



WHZ Westsächsische
Hochschule Zwickau
Hochschule für Mobilität

Untersuchung der Leistungsfähigkeit, Funktionalität und Anwendungsmöglichkeiten von unterschiedlichen Detektoren des Rasterelektronenmikroskops TESCAN CLARA anhand verschiedener Proben

Bachelorarbeit

zur Erlangung des akademischen Grades Bachelor of Engineering (B.Eng.)

Antonia Oeser

Matrikelnummer: 41729

Seminargruppe: 202224

Fakultät: Physikalische Technik/Informatik

Studiengang: Physikalische Technik

Studienschwerpunkt: Mess- und Verfahrenstechnik

1. Gutachter: Prof. Dr. Christian Müller
Westsächsische Hochschule Zwickau

2. Gutachter: M. Eng. Dirk Hildebrand
Westsächsische Hochschule Zwickau

Ausgabedatum: 12.01.2026

Abgabedatum: 09.03.2026

Autorenreferat

Die Arbeit untersucht die Leistungsfähigkeit und die Anwendungsmöglichkeiten des Feldemissionsrasterelektronenmikroskops CLARA von Tescan an der Westsächsischen Hochschule Zwickau. Ziel war die systematische Evaluierung der Detektoren und Abbildungsmodi sowie die Ermittlung geeigneter Parameter zur optimalen Abbildung ausgewählter Proben.

Untersucht wurden Sekundärelektronendetektoren und Rückstreuelektronendetektoren. Zudem wurden die hochauflösende Sekundärelektronenabbildung und ein Detektor für transmittierte Elektronen getestet.

Als Proben dienten ein eingebetteter Siliziumchip, Berliner Blau, ein Hochauflösungstestobjekt mit Goldteilchen auf Kohle sowie ein Trägerfilm auf einem TEM-Gitter. Die Arbeit zeigt, wie mit dem Feldemissionsrasterelektronenmikroskop CLARA die Topografie und Zusammensetzung verschiedener Proben analysiert werden kann und welche proben- und gerätespezifischen Grenzen dabei auftreten.

Abstract

This work investigates the performance and application potential of the field emission scanning electron microscope CLARA by Tescan at the University of Applied Sciences in Zwickau. The objective was the systematic evaluation of the detectors and imaging modes, as well as the determination of suitable parameters for the optimal imaging of selected specimens.

Secondary electron detectors and backscattered electron detectors were examined. In addition, high-resolution secondary electron imaging and a detector for transmitted electrons were tested.

The samples were an embedded silicon chip, Prussian Blue, a high-resolution test specimen with gold particles on carbon, and a thin section on a TEM grid. The work demonstrates how the field emission scanning electron microscope can be used to analyze the topography and composition of various samples and identifies the sample- and instrument- specific limitations that arise.

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei allen Personen bedanken, die mich bei der Erstellung dieser Bachelorarbeit unterstützt haben.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Müller, der mir die Durchführung dieser Arbeit ermöglicht und die inhaltliche Ausrichtung mit mir erarbeitet hat.

Susana Oliveira Richter-Trummer danke ich für die Bereitstellung des eingebetteten Transistors als Probe vom Fraunhofer ENAS sowie für die Möglichkeit zur Verwendung der am Elektronenmikroskop des Fraunhofer ENAS aufgenommenen Bilder.

Ebenso danke ich der Firma Tescan für die Bereitstellung von spezifischen Unterlagen.

Florian Schauerhammer, Servicetechniker bei Tescan, danke ich für die fachkundige Beantwortung meiner Fragen und die hilfreichen Erläuterungen.

Ein besonderer Dank gilt zudem Dirk Hildebrand für sein kontinuierliches Feedback während der Erstellung dieser Arbeit, seine fachliche Betreuung sowie die wertvollen Anregungen.

Abschließend danke ich Maiko Voigtländer für die Zeit, die er mir zum Schreiben eingeräumt hat, sowie für seine Motivation und Unterstützung während der Anfertigung der Arbeit.

Inhaltsverzeichnis

Autorenreferat	I
Abstract	I
Danksagung	II
Abbildungsverzeichnis	IV
Tabellenverzeichnis	VII
Abkürzungsverzeichnis	VIII
1 Einleitung	1
2 Grundlagen	3
2.1 Strahlerzeuger	3
2.2 Elektronensäule	4
2.3 Bildentstehung	7
2.4 Detektoren	10
2.5 Abbildungsmodi	14
2.6 Probenvoraussetzungen	15
2.7 Hochauflösung	16
3 Experimentelles	18
3.1 Geräte	18
3.2 Proben	18
3.3 Ablauf der Analysen	20
4 Ergebnisse und Diskussion	22
4.1 Abbildungsparameter	22
4.2 Detektoren	27
4.3 Abbildungsmodi	32
4.4 Hochauflösung	37
4.4.1 gerätespezifischer Vergleich: REM CLARA und REM GAIA	37
4.4.2 probenbasierter Vergleich: Gold auf Kohlenstoff und Berliner Blau ...	40
5 Zusammenfassung und Ausblick	44
Anhang	A-1

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Strahlerzeuger: A thermischer Emitter, B kalter Feldemitter, C thermischer Feldemitter [10, S. 318]	4
Abbildung 2: Aufbau eines Rasterelektronenmikroskops [14, S. 21]	6
Abbildung 3: Wechselwirkungsvolumen [11, S. 136]	8
Abbildung 4: Entstehung des Kanteneffekts [11, S. 138]	9
Abbildung 5: Entstehung des Flächenneigungseffekts [11, S. 137]	9
Abbildung 6: Aufbau eines Everhart-Thornley-Detektors [10, S. 339]	11
Abbildung 7: Aufbau eines Halbleiterdetektors [10, S. 343]	12
Abbildung 8: Aufbau des STEM-Detektors [14, S. 39]	13
Abbildung 9: Detektoren in der Kammer des REM CLARA	14
Abbildung 10: Wechselwirkungsvolumen in Kohlenstoff bei verschiedenen Beschleunigungsspannungen [Joy, S. 3]	17
Abbildung 11: Hochauflösetestobjekt	18
Abbildung 12: Berliner Blau	19
Abbildung 13: eingebetteter Siliziumchip, präpariert, von Fraunhofer ENAS	19
Abbildung 14: Trägerfilm auf TEM-Gitter	20
Abbildung 75, 76 und 77: 15 kV, 10 kV und 6 kV Beschleunigungsspannung; eingebetteter Chip	23
Abbildung 15, 17 und 16: 15 kV, 10 kV und 5 kV Beschleunigungsspannung; Hochauflösetestobjekt	23
Abbildung 78, 76 und 79: 3 nA, 1 nA und 300 pA Strahlstrom; eingebetteter Chip	24
Abbildung 116, 113 und 117: 500 pA, 300 pA und 100 pA Strahlstrom; Berliner Blau	24
Abbildung 20, 17 und 21: 15 mm, 10 mm und 5 mm Arbeitsabstand; Hochauflösetestobjekt	25
Abbildung 120, 121 und 113: 45°, 45° FSS und 0° Probenkippwinkel; Berliner Blau	25
Abbildung 24, 85 und 122: E-T-Detektor; 100 µm Sichtfeld; Hochauflösetestobjekt, eingebetteter Chip und Berliner Blau.....	27
Abbildung 26, 86 und 123: BSE-Detektor; 100 µm Sichtfeld; Hochauflösetestobjekt, eingebetteter Chip und Berliner Blau	28

