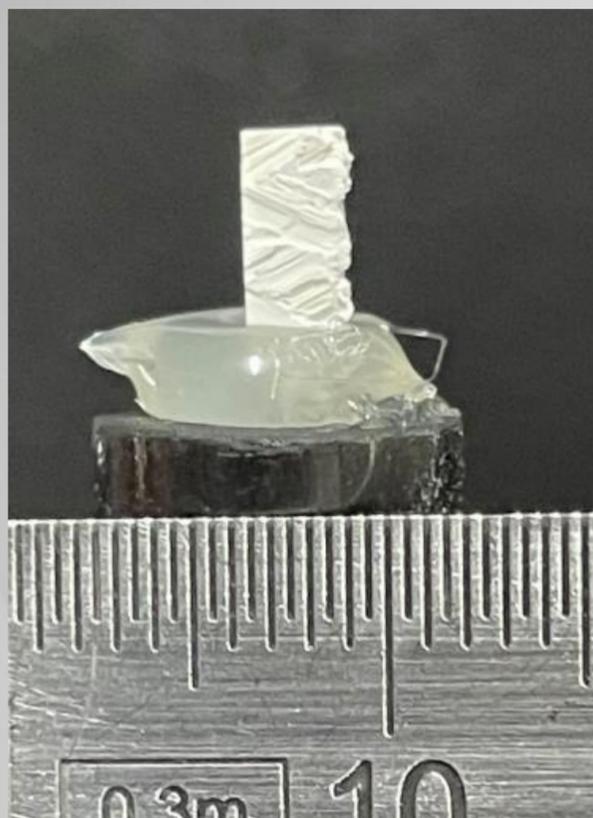
## Industrielle CT ist eine leistungsfähige Methode zur zerstörungsfreien Charakterisierung von Bauteilen aus keramischen Verbundwerkstoffen

- Nachweis von Merkmalen in den Bauteilen wie Risse, Poren und Delaminationen, Bestimmung des Faseranteils und der Faserorientierung, Vermessung der Bauteil-Geometrie
- In-Situ CT mit mechanischer Belastung zum besseren Verständnis der Auswirkungen von mechanischen Beanspruchungen auf den CMC-Werkstoff
- Erzeugung von Eingangsdaten für die Werkstoffsimulation sowie Abgleich der Ergebnisse von Werkstoffsimulationen mit der realen Beschaffenheit des Bauteils

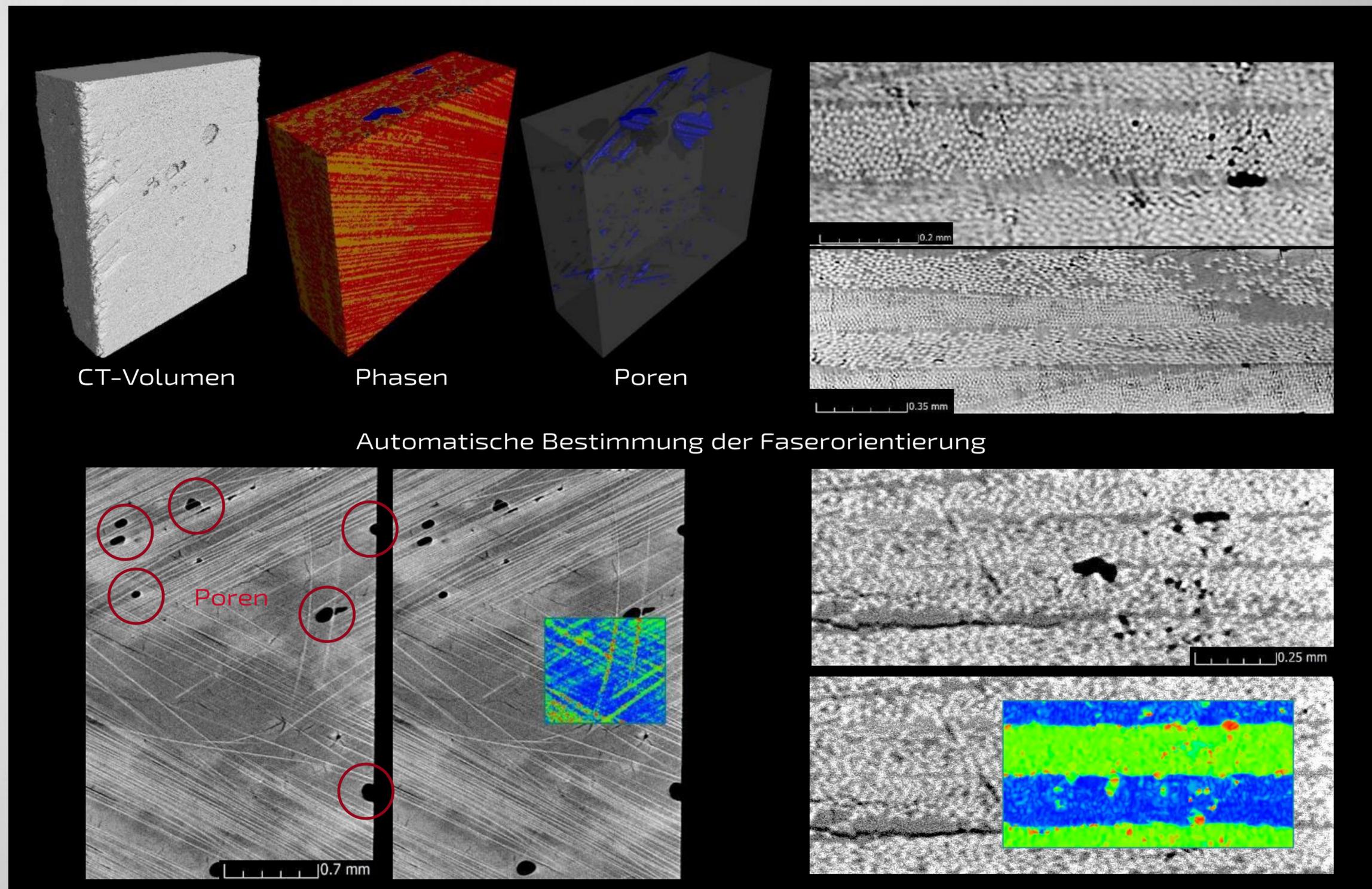


# CT-Untersuchungen an keramischen Verbundwerkstoffen (CMC)

Mikro-CT Untersuchungen zur Charakterisierung der verschiedenen Phasen und Poren in Materialproben



- Röntgenenergie: 100 keV
- Voxelgröße: 2  $\mu\text{m}$



# CT-Untersuchungen an keramischen Verbundwerkstoffen (CMC)

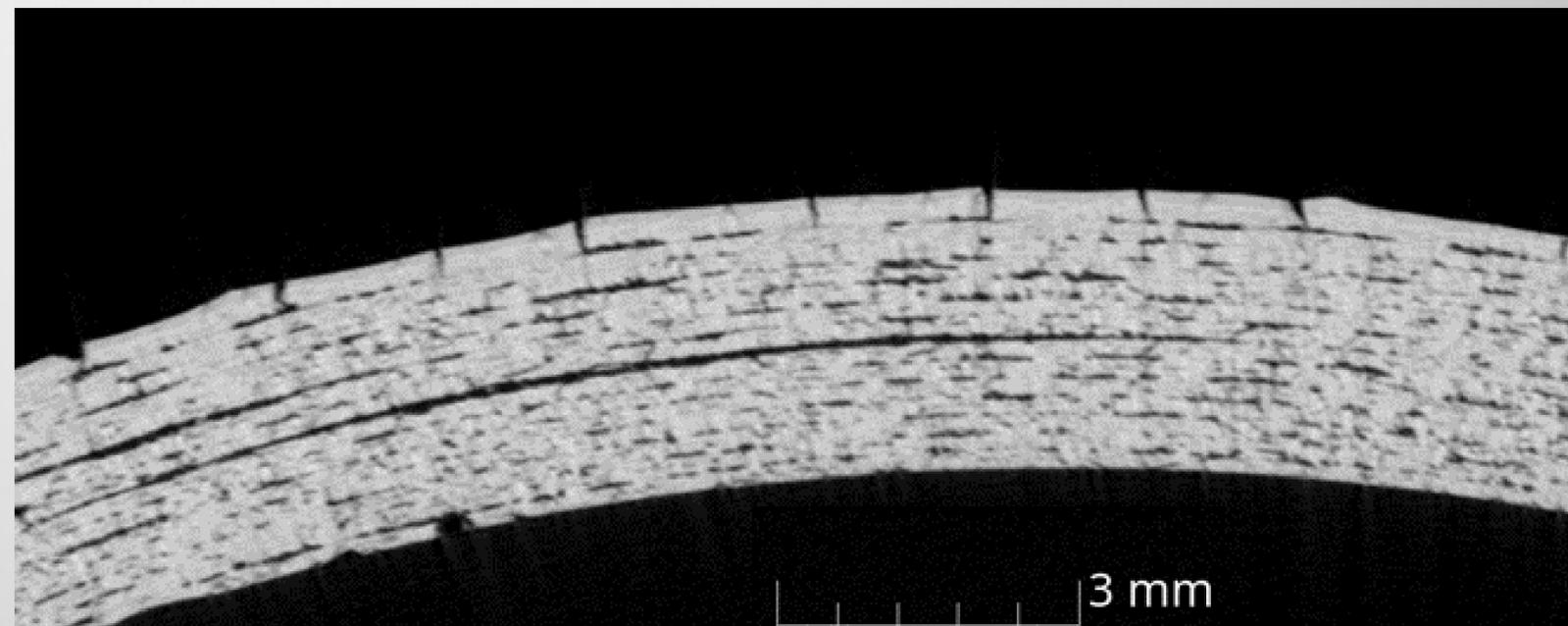
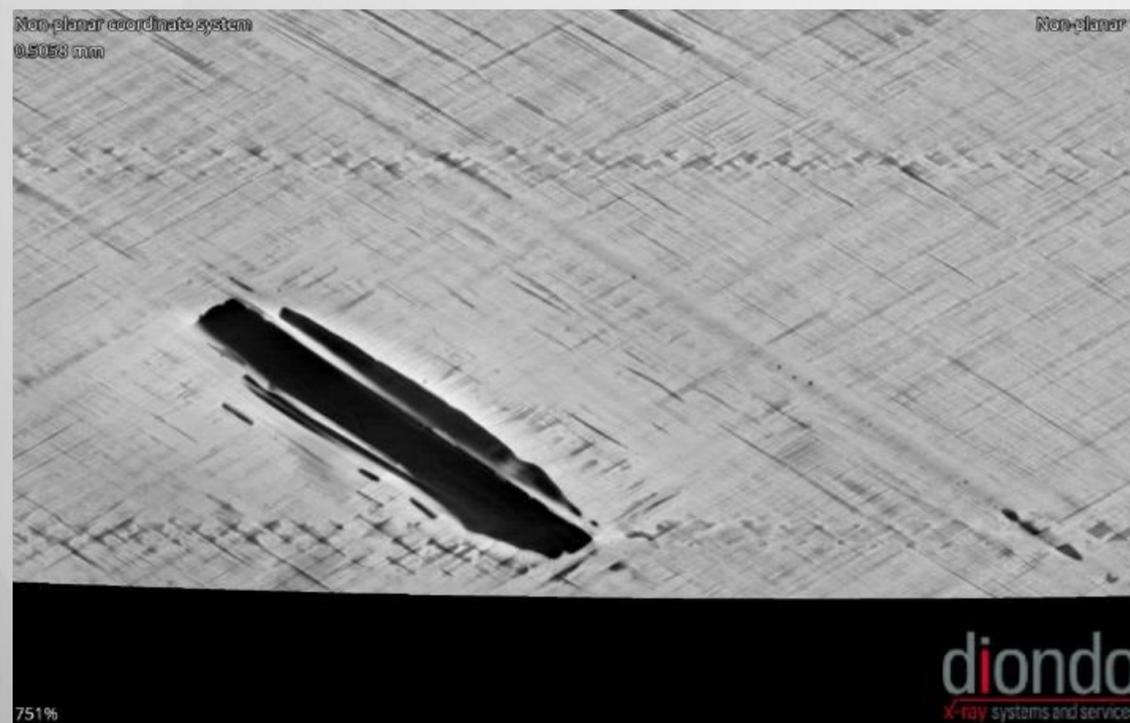
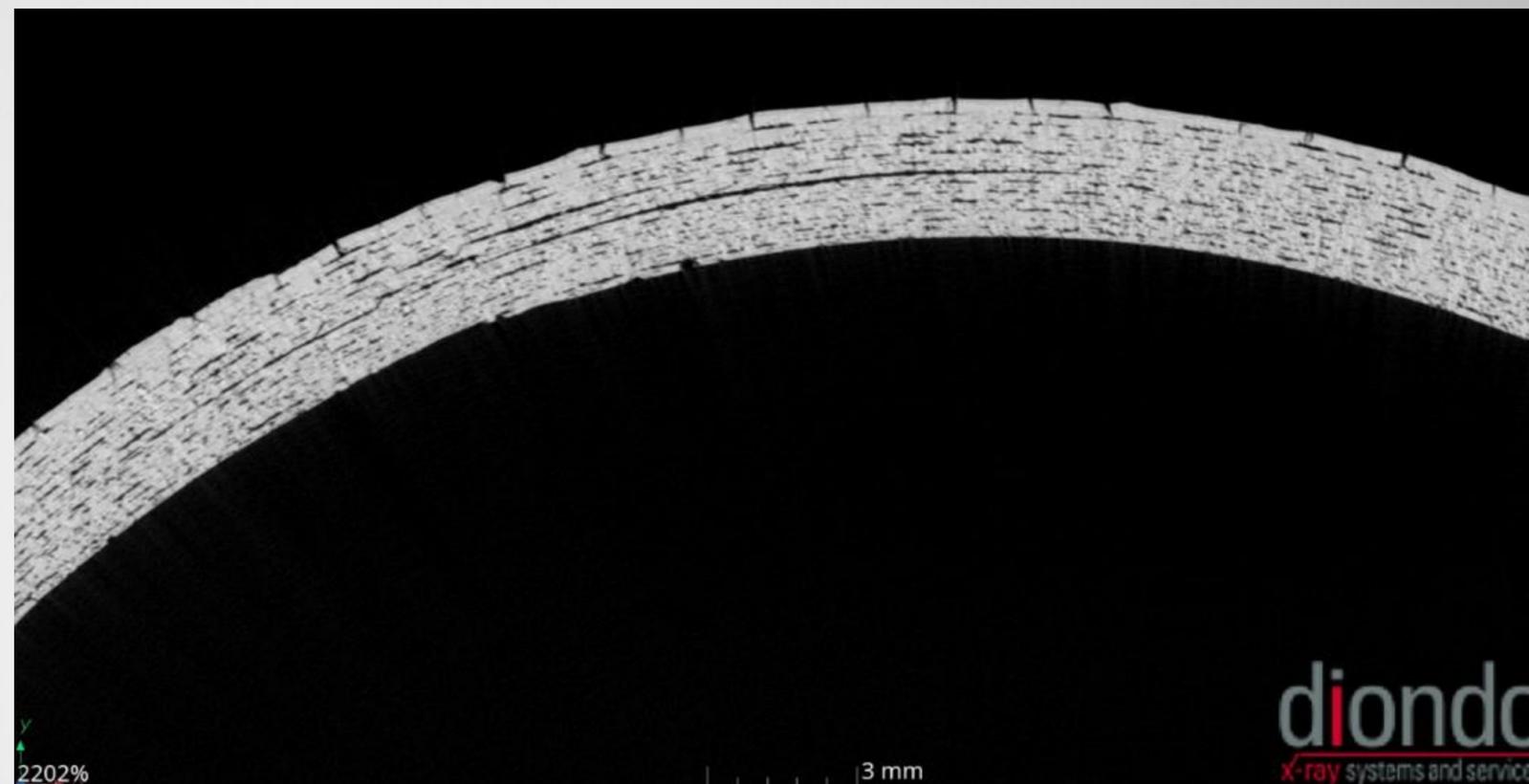
Charakterisierung verschiedener Demonstratoren des Innenrohres aus unterschiedlichen Werkstoffen



