

Abschlussbericht Cool Promo

ZE X-FAB MEMS Foundry GmbH	Förderkennzeichen 03INT610BC
Vorhabensbezeichnung Prozessüberwachungs- und Fehleranalyselösungen für energieeffiziente Bauelemente und Produkte der Mikroelektronik-Teilvorhaben C	
Laufzeit des Vorhabens 01.07.2019 bis 30.11.2022	
Berichtszeitraum 01.07.2019 bis 30.11.2022	

Inhalt

1.	Kurze Darstellung zu	3
1.1	Motivation.....	3
1.2	Projektpartner.....	4
1.3	Aufgabenstellung an X-FAB	4
1.3.1	Arbeitspaket 4.1 Identifikation und Beschreibung von Referenzproben, Auswahl geeigneter Techniken	5
1.3.2	Arbeitspaket 4.5 Bewertung des hybriden Metrologieansatzes und der Kreuzkorrelationsanalyse.....	5
1.3.3	Arbeitspaket 4.6 Definition von Messmethodik und High-TP-Strategie / Referenzanwendungen, Methodik und kommerzielle Verwendbarkeit	6
2.	Bearbeitung der Projektaufgaben.....	6
2.1	Tooldemonstration.....	6
2.1.1	Laserscanning-Mikroskop Keyence VK-X1000.....	6
2.1.2	Hitachi ArBlade 5000	8
2.1.3	Diamond WireTEC DWS100	11
2.2	Arbeitspaket 4.1 Identifikation und Beschreibung von Referenzproben, Auswahl geeigneter Techniken.....	12
2.3	Arbeitspaket 4.5 Bewertung des hybriden Metrologieansatzes und der Kreuzkorrelationsanalyse	14
2.4	Arbeitspaket 4.6 Definition von Messmethodik und High-TP-Strategie / Referenzanwendungen, Methodik und kommerzielle Verwendbarkeit.....	20
3.	Zusammenfassung	26
	Glossar	27

1. Kurze Darstellung zu

1.1 Motivation

X-FAB ist eine weltweit führende Foundry Gruppe für analog und gemischt analog-digitale Halbleiter. Neben der Kombination von analogen und digitalen Komponenten in einem Chip bietet X-FAB eine breite Palette von More-than-Moore-Technologien und eine einzigartige technologische Kombination von CMOS- und MEMS-Funktionalitäten. X-FAB hat langjährige Erfahrungen solche komplexen Systeme für verschiedene Anwendungsfelder herzustellen, die den Qualitätsanforderungen der Automobil-, Industrie-, aber auch Medizin- und Verbrauchermärkte entsprechen.

Mit sechs Fertigungsstätten in Deutschland, Frankreich, Malaysia und den USA verfügt die X-FAB Gruppe über eine Kapazität von etwa 98.000 acht Zoll äquivalenten Waferstarts pro Monat und beschäftigt ca. 4.000 Mitarbeiter weltweit.

Besonders für weltweit agierende Unternehmen, wie die X-FAB, ist die Ausfallanalyse (Failure Analysis) - die systematische und schnelle Aufklärung eines Ausfalls - ein wichtiges Instrument für die Entwicklung neuer Produkte und die Verbesserung der bestehenden. Es ist notwendig, alle Daten zu sammeln, zu analysieren und Schlussfolgerungen zu ziehen, um Ausfälle schnellstmöglich zu beseitigen und in Zukunft vermeiden zu können. Der Kunde soll ein zuverlässiges Qualitätsprodukt erhalten, das seine Erwartungen und die des Marktes vollständig erfüllt.

Durch die ständig zunehmende Komplexität auf Systemebene, um Kostenvorteile zu erzielen, sind die Anforderungen und Herausforderungen an die Ausfallanalyse stetig gewachsen. Gerade die (monolithische) Integration von MEMS-Aktoren/-Sensoren und den Controller-Schaltkreisen stellt besondere Anforderungen, wenn es um die elektrische Kontaktierung, z.B. durch Through-Silicon-Vias, und die Verbindung von unterschiedlichen Wafern bzw. Schaltkreise durch Bondverfahren geht. Um die Fragestellungen in diesen wichtigen technischen Bereichen auch in Zukunft genauso zuverlässig lösen zu können, sind neue Methoden erforderlich. Wobei nichtzerstörende Verfahren immer zerstörenden Verfahren vorzuziehen sind. Während der Entwicklung neuer 3D-Produkte werden ausschließlich zerstörende Methoden eingesetzt, was zu hohen Kosten und Personalaufwand führt. Um diese Ressourcen während der Massenproduktion zu reduzieren und mögliche Ausfälle

gezielt zu untersuchen, könnten sehr hochauflösende X-Ray-Verfahren hilfreich sein. Kombiniert mit neuesten bildgebenden Untersuchungsverfahren, z.B. Laser-Scanning-Systemen, sowie modernen Präparationstechniken, z.B. Ionen -gestützte Abtragung, kann die Röntgenanalyse wirkungsvoll genutzt werden. Dies führt zu besserer Fertigungsqualität, als auch zukünftig zu kürzeren Durchlaufzeiten bei Kundenreklamationen. Deshalb ist dieses Forschungsvorhaben für die X-FAB von großem Interesse besonders in Hinblick auf die eingesetzten Analyseworkflows unter Einbeziehung neuester Verfahren.

1.2 Projektpartner

Koordiniert wird das Projekt von zwei starken industrieorientierten Organisationen in Dresden und Brno, Cool Silicon und CEITEC Nano. Auf deutscher Seite besteht das Konsortium aus AXO DRESDEN, Huber Diffraktionstechnik und dem Fraunhofer IKTS Dresden zur Entwicklung eines hochauflösenden Röntgeninspektionssystem. Die tschechische Seite wird neuartige Lösungen entwickeln, insbesondere Szintillatorkristalle und Detektoren für das Röntgeninspektionssystem, sowie diese mit Analysemethoden unter Verwendung von Elektronen- und Ionenstrahlen in einem Konsortium korrelieren, das aus TESCAN, Crytur, NenoVision und der Technische Universität Brno besteht und wird unterstützt durch einen großen Halbleiterhersteller, X-FAB MEMS Foundry GmbH.

1.3 Aufgabenstellung an X-FAB

In der Übersicht ist die gesamte Planung des Projekts dargestellt. Zusammen mit den deutschen Partnern Fraunhofer IKTS Dresden (IKTS), AXO DRESDEN (AXO), Huber Diffraktionstechnik (Huber) und X-FAB MEMS Foundry GmbH (X-FAB) starteten am 01.07.2019.

Die tschechischen Projektpartnern Brno University of Technology, CEITEC Nano (BUT/Ceitec), TESCAN, Crytur und NenoVision fingen schon am 01.01.2019 an.

Work package	Partner	PM	Year 1												Year 2												Year 3													
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12		
1 Coordination and Management	alle	6+3+1+2																																						
Development and Testing of Components for Nondestructive High-Res XCT																																								
Task 2.1: Design, development, and production of scintillator crystal and X-ray Camera; testing	Crytur	126												M2.1																										
2 Task 2.2: X-ray source-optics systems	AXO	24												M2.2																										
Task 2.3: Analytics of Scintillator crystals and X-ray optics Multilayers	BUT/CEITEC	22																								M2.3														
Task 2.4: AXT tool configuration	IKTS, Huber	10+2												M2.4																										
Development and Integration of Nondestructive High-Res XCT Tool																																								
Task 3.1: Setup of X-ray stage, improved mechanical set-up	Huber	28																									M3.1													
3 Task 3.2: Tool Integration (incl. X-ray source)	IKTS, AXO, Huber	12+15+2																																				M3.2		
Task 3.3: Development of application and controlling software	IKTS	10																										M3.3												
Development of measurement procedure and cross-correlation with destructive High-Res Measurements																																								
Task 4.1: Identification and description of reference samples, selection of suitable techniques	X-FAB	8												M4.1																										
Task 4.2: Testing and optimization of ion tomography	BUT/CEITEC	10																										M4.2												
4 Task 4.3: Validation testing, implementation of advanced SEM techniques	TESCAN	9																										M4.3												
Task 4.4: Validation testing, implementation of SPM techniques	NenoVision	32,4																										M4.4												
Task 4.5: Evaluation of hybrid metrology approach and Cross-correlation-analysis	Tescan, BUT/CEITEC, IKTS, X-FAB,	4+4+4+9																																			M4.5			
Task 4.6: definition of measurement Methodology and high TP Strategy / Reference applications, methodology and commercial use	X-FAB, IKTS	4+6																																			M4.6			
5 Exploitation and Dissemination Strategy	alle	5+6+1+4																																						
		CZ: 212,4 GER:157																																						

Abb. 1 Gesamtübersicht des Projekts Cool Promo - Förderkennzeichen: 03INT610BC

Abb. 1 Gesamtübersicht des Projekts Cool Promo - Förderkennzeichen: 03INT610BC

1.3.1 Arbeitspaket 4.1 Identifikation und Beschreibung von Referenzproben, Auswahl geeigneter Techniken

In diesem Arbeitspaket erfolgt die Herstellung geeigneter Wafer und Strukturen zur Untersuchung mittels XCT. Die X-FAB fokussiert sich dabei auf die Ausarbeitung der Proben- und Problembeschreibung, inkl. der Analyse bekannter grundlegenden Produktions- und Funktionsprobleme. Gegebenenfalls ist eine komplexe Vorcharakterisierung erforderlich. Dabei werden verschiedene Techniken im eigenen FA-Labor kombiniert, wie z.B. Sägen, Brechen, Reinigen, Rückpräparationen und elektrische Messungen. Eine erste Analyse, Vergleich und Auswertung der XCT-Ergebnisse von Projektpartnern und eine Gegenüberstellung mit selbst gewonnen Resultaten wird durchgeführt.

1.3.2 Arbeitspaket 4.5 Bewertung des hybriden Metrologieansatzes und der Kreuzkorrelationsanalyse

Die X-FAB nimmt eine ausführliche Bewertung der Ergebnisse der XCT-Analyse vor. Das umfasst eine umfassende Analyse von Proben unter Verwendung verschiedener Präparations- bzw. Abbildungstechniken unter Auswahl räumlicher Auflösung, Empfindlichkeit und Destruktivität. Dabei steht im Zentrum die Entwicklung von Analyseverfahren an ausgewählten Proben mit dem Ziel, eventuell gefundene Fehlstellen zu charakterisieren und zu kategorisieren. Die ausführliche Nutzung des Hitachi IM5000 und des

Keyence VK-X 1000 ist in diesem Arbeitspaket geplant. Die Erweiterung des bestehenden Analyse-Workflows der Fehleranalyse bzgl. Möglichkeiten einer XCT-Untersuchung wird dabei vorangetrieben.

1.3.3 Arbeitspaket 4.6 Definition von Messmethodik und High-TP-Strategie / Referenzanwendungen, Methodik und kommerzielle Verwendbarkeit

Auf Grund der Ergebnisse der oben genannten Arbeitspakete werden bei Bedarf diese mittels hochauflösenden Transmissionselektronenmikroskopie (TEM) bestätigt und visualisiert. Hierbei können weitere Analyseverfahren wie EDX und EELS angewandt werden. Diese zusätzlichen Untersuchungen sind notwendig, um über die X-Ray-Ergebnisse verlässliche Aussagen treffen zu können.

2. Bearbeitung der Projektaufgaben

2.1 Tooldemostration

Im Vorfeld des Projekts wurde 2 neue Methoden für die Fehleranalyse geplant. Im ersten Teil des Vorhabens wurden durch verschiedene Demonstrationen mehrere Hersteller evaluiert und letztendlich haben die beiden Produkte von Hitachi und Keyence voll überzeugt.