Abbildung 28, 87 und 124:	4-Q-BSE-Detektor Compo; 100 µm Sichtfeld; Hochauflösungstestobjekt, eingebetteter Chip und Berliner Blau	28
Abbildung 30, 88 und 125:	4-Q-BSE-Detektor Topo; 100 µm Sichtfeld; Hochauflösungstestobjekt, eingebetteter Chip und Berliner Blau	29
Abbildung 32, 89 und 126:	Axial-Detektor; 100 µm Sichtfeld; Hochauflösungstestobjekt, eingebetteter Chip und Berliner Blau	29
Abbildung 34, 90 und 127:	Multi-Detektor; 100 µm Sichtfeld; Hochauflösungstestobjekt, eingebetteter Chip und Berliner Blau	30
Abbildung 152 und 153:	Hellfeld und Dunkelfeld mit STEM-Detektor; 5 µm Sichtfeld; Trägerfilm auf TEM-Gitter	31
Abbildung 155 und 154:	E-T-Detektor und Hochwinkeldunkelfeld mit STEM-Detektor; 5 µm Sichtfeld; Trägerfilm auf TEM-Gitter	31
Abbildung 91, 97 und 95:	„Analysis“- , „Overview“- und „Wide Field“-Abbildungsmodus; 1 mm Sichtfeld; eingebetteter Chip	33
Abbildung 94 und 96:	8,3 mm und 250 µm Sichtfeld; „Wide Field“-Abbildungsmodus; eingebetteter Chip	33
Abbildung 46, 37 und 43:	„Analysis“- , „UHR“- und „Depth“-Abbildungsmodus; 20 µm Sichtfeld; Hochauflösungstestobjekt	34
Abbildung 102, 101 und 98:	„UHR“- und „Depth“-Abbildungsmodus; 500 µm Sichtfeld; eingebetteter Chip	34
Abbildung 93, 100 und 105:	„Analysis“- , „Depth“- und „UHR“- heller Strahl Abbildungsmodus; 10 µm Sichtfeld; eingebetteter Chip	35
Abbildung 55, 57 und 58:	„Analysis“- , „Wide Field“- und „Overview“-Abbildungsmodus; Hochauflösungstestobjekt	36
Abbildung 110, 111 und 112:	„UHR“-Abbildungsmodus mit Potenzialmodus heller Strahl, axiale BSE und universell mit Axial-Detektor; 100 µm Sichtfeld; eingebetteter Chip	37
Abbildung 103, 106 und 108:	„UHR“-Abbildungsmodus mit Potenzialmodus heller Strahl, axiale BSE und universell; ET-Detektor; 100 µm Sichtfeld; eingebetteter Chip	37
Abbildung 61 und 64:	Hochauflösung; E-T-Detektor; CLARA und GAIA; 100 µm Sichtfeld; Hochauflösungstestobjekt	38

Abbildung 73 und 72:	Hochauflösung; In-Lens-Axial-Detektor; CLARA und GAIA; 0,237 μm Sichtfeld; Hochauflösungstestobjekt 39
Abbildung 74:	Hochauflösung; In-Lens-Axial-Detektor; CLARA mit angepassten Abbildungsparametern; 0,237 μm Sichtfeld; Hochauflösungstestobjekt39
Abbildung 65, 66 und 64:	Hochauflösung mit E-T-Detektor; 0,1 μm Sichtfeld mit 3 mm Arbeitsabstand, 0,1 μm Sichtfeld mit 10 mm Arbeitsabstand, 0,237 μm Sichtfeld mit 5 mm Arbeitsabstand; Hochauflösungstestobjekt 40
Abbildung 63 und 62:	Hochauflösung mit E-T-Detektor; 1 μm Sichtfeld mit 3 mm Arbeitsabstand und 1 μm Sichtfeld mit 10 mm Arbeitsabstand; Hochauflösungstestobjekt41
Abbildung 70 und 69:	Hochauflösung mit In-Lens-Axial-Detektor; 0,069 μm Sichtfeld und 0,237 μm Sichtfeld mit 5 mm Arbeitsabstand; Hochauflösungstestobjekt41
Abbildung 148 und 149:	Hochauflösung mit E-T-Detektor; 1 μm und 2 μm Sichtfeld mit 10 mm Arbeitsabstand; Berliner Blau42
Abbildung 151, 150 und 149:	Hochauflösung mit In-Lens-Axial-Detektor; 1 μm , 2 μm und 5 μm Sichtfeld mit 10 mm Arbeitsabstand; Berliner Blau 42

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Einfluss der Abbildungsparameter	26
Tabelle 2:	Abbildungen Hochauflösungstestobjekt	A-1
Tabelle 3:	Abbildungen eingebetteter Chip	A-2
Tabelle 4:	Abbildungen Berliner Blau	A-3
Tabelle 5:	Abbildungen Kohlenstoffträgerfilm auf TEM-Gitter	A-4
Tabelle 6:	Maschenweite bei verschiedenen Abbildungsmodi	A-4
Tabelle 7:	Vergleich REM CLARA und REM GAIA	A-5

Abkürzungsverzeichnis

4-Q-BSE-Detektor... 4-Quadranten-Rückstreuelektronen-Detektor

BC... Strahlstrom

BSE... Rückstreuelektronen

EDX... energiedispersive Röntgenspektroskopie

ENAS... Fraunhofer-Institut für Elektronische Nanosysteme

Eng... Beschleunigungsspannung

E-T-Detektor... Everhart-Thornley-Detektor

FIB... fokussierter Ionenstrahl

FSS... Korrektur von Verzerrung und Fokus

HADF... Hochwinkeldunkelfeld

High-Vac... Hochvakuum

HSV-Farbmodell... Farbwert, Farbsättigung und Hellwert (hue, saturation and value)

LaB₆ ...Lanthanhexaborid

Low-Vac... Niedrigvakuum

px... Pixel

REM... Rasterelektronenmikroskop/Rasterelektronenmikroskopie

SE... Sekundärelektronen

SE1... Sekundärelektronen erster Art

SE2... Sekundärelektronen zweiter Art

SE3... Sekundärelektronen dritter Art

Spd... Scangeschwindigkeit

STEM-Detektor... Detektor für transmittierte Elektronen (scanning transmission electron microscopy)

TEM-Gitter... Gitter zur Stabilisierung eines Dünnschliffs (transmission electron microscopy)

UHR-Modus... Modus zur Hochauflösenden Abbildung (ultra high resolution)

WD... Arbeitsabstand

1 Einleitung

Die Rasterelektronenmikroskopie ist ein vielseitig eingesetztes Analyseverfahren in Industrie und Forschung und dient der Charakterisierung von Oberflächen im Mikro- bis Nanometerbereich. Das elektronenoptische Verfahren ist ein etabliertes Werkzeug der Materialanalytik.

Die Leistungsfähigkeit mikroskopischer Verfahren wird im Allgemeinen durch die Auflösungsgrenze charakterisiert, welche durch den minimalen Abstand zweier Objektpunkte, die noch getrennt voneinander abgebildet werden können, definiert wird [1, S. 86]. Während die laterale Auflösung lichtoptischer Systeme durch die Wellenlänge des sichtbaren Lichts (typischerweise 400–780 nm [2]) begrenzt ist, besitzen beschleunigte Elektronen deutlich kleinere Wellenlängen im Pikometer- bis Subnanometerbereich [3]. Dadurch können Rasterelektronenmikroskope wesentlich höhere laterale Auflösungen und Vergrößerungen sowie eine große Schärfentiefe erreichen.