Durchmesser: 230 mm



Höhe: 227 mm

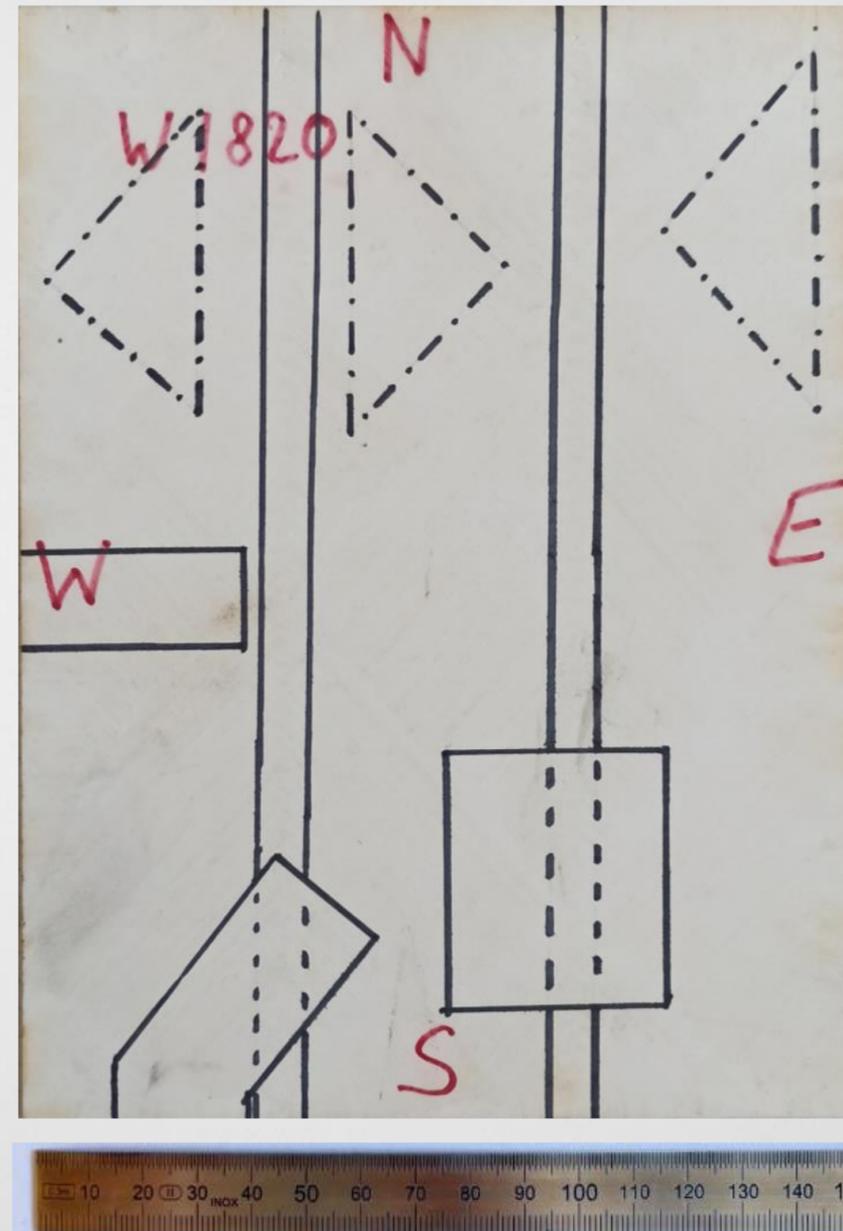


# CT-Untersuchungen an keramischen Verbundwerkstoffen (CMC)

Benchmark der CT-Untersuchungen mit alternativen ZfP-Verfahren

## Untersuchungen an einer CMC-Testplatte

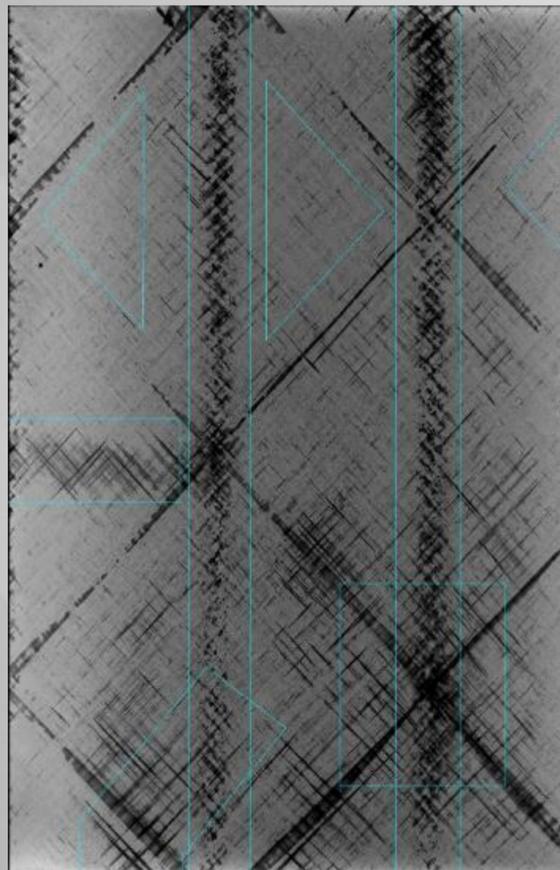
- Material:  $\text{Al}_2\text{O}_3$  Fasern in einer mikroporösen  $\text{Al}_2\text{O}_3$  Matrix.
- Abmessungen: Breite: 150 mm  
Höhe: 200 mm  
Dicke: 3 mm
- Aufgrund des Herstellungsprozesses gibt es eine große Anzahl von Delaminationen / luftgefüllten Bereichen in der Platte..
- Besonders auffällige Bereiche sind durch die schwarzen Markierungen gekennzeichnet.



# CT-Untersuchungen an keramischen Verbundwerkstoffen (CMC)

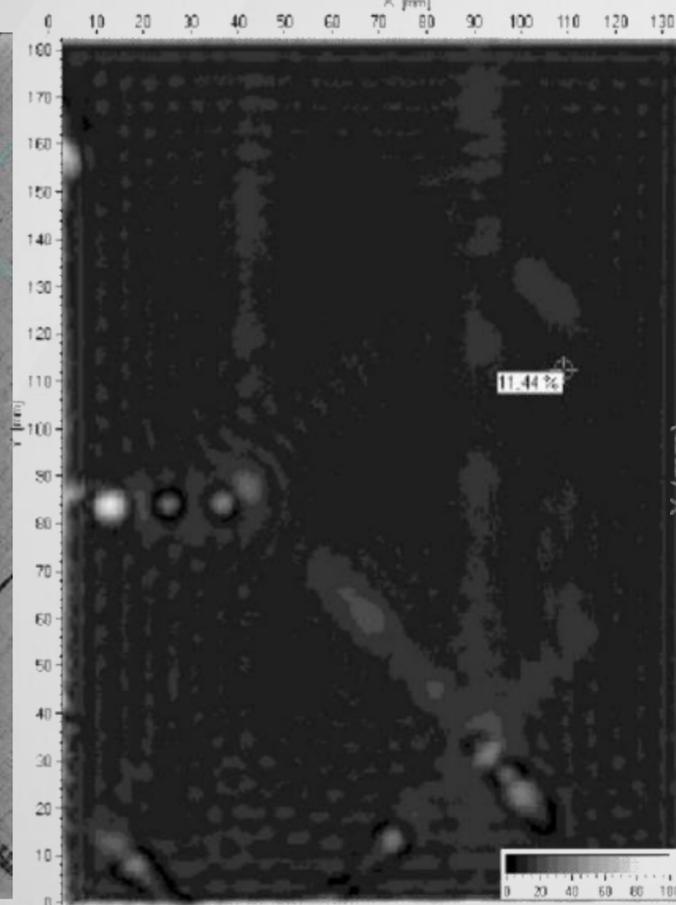
Benchmark der CT-Untersuchungen mit alternativen ZfP-Verfahren

Computertomographie



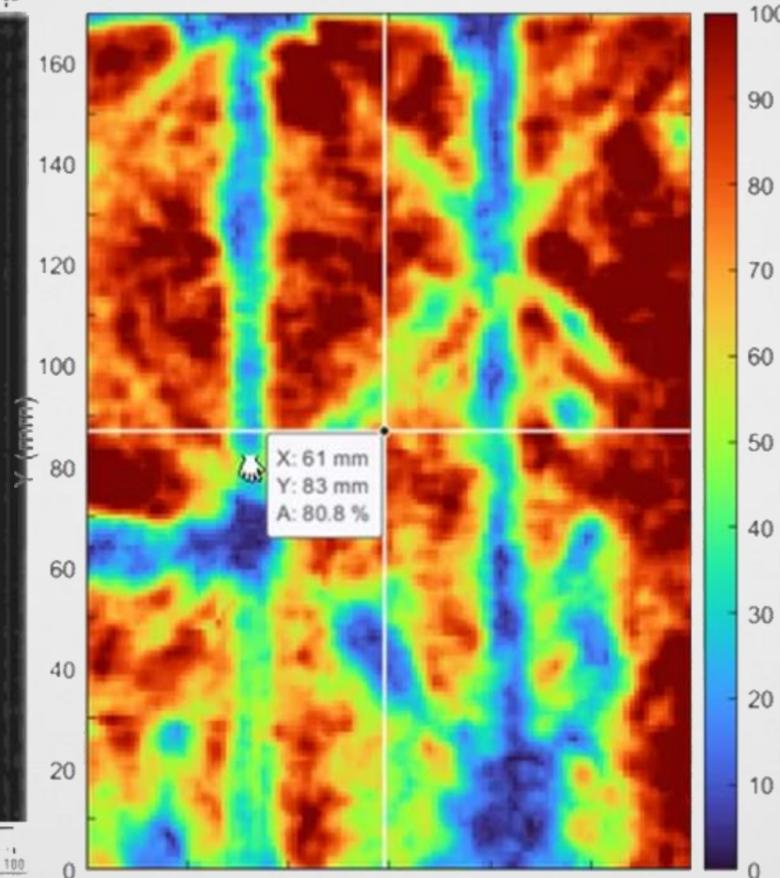
- Kegelstrahl 3D CT
- Röntgenenergie: 100 keV
- Voxelgröße: 60 µm

UT (Luft-Kopplung)



- Luftgekoppelte UT-Prüfung
- Transmission

UT (Wasser-Kopplung)



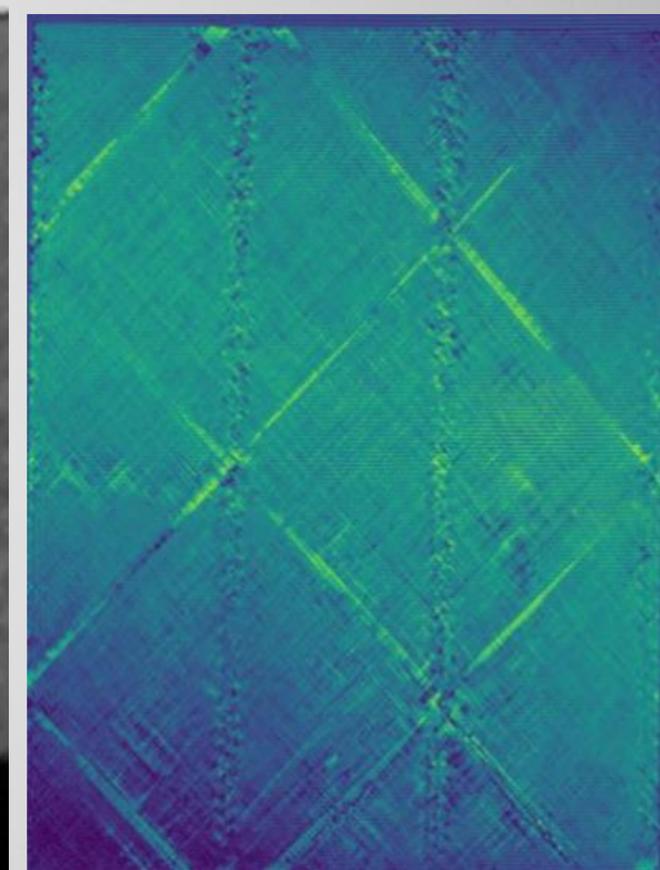
- Wassergekoppelte UT-Prüfung
- PAUT C-scan
- Pixelgröße: 0.25 mm

THz Transmission



- THz Transmission
- Frequenz: 0.1 - 3 THz
- Pixelgröße: 1 x 1 mm<sup>2</sup>

RADAR



- FMCW-Radarsensor
- Messung in Reflektion
- Frequenz-Sweep: 126 - 182 GHz
- 1 ms Sweep Durchlaufzeit
- 10 Hz Messrate