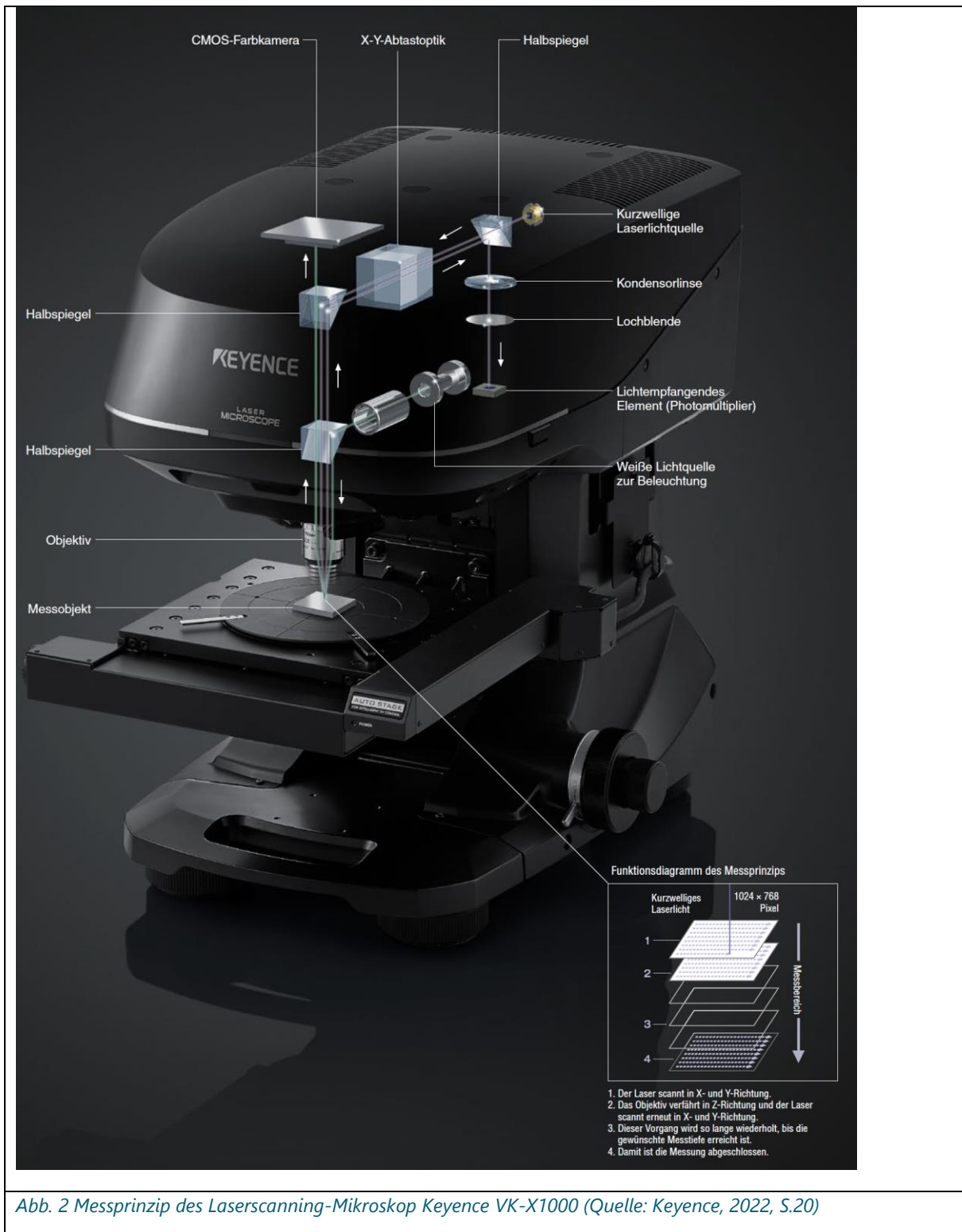
2.1.1 Laserscanning-Mikroskop Keyence VK-X1000

Das Gerät vereint durch sein variables Beleuchtungssetup: Koaxialbeleuchtung, Ringbeleuchtung und UV-Laser (404 nm), 2 Mikroskope in einen, ein Standardlichtmikroskop und ein Konfokales Laserscanningsystem.

Es ermöglicht die zerstörungsfreie Profiluntersuchung (Höhen- und Tiefenprofil) und Bestimmung der Oberflächenrauheit. Mit den 150x Objektiv erreicht man bis zu 28.000 –fache Vergrößerung bei 0.5nm Auflösung. Ein motorisierter Probentisch ermöglicht den Scan und die Zusammensetzung von sehr großen Proben/Betrachtungsbereichen inklusive automatischer Fokusanpassung.

Das Messprinzip ist einfach erklärt: Der Laser wird in X- und Y-Richtung über die Probe gescannt. Danach wird das Objektiv in Z-Richtung verfahren und erneut wird in X- und Y-Richtung gescannt, dies wird so lange wiederholt, bis die gewünschte Tiefe erreicht ist.

Abschließend wird aus den verschiedenen Z-Ebenen ein 3D-Bild errechnet. Diese Bilder können dann zu verschiedenen Messungen genutzt werden.

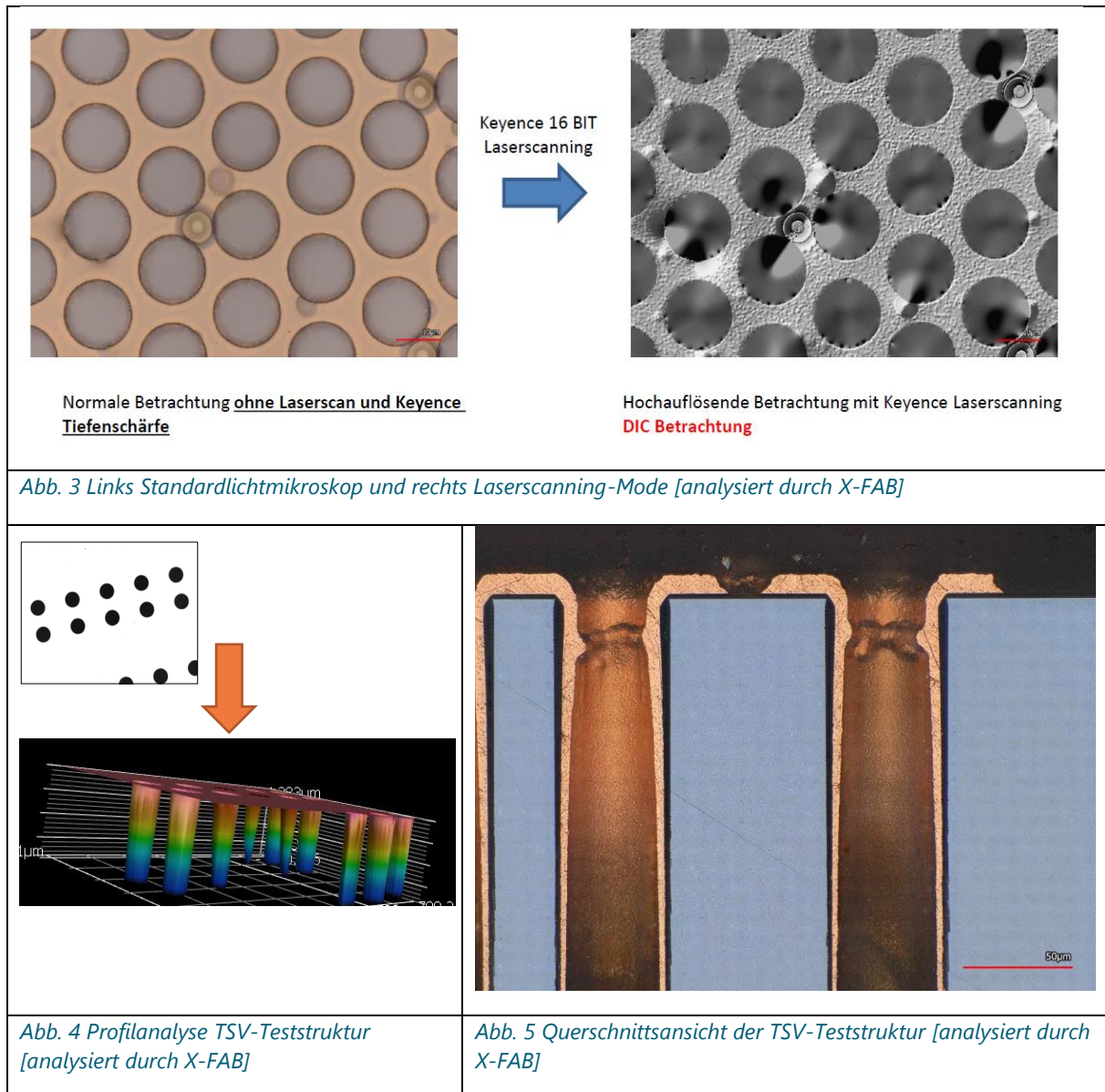


Vorteil gegenüber Mitbewerbern langjährige optimierte Hardware mit abgestimmter Software. Es fand Anwendung im Projekt Cool-Promo zur Visualisierung gefundener

Schwachstellen aus den X-RAY-Untersuchungen und deren Kategorisierung im Arbeitspaket

4.

Abb. 3, 4 und 5 zeigen einige Ergebnisse aus Anlagendemonstration von Keyence.

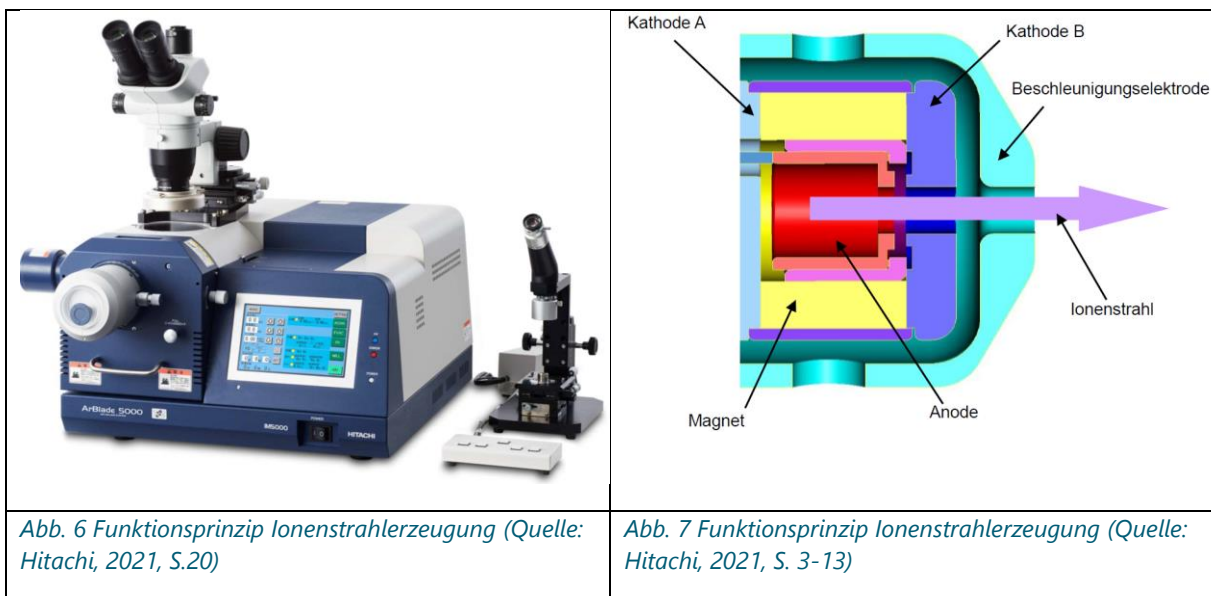


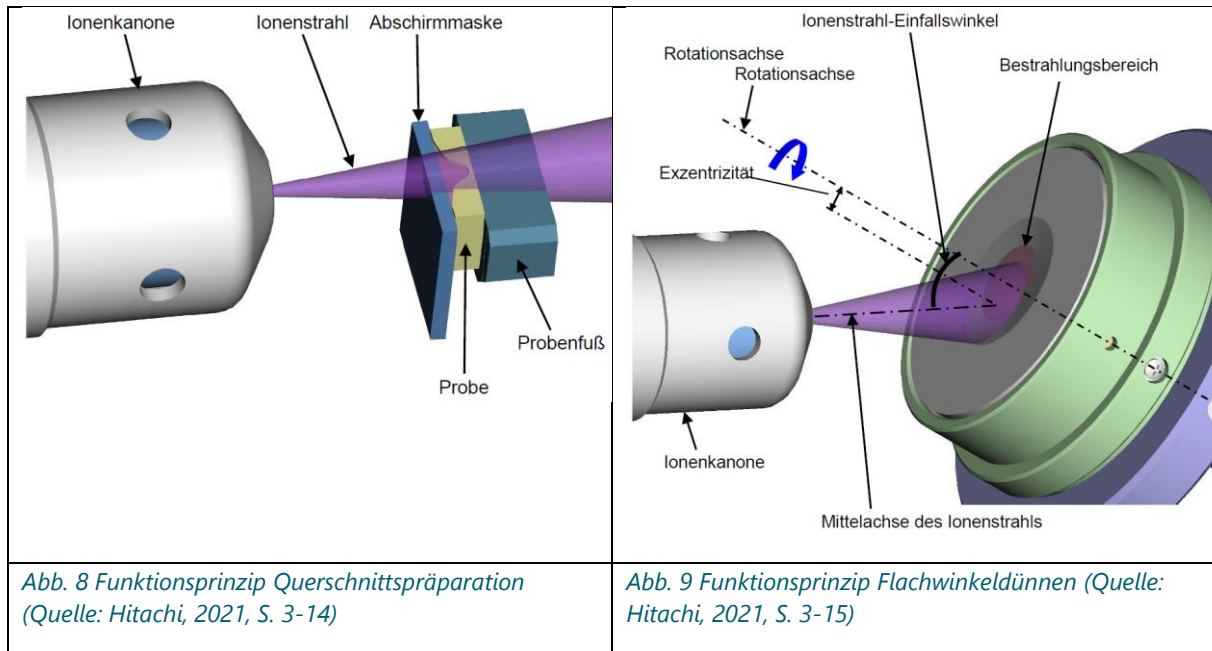
2.1.2 Hitachi ArBlade 5000

Die Ionenkanone in der ArBlade5000 verwendet ein Penning-System (eine Methode, bei der ein Magnet in die Elektrode integriert ist, um die Entladungseffizienz zu verbessern). Das System legt eine Hochspannung zwischen der Anode und den Kathoden A und B an, um ein Plasma zu erzeugen, und extrahiert und beschleunigt die Ionen im Plasma mit Hilfe einer negativen Spannung zwischen 0 und 8 kV, die zwischen den Kathoden A und B und der

Beschleunigungselektrode angelegt wird. Abb. 2 zeigt die Konfiguration der Ionenkanone im ArBlade5000.