Die Entwicklung moderner Rasterelektronenmikroskope verläuft dabei in verschiedene Richtungen parallel. Umwelt-REM ermöglichen eine oberflächensensitive Abbildung mit reduzierter Probenbeschädigung und sind besonders für empfindliche oder biologische Proben geeignet. Multistrahl-Systeme wie das MultiSEM mit 91 parallel arbeitenden Elektronenstrahlen zielen auf eine Erhöhung der Aufnahmegeschwindigkeit hin [4]. Weitere spezialisierte Varianten umfassen Cryo-REM, automatisierte REM sowie FIB-REM- bzw. Crossbeam-Systeme, die zusätzlich die Präparation und tomografische Analyse zur dreidimensionalen Rekonstruktion des Probeninneren erlauben [5]. Moderne Feldemissionsrasterelektronenmikroskope erreichen laterale Auflösungen bis in den subnanometrischen, nahezu atomaren Bereich. So werden beispielsweise für das ZEISS Gemini Auflösungen von 0,1 nm bei 1 kV und für das Hitachi SU9600 0,4 nm bei 30 kV angegeben [6] [7].

Die in der Rasterelektronenmikroskopie erzielbaren Informationen hängen maßgeblich von der Wahl geeigneter Abbildungsparameter, Detektoren und Abbildungsmodi ab, die zudem probenspezifisch angepasst werden müssen. Ziel dieser Arbeit ist es daher, einen Überblick über die mit einem modernen Feldemissionsrasterelektronenmikroskop möglichen Analyse- und Charakterisierungsmethoden zu geben und deren Eignung für unterschiedliche Proben zu bewerten.

Im Mittelpunkt steht das Feldemissionsrasterelektronenmikroskop CLARA von TESCAN, das für die Charakterisierung von Nanomaterialien, die Qualitätssicherung in der Hochtechnologiefertigung sowie für Forschungs- und Entwicklungsaufgaben ausgelegt ist [8, S. 1].

Zur experimentellen Untersuchung wurden drei ausgewählte Proben für die Sekundär- und Rückstreuelektronendetektion herangezogen. Ein eingebetteter Chip, Berliner Blau sowie ein Hochauflösetestobjekt mit Goldpartikeln auf Kohlenstoff. Die Untersuchungen erfolgten unter Variation von Beschleunigungsspannung, Strahlstrom, Arbeitsabstand und Kippwinkel, um den Einfluss der Parameter systematisch zu untersuchen. Für die Detektion transmittierter Elektronen kam zusätzlich ein Trägerfilm auf einem TEM-Gitter zum Einsatz.

Durch den Vergleich der erzielten Ergebnisse soll gezeigt werden, welche Abbildungsmodi und Parameterkombinationen für unterschiedliche Probenanforderungen besonders geeignet sind und welches Leistungsvermögen ein modernes Feldemissionsrasterelektronenmikroskop in der praktischen Anwendung bietet.

2 Grundlagen

Im Rasterelektronenmikroskop wird die zu untersuchende Probe rasterförmig mit einem fokussierten Elektronenstrahl beschossen. Die daraus resultierenden Sekundärsignale werden von verschiedenen Detektoren erfasst und das Bild der Probe kann Punkt für Punkt auf einem Monitor dargestellt werden. [9, S. 5] [10, S. 308] Vergrößert wird, indem ein immer kleinerer Bereich gescannt und auf einem immer gleich großen Bildschirm übertragen wird. [9, S. 8] Der grundlegende Aufbau eines REM besteht aus einer elektronenoptischen Säule, einer Probenkammer, Detektoren, Vakuumpumpen und einem PC. [10, S. 311]

2.1 Strahlerzeuger

Der Weg der Elektronen, die auch als Elektronenstrahl oder Bündel bezeichnet werden, beginnt im Strahlerzeuger. Dabei können verschiedene physikalische Prinzipien genutzt werden.

Bei der thermischen Emission wird ein Filament aus Wolfram oder LaB_6 mittels Stromfluss beheizt. Die hohe Temperatur liefert genug kinetische Energie für einen Teil der Elektronen, um die Potenzialbarriere der Oberfläche zu überwinden, wodurch Leitungselektronen im Glühfaden die Oberfläche verlassen können. Die Elektronen werden dann durch eine hohe elektrische Spannung zwischen dem Glühfaden und der Anode beschleunigt. Der Wehneltzylinder, der eine etwas höhere Spannung besitzt, hat eine Linsenfunktion und fokussiert die aus der Kathode emittierten Elektronen zu einem schmalen Strahldurchmesser, dem Crossover. LaB_6 wird häufiger verwendet, weil die Austrittsarbeit mit 2 eV geringer ist als die von Wolfram mit 4,5 eV. Mit einer niedrigeren Kathodentemperatur kann eine 30-fach höhere Elektronenstromdichte erreicht werden. Auch die Lebensdauer der LaB_6 -Kathode ist größer. Ein Nachteil ist aber, dass für LaB_6 -Kathoden ein besseres Vakuum $< 10^{-4}$ Pa benötigt wird. [11, S. 85-87] [12, S. 29] [13, S. 60] [9, S. 6]

Eine Feldemissionskathode muss keine thermische Energie bereitstellen, damit Elektronen die Potenzialbarriere überwinden können. Die Elektronen werden durch Anlegen eines hohen elektrischen Feldes an eine Metalloberfläche herausgezogen. Anstelle eines thermischen Effekts bewirkt der Tunneleffekt, dass Elektronen im Leitungsband die Potenzialbarriere überwinden. Die Elektronen werden, durch ein angelegtes Spannungsfeld zwischen der ersten Anode und einer scharfen Spitze eines Wolframkristalls, gelöst und mit 0,5 bis 30 kV zu einer zweiten Anode beschleunigt. Die Feldemissionskathode erzeugt den Elektronenstrahl mit der höchsten Intensität, die 10^4 -mal größer ist als die, der Wolframfadenkathode und 10^2 -mal

größer als die, der LaB₆-Kathode. Der hohe Richtstrahlwert ermöglicht es, die Elektronen bei gleichem Strom auf sehr kleine Bereiche zu fokussieren. Es gibt zwei Arten von Feldemission: thermische und kalte Feldemission. Die kalte Feldemissionskathode arbeitet bei Raumtemperatur. Die thermische Feldemissionskathode, welche im REM CLARA verwendet wird, arbeitet bei einer erhöhten Temperatur von etwa 1600 bis 1800 K, die niedriger ist als die der rein thermischen Emission. Auch dabei ist ein Wolframkristall an der Spitze des Wolframfilaments angebracht, an dem sich nun zusätzlich ein Zirkondioxid-Reservoir befindet, um die Austrittsarbeit auf ~ 2,8 eV zu verringern. Da hier der Schottkyeffekt genutzt wird, wird der Emitter auch als Schottky Feldemitter bezeichnet. Beide Arten bieten eine geringe Energiebreite, reagieren jedoch empfindlich auf Ionen und benötigen ein Vakuum < 10⁻⁷ Pa. Schon durch einen molekularen Film von adsorbiertem Gas kann die Tunnelbarriere angehoben werden und sich die Emission verschlechtern. [11, S. 86-87] [13, S. 62-63; 65] [12, S. 29-30] [8, S. 3]

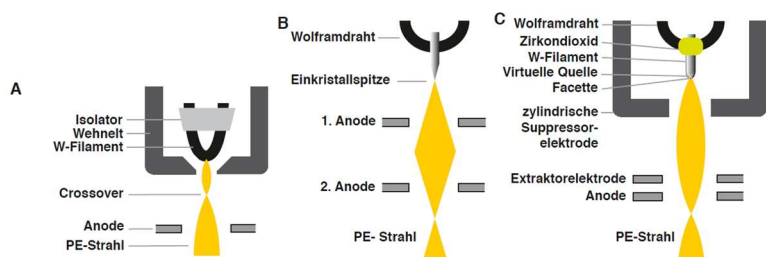


Abbildung 1: Strahlerzeuger: A thermischer Emitter, B kalter Feldemitter, C thermischer Feldemitter [10, S. 318]