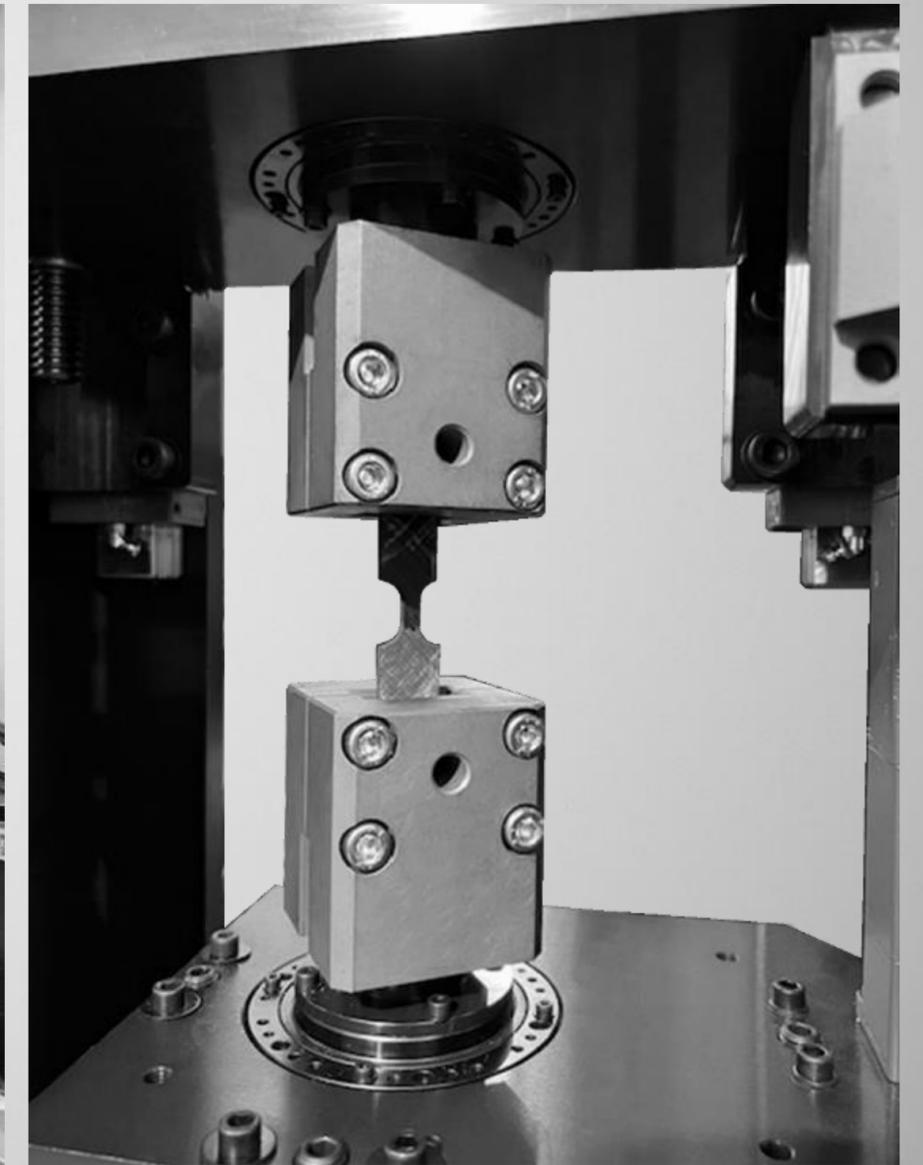
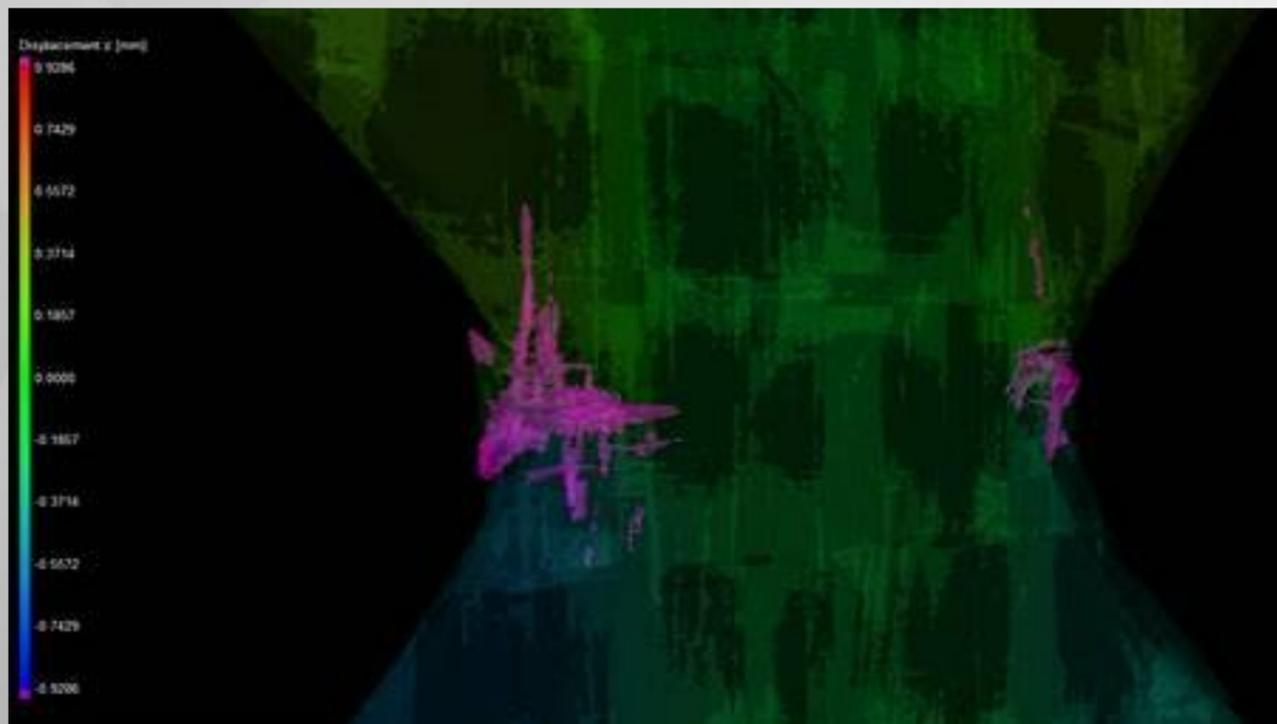
# CT-Untersuchungen an keramischen Verbundwerkstoffen (CMC)

Entwicklung eines Lastrahmens für die In-Situ Computertomographie

Die diondo In-situ Erweiterung ermöglicht die 3D-Visualisierung von Prüfobjekten unter dem Einfluss von mechanischer Zug- oder Druckbelastung. Mit dem Lastrahmen können beispielsweise zeitaufgelöste mechanische Prüfungen von polymeren oder keramischen Verbundwerkstoffen durchgeführt werden, um ihr Verhalten unter Lasteinwirkung besser zu verstehen. Das spezielle Design ermöglicht maximale Flexibilität und eine für die Größe des Bauteils optimierte Auflösung in der CT-Prüfung.

## Beispiel:

Ergebnisse der In-situ CT-Untersuchung an einem Glasfaserprobekörper unter Zugbelastung im Kraftbereich von 0 - 5 kN. Mit dieser Methode können selbst feinste Risse sowie Materialveränderungen detektiert und die Einflüsse von inneren Merkmalen im Bauteil auf den Entstehungsprozess von Rissen charakterisiert werden ("Effects-of-Defects").



# CT-Untersuchungen an keramischen Verbundwerkstoffen (CMC)

Entwicklung eines Lastrahmens für die In-Situ Computertomographie



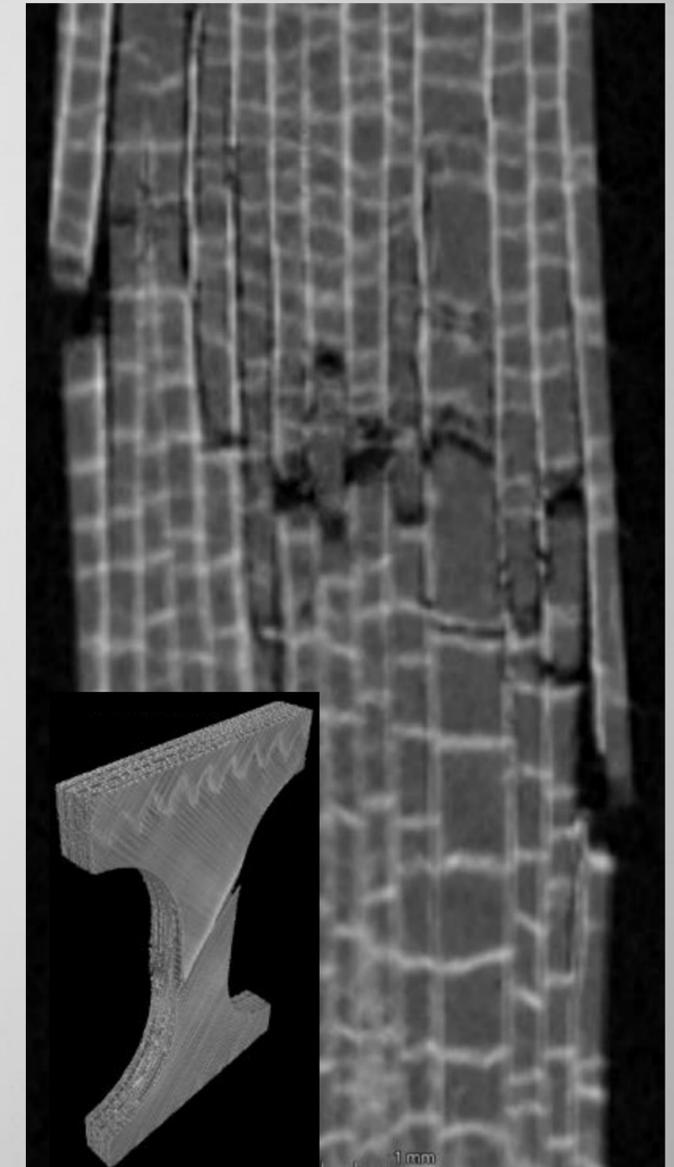
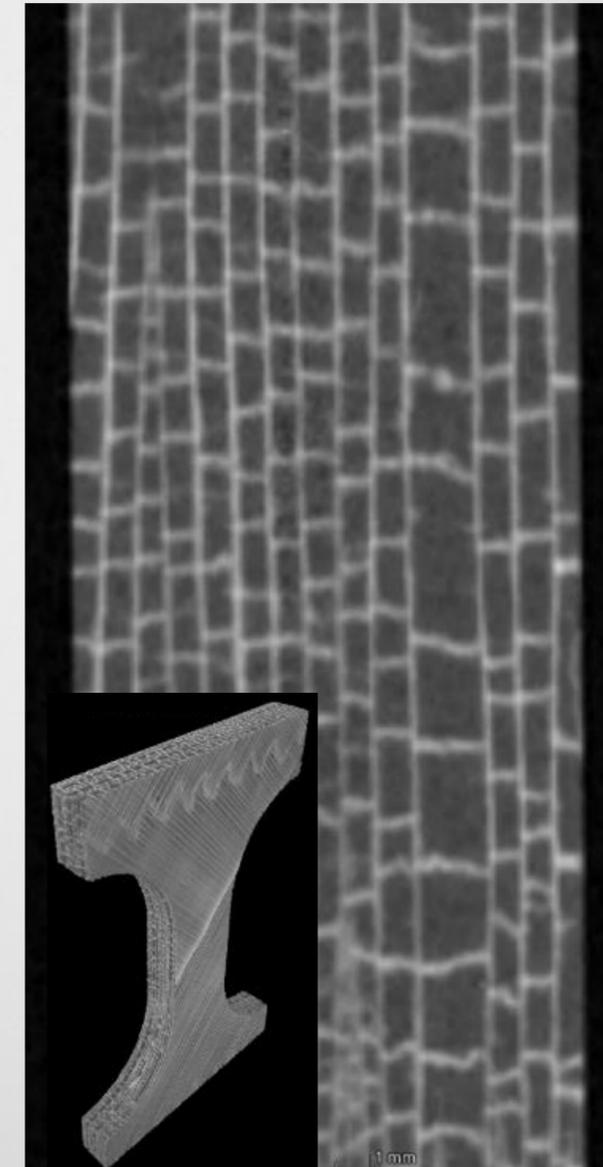
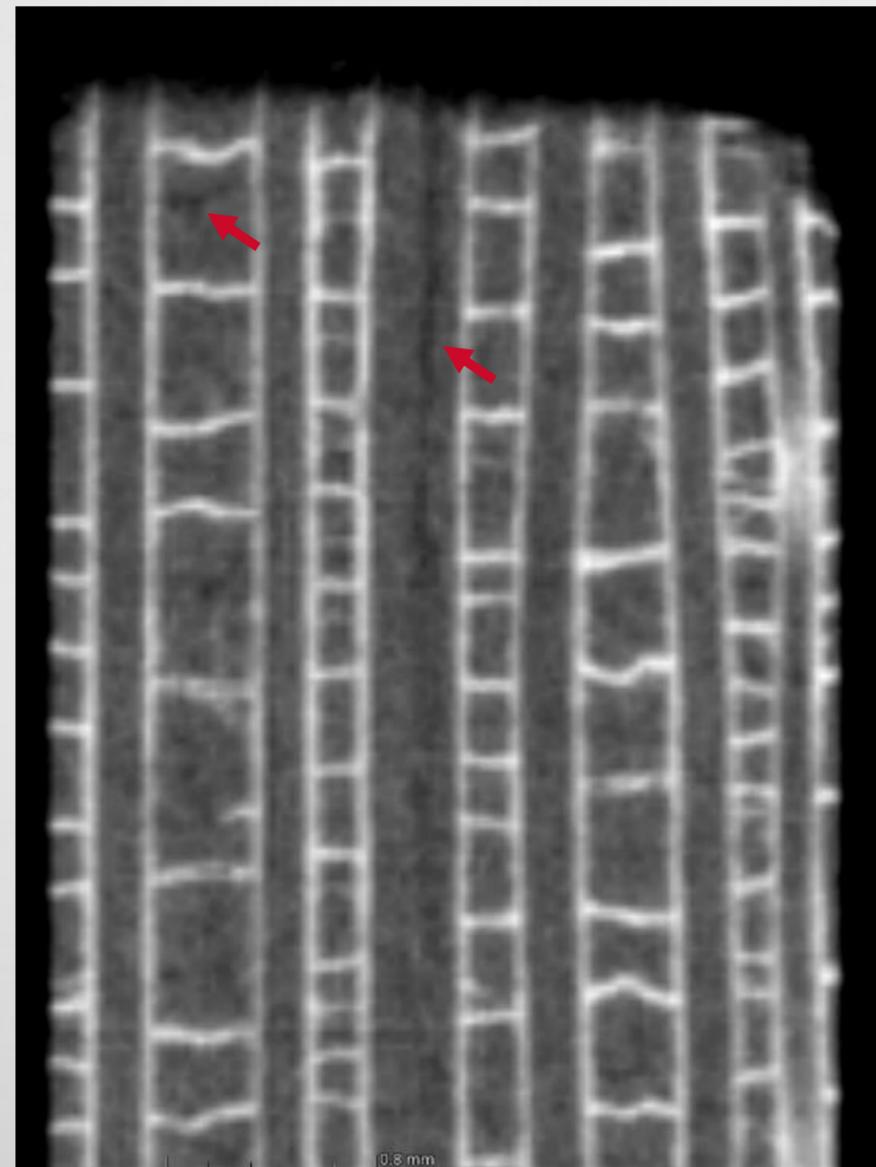
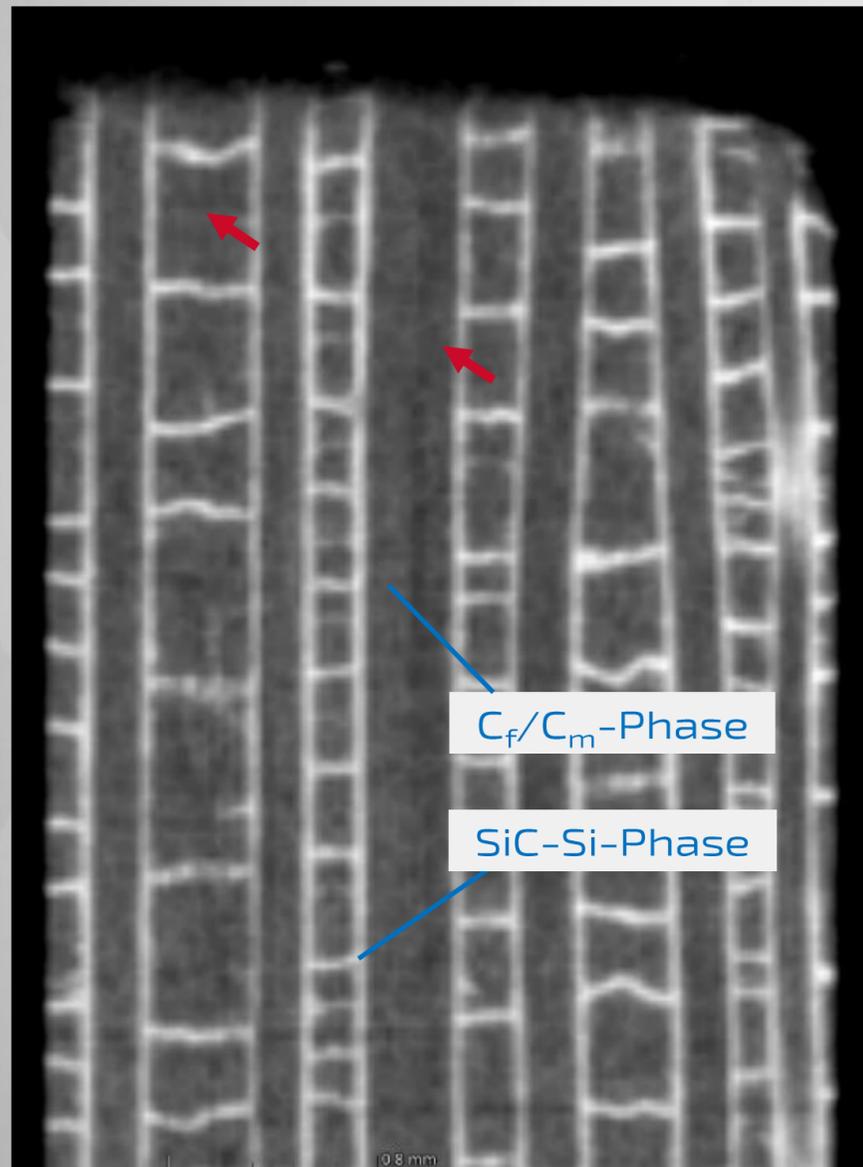
C/C-SiC CMC-Werkstoff (C-Fasern in C-SiC-Matrix) - Vergleich von Schnittbildern, mit und ohne Last