Der Prozess des Abtrags (Ätzens) der Oberfläche einer Probe unter Ausnutzung des Sputter-Effekts, bei dem Atome von der Probenoberfläche abgelöst werden, wenn diese mit einem Ionenstrahl bestrahlt wird. Als ionische Spezies werden Edelgase wie Argon und Xenon verwendet, die normalerweise keine chemischen Reaktionen mit der Probe eingehen; das ArBlade5000 verwendet Argongas. Wenn beschleunigte Argon-Ionen auf die Probenoberfläche auftreffen, werden die Oberflächenatome, auf die die Energie der auftreffenden Ionen übertragen wird, von der Oberfläche abgelöst (Sputter-Effekt). Ist die Ionenenergie niedrig, kommt es nur zum Ablösen der Atome in der Oberflächenschicht; die Energie wird nicht in das Innere der Probe übertragen, so dass es unter der unmittelbaren Probenoberfläche nicht zu Schäden kommt. Die Abtragsrate steigt in Abhängigkeit von der Ionenenergie (der an die Ionenkanone angelegten Spannung). Normalerweise wird der Ätzvorgang unter Anwendung einer geeigneten Ionenenergie (die je nach Probe variiert) durchgeführt, die die Oberfläche der Probe nicht beschädigt.





Die Vorteile des Verfahrens gegenüber vorhandenen Methoden in der Fehleranalyse:

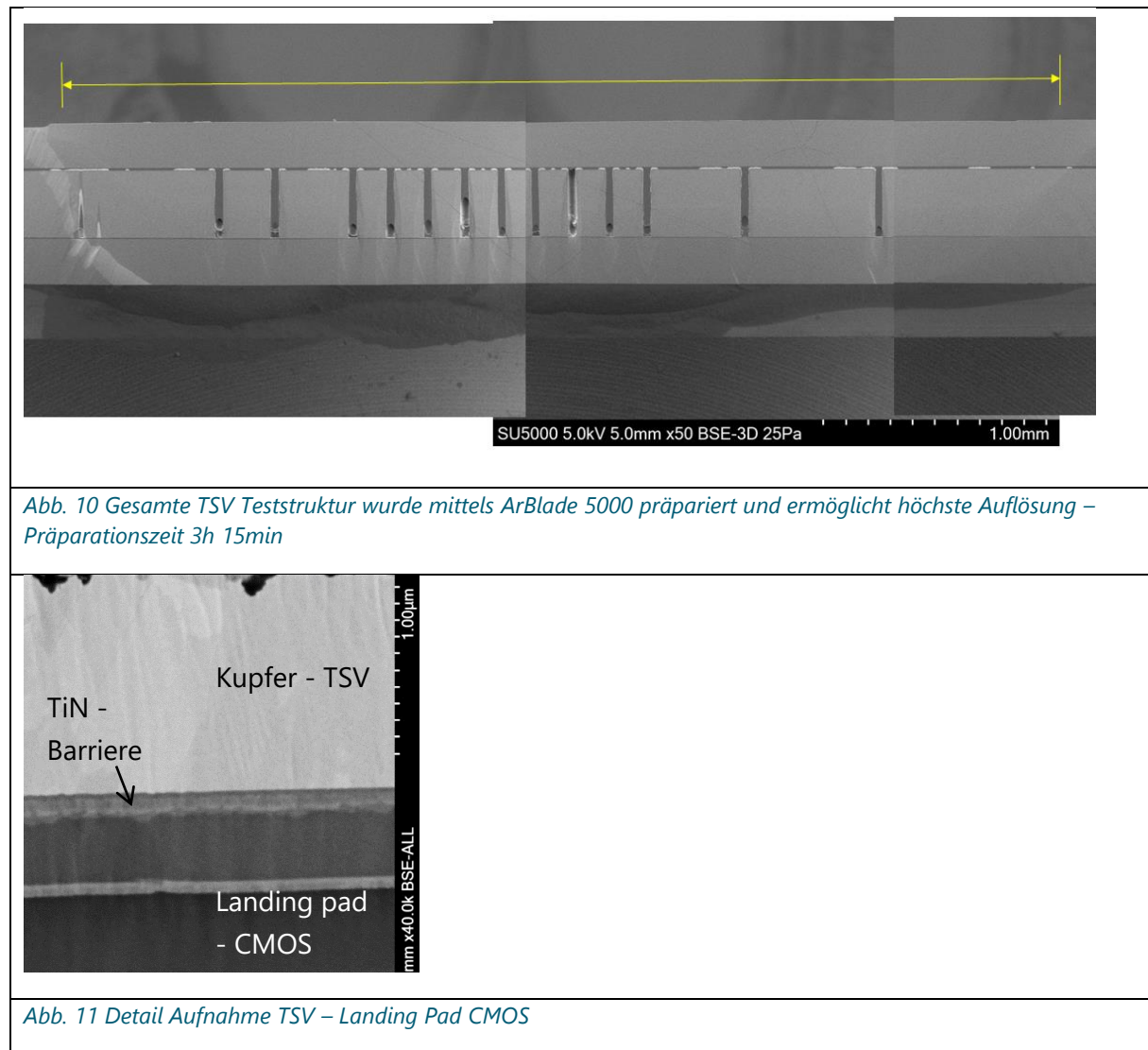
- Artefakt freie Alternative zur Querschnittsanalyse mittels Schleifen auf Diamantfolien, was viele Präparationsartefakte erzeugt und zu Fehlinterpretationen führt
- Das Gerät ist für sowohl für Querschnitte (Cross-section Milling – Abb. 8) als auch oberflächliche Analysen (Flat milling – Abb. 9) geeignet
- Die Querschnittsbreiten können bis zu 8mm betragen, dadurch können gleichzeitig mehrere TSV's untersucht werden
- Weitere interessante Verwendung ist Dotier-Kontrast-Untersuchungen an Halbleiterproben

Der große Vorteil gegenüber Mitbewerbern: sehr hohe Abtragungsraten von > 1mm/h Silizium durch die Nutzung einer starken Argon-Ionen-Quelle, andere Wettbewerber am Markt nutzen mindesten 2-3 Quellen, dadurch ergeben sich geringere Wartungskosten und kürzere Bearbeitungszeiten

Anwendung im Projekt Cool-Promo: Präparation gefundener Schwachstellen aus den X-RAY Untersuchungen im Arbeitspaket 4.

Die Abbildung 10 zeigt einen Querschnitt aus der Anlagendemonstration bei Hitachi in Krefeld mit einer Gesamtbreite von ca. 6mm. Trotz der großen Dimension ist es möglich mit einem Rasterelektronenmikroskop einzelne Bereiche sehr hochauflösend zu untersuchen (Abb.

11). Des Weiteren konnten nur sehr wenige Artefakte beobachtet werden, dass gab dann auch den Ausschlag das Gerät zu kaufen.



2.1.3 Diamond WireTEC DWS100

Durch die gewonnenen Erkenntnisse im Umgang mit dem Hitachi ArBlade 5000 und Gesprächen mit den Projektpartnern wurde während des Projektes Diamonddrahtsägen verschiedener Hersteller evaluiert, um die Vorpräparation weiter zu beschleunigen und zu verbessern. Letztendlich entschied sich die X-FAB FA für eine DWS.100 vom Hersteller Diamond WireTec (Abb. 12).

 <p>DWS100: 85 x 85 mm</p>	
<p><i>Abb. 12 Diamonddrahtsäge von Diamond WireTec DWS100 (Quelle: Diamond WireTec, 2021, S. 1)</i></p>	<p><i>Abb. 13 Probeschnitte [analysiert durch X-FAB]</i></p>

Durch den Einsatz der Säge konnte zusätzlich viel Zeit bei der Vorpräparation gespart und die Qualität weiter verbessert werden. Durch den Einsatz verschiedener Drahtbreiten von 300µm bis zu 80µm und der guten Stabilität kann man sehr nahe an sein Ziel sägen und anschließend direkt mit dem Ionenstrahlzähler Hitachi ArBlade 5000 fortfahren.

2.2 Arbeitspaket 4.1 Identifikation und Beschreibung von Referenzproben, Auswahl geeigneter Techniken

Im Rahmen der Aufgabe „Task 4.1“ hat X-FAB gezielt nach Proben mit Fehlerbild „Leckstrom“ oder „Hoher Widerstand“ von TSV's gesucht und konnte diese den Projektpartnern bereitstellen. Dafür wurde in X-FAB folgender Ablauf etabliert:

- 1 Bereitstellung des auffälligen Materials durch MEMS-Entwicklungsingenieuren
- 2 Elektrische Kategorisierung des kompletten Wafers in Zusammenarbeit mit Prozess-Charakterisierung (Abb. 14)
- 3 Vereinzeln fehlerhafter TSV-Testchips durch die Fehleranalyse (Abb. 15)
- 4 Elektrische Verifizierung durch die Fehleranalyse (Abb. 16)
- 5 Lock-In-Thermographie in Zusammenarbeit mit FHI CAM in Halle/Saale (Abb. 17)
- 6 Bereitstellung von vereinzelt TSV's oder kompletten Wafern zur X-RAY-Tomographie in FHI IKTS Dresden

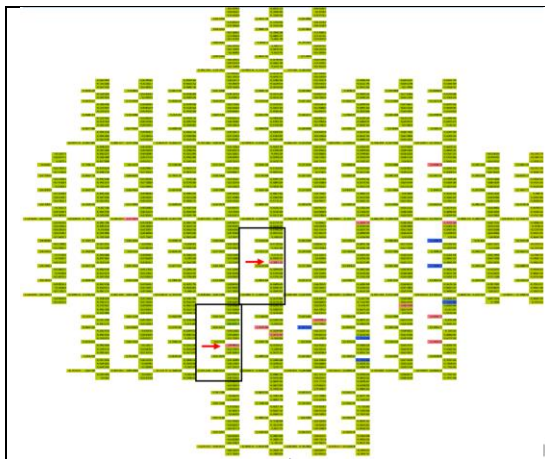


Abb. 14 aufbereitete Wafermap mit rot markierten auffälligen Testchips [analysiert durch X-FAB]

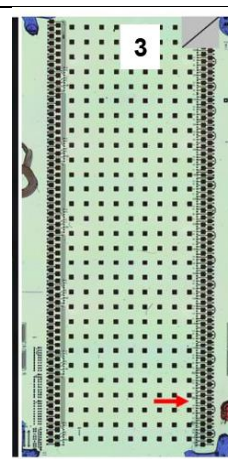


Abb. 15 einzelner TSV-Testchip mit rot markierten auffälligen TSV [analysiert durch X-FAB]

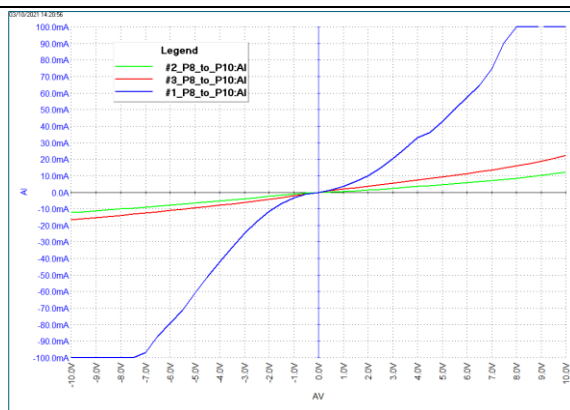


Abb. 16 Probing-Ergebnis der Fehleranalyse (grüne und rote Kurven zeigen ein normales Verhalten im Gegensatz zu der blauen IV-Kurve) [analysiert durch X-FAB]