Beim Austritt aus dem Strahlerzeuger haben alle Elektronen nahezu gleiche Energien und sind damit nahezu monochromatisch. Die Energiebreite liegt zwischen 0,3 eV (bei Feldemissionsquellen) und 2 eV. [12, S. 30-31]

2.2 Elektronensäule

Die Kondensorenlinse bündelt den leicht divergenten Elektronenstrahl. Damit wird auch der Elektronenstrahlstrom, d. h. die Menge an Elektronen, die auf die Probe treffen, gesteuert. Mit einem durch die Kondensorenlinse fließenden Strom wird der Elektronenstrahldurchmesser verkleinert. Folge dessen ist die Zunahme des Rauschens, da weniger Elektronen die Probe erreichen. [14, S. 22] [9, S. 47-48] Anschließend wird der gebündelte Elektronenstrahl von einem System elektromagnetischer Spulen zentriert. [14, S. 22] Die Aperturblende begrenzt den Strahl und befindet sich unter dem ersten Kondensor

und den Zentrierspulen. Die Blende definiert zusammen mit der Kondensorlinse den Elektronenstrahlstrom und verhindert, dass Elektronen, die durch die Kondensorlinsen dem Strahl verloren gehen, Kontaminationsschichten erzeugen. [14, S. 22] [9, S. 50] Die zweite magnetische Linse wird auch als magnetische Hilfslinse bezeichnet und funktioniert wie bei Kondensorlinsen beschrieben. Zudem kann diese Linse zur direkten Fokussierung genutzt werden, wenn die Objektivlinse ausgeschaltet ist. Das ermöglicht verschiedene Abbildungsmodi. [14, S. 22] Verunreinigungen der Polschuhbohrungen, verunreinigte Aperturblenden und mechanisch nicht symmetrische Linsenbohrungen mit inhomogenen Magnetfeldern führen zu einer Verformung des Elektronenstrahls. Um das auszugleichen, durchläuft der Elektronenstrahl den Stigmator. Die elektromagnetischen Spulen dienen der Kompensation von Astigmatismus und werden in der Software gesteuert. [9, S. 49] [14, S. 22] Die Elektronen gelangen danach direkt in ein weiteres Spulensystem, die Scanspulen. Mittels zwei Stufen von Ablenkspulen wird der Elektronenstrahl über die Probenoberfläche bewegt. Dabei können Scan-Frequenz, Scan-Geschwindigkeit und die Amplitude gesteuert werden. Die rasterförmige Bewegung ist der Namensgeber für das Rasterelektronenmikroskop. [14, S. 22] Die Objektivlinse ist eine kombinierte elektrostatische und magnetische Linse. Sie fokussiert den Elektronenstrahl auf die Probenoberfläche, die sich direkt darunter befindet. Und bestimmt damit den Durchmesser des Strahls auf der Probe. Da diese Linse wie ein Kondensor funktioniert, kann sie auch als dritte Kondensorlinse gesehen werden. [14, S. 22] [12, S. 36] [11, S. 128] Das gesamte Linsensystem verkleinert den Elektronenstrahl um etwa das 10.000-fache bei einer rein thermischen Quelle und um das 10- bis 100-fache bei einer Feldemissionsquelle. [11, S. 128]

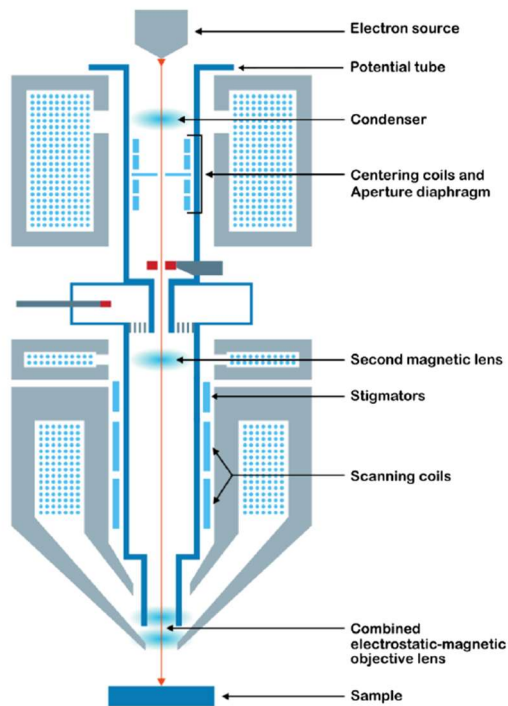


Abbildung 2: Aufbau eines Rasterelektronenmikroskops [14, S. 21]

Während des gesamten Weges von der Elektronenquelle bis zum Durchfliegen der Objektivlinse befinden sich die Elektronen innerhalb einer sogenannten Potenzialröhre. Diese hält die Primärelektronen auf einem höheren Energieniveau, während sie die Elemente der Elektronensäule passieren. Das reduziert die Anfälligkeit für externes Rauschen und verringert die Aberration an den optischen Elementen. [14, S. 22]

Um Stöße der Elektronen mit Teilchen auf dem Weg vom Strahlerzeuger bis zur Probe zu verhindern, befindet sich im Strahlerzeuger, in der Elektronensäule und in der Kammer ein Vakuum. Für die Strahlerzeugung ist ein Vakuum von kleiner 10^{-7} Pa notwendig. Die Probenkammer des REM CLARA kann im „HighVac“-Modus mit Drücken $< 0,04$ Pa oder im „LowVac“-Modus bei 7 bis 500 Pa betrieben werden. [15] [11, S. 87]

Um die Probe zu wechseln, wird die Kammer mit Stickstoff belüftet und anschließend wieder abgepumpt. Tescan bietet auch die Möglichkeit Proben mit einer Schleuse (Loadlock) in die Kammer zu schleusen. Das ermöglicht einen schnelleren Probenwechsel, da nur die Schleuse und nicht die gesamte Probenkammer abgepumpt werden muss. [16] [17]

2.3. Bildentstehung

Beim Auftreffen des Elektronenstrahls auf die Probe kann es zu verschiedenen Wechselwirkungen kommen. Diese Wechselwirkungen ermöglichen verschiedene Informationen über die Probe zu erfassen. Betrachtet wird nun die Wechselwirkung zwischen einem beschleunigten Primärelektron und einem Atom an der Probenoberfläche. Grundsätzlich wird zwischen elastischer und inelastischer Streuung unterschieden. Wird das Primärelektron vom Atomkern angezogen und abgelenkt, ohne dabei Energie zu verlieren, handelt es sich um elastische Streuung. Gibt das Primärelektron bei der Wechselwirkung mit Elektronen des Atoms einen Teil seiner Energie ab, ist die Streuung inelastisch. [9, S. 9] [13, S. 93]

Diese Streuprozesse finden innerhalb des sogenannten Wechselwirkungsvolumens statt, das in der Schnittansicht eine birnenähnliche Form aufweist. Die Form entsteht durch Streuung der Primärelektronen und allmählicher Energieabgabe bis hin zur Absorption. Die Größe des Wechselwirkungsvolumens und die Eindringtiefe der Primärelektronen sind abhängig von der Beschleunigungsspannung. Mit steigender Beschleunigungsspannung dringen die Elektronen tiefer in die Probe ein, wodurch der Bereich, in dem Wechselwirkungen stattfinden, größer wird und Informationen aus tieferliegenden Schichten gewonnen werden können. Wird hingegen lediglich ein oberflächennaher Bereich untersucht, kann die Beschleunigungsspannung reduziert werden. Ebenso führt das Kippen der Probe dazu, dass die Primärelektronen eine geringere Eindringtiefe aufweisen. [13, S. 129] [9, S. 295]