CT bei 0 kN (Referenzmessung)

CT bei 2 kN Belastung

CT bei 0 kN (Referenzmessung)

CT nach Belastung bis 10 kN  
Durchriss der Probe



# CT-Untersuchungen an keramischen Verbundwerkstoffen (CMC)

Composite Engineering - Per CT erfasste „as-built“ Informationen in die CAx-Kette rückkoppeln

CT-Untersuchung einer C/C-SiC Raketendüse mit hoher Auflösung als Grundlage zur Bestimmung der Faserorientierung im Bauteil

## Gewählte CT-Parameter

Ziel der CT-Prüfung der Raketendüse war es, trotz der verhältnismäßig großen Abmessungen des Bauteils eine ausreichende Auflösung zu erreichen, um die Faserbündel zur späteren Bestimmung der Faserorientierung darzustellen.

diondo CT-System: DL1 mit Transmissionsröntgenquelle und Flachdetektor

Röntgenquelle: XRAY WorX 240 TCHE Plus

Röntgenparameter:  $E = 185 \text{ keV}$ ,  $I = 270 \mu\text{A}$ ,  $P = 50 \text{ W}$

Vorfilterung: 0,75 mm Al

Detektor: Flachdetektor, Pixelmatrix:  $3\text{k} \times 3\text{k}$ , Pixelgröße:  $139 \mu\text{m}$

Projektionen: 5.400 Röntgenprojektionen über  $360^\circ$ -Drehung

Integrationszeit: 430 msec je Projektion

Rekonstruktion: Conebeam-Algorithmus (FDK)

MKE: 2-fache horizontale Messkreiserweiterung

5-fache vertikale Messkreiserweiterung

CT-Volumen:  $7.970 \times 5.696 \times 5.696$  Voxel mit MKE

Voxelgröße:  $39 \mu\text{m}$

Format: 16-bit integer

Datensatz-Größe: 482 GByte

Scan-Zeit: 3h 15m

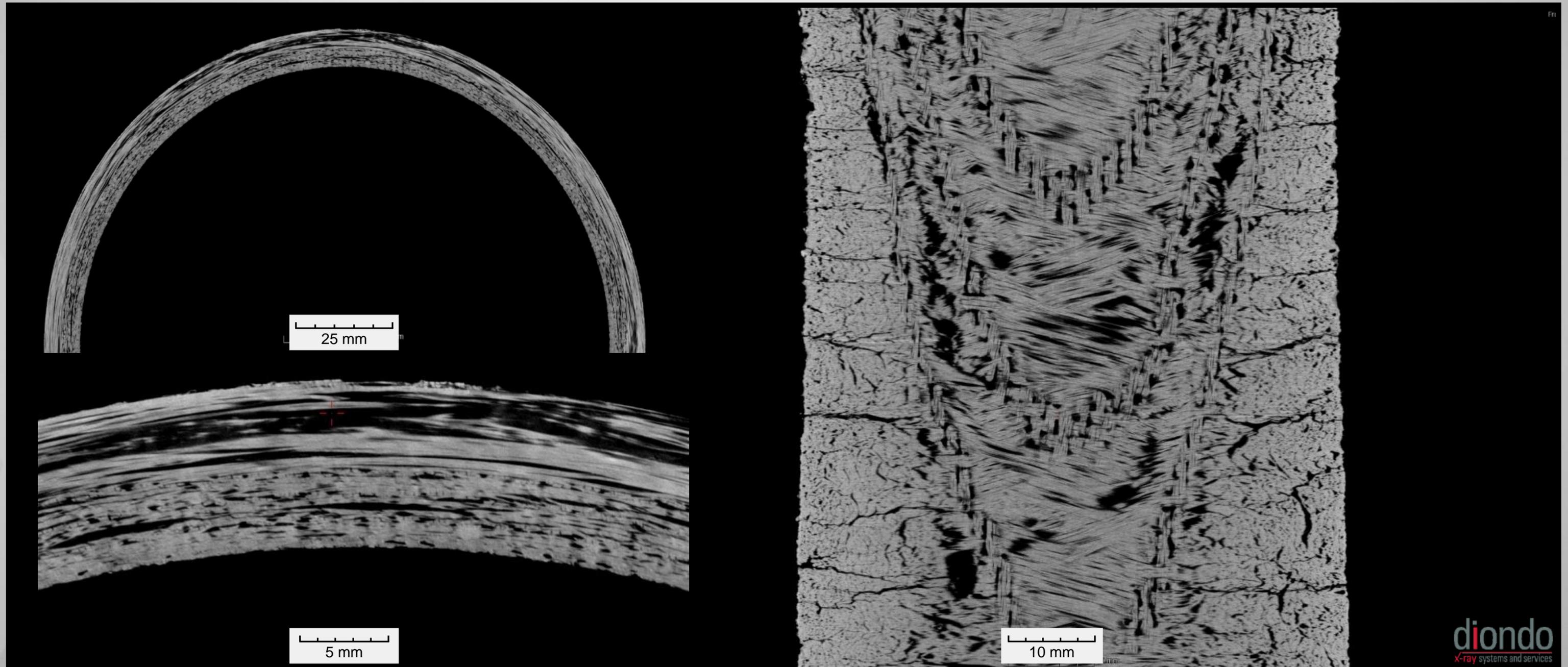




# CT-Untersuchungen an keramischen Verbundwerkstoffen (CMC)

Composite Engineering - Per CT erfasste „as-built“ Informationen in die CAx-Kette rückkoppeln

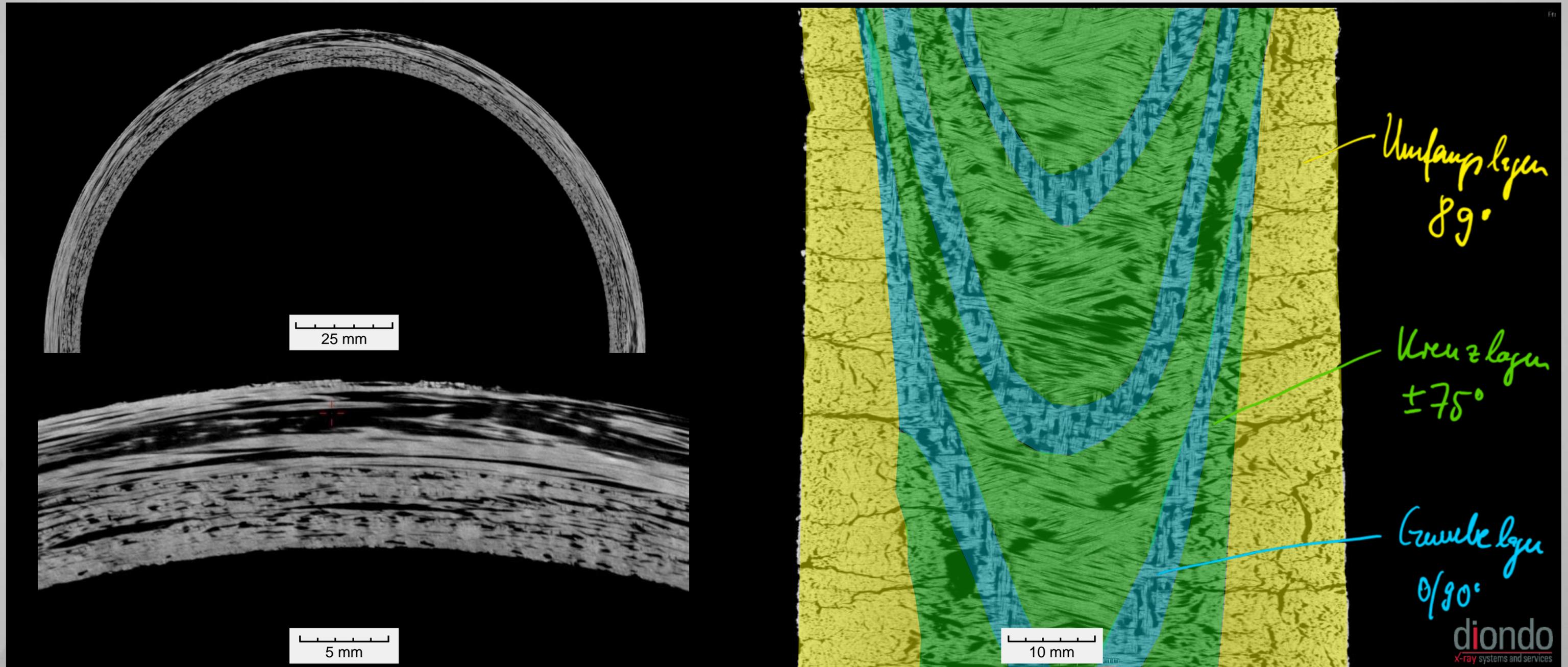
CT-Untersuchung einer C/C-SiC Raketendüse mit hoher Auflösung als Grundlage zur Bestimmung der Faserorientierung im Bauteil



# CT-Untersuchungen an keramischen Verbundwerkstoffen (CMC)

Composite Engineering - Per CT erfasste „as-built“ Informationen in die CAx-Kette rückkoppeln

CT-Untersuchung einer C/C-SiC Raketendüse mit hoher Auflösung als Grundlage zur Bestimmung der Faserorientierung im Bauteil

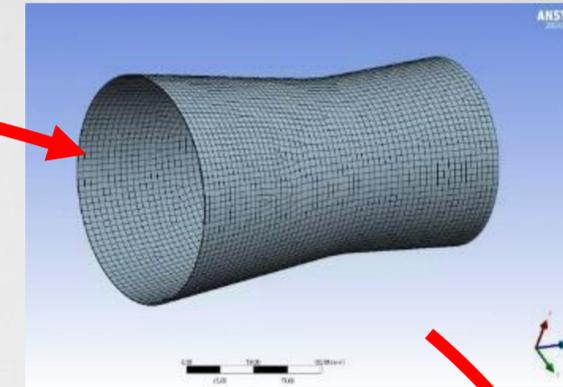
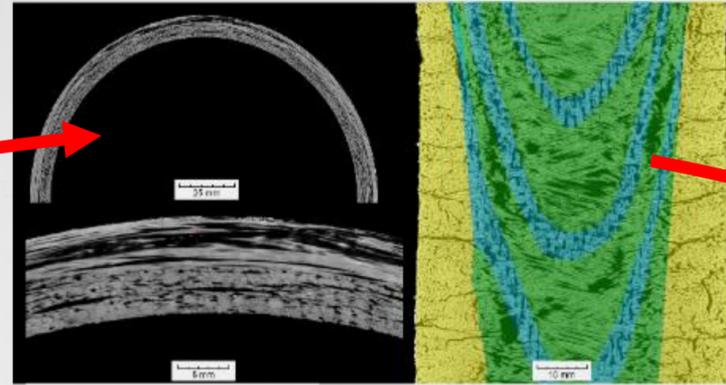
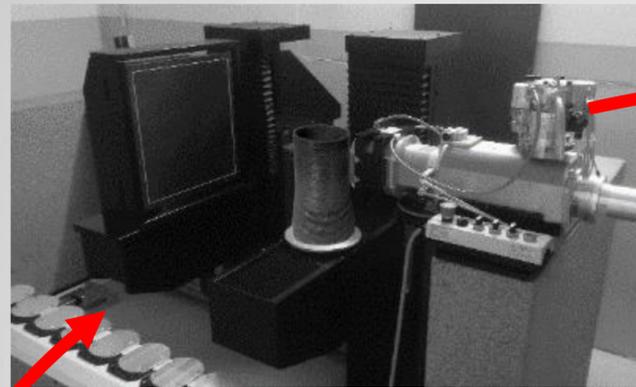