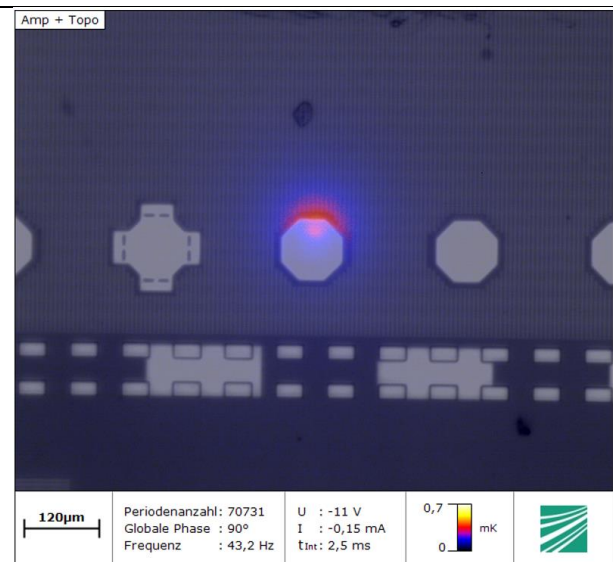


Abb. 17 Lock-In-Thermographie-Ergebnis [analysiert durch FHI CAM]

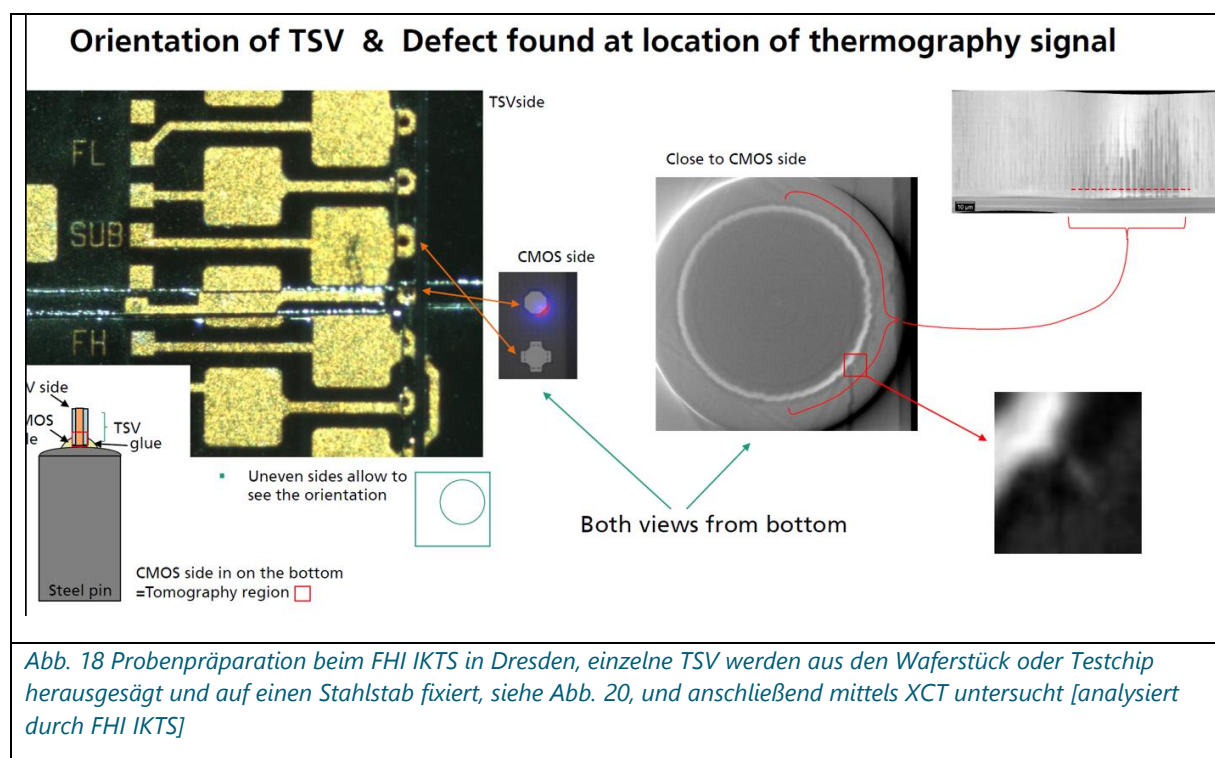
Das Arbeitspaket 4.1 konnte erfolgreich, in Absprache, mit den verschiedenen Partnern abgeschlossen werden. Die gelieferten Proben konnte im Rahmen des Projekts vollumfänglich genutzt werden

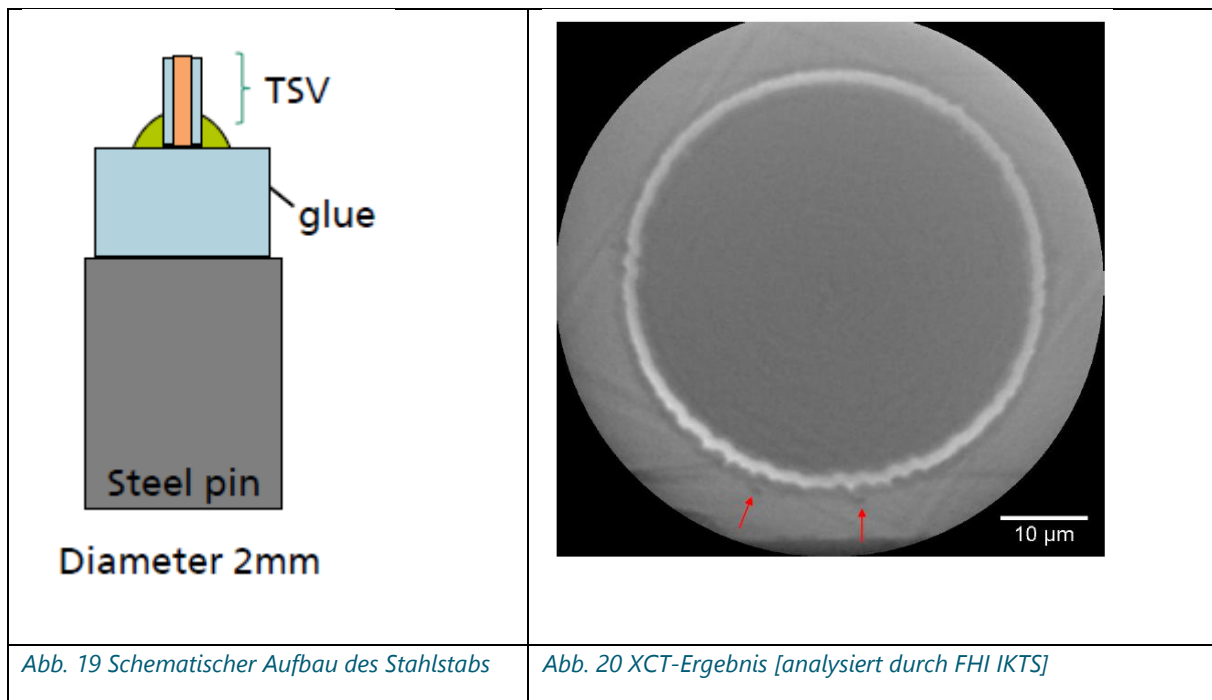
2.3 Arbeitspaket 4.5 Bewertung des hybriden Metrologieansatzes und der Kreuzkorrelationsanalyse

Nach der Auswahl geeigneter Proben, wurden diese zum FHI IKTS nach Dresden verschickt.

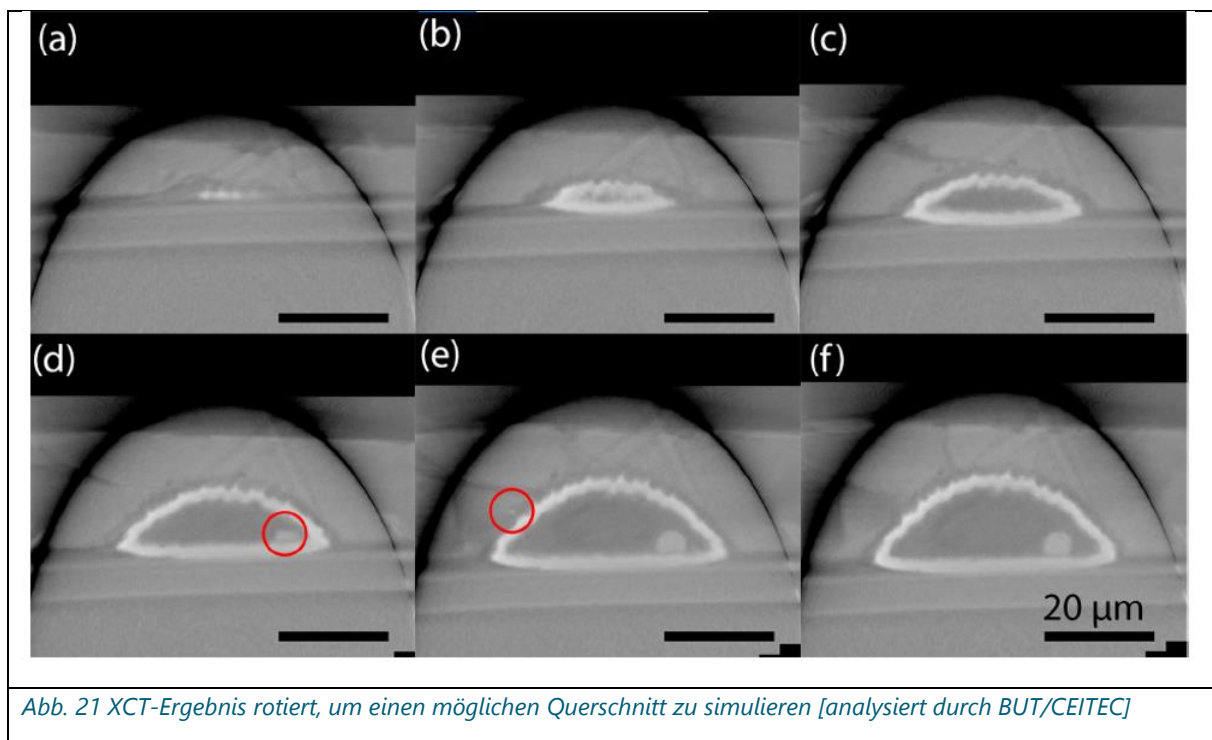
Anschließend wurden die Proben durch IKTS analysiert:

- Vereinzeln von TSVs durch Sägen
- X-RAY- Computer-Tomographie (XCT)
- Analyse und Diskussion der Ergebnisse
- Auswahl auffälliger TSVs für weitere Analysen





Nach der Diskussion der Ergebnisse wurden mit den Projektpartnern, das weitere Vorgehen abgestimmt. Korrelative Untersuchung mit FIB, EDX und TOF-SIMS durch BUT/Ceitec. Die Ergebnisse sind in den nächsten Abbildungen gezeigt



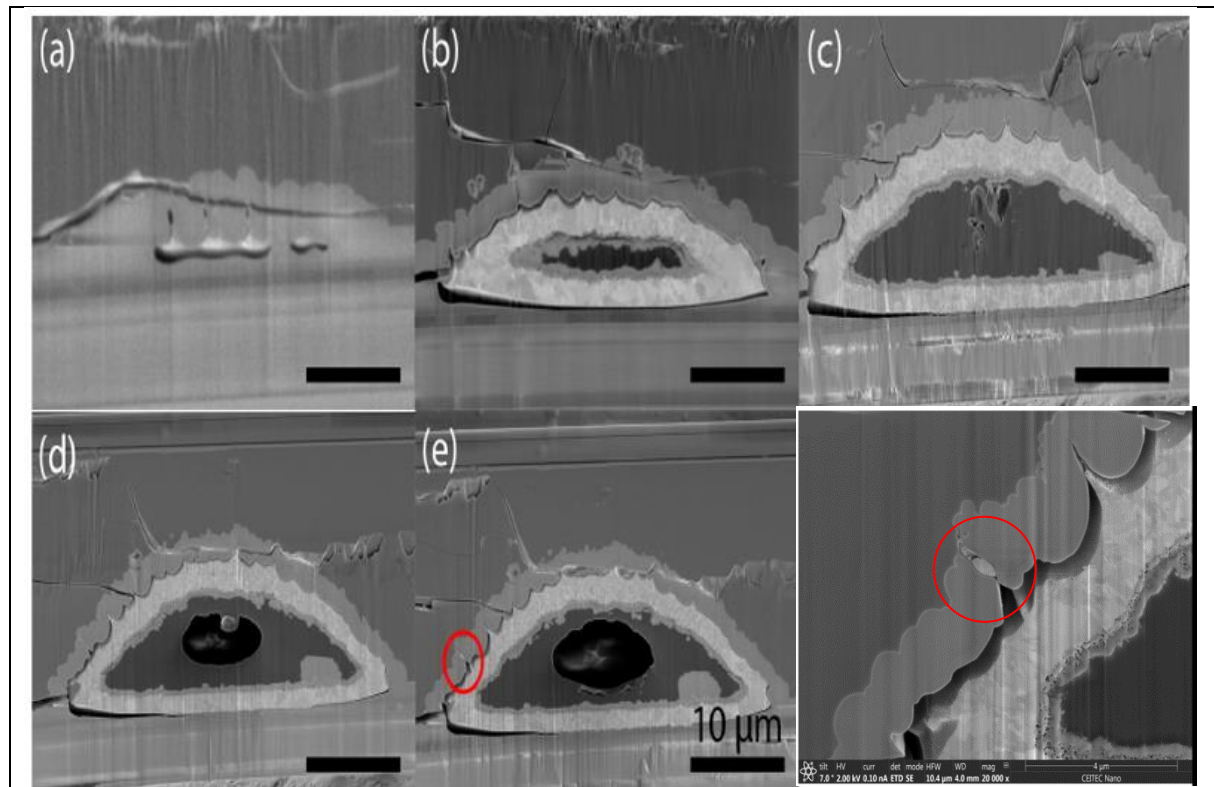


Abb. 22 Ergebnis der Querschnittsanalyse mittels Focused-Ion-Beam-System (FIB) [analysiert durch BUT/CEITEC]