Primärelektronen, die elastisch gestreut wurden, werden als Rückstreuelektronen bezeichnet. Aufgrund ihrer hohen kinetischen Energie, die nah an der, der Primärelektronen liegt, treten sie mit hoher Wahrscheinlichkeit aus der Probe aus. Die Informationstiefe der Rückstreuelektronen beträgt bis zu 300 nm. Die Wahrscheinlichkeit der elastischen Stöße hängt von der Zahl der Protonen im Kern ab. Je höher die Ordnungszahl ist, desto mehr Protonen befinden sich im Kern und desto wahrscheinlicher ist es, dass Elektronen abgelenkt werden. [13, S. 129] [10, S. 332] [11, S. 136]

Die im Rasterelektronenmikroskop am häufigsten zur Abbildung verwendeten Elektronen sind Sekundärelektronen. SE1 entstehen durch die Abbremsung des Elektronenstrahls in unmittelbarer Nähe des Auftreffpunktes, wobei Elektronen aus den Atomen der Probe herausgelöst werden. Die Informationstiefe beträgt nur 50 nm, da die Energien der Sekundärelektronen sonst nicht ausreichen, um aus dem Material auszutreten. SE2 werden von den Rückstreuelektronen beim Austritt aus der Probenoberfläche gelöst. SE3 werden von

Rückstreuелеktronen, welche im Kammerinneren z. B. auf Kammerwände treffen, gelöst und tragen zum Hintergrundrauschen bei. [14, S. 33] [12, S. 85] [11, S. 136]

Beim Herauslösen von Sekundärelektronen verbleiben ionisierte Atome in der Probe. Diese können Augerelektronen oder Röntgenquanten emittieren, wenn die Atome in einen niedrigeren Energiezustand zurückfallen. [14, S. 33]

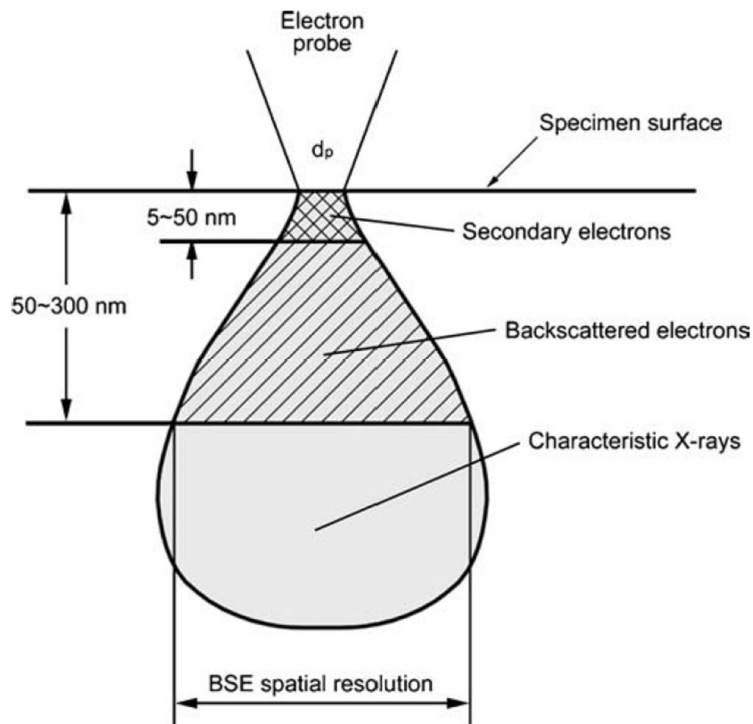


Abbildung 3: Wechselwirkungsvolumen [11, S. 136]

Die aus der Probe austretenden Rückstreuелеktronen und Sekundärelektronen werden von verschiedenen Detektoren aufgefangen. Auf einem Monitor wird die Probenoberfläche dann, durch das Scannen mit Elektronen, Punkt für Punkt in Graustufen wiedergegeben. Heller sind Bereiche, von denen viele Elektronen emittiert und vom Detektor erfasst werden. Die Elektronenausbeute ist dort hoch. Daraus resultierende Hell-Dunkel-Unterschiede werden als Kontrast bezeichnet. [9, S. 7]

Somit lassen sich die Topografie, Materialunterschiede, Kristallorientierung und elektrische Potenziale analysieren. [9, S. 5] Da Sekundärelektronen aufgrund ihrer geringen kinetischen Energie nur aus oberflächennahen Schichten austreten können, liefern sie hauptsächlich Informationen über die Topografie der Probe. Der Topografiekontrast entsteht aus mehreren Effekten, die das Bild dreidimensional wirken lassen. Der Kanteneffekt tritt an Kanten, Spitzen

oder allgemein dünnen Strukturen auf, weil dort mehr Rückstreuelektronen austreten und dabei SE2 lösen. Die Entstehungswahrscheinlichkeit hängt von der Orientierung der Austrittsfläche in Bezug auf die Richtung des Primärelektronenstrahls ab. Dies ist in Abbildung 4 schematisch dargestellt. [12, S. 85-86] [9, S. 298-300] Der Flächenneigungseffekt entsteht, weil von Flächen, die zum Detektor geneigt sind, mehr Elektronen zum Detektor gelangen als von Flächen, die in eine andere Richtung zeigen oder verdeckt sind. Bereiche, von denen die Elektronen auf direktem Weg erfasst werden können, sind heller (Abb. 5, Fläche d). Die Elektronen von Fläche a und c gelangen nicht direkt und nur mit einer Saugspannung zum Detektor. [11, S. 137-139]

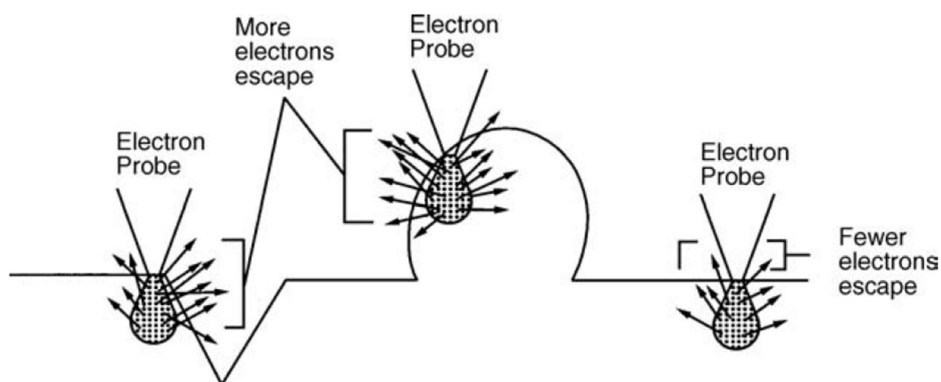


Abbildung 4: Entstehung des Kanteneffekts [11, S. 138]



Abbildung 5: Entstehung des Flächenneigungseffekts [11, S. 137]

Der Materialkontrast entsteht, weil die Streuwahrscheinlichkeit der Rückstreuelektronen stark von der Ordnungszahl der streuenden Atome abhängt. Elemente hoher Ordnungszahl erscheinen heller, weil der Rückstreukoeffizient größer ist. Die Eindringtiefe ist niedriger und die Streuwinkel sind größer. Damit liefern Rückstreuelektronen im Materialkontrast Informationen über die Zusammensetzung der Probe. [12, S. 85] [9, S. 149-151] Bei kristallinen Proben können durch die unterschiedliche Kristallographische Orientierung der Kristallkörner