# CT-Untersuchungen an keramischen Verbundwerkstoffen (CMC)

Composite Engineering - Per CT erfasste „as-built“ Informationen in die CAx-Kette rückkoppeln



CT-Untersuchung



FE-Netz aus CT-Geometrie (shell mesh mit 125 Ebenen)

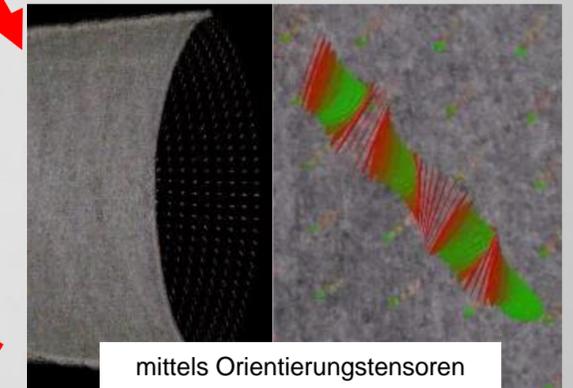


Bauteil aus Verbundwerkstoff

Segmentierung von Faserlagen auf Grundlage der CT-Daten und Auswertung auf das shell mesh

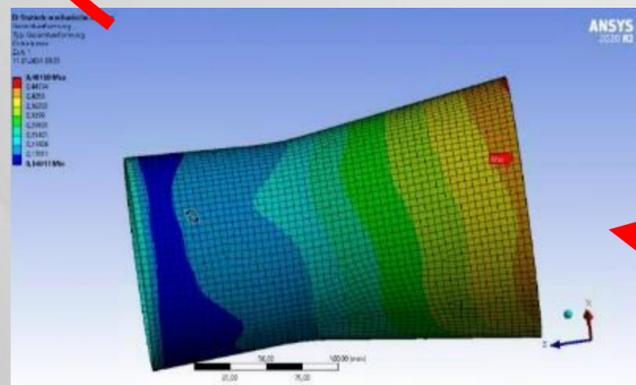


mit KI-basierter Segmentierung



mittels Orientierungssensoren

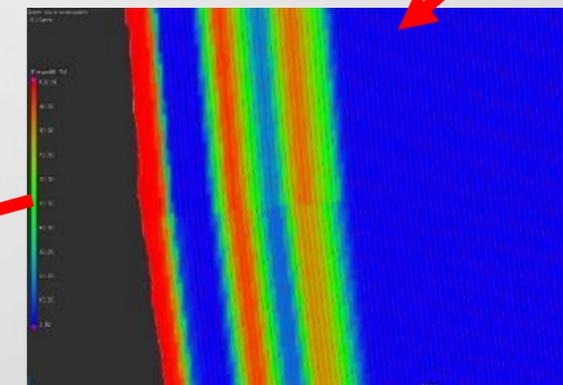
FE-Simulation



PCOMPG-Konvertierung

```

CQUAD4 10975 5241 9796 5917 5872 5924
CQUAD4 10976 5242 9797 5918 5917 9796
CQUAD4 10977 5243 9798 5919 5918 9797
CQUAD4 10978 5244 9799 5920 5919 9798
CQUAD4 10979 5245 9800 5921 5920 9799
CQUAD4 10980 5246 9801 5922 5921 9800
CQUAD4 10981 5246 9801 6010 5818 5922
$ ANSYS: Shell 281
$ ANSYS: Solid 185
$ ANSYS: Solid 186
$ ANSYS: Solid 187
$ ANSYS: Mass 21
$ Boundary Conditions -----
$ DOF BCs (SPCs)
SPC 1 5818 4 0.000000
SPC 1 5818 5 0.000000
SPC 1 5818 6 0.000000
SPC 1 5818 1 0.000000
SPC 1 5818 2 0.000000
    
```



Mapping der Lagensegmentierung auf das FE-Netz

# Agenda

Einsatz röntgenbasierter Prüftechnologien für die nachhaltige Energietechnik der Zukunft

1

## diondo GmbH – Innovation durch Erfahrung

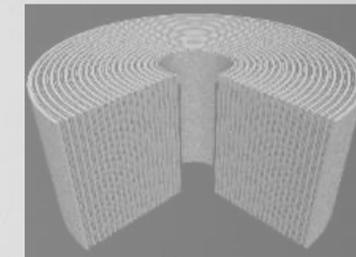
– Eine kurze Unternehmensdarstellung der CT-Systeme und CT-Dienstleistungen



2

## Applikation 1 – Li-Ionen Batterien in der Elektromobilität

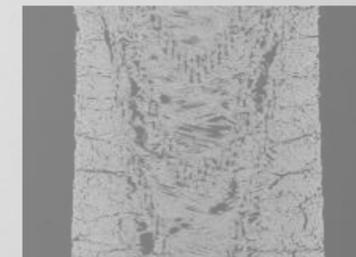
– Einsatz der CT zur Qualitätssicherung und Fehleranalyse an Li-Ionen Batteriezellen



3

## Applikation 2 – Keramische Verbundwerkstoffe (CMC)

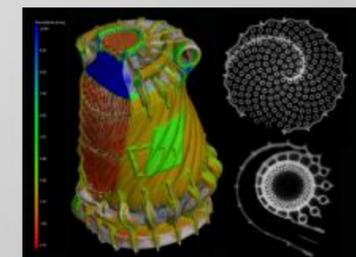
– CT-basierte Charakterisierung von CMC-Komponenten am Beispiel eines APU-Mufflers  
– Rückkopplung per CT erfasster „as-built“ Informationen in die CAx-Kette



4

## Applikation 3 – Hochenergie-Computertomographie (LINAC CT)

– Untersuchungen an metallischen Bauteilen aus der Elektromobilität  
– LINAC CT zur Qualitätssicherung in der metallischen additiven Fertigung



# Hochenergie-Computertomographie (LINAC CT)

Spezifikationen des diondo d<sub>7</sub> LINAC CT Systems

## Röntgenquelle und Detektor

- Linearbeschleuniger 6-9 MeV
- Flachdetektor 3,000 x 3,000 pixel, 139 µm pitch

## Spezifikation der Probekörper

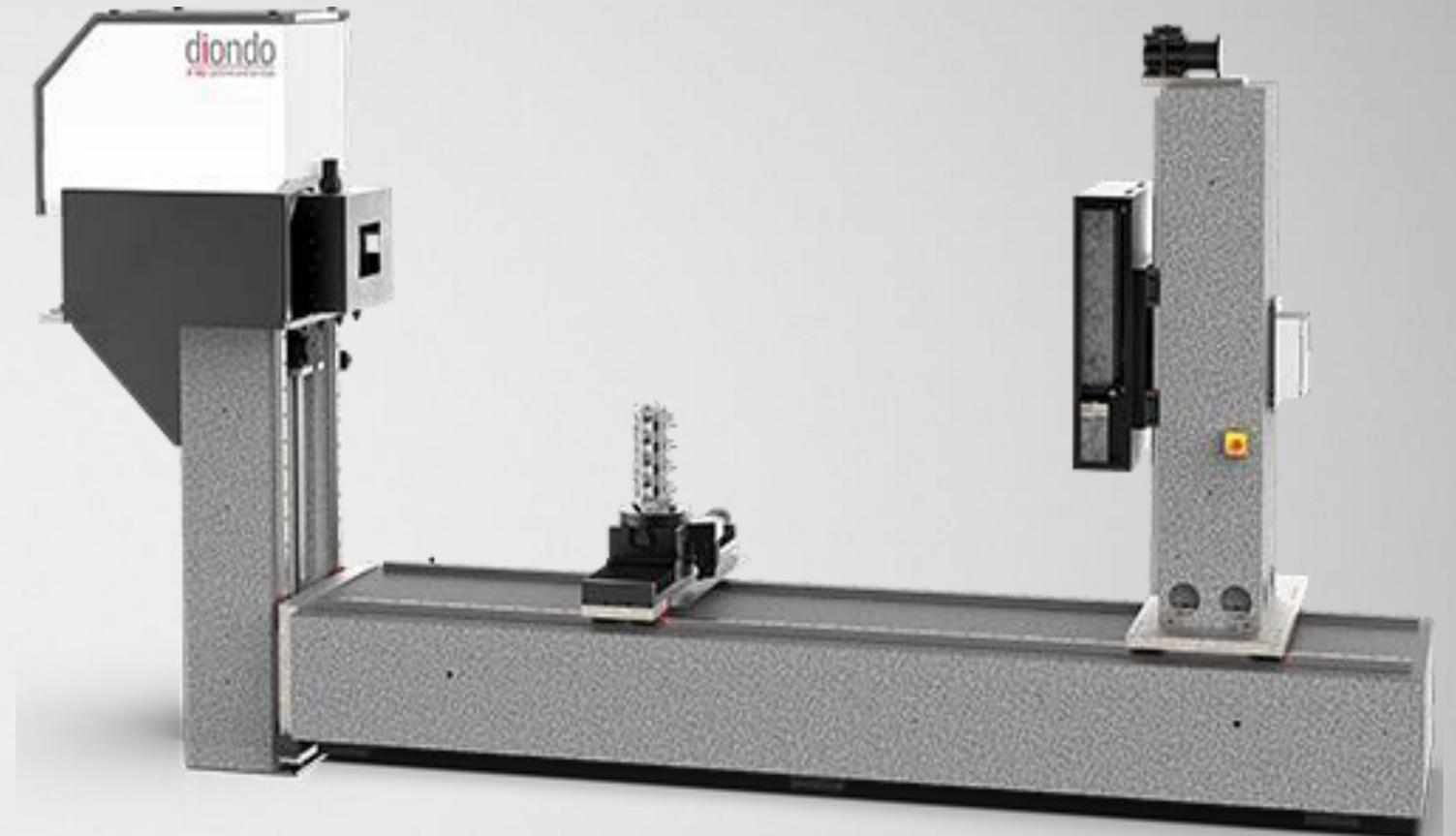
- Scan-Volumen Ø 700 x H 1,000 mm
- Gewicht der Prüfkörper 200 – 1,000 kg

## Manipulator

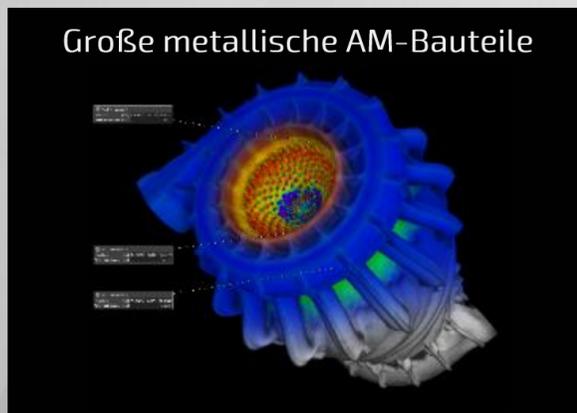
- Abmessungen L 5,900 x B 1,500 x H 2,900 mm
- Gewicht 17 t

## Maximale Durchstrahlbarkeit (Massives Material)

- Aluminium: 350 mm
- Cu-Legierungen: 150 mm
- Stahl: 200 mm
- Inconel (z.B. IN 718): 150 mm