EDX

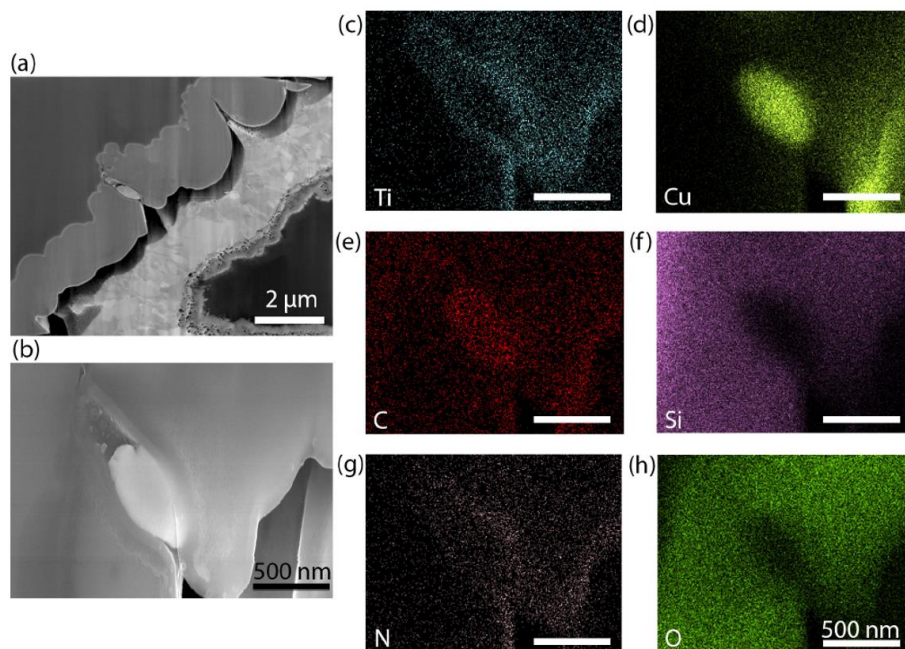
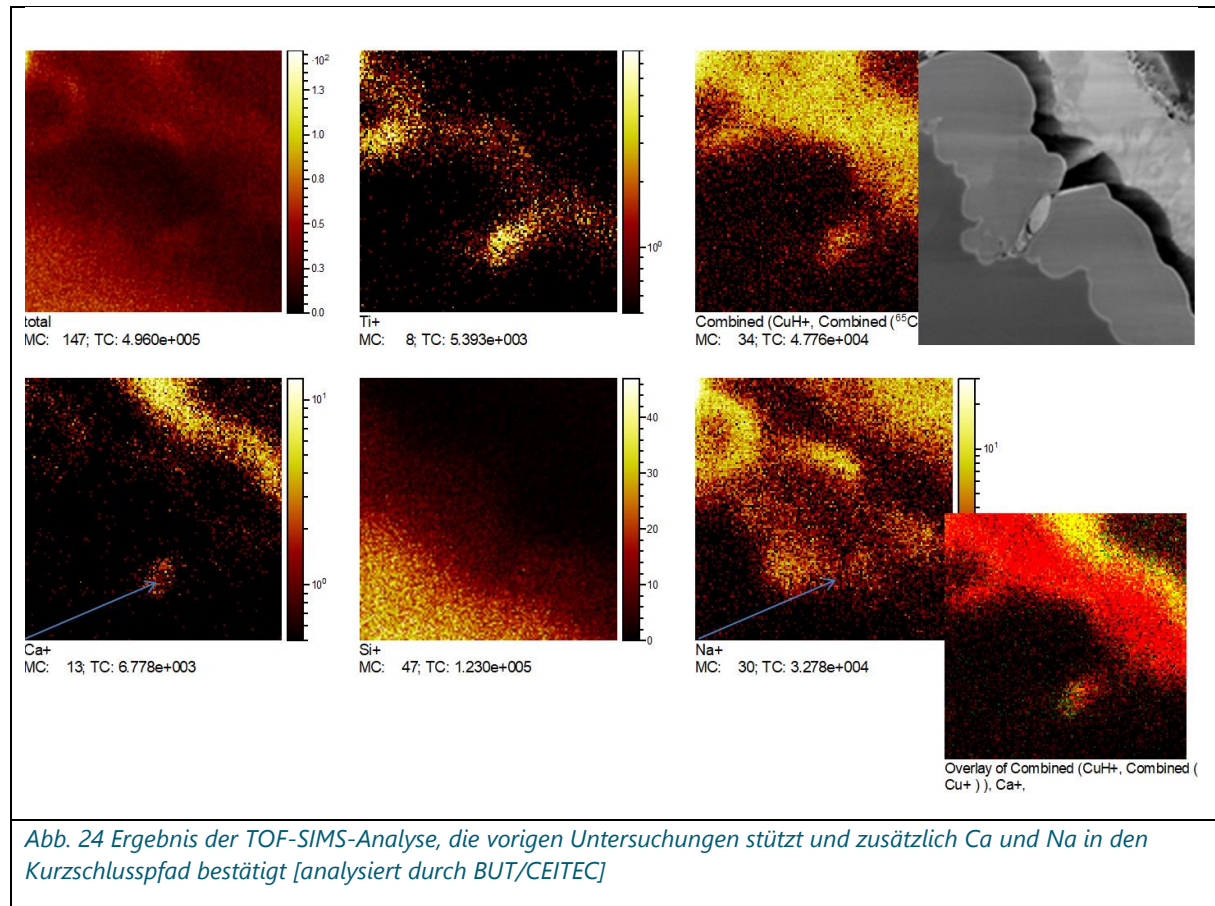
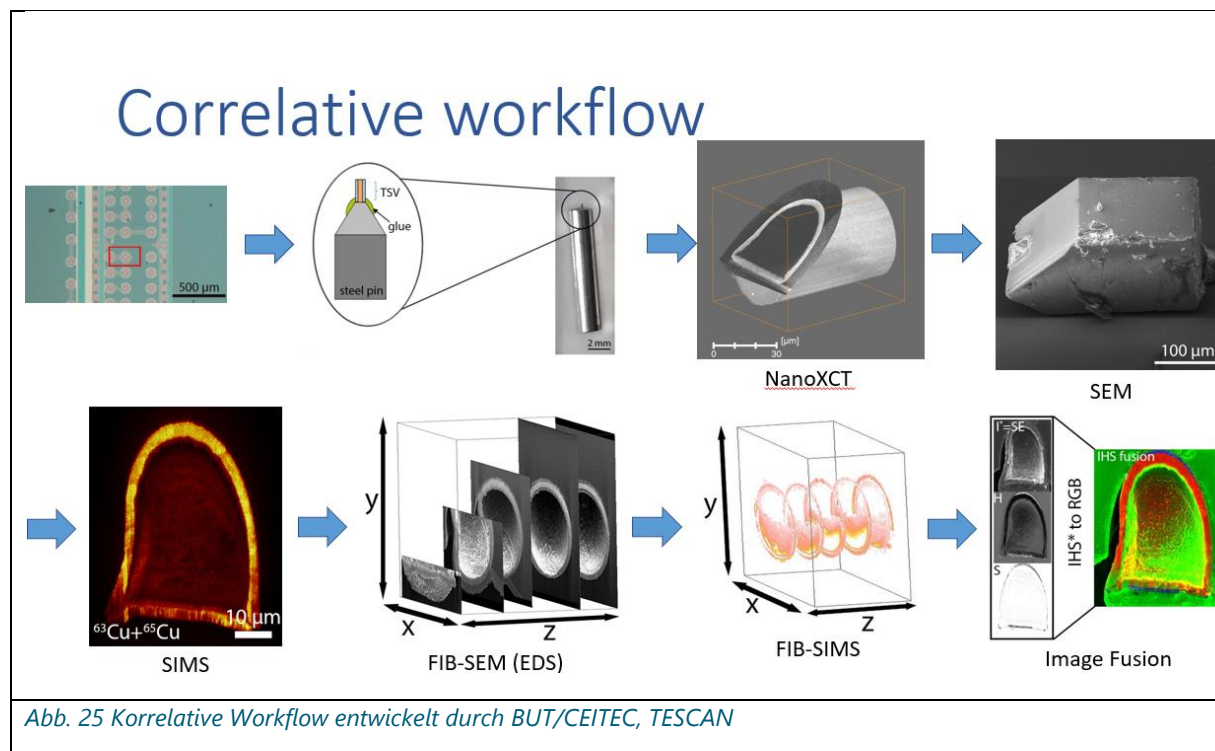


Abb. 23 Ergebnis der Elementanalyse mittels EDX [analysiert durch BUT/CEITEC]



Anhand dieser Daten wurde der Korrelative Workflow vom Projektpartner

BUT/CEITEC/TESCAN/NenoVision entwickelt und der Vollständigkeit halber hier mit angefügt.



Anhand des X-FAB genutzten Lösungsansatz, in Arbeitspaket 4.1, konnten schnell geeignete Proben bereitgestellt werden. Aber leider waren für die XCT-Analyse am FHI IKTS zeitaufwändig Vorpräparationen notwendig und das genutzte System bot nicht die gewünschte Auflösung. So dass kleine Defekte eine langwierig Datenanalyse erforderten.

Zeitgleich führte X-FAB Untersuchungen durch, um die eigenen Prozesse und Arbeitsabläufe zu optimieren. Mit Hilfe der, im Rahmen des Projekts erworbenen Anlagen und Erkenntnisse, stellte es sich als schnell heraus, die betroffenen Proben zur Lock-In-Thermographie (Abb. 26) zu senden und anschließend selbst im FA-Labor mittels FIB/SEM/EDX (Abb. 28 und 29) zu untersuchen.

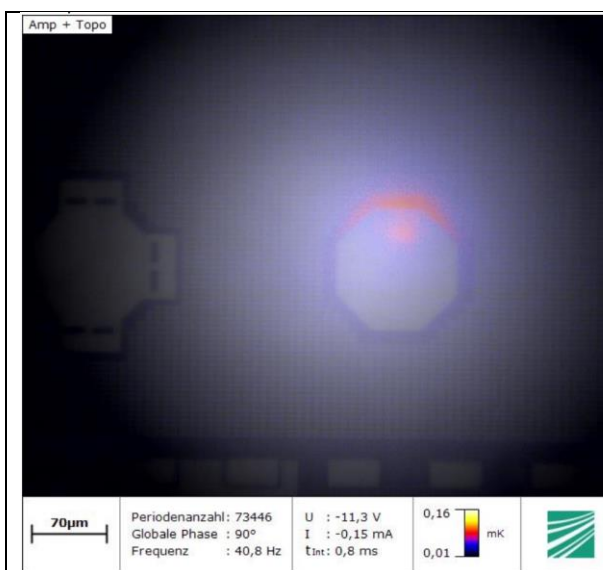


Abb. 26 Ergebnis der LIT-Untersuchung [analysiert durch FHI CAM]

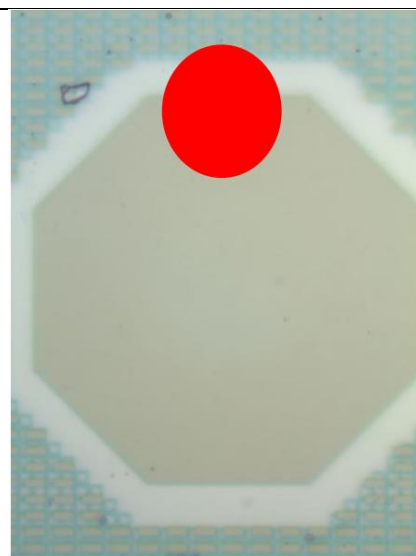


Abb. 27 Optische Kontrolle im FA-Labor [analysiert durch X-FAB]