Channeling Effekte sichtbar werden. Die Ursache ist die Abhängigkeit der Rückstreuerelektronenausbeute vom Winkel zwischen dem Primärelektronenstrahl und den Netzebenen des Kristalls. Der Kristallorientierungskontrast entsteht, weil die Ausrichtung der Ebenen das Eindringen des Elektronenstrahls in den Kristall beeinflusst. Bei höheren Eindringtiefen ist der Rückstreukoeffizient geringer. [9, S. 172-173] [11, S. 141] Elektrische Potenziale, die Sekundärelektronen beeinflussen, sind z. B. in Form von Aufladungen sichtbar. Bei nicht elektrisch leitfähigen Proben oder Partikeln kann es zur Aufladung kommen. Partikel erscheinen hell. Dabei sammeln sich Elektronen und bilden eine Raumladung, die die Emission von Sekundärelektronen beeinträchtigt. Der Bereich um Partikel erscheint damit dunkel. [9, S. 192; 319]

2.4 Detektoren

Zur Erfassung der bei den Wechselwirkungsprozessen entstehenden Signale werden im Rasterelektronenmikroskop verschiedene Detektoren eingesetzt. Diese unterscheiden sich in Material und Funktionsprinzip. Die am häufigsten verwendeten Detektortypen sind Szintillator-Photomultiplier-Detektoren und Halbleiterdetektoren. Im Folgenden werden Detektoren beschrieben, die im REM CLARA verbaut sind. [10, S. 338]

Der Everhart-Thornley-Detektor (E-T) ist der Standarddetektor für topographische Abbildungen im REM und gehört zur Grundausstattung nahezu jedes Geräts. Er detektiert hauptsächlich Sekundärelektronen. Wird die Potenzialröhre aktiviert, werden topografische Rückstreuerelektronen erfasst, was die Abbildung eines topografischen Kontrasts ohne Aufladungsartefakte ermöglicht. Der E-T-Detektor ist ein Szintillator-Photomultiplier-Detektor. Dabei werden austretende Elektronen im Szintillator in Licht umgewandelt. Die entstehenden Photonen werden über einen Lichtleiter zum Photomultiplier geführt, wo sie an einer Photokathode erneut in Elektronen konvertiert und anschließend kaskadenartig verstärkt werden. Während hochenergetische Rückstreuerelektronen den Szintillator direkt anregen können, müssen niederenergetische Sekundär- und Rückstreuerelektronen zunächst nachbeschleunigt werden. Um zu verhindern, dass dieses Feld den Primärelektronenstrahl beeinflusst, ist der Szintillator von einem Faraday-Käfig umgeben. Durch geeignete Wahl einer Kollektorspannung können niederenergetische Sekundärelektronen entweder zurückgedrängt (negative Saugspannung) oder gezielt gesammelt werden (positive Saugspannung). Auch Sekundärelektronen, deren Flugbahn vom Detektor wegführt, werden zum Detektor gezogen. [14, S. 36] [10, S. 338-340]

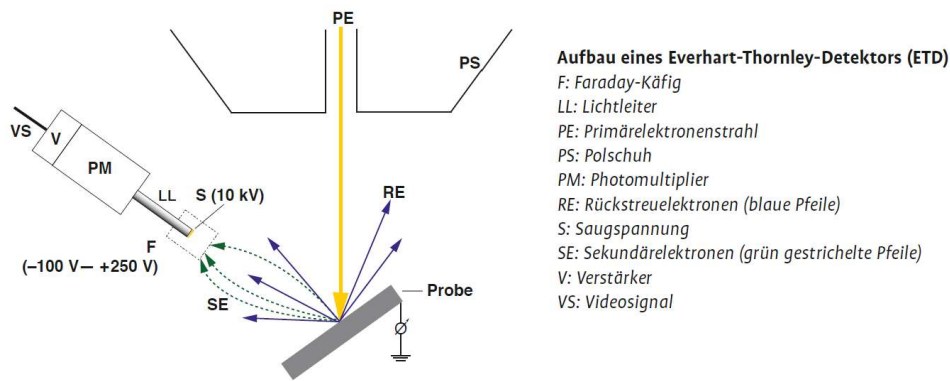


Abbildung 6: Aufbau eines Everhart-Thornley-Detektors [10, S. 339]

Der 4-Quadranten-BSE-Detektor ist ein ringförmiger Rückstreuerelektronendetektor zur Erfassung weitwinklig rückgestreuter Elektronen. Er basiert auf dem Prinzip der Erzeugung von Elektronen-Loch-Paaren in einem Halbleitermaterial. Treffen energiereiche Elektronen auf den Detektor, übertragen sie Energie auf das Halbleitermaterial und Elektronen werden aus dem Valenz- in das Leitungsband angehoben, wodurch freie Elektronen-Loch-Paare entstehen. Zur Vermeidung von Rekombination werden diese durch ein extern angelegtes elektrisches Feld räumlich getrennt. Die getrennten Ladungen werden an Elektroden gesammelt und als elektrisches Signal weiterverarbeitet. Das resultierende Signal ist proportional zur Energie der einfallenden Elektronen. Aufgrund der flachen Bauform kann der Detektor nah an der Probe positioniert werden und erfasst Rückstreuerelektronen über einen großen Raumwinkel. Der 4-Quadranten-BSE-Detektor ist rückziehbar und befindet sich unterhalb des Polschuhs in Messposition. Der Detektor besteht aus vier identischen Halbleiterdioden, die symmetrisch um die zentrale Öffnung für den Primärelektronenstrahl positioniert sind. Aufgrund gleicher Geometrie und Fläche werden die Dioden als Quadranten (Q1–Q4) bezeichnet. Im Standard BSE-Modus dient der Detektor der konventionellen Rückstreuerelektronendetektion. In anderen Modi können auch einzelne Quadranten separat genutzt werden können. Die segmentierte Anordnung ermöglicht sowohl Material als auch Topografiekontrast abzubilden. Die Bildinformation ergibt sich aus additiven oder subtraktiven Kombinationen der Quadrantensignale. In der TESCAN Essence Software stehen hierfür verschiedene Modi zur Verfügung: COMPO zur Darstellung des Materialkontrasts, TOPO für Topografiekontrast, Custom zur frei definierbaren Signalverknüpfung sowie Color zur Kombination der Quadrantensignale im HSV-Farbmodell für eine farbcodierte Darstellung. [10, S. 342] [14, S. 37]

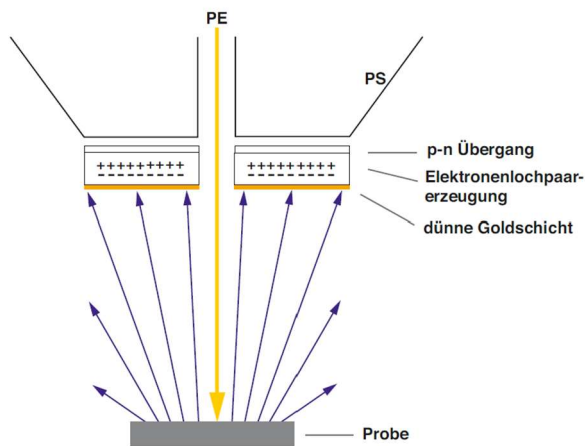


Abbildung 7: Aufbau eines Halbleiterdetektors [10, S. 343]

Die höchste laterale Auflösung wird im REM bei kleinen Arbeitsabständen unter 5 mm erreicht. Bei diesen kurzen Arbeitsabständen nimmt jedoch die Effizienz des E-T-Detektors ab. Aus diesem Grund werden sogenannte In-Lens-Detektoren eingesetzt, die sich innerhalb der Elektronensäule befinden. Die Detektoren werden auch als In-Beam- oder In-Column-Detektoren bezeichnet.