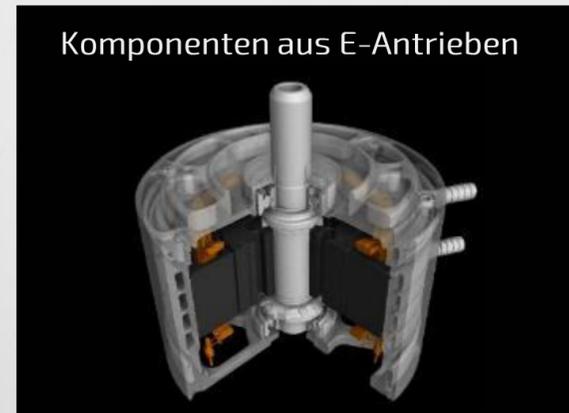
Große metallische AM-Bauteile



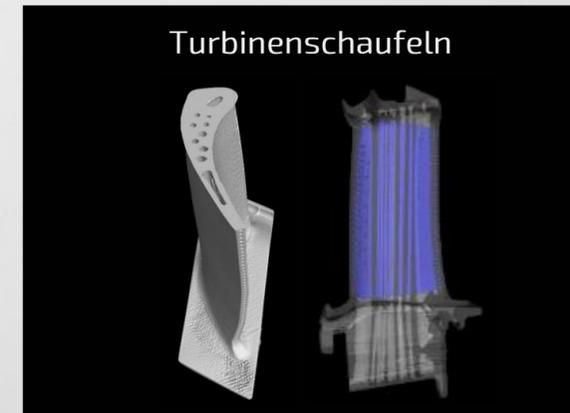
Komponenten aus E-Antrieben



Komponenten aus E-Antrieben



Turbinenschaufeln



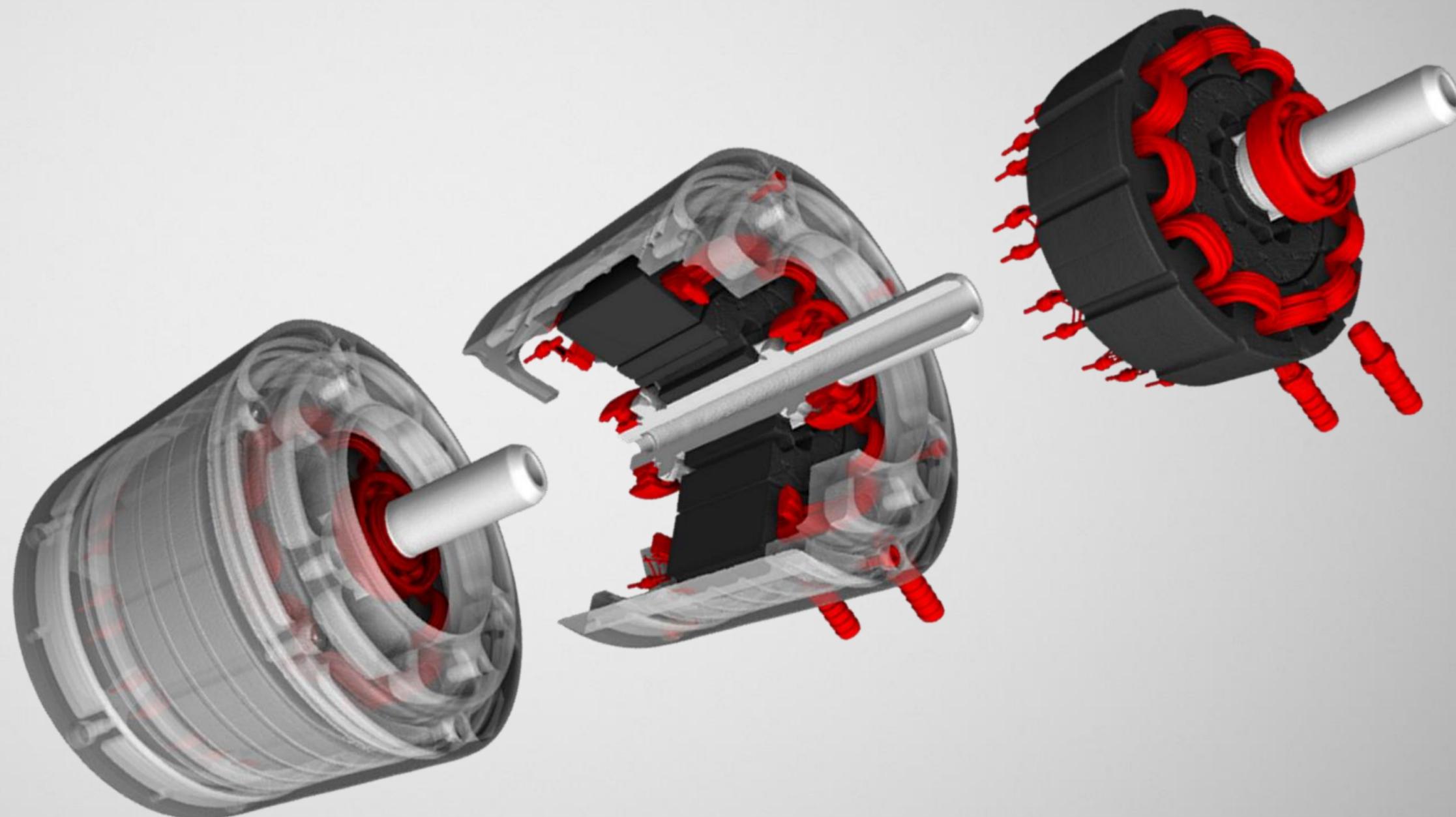
Brennstoffzellen-Stacks



# Hochenergie-Computertomographie (LINAC CT)

Metallische Bauteile – Demonstrator eines Motors für ein Elektrofahrzeug

LINAC CT an einem Demonstrator eines Motors für ein Elektrofahrzeug – Segmentierung der Hauptkomponenten

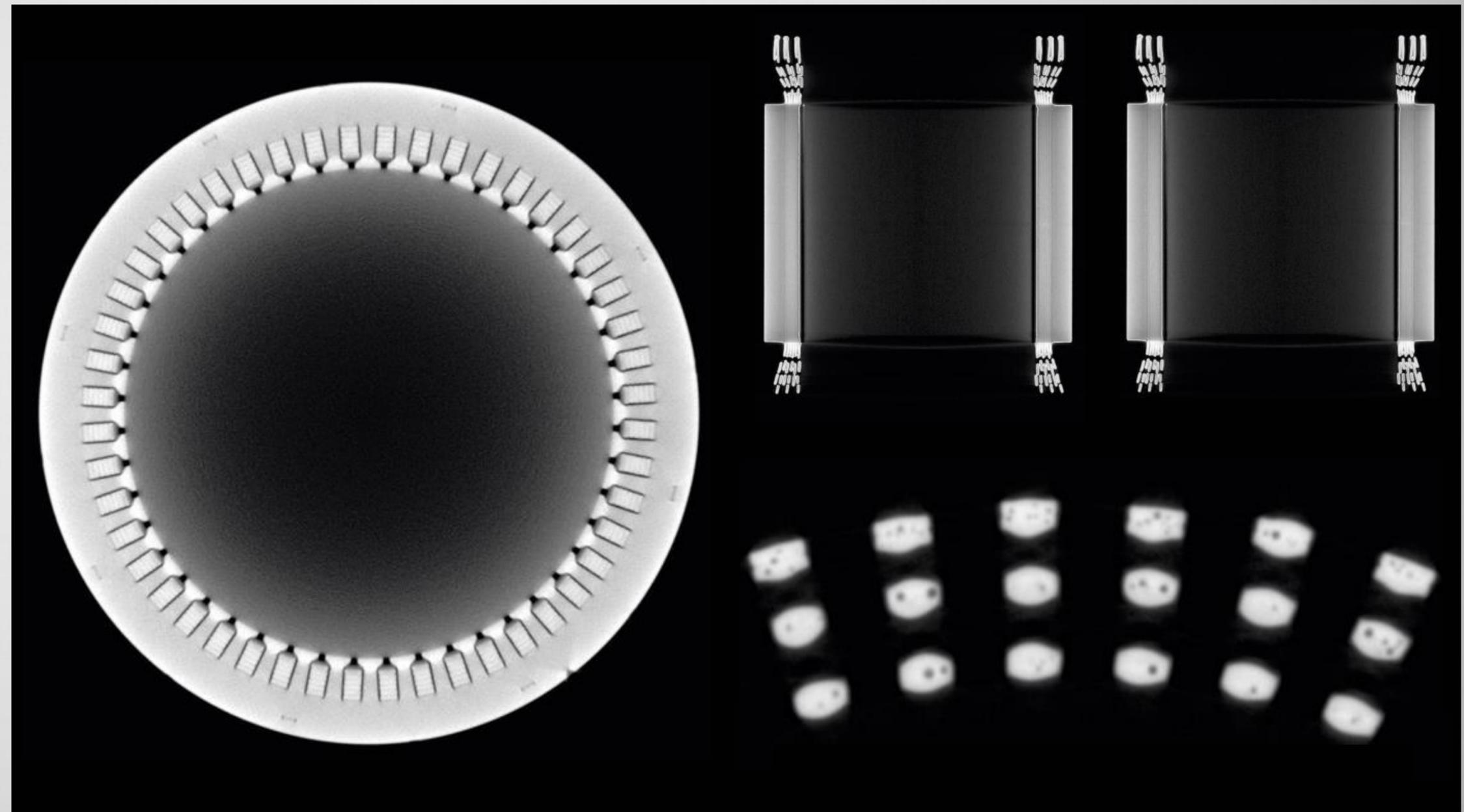


Mit freundlicher Genehmigung von MTC UK

# Hochenergie-Computertomographie (LINAC CT)

Metallische Bauteile – Stator eines Motors für ein Elektrofahrzeug

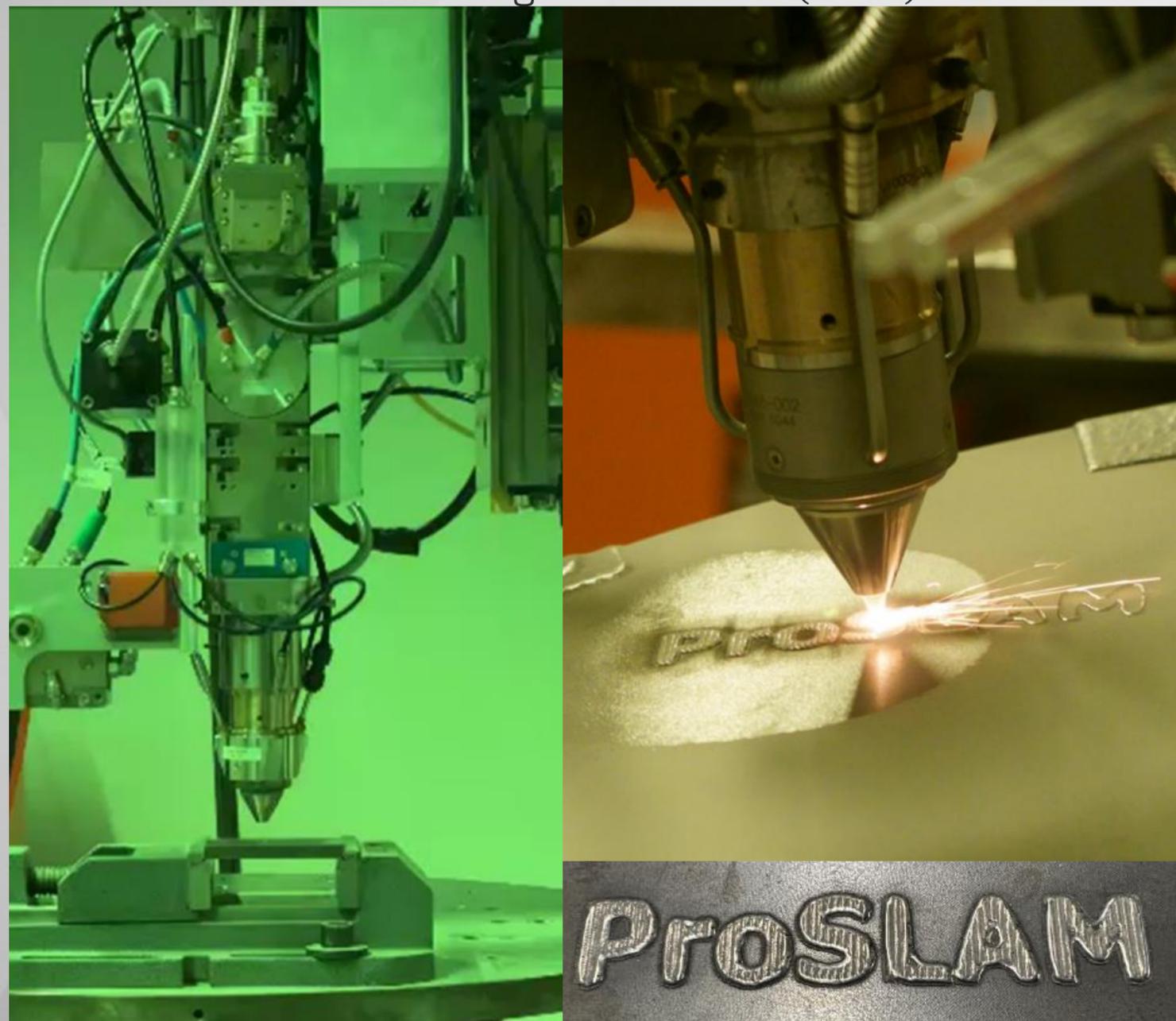
LINAC CT an einem Stator eines Motors für ein Elektrofahrzeug – Bewertung der Hairpin - Verbindungstechnik



# Hochenergie-Computertomographie (LINAC CT)

Metallische Additive Fertigung – Laserauftragsschweißen versus Laser-Pulverbettverfahren

Laserauftragsschweißen (LMD)



Laser-Pulverbettverfahren (LPBF)