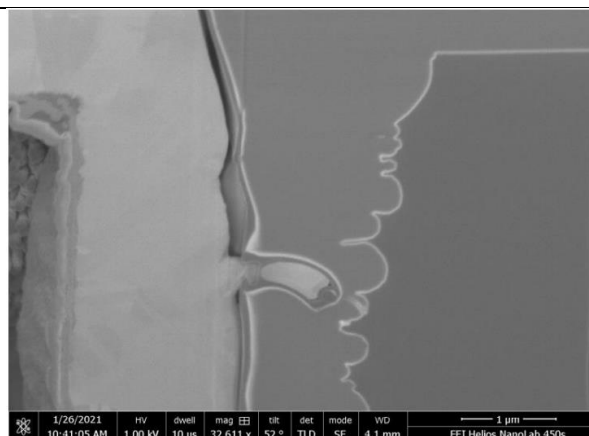


Abb. 28 Ergebnis aus der „Slice and View“-Querschnittsanalyse [analysiert durch X-FAB]

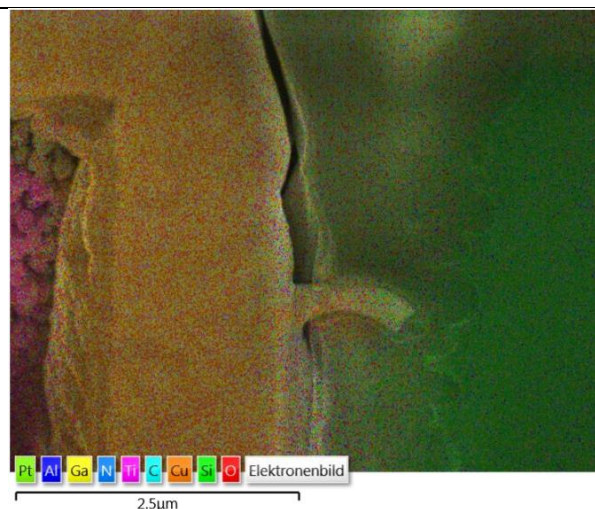
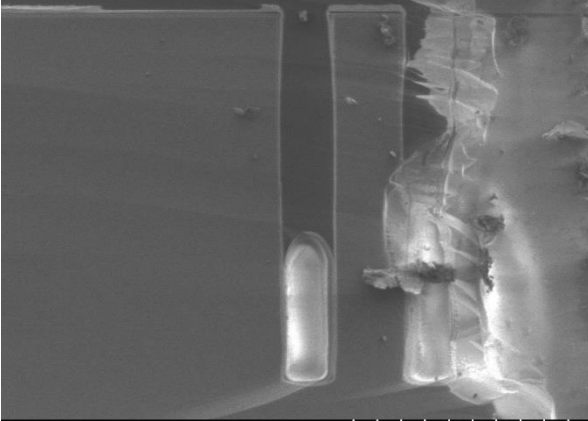
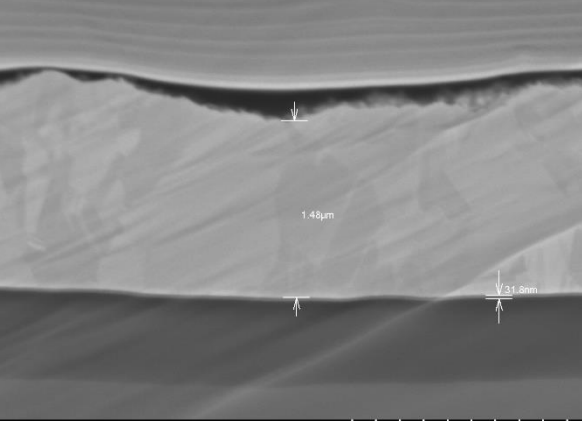

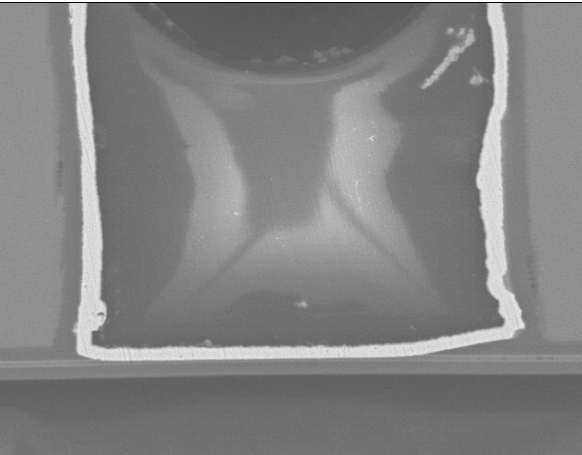


Abb. 29 Ergebnis der EDX-Untersuchung [analysiert durch X-FAB]

Aber auch durch den Einsatz der Kombination aus Hitachi ArBlade 5000 und SEM (Abb. 30 und 31) erfolgten schnelle Analysen, zwar ungenauer, dafür unter erheblicher Ersparnis in Zeit und Aufwand. Für allgemeine Prozessprobleme ist das eine sehr gute Alternative zum bisher genutzten Verfahren Querschnittsanalyse durch Schleifen. Gerade im optischen Bild (Abb. 32) sind starke Schleifartefakte zu sehen, weniger stark im SEM-Bild (Abb. 33).

 <p>X-Fab 1.0kV 4.1mm x250 LM(L) 02/20/2020 20:47 200µm</p>	 <p>X-Fab 5.0kV 4.2mm x25.0k LA80(U) 02/20/2020 21:09 2.00µm</p>
<p>Abb. 30 SEM-Untersuchung nach Präparation mit Hitachi ArBlade 5000 [analysiert durch X-FAB]</p>	<p>Abb. 31 SEM-Untersuchung nach Präparation mit Hitachi ArBlade 5000 [analysiert durch X-FAB]</p>
 <p>2020.09.01 L x4,0k 20 ur</p>	 <p>2020.09.01 L x4,0k 20 ur</p>
<p>Abb. 32 Untersuchung nach Präparation Schleifen [analysiert durch X-FAB]</p>	<p>Abb. 33 SEM-Untersuchung nach Präparation Schleifen [analysiert durch X-FAB]</p>

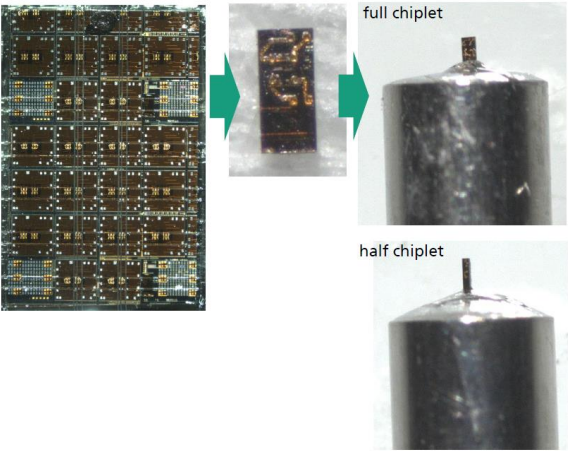
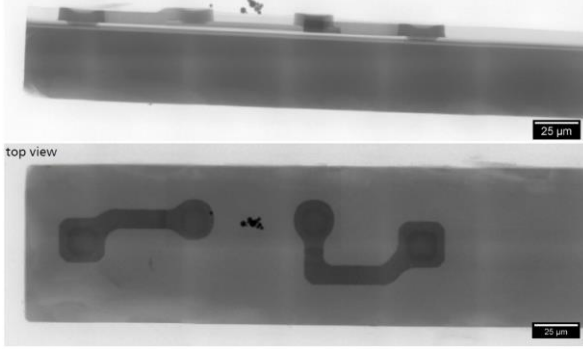
2.4 Arbeitspaket 4.6 Definition von Messmethodik und High-TP-Strategie / Referenzanwendungen, Methodik und kommerzielle Verwendbarkeit

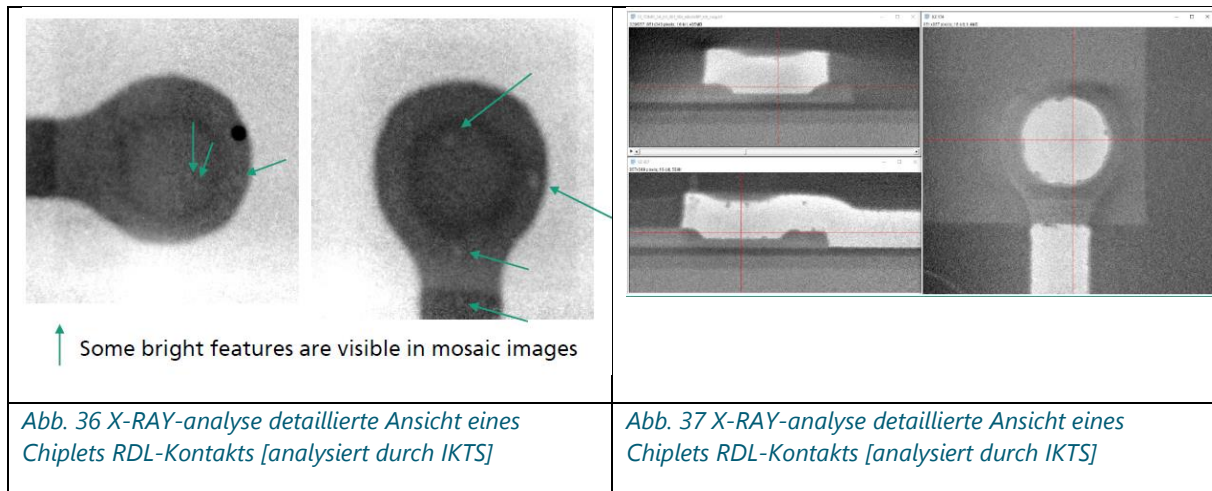
Leider konnte diese Arbeitspaket nicht vollumfänglich bearbeitet werden, da das zu entwickelten hochauflösende XCT-System nicht abgeschlossen werden konnte.

Trotzdem konnten die verschiedenen Methoden, angeboten durch die Projektpartner, anprobiert werden.

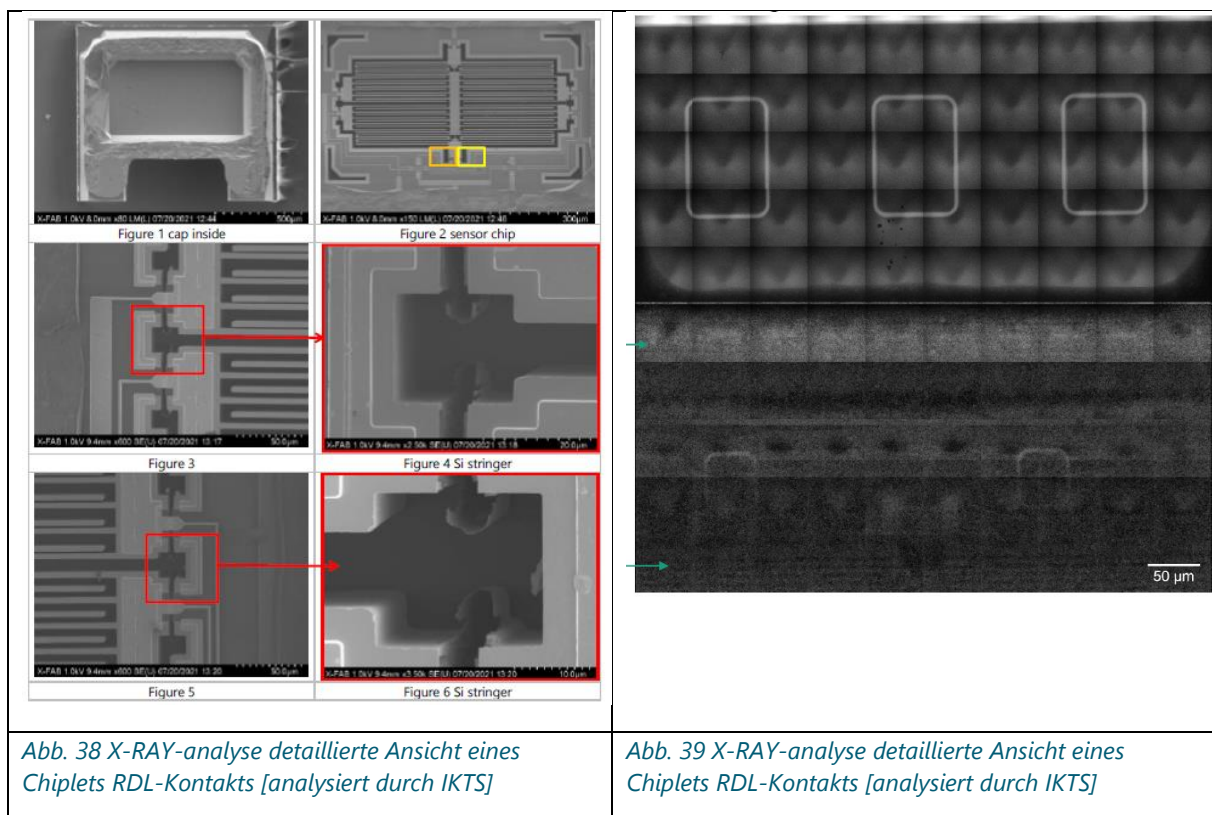
Es wurde versucht verscheiden Aufgabenstellungen mit dem, durch FHI IKTS genutzten System, Zeiss Xradia nanoXCT-100 zu erfüllen.