Der In-Lens-Axial-Detektor basiert auf einem Szintillator und ist in der Elektronensäule positioniert. Er detektiert Elektronen, nah der optischen Achse. Abhängig vom Abbildungsmodus können unterschiedliche Signalarten erfasst werden. Im Potenzialmodus „universell“ und „heller Strahl“ werden axiale Sekundärelektronen detektiert, während im Potenzialmodus „axiale BSE“ axiale Rückstreuelektronen erfasst werden. Der Detektor ist besonders geeignet für hochauflösende SE-Bildgebung bei kleinen Arbeitsabständen und arbeitet bei allen Landespannungen ohne wahrnehmbaren Signalverlust. [14, S. 35] [8, S. 1]

Der In-Lens-Multidetektor befindet sich ebenfalls in der Elektronensäule. Ohne aktivierten Filter detektiert er überwiegend Sekundärelektronen und liefert ein topografisches Bild mit ausgeprägtem Kantenkontrast. Bei kleinen Arbeitsabständen kann dadurch eine verbesserte laterale Auflösung erzielt werden. Der Detektor ist mit einem Filtergitter ausgestattet, das eine gezielte Auswahl der detektierten Elektronen ermöglicht. Je nach eingestellter Filterenergie werden axiale Rückstreuelektronen oder verlustarme Rückstreuelektronen detektiert. Diese Möglichkeit der Energiefilterung erhöht die Oberflächenempfindlichkeit des Materialkontrasts. Der Detektor ist speziell für den Nachweis niederenergetischer Rückstreuelektronen ausgelegt. [14, S. 35]

Der rückziehbare STEM-Detektor wird unterhalb der Probe positioniert und dient der Detektion transmittierter Elektronen. Er besteht aus mehreren Halbleiterdioden, die Elektronen erfassen, welche in unterschiedlichen Streuwinkeln aus der Probe austreten. Durch die winkelabhängige Detektion können verschiedene Kontraste unterschieden werden. Das Hellfeldsignal liefert Braggschen Beugungs- und Absorptionskontrast, das Dunkelfeldsignal enthält vor allem Orientierungsinformationen sowie gestreute Elektronen von leichten Elementen, während das Hochwinkeldunkelfeldsignal (HADF) maximalen Materialkontrast und minimalen Bragg-Beugungskontrast zeigt. [14, S. 39]

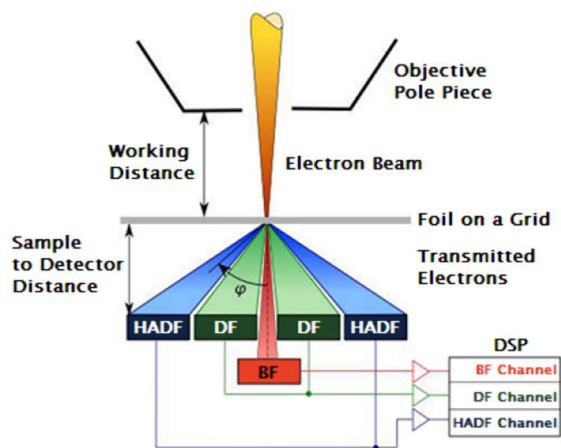


Abbildung 8: Aufbau des STEM-Detektors [14, S. 39]

Der rückziehbare EDX-Detektor Ultim Max 65 von Oxford Instruments dient der chemischen Analyse von Proben im Rasterelektronenmikroskop mittels energiedispersiver Röntgenspektroskopie. Bei der Wechselwirkung des Elektronenstrahls mit der Probe entsteht charakteristische Röntgenstrahlung, die durch Elektronenübergänge zwischen Energieniveaus der inneren Elektronenhüllen verursacht wird. Diese Röntgenstrahlung bildet ein elementspezifisches Linienspektrum, das die Identifikation der in der Probe enthaltenen Elemente ermöglicht. Aus der Auswertung der Intensitäten der charakteristischen Linien lassen sich Aussagen über die chemische Zusammensetzung der Probe ableiten. [10, S. 330-331]

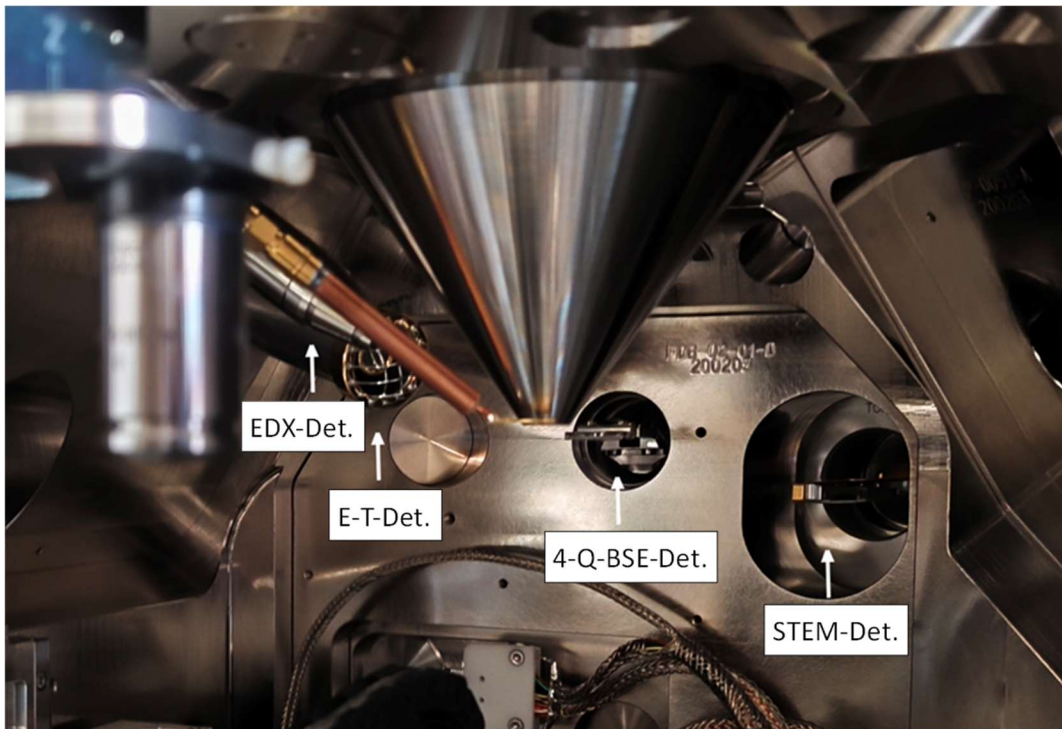


Abbildung 9: Detektoren in der Kammer des REM CLARA

2.5 Abbildungsmodi

Um unterschiedliche Anforderungen bei der Bildgebung abzudecken, können am Rasterelektronenmikroskop CLARA verschiedene Abbildungsmodi verwendet werden.