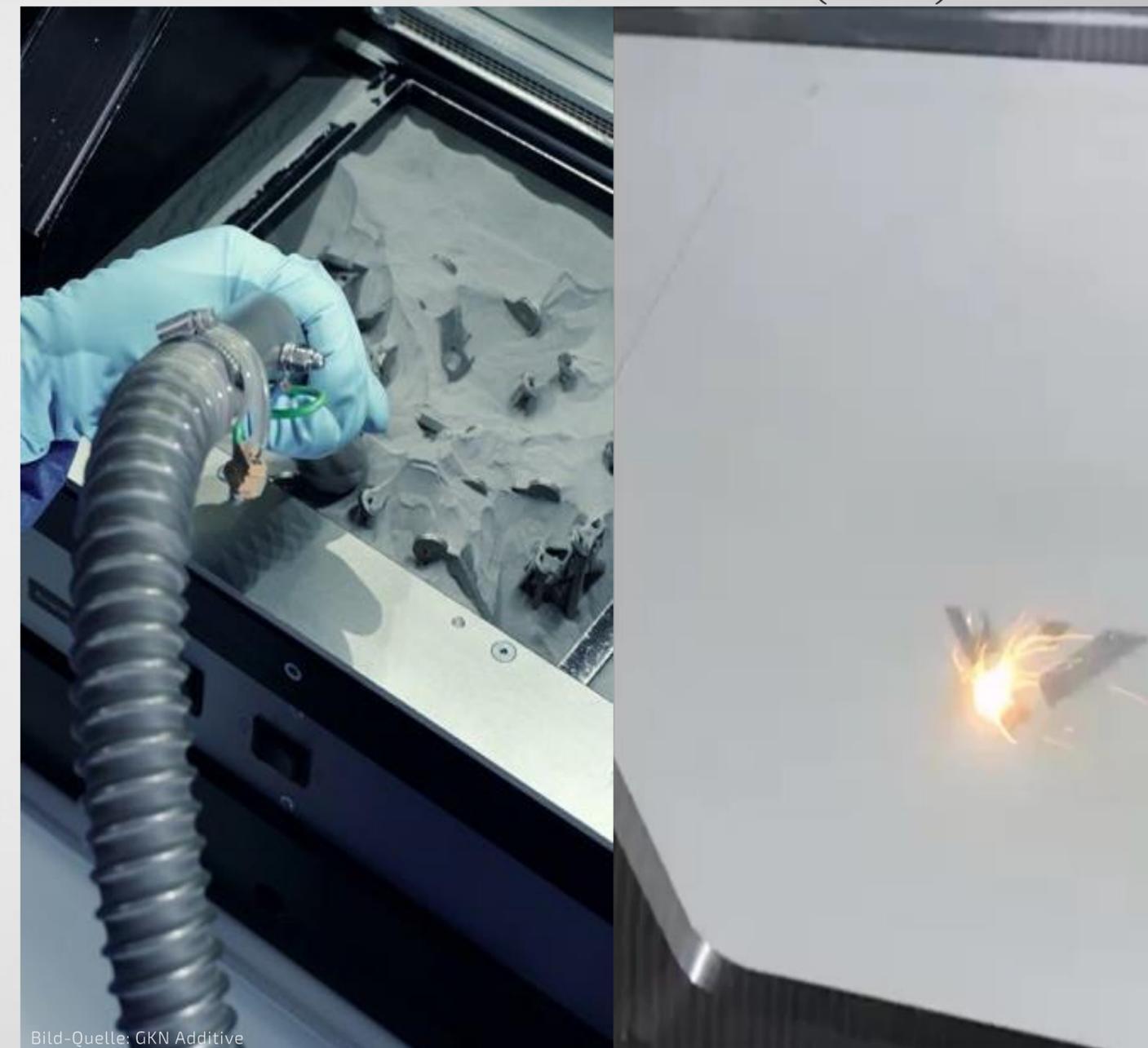


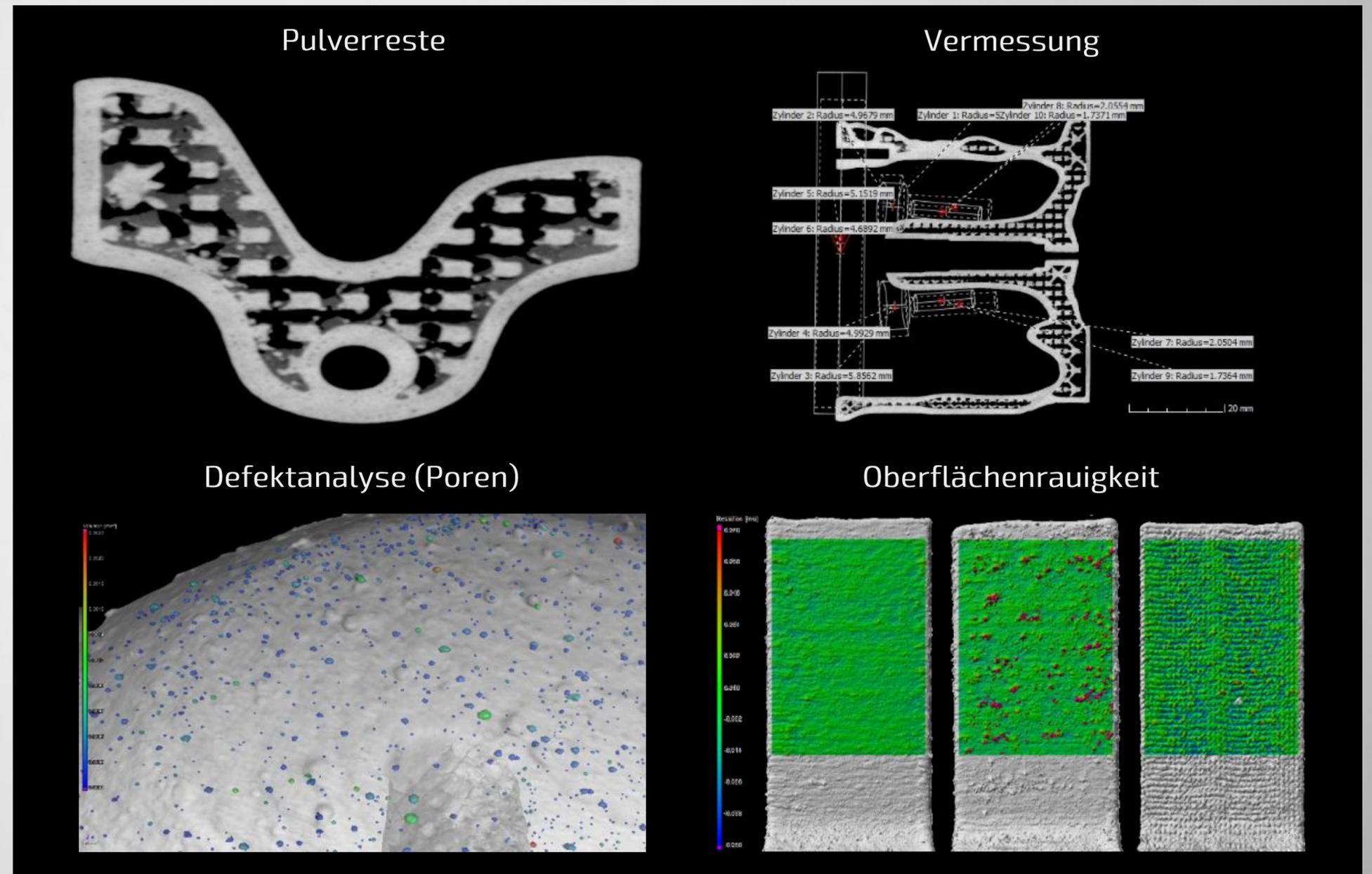
Bild-Quelle: GKN Additive

# Hochenergie-Computertomographie (LINAC CT)

Die industrielle CT als „Gold-Standard“ zur Prüfung metallischer AM-Komponenten

## Mit CT nachweisbare Merkmale in AM-Bauteilen

- Die additive Fertigung ermöglicht die Herstellung komplexer Bauteile, die mit herkömmlicher Prüftechnik nur schwer auf Fehler und Unregelmäßigkeiten untersucht werden können.
- Die 3D-Computertomographie hat sich zur Bewertung der Qualität von AM-Bauteilen bewährt und ermöglicht eine detaillierte Untersuchung innerer Strukturen, Bauteildichten und Wandstärken, beispielsweise hinsichtlich:
  - Pulverresten im Bauteil / in Kühlkanälen
  - Vermessung der Geometrie des Bauteils
  - Wanddicken-Messung
  - Defektanalyse (Porenverteilung im Bauteil)
  - Rauigkeit innerer Oberflächen



# Hochenergie-Computertomographie (LINAC CT)

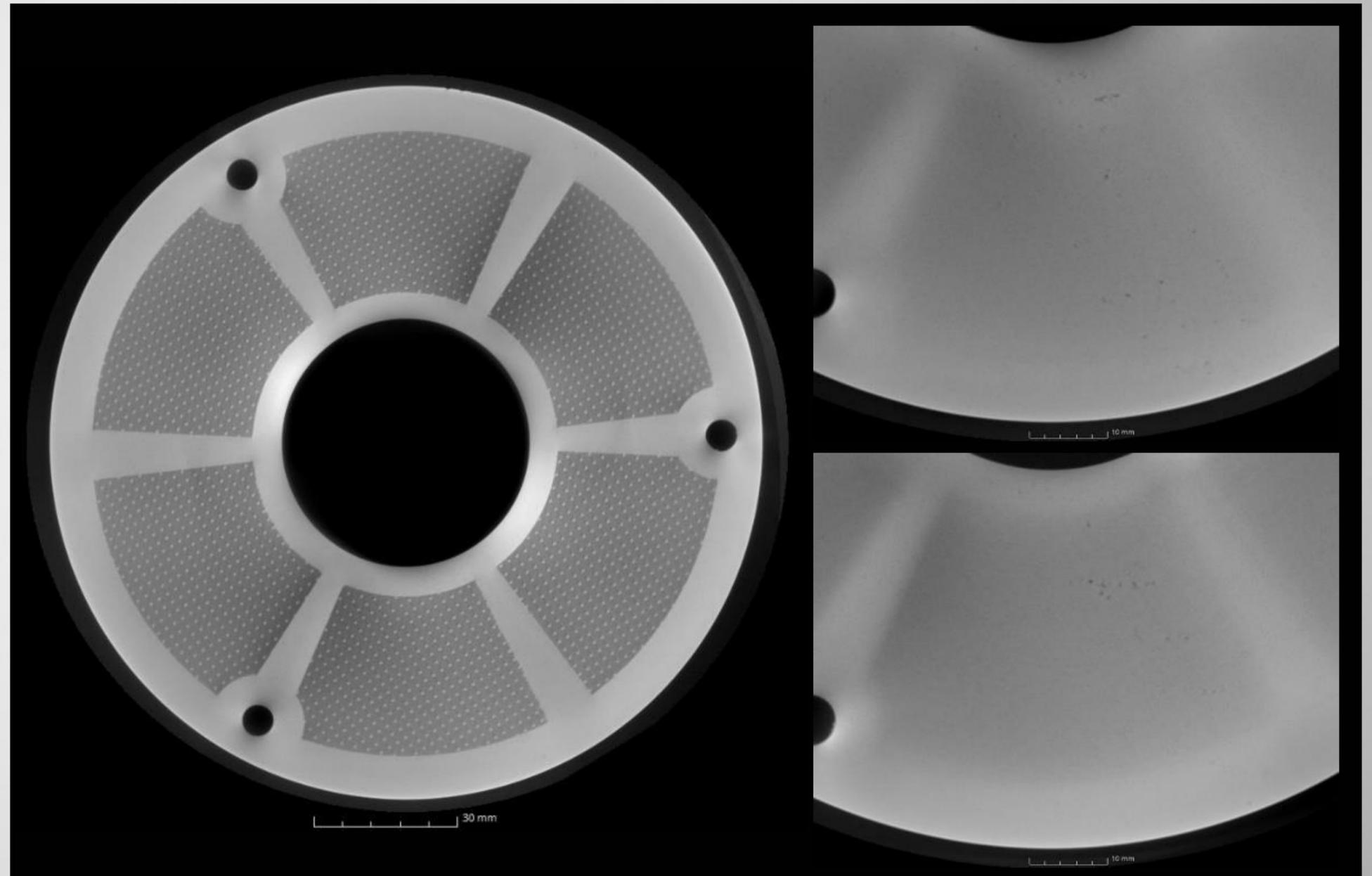
Metallische AM-Bauteile – Demonstrator einer Ankerscheibe aus Stahl

## Einsatz der Ankerplatte im E-Motor

- In E-Motoren werden Federspeicherbremsen häufig verwendet, um das Antriebssystem zu verlangsamen. Beim Bremsen wird die Ankerplatte gegen den rotierenden Reibbelag gedrückt, was zu starken Stößen und Vibrationen mit dem Reibbelag und dem Gehäuse des E-Motors führt und wahrnehmbare Geräusche verursacht. Durch additive Fertigung wurde ein segmentierter, ringförmiger Hohlraum als Dämpfungsstruktur in die Ankerplatte integriert, um eine bessere Aufnahme der Aufprallkräfte zu erreichen. Der mittlere Schalldruckpegel wird dadurch um 7,86 dB(C) gesenkt.



Bild: DMRC Uni Paderborn



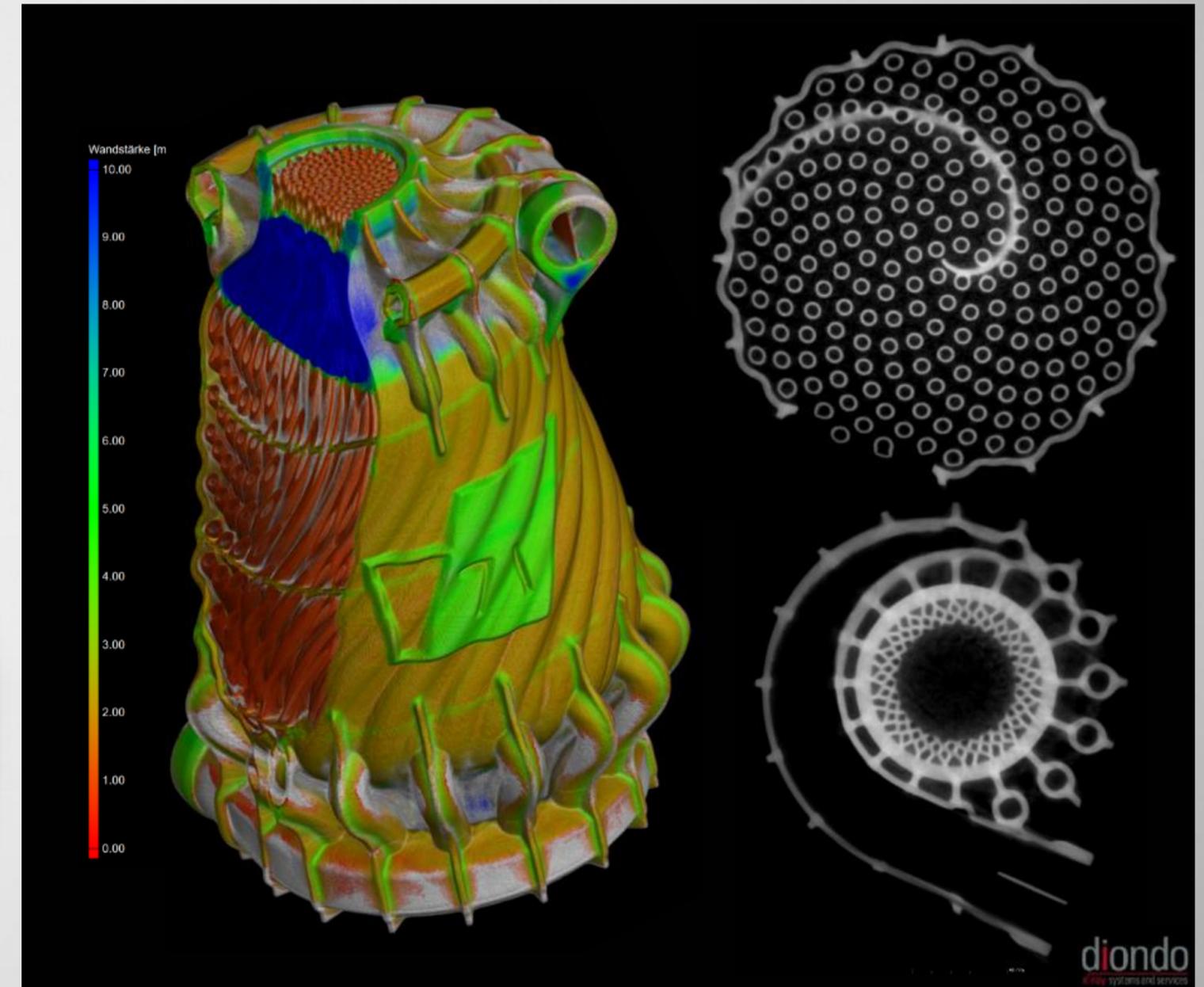
Mit freundlicher Genehmigung vom DMRC Uni Paderborn

# Hochenergie-Computertomographie (LINAC CT)

Metallische AM-Bauteile – Demonstrator eines Multi-Material Wärmetauschers

## Multi-Material Additive Manufacturing

- Cu-Legierungen wie GRCo-42 oder GRCo-84 besitzen eine hohe Wärmeleitfähigkeit und werden daher für viele Hochtemperatur-Anwendungen in der metallischen additiven Fertigung eingesetzt.
- Obwohl sie über eine hohe Festigkeit verfügen, stehen bessere Metalllegierungen (Superlegierungen, z.B. IN718) zur Verfügung, um auf Druck-, Wärme- und Schublasten zu reagieren.
- Vor diesem Hintergrund besteht dringender Bedarf die metallische additive Fertigung von Bimetall- oder Multi-Material-Komponenten weiterzuentwickeln.