Als erste wurde an getestet, ob sogenannte Chiplets richtig mit dem Träger während der Fertigung verbunden worden. Chiplets sind externe Bauelemente, die per Cu-RDL-Layer an den ursprünglichen Schaltkreis angeschlossen werden. Die Untersuchungen, dargestellt in den Abbildungen 34 – 37, waren zwar erfolgreich, aber bedingt durch die schlechte Systemauflösung konnten, die für X-FAB wichtigen Fragen, nicht beantwortet werden.

	
<p><i>Abb. 34 Vorpräparation FHI IKTS Chiplet-Analyse [analysiert durch IKTS]</i></p>	<p><i>Abb. 35 X-RAY-analyse Seiten- und Draufsicht eines Chiplets [analysiert durch IKTS]</i></p>

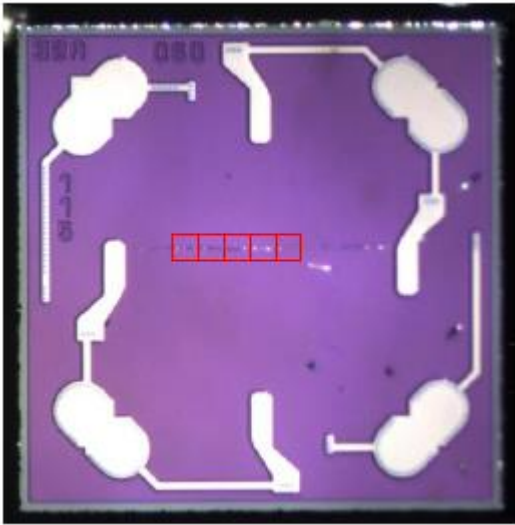
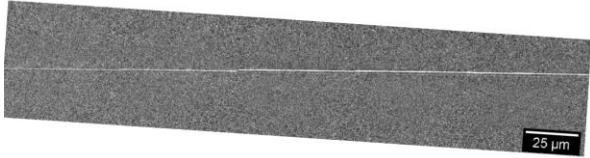


Als weitere Versuchsreihe wurden defekte Gyroskop-Schaltkreise untersucht, durch Produktionsreste können diese nicht freien Schwingen. Normalerweise sind diese mit einer Siliziumkappe abgedeckt, dadurch sind sie nicht einfach zu begutachten, wenn es zu Ausfällen kommt. Leider erweist sich der schwache Röntgen-Kontrast von Silizium als Hindernis. So dass die Reste oder auch das Silizium-Glasfrit, was als eine Art Kleber fungiert, nicht sichtbar sind (siehe Abb. 38 und 39).



Als weitere Versuchsreihe wurden verschiedene defekte Beschleunigungssensoren untersucht, diese wiesen Riss im Silizium auf. X-FAB konnte diese elektrisch charakterisieren, aber die genaue Lage nicht lokalisieren. Von 5 gelieferten Sensoren, konnte nur bei dem unten abgebildeten Chip (Abb. 40 und 41), der Riss sichtbar gemacht werden.


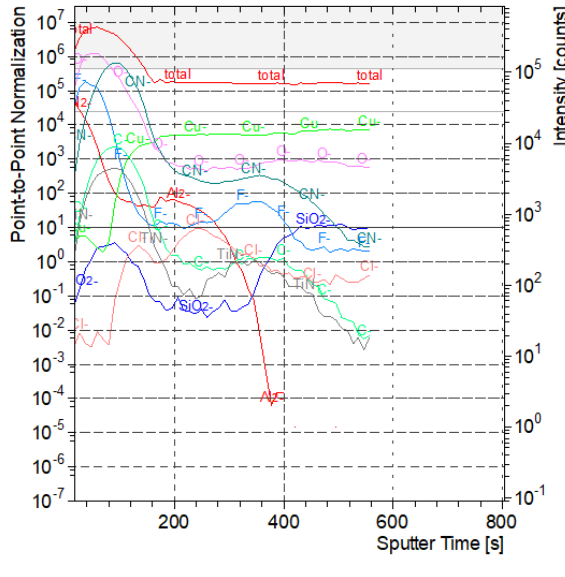
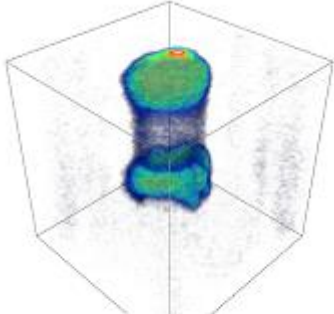
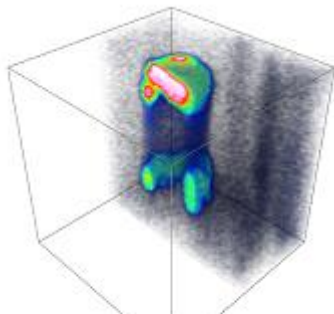
Wahrscheinlich, weil die Schwachstelle bis an die Oberfläche reicht.

	
<p><i>Abb. 40 Defekter Sensor-IC [analysiert durch IKTS]</i></p>	<p><i>Abb. 41 X-RAY-analyse eines Risses im Silizium, des rot markierten Bereichs in Abb. 41 [analysiert durch IKTS]</i></p>

Das Verfahren TOF-SIMS ist zwar bei X-FAB schon bekannt, durch die Ergänzung einer weiteren Säule (FIB) könnten sich interessante Anwendungsmöglichkeiten ergeben.

Die X-FAB FA entdeckte Chips, welche sich nicht elektrischen Ansteuern ließen und in der Querschnittsanalyse konnte eine zusätzliche Schicht gefunden werden. Leider ist die EDX-Auflösung in der FA nicht ausreichend, so bot es sich an den Chip innerhalb des Projekts mittels FIB/TOF-SIMS analysieren zu lassen.

Die Ergebnisse sind in den Abb. 43, 44 und 45 dargestellt, dank der guten Auflösung konnte bestätigt werden das die Schicht aus Fluor besteht und wahrscheinlich handelte es sich um Polymere aus der Fertigung.

 <p>400nm</p> <p>X-FAB 3.0kV 3.0mm x130k LA40(U) 01/27/2021 11:12</p> <p>CMOS part</p> <p>Pad aluminum</p> <p>residuals</p> <p>Copper</p>	 <p>Point-to-Point Normalization</p> <p>Sputter Time [s]</p> <p>Intensity [counts]</p> <p>Al, Cu, F, Si, O, C, N, Ti, Cl</p>
<p>Abb. 42 REM-Ansicht von Fertigungsresten [analysiert durch X-FAB]</p>	<p>Abb. 43 FIB/TOF-SIMS-Ergebnis Tiefenprofil-Analyse [analysiert durch BUT/Ceitec]</p>
 <p>3D Render of F-</p>	 <p>3D Render of F-</p>
<p>Abb. 44 FIB/TOF-SIMS-Ergebnis 3D-Rendering von Fluor [analysiert durch BUT/Ceitec]</p>	<p>Abb. 45 FIB/TOF-SIMS-Ergebnis 3D-Rendering von Fluor [analysiert durch BUT/Ceitec]</p>

Das LiteScope von NenoVision bietet einen AFM-in-SEM-Ansatz für die Halbleiterforschung und -entwicklung. Es können elektrische Eigenschaften gemessen und Defekte lokalisiert werden.

Im Projekt wurde es angewandt, um Poren in der Kupferschicht zu vermessen und 3-dimensionale Profile zu erstellen (Abb. 46 und 47). Leider war es nicht möglich Halbleiter charakteristische Implantationsschichten sichtbar zu machen.

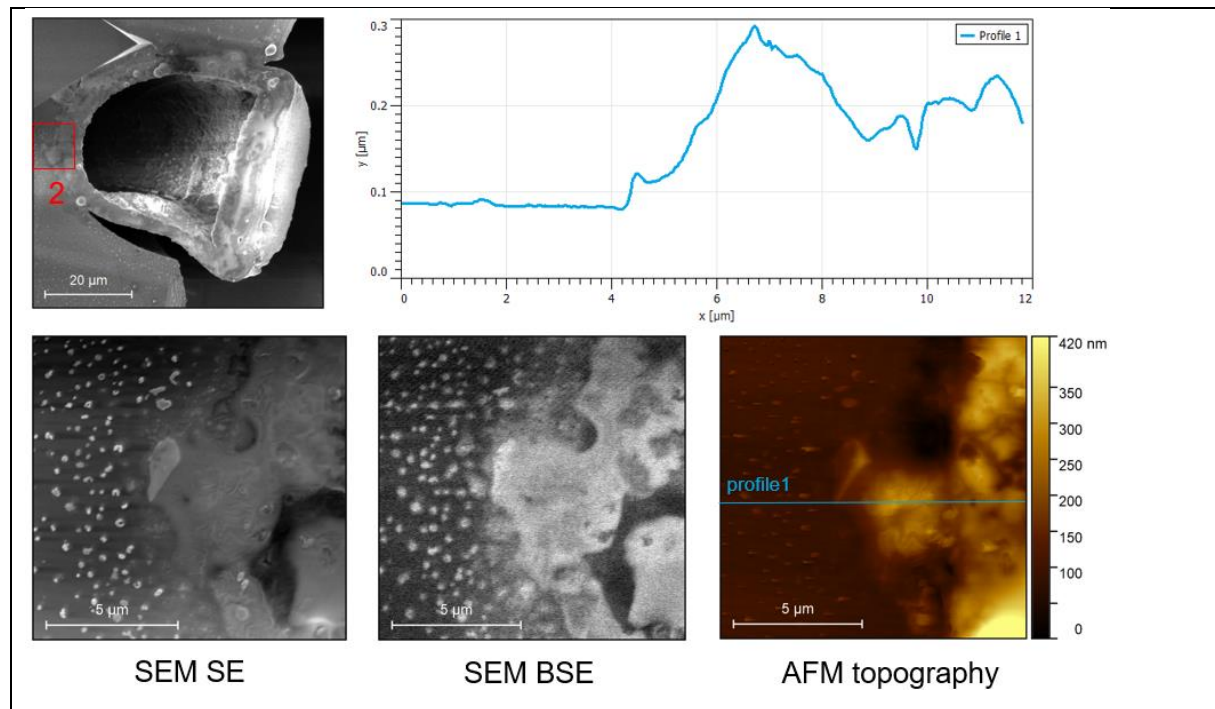


Abb. 46 SEM basiertes AFM-Ergebnis einer Pore in der Kupferschicht [analysiert durch NenoVision]