Mit freundlicher Genehmigung von LEAP 71

# Hochenergie-Computertomographie (LINAC CT)

Metallische AM-Bauteile – Komponenten von Raketentriebwerken

## Stark wachsende Zahl an Kleinsatelliten

- Die Zahl der Kleinsatelliten ("CubeSat") und der Satelliten mit kleiner und mittlerer Masse hat in den letzten zehn Jahren zugenommen und wird voraussichtlich noch erheblich steigen.
- Kleinsatelliten haben eine Masse < 500 Kilogramm und werden unterteilt in Minisatelliten (100-500 kg), Mikrosatelliten (10-100 kg) und Nanosatelliten (1-10 kg)
- Diese Satelliten werden vor allem eingesetzt für Kommunikation ("Internet"), Erdbeobachtung, Satellitennavigation, Forschung und Entwicklung sowie Weiterentwicklung der Satellitentechnik

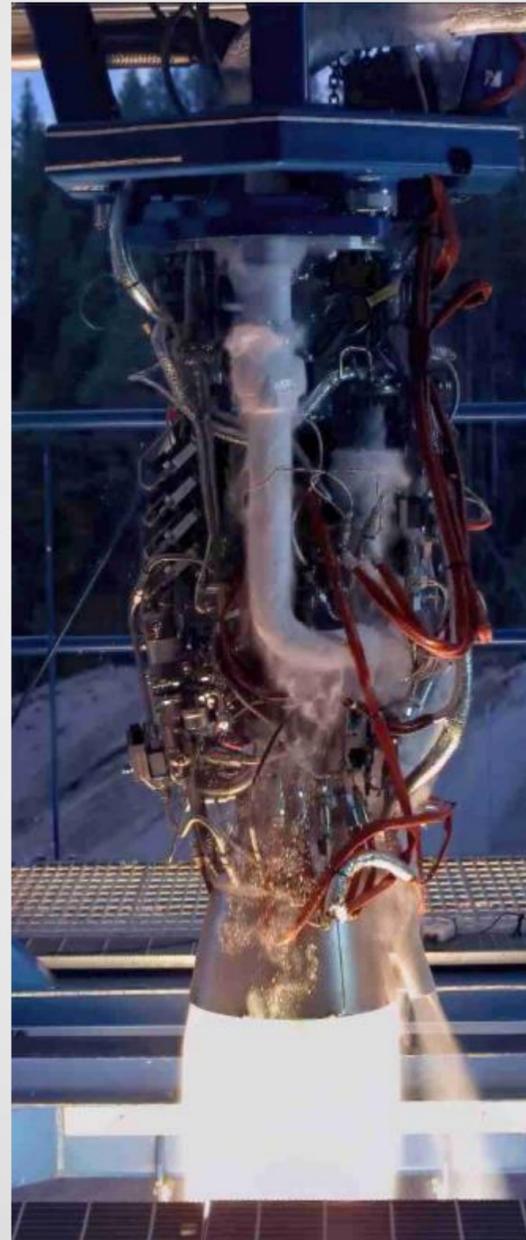
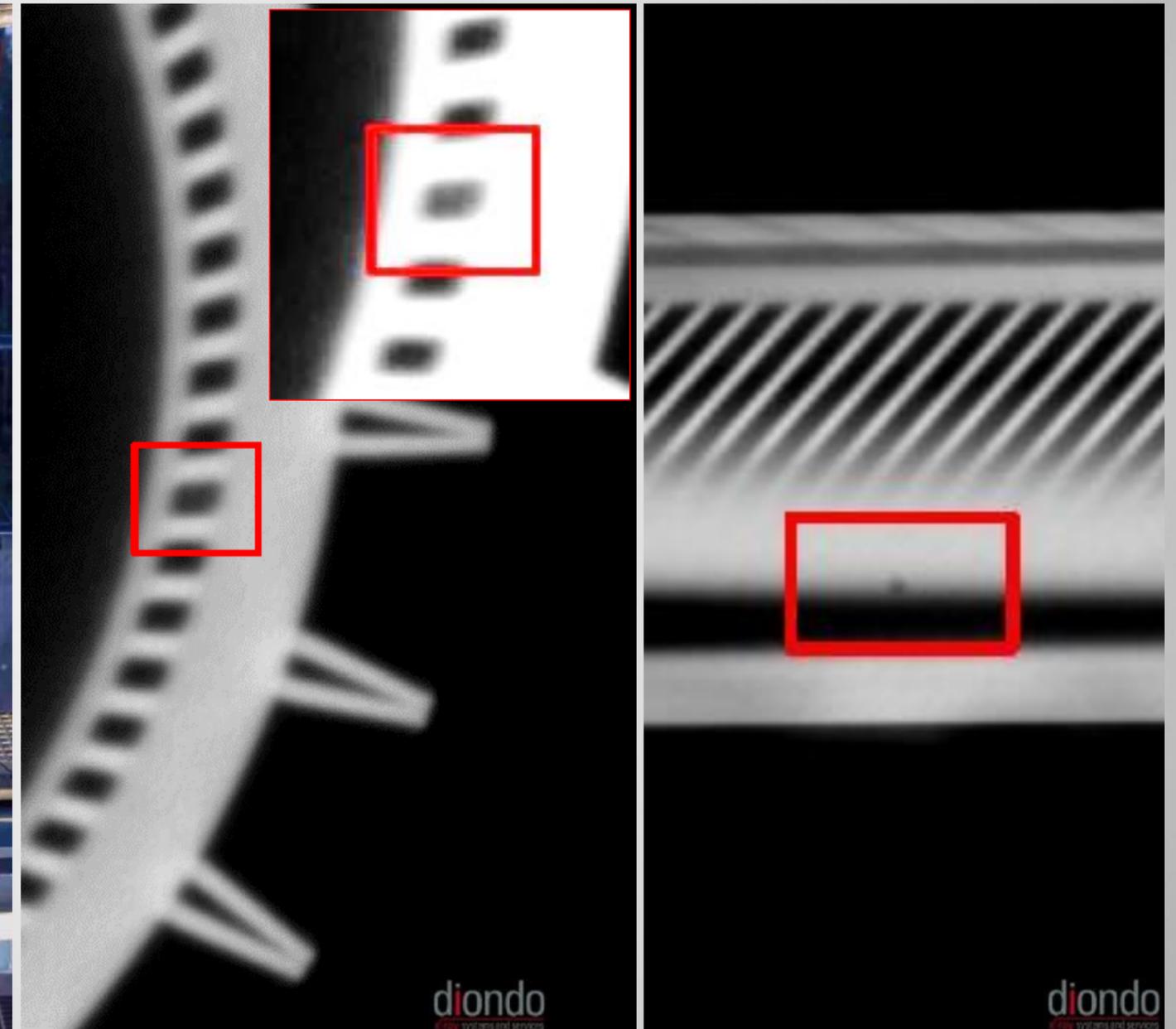


Bild: Rocket Factory Augsburg AG

## Nachweis von Pulverresten in den Kühlkanälen und Poren im Bauteil



Mit freundlicher Genehmigung von Rocket Factory Augsburg AG

# Hochenergie-Computertomographie (LINAC CT)

Metallische AM-Bauteile – Komponenten von Raketentriebwerken



Ausgewählter Bereich des Bauteils

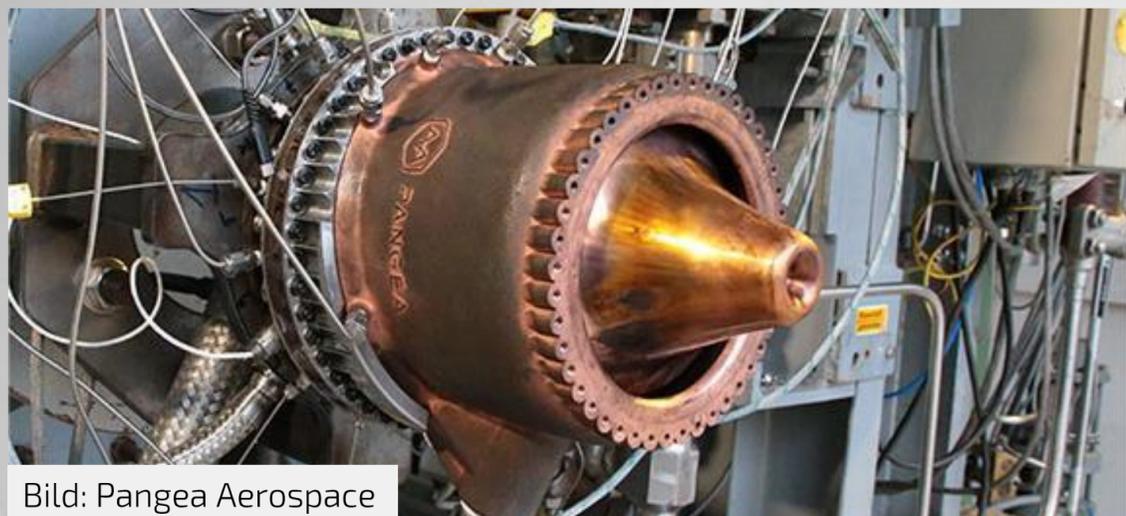
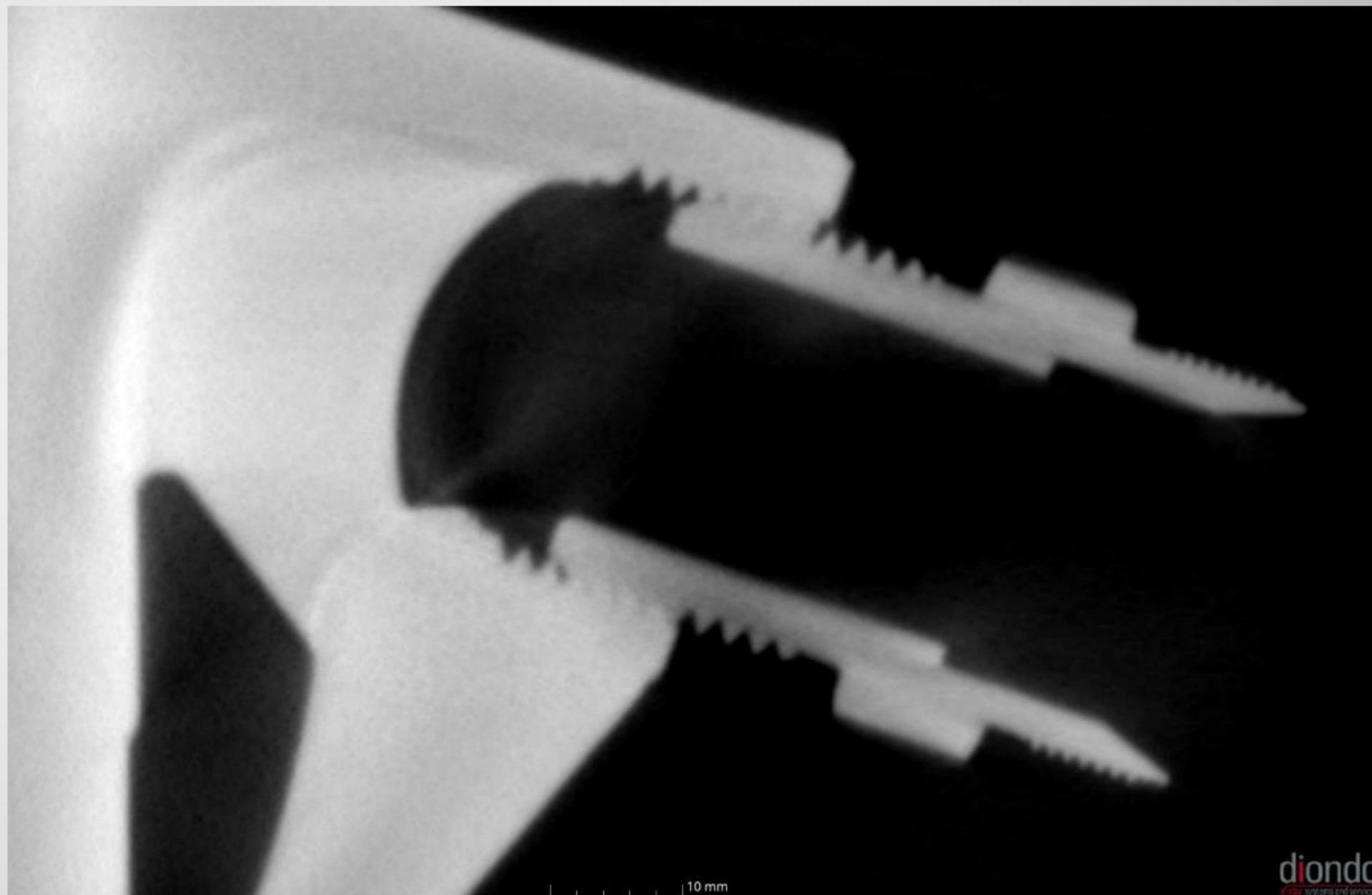


Bild: Pangea Aerospace



Mit freundlicher Genehmigung von Pangea Aerospace

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit ... Haben Sie Bedarf an mehr?

Nehmen Sie an unserem VC-Röntgen-Technologietag 2024 teil



VisiConsult  
X-ray Systems & Solutions

# Röntgen-Technologietag 2024

Auf der Agenda befinden sich Vorträge unserer Kunden sowie eigene Fragestellungen:  
Neuste Technologien in der Röntgenprüfung und der industriellen Computertomographie wie Innovationen der Röntgentechnik, High-Speed und High-Energy Computertomographie, Inline CT zur Batterieprüfung, Aufbau eines CT-Labors, Normenupdates, KI in der Röntgenprüfung, Digitalisierung / NDE 4.0 uvm.

**Registrierung der Teilnahme unter: [gstoo.de/technologietag2024](https://gstoo.de/technologietag2024)**



Lufthansa



Mercedes-Benz



LIEBHERR



SCHAEFFLER



10. Oktober 2024 | Stockelsdorf



# diondo

X-ray systems and services

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit

[olaf.guennewig@diondo.com](mailto:olaf.guennewig@diondo.com) | [www.diondo.com](http://www.diondo.com)

Ruhrallee 14 | D-45525 Hattingen | Tel. +49 2324 39319-33 | Fax +49 2324 39319-29

14