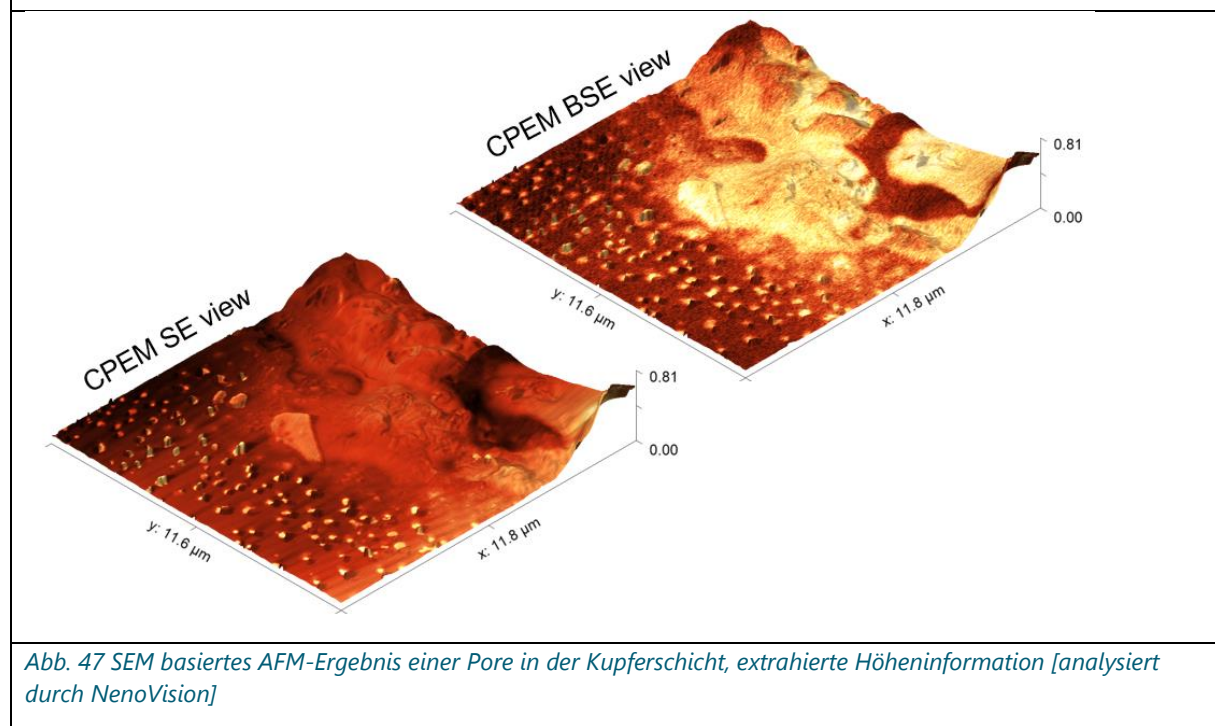
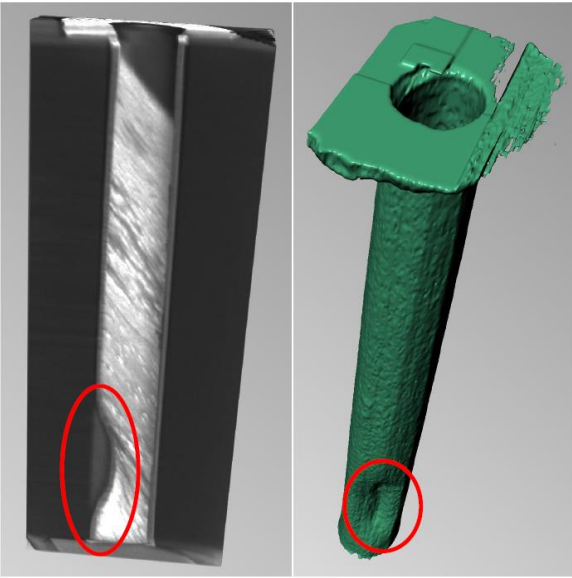
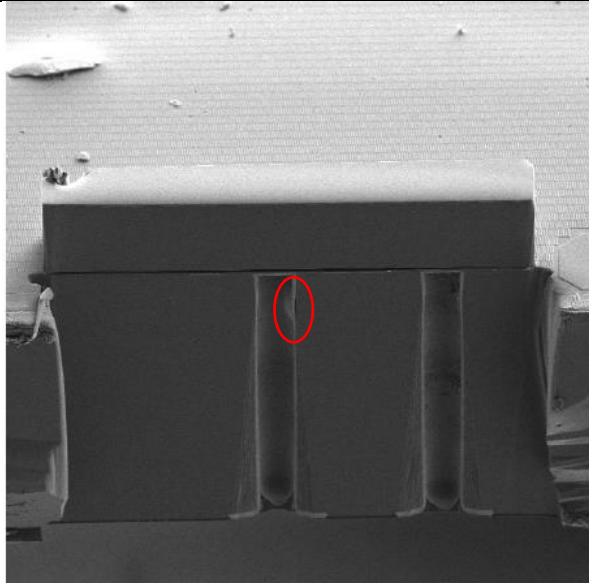
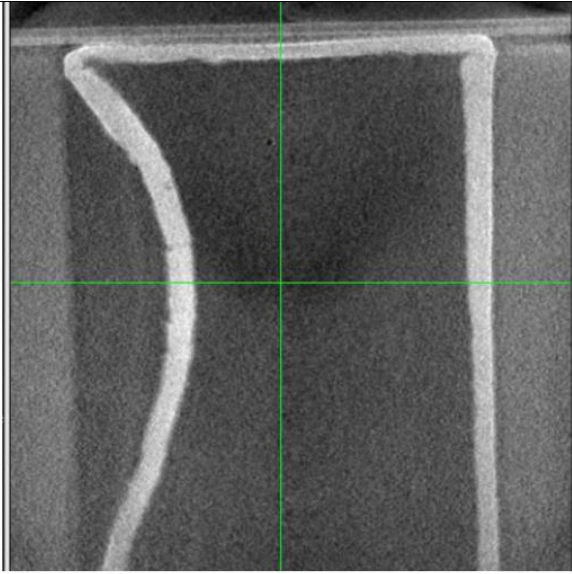
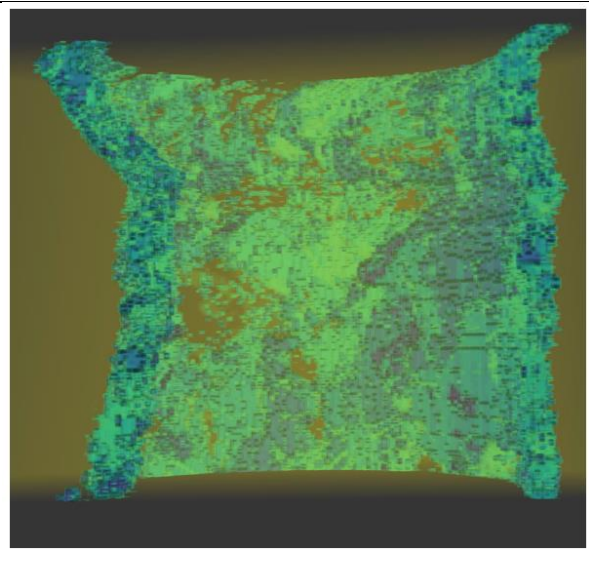


Abb. 47 SEM basiertes AFM-Ergebnis einer Pore in der Kupferschicht, extrahierte Höheninformation [analysiert durch NenoVision]

Im Rahmen des Projekts konnte auch verschiedenen Anlagen vom Hersteller TESCAN ausprobiert werden, unter anderen einen μ CT-Anlage (Ergebnis Abb. 48) und Plasma-FIB neuster Generation. Gerade die pFIB ist eine für MEMS-Produkte sehr interessante Anlage und erlaubt Durchmusterung von sehr großen Volumen, was aber immer noch zeitintensiv ist. Abb. 49 zeigt das Ergebnis einer solchen Analyse mit einer geschätzten Bearbeitungszeit von 8,5 Stunden.

	
<i>Abb. 48 μCT-Ergebnis [analysiert durch TESCAN]</i>	<i>Abb. 49 Plasma-FIB-Ergebnis [analysiert durch TESCAN]</i>
	
<i>Abb. 50 X-RAY Detailansicht [analysiert durch TESCAN]</i>	<i>Abb. 51 3D-EBSD-Ergebnis [analysiert durch TESCAN]</i>

3. Zusammenfassung

Das Arbeitspaket 4.1 konnte erfolgreich, in Absprache, mit den verschiedenen Partnern abgeschlossen werden. Die gelieferten Proben konnten im Rahmen des Projekts vollumfänglich genutzt werden

Anhand des X-FAB genutzten Lösungsansatz, entwickelt in Arbeitspaket 4.1, konnten schnell geeignete Proben für Arbeitspaket 4.5 bereitgestellt werden. Leider waren für die XCT-Analyse am FHI IKTS zeitaufwändig Vorpräparationen notwendig und das genutzte System bot nicht die gewünschte Auflösung. So dass kleine Defekte eine langwierige Datenanalyse erforderten oder nicht möglich waren. Die zeitgleich durchgeführten internen Optimierungen des FA-Workflows und die Integration der neuen Anlagen, erlaubten schnellere und aussagekräftigere Ergebnisse.

Leider konnte das Arbeitspaket 4.6 nicht bearbeitet werden. Trotzdem können in Zukunft X-RAY-Bildgebende Verfahren hilfreich sein, vorausgesetzt Auflösungen von <500nm und kontrastreichere Aufnahmen sind möglich.

- *Der voraussichtliche Nutzen, insbesondere die Verwertbarkeit des Ergebnisses – auch konkrete Planungen für die nähere Zukunft - im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans*
 - Es besteht ein starkes Interesse, verschiedener interner Abteilungen die im Rahmen des Projekts erworbene Anlagen und Erkenntnisse zu nutzen, um schneller und aussagekräftigere Ergebnisse zu erhalten. Damit werden zukünftige Entwicklungsthemen beschleunigt.
- *Der während der Durchführung des Vorhabens dem Zuwendungsempfänger bekannt gewordene Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen*
 - Das ist uns nicht bekannt.
- *Die erfolgten oder geplanten Veröffentlichungen des Ergebnisses nach Nr. 5 der NKBF/NABF*
 - Es ist von unserer Seite nichts geplant.

Glossar

EDX - energy dispersive X-ray spectroscopy

EELS - electron energy loss spectroscopy

FA - Fehleranalyse

FIB – Focused Ion Beam

FHI – Fraunhofer Institute

LIT – Lock-In-Thermographie

MEMS - Micro-Electro-Mechanical Systems

RDL - Redistribution Layer

SEM – Scanning-electron Microscope

TEM – Transmission-Electron-Microscope

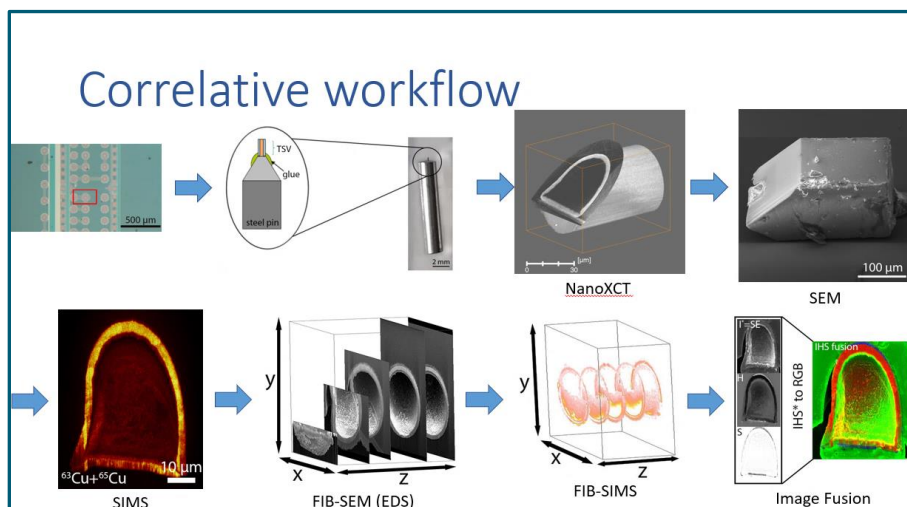
TOF-SIMS – Time-of-Flight Secondary Ion Mass Spectrometry

TSV - Through-Silicon-VIA

XCT – X-RAY computed tomography

Eine ausführliche Bewertung der Ergebnisse der XCT-Analyse erfolgte im Rahmen des Arbeitspaket 4.5 durch X-FAB. Das beinhaltet eine umfassende Analyse von Proben unter Verwendung verschiedener Präparations- bzw. Abbildungstechniken unter Auswahl räumlicher Auflösung, Empfindlichkeit und Destruktivität. Dabei stand im Zentrum die Entwicklung von Analyseverfahren an ausgewählten Proben mit dem Ziel, eventuell gefundene Fehlstellen zu charakterisieren und zu kategorisieren. Hierbei wurden die im Rahmen des Projektes erworbenen Erkenntnisse, Erfahrungen und Anlagen Hitachi IM5000, Keyence VK-X 1000 und Diamond Wire DWS.100 ausführlich genutzt.

Leider waren weitere Präparationsschritte am FHI IKTS erforderlich, wie das Vereinzeln von TSVs durch Sägen und hochauflösender X-RAY- Computer-Tomographie (XCT). Anschließend wurden die erworbenen Daten ausgewertet und in der Diskussion mit den Projektpartnern wurden die weiteren Analysen eingeleitet, z.B. pFIB-SEM, FIB-TOFSIMS, EDX und AFM. In Zusammenarbeit und mit den Partnern wurde der Korrelative Workflow entwickelt. Dieser erforderte eine komplexe Datenverarbeitung, um die verschiedenen Analyseergebnisse zu kombinieren und zu vereinheitlichen.



Zusammenfassend ist zu sagen, dass die beiden Arbeitspaket 4.1 und 4.5 erfolgreich mit den Projektpartnern abgeschlossen werden konnte. Leider konnte das Arbeitspaket 4.6 nicht bearbeitet werden. Trotzdem können in Zukunft X-RAY-Bildgebende Verfahren hilfreich sein, vorausgesetzt Auflösungen von <500nm und kontrastreichere Aufnahmen werden möglich.