Der „Overview“-Modus ist für Messungen und Analysen von großen Bereichen bei Arbeitsenergien von 200 eV bis 30 keV ausgelegt. Er ermöglicht eine verzerrungsarme Darstellung mit hoher Tiefenschärfe, was sich besonders für Übersichtsaufnahmen eignet. Die Endfokussierung erfolgt an der zweiten Magnetischen Linse, die Potenzialröhre ist deaktiviert. [14, S. 23; 25]

Der „Analysis“-Modus wird für allgemeine Bildgebung und analytische Anwendungen eingesetzt, ebenfalls ohne aktivierte Potenzialröhre. Der optimale Arbeitsabstand beträgt bei Verwendung des E-T-Detektors 2 mm. Der Modus liefert eine gute laterale Auflösung bei Energien von 200 eV bis 30 keV, die jedoch unterhalb der des „UH-Resolution“-Modus liegt. [14, S. 23-24]

Der „Wide Field“-Modus wird zur Navigation auf der Probe verwendet. Er bildet einen besonders großen Bereich ab, wobei Verzerrungen korrigiert werden. Die Potenzialröhre ist deaktiviert. [14, S. 23; 25]

Der „UH-Resolution“-Modus dient der ultrahochauflösenden Bildgebung in einem breiten Strahlstrombereich von 1 pA bis 1 nA mit Energien zwischen 50 eV und 20 keV. Weist jedoch eine geringe Tiefenschärfe auf. Die Endfokussierung erfolgt an der elektrostatisch-magnetischen Objektivlinse und die Potenzialröhre ist aktiviert. Für die optimale laterale Auflösung ist ein Arbeitsabstand von 1 mm empfohlen. [14, S. 23]

Der „Depth“-Modus ist für ultrahochauflösende Bildgebung mit erhöhter Tiefenschärfe ausgelegt. Im Vergleich zum „UH-Resolution“-Modus ist die laterale Auflösung bei gleichen Energien geringer. Auch hier erfolgt die Endfokussierung mit aktivierter Potenzialröhre über die elektrostatisch-magnetische Objektivlinse. [14, S. 23-24]

2.6 Probenvoraussetzungen

Die Qualität der rasterelektronenmikroskopischen Analyse hängt stark von der zu untersuchenden Probe ab. Daher sind einige Voraussetzungen zu beachten.

Die Größe und das Gewicht der Proben sind durch die Vakuumkammer und den verwendeten Probenhalter begrenzt. Um das Kippen der Probe zu ermöglichen, muss die Probe sicher auf einem geeigneten Probenhalter befestigt werden. Für Untersuchungen im Hochvakuum ist erforderlich, dass die Probe trocken ist, strukturell unverändert bleibt und nicht ausgast. Auch soll die Probe unter Elektronenbeschuss nicht beschädigt werden. Zudem ist eine saubere Probenoberfläche Voraussetzung für qualitativ hochwertige Abbildungen. [18, S. 160-161] [10, S. 350] [12, S. 55-56]

Eine ausreichende elektrische Leitfähigkeit der Probe ist notwendig, um das Abfließen des eintreffenden Elektronenstroms zu gewährleisten und Aufladungen oder Erwärmung zu vermeiden. Da nur ein Teil der Primärelektronen als Sekundär- oder Rückstreuelektronen emittiert wird, muss der verbleibende Strom abgeführt werden. Nichtleitende und halbleitende Materialien werden daher üblicherweise mit einer dünnen leitfähigen Schicht, beispielsweise aus Kohlenstoff, Gold, Palladium oder Platin, beschichtet, häufig mittels Sputtern. Auch Elemente mit guter elektrischer Leitfähigkeit z. B. Kohlenstoff, können beschichtet werden, um die Elektronenausbeute zu verbessern, weil Elemente hoher Ordnungszahl mehr Elektronen emittieren. Diese Beschichtungen können jedoch die Oberflächenstruktur verändern und bei hohen Vergrößerungen (100.000-fach oder mehr) sichtbar werden. Generell wird empfohlen, die Probenpräparation möglichst gering zu halten und stattdessen schonende Abbildungsbedingungen, wie eine niedrige Beschleunigungsspannung zu wählen. [10, S. 351-352] [18, S.163-164; 166]

Feuchte Proben müssen vor der Untersuchung getrocknet werden, wenn kein Niedrigvakuummodus verwendet wird. Dabei können sich Struktur und Zusammensetzung verändern. [18, S. 169] [10, S. 350-351]

Für spezielle Analysetechniken gelten zusätzliche Anforderungen. Für die energiedispersive Röntgenspektroskopie sollte die Probenoberfläche möglichst eben sein, um Abschattungen zum seitlich angeordneten EDX-Detektor zu vermeiden. Beschichtungen sollten kein Element enthalten, welches in der Probe analysiert werden soll. Zudem müssen sich die Energien der relevanten Röntgenlinien zwischen der Nachweisgrenze des Detektors und der Primärenergie des Elektronenstrahls befinden. Der zu untersuchende Probenbereich muss größer sein als das Wechselwirkungsvolumen. Für Abbildungen mit dem STEM-Detektor muss die Probe als dünne Lamelle präpariert werden. [11, S. 208; 214] [19, S. 50; 394] [18, S. 160]

2.7 Hochauflösung

Die Hochauflösung im Rasterelektronenmikroskop beschreibt das Abbilden kleinster Strukturen. Die Auflösungsgrenze wird im Wesentlichen durch den Sondendurchmesser beim Eintritt des Elektronenstrahls in die Probe sowie durch die Größe des Wechselwirkungsvolumens bestimmt. Um ein Detail gut abbilden zu können, muss der Sondendurchmesser etwa halb so groß sein, wie die kleinste darzustellende Struktur. Eine höhere Beschleunigungsspannung führt zu einer Verringerung des Sondendurchmessers, vergrößert jedoch gleichzeitig das Wechselwirkungsvolumen, was die laterale Auflösung verschlechtert. Für eine hohe laterale Auflösung ist ein möglichst kleiner Arbeitsabstand zu wählen. [10, S. 352] [9, S. 169-170] [20, S. 1]

Die erreichbare laterale Auflösung wird zudem durch weitere Faktoren limitiert, darunter die Anforderungen an den Strahldurchmesser für einen ausreichenden Kontrast, störende elektromagnetische Felder, mechanische Instabilität der Probenhalterung, Erschütterungen des Rasterelektronenmikroskops, die Qualität der Probenoberfläche und mögliche Veränderungen der Probenoberfläche während der Analyse. Ist eine Beschichtung der Probe erforderlich, wird häufig Kohlenstoff verwendet, da die geringe Korngröße bei hochauflösenden SE-Abbildungen nicht sichtbar ist und die Topografie der Probe nicht verfälscht. [13, S. 148] [19, S. 148]

Am REM CLARA können laterale Auflösungen von 1,3 nm bei 1 keV, 0,9 nm bei 15 keV sowie 0,8 nm bei 30 kV im STEM-Betrieb erreicht werden. Für hochauflösende Sekundärelektronenabbildungen wird empfohlen, im „UH-Resolution“-Modus mit aktiviertem

Potenzialmodus „heller Strahl“ zu arbeiten. Der Arbeitsabstand sollte dabei etwa 1 mm betragen, und zur Detektion ist der In-Lens-Axial-Detektor zu verwenden, da bei kleinen Arbeitsabständen weniger Elektronen den Everhart-Thornley-Detektor erreichen. [14, S. 23; 35] [9, S. 315] [21, S. 2-3]

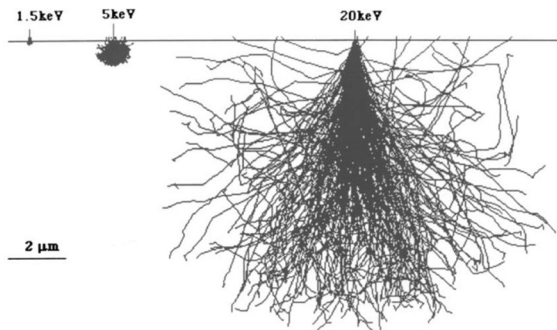


Abbildung 10: Wechselwirkungsvolumen in Kohlenstoff bei verschiedenen Beschleunigungsspannungen [20, S. 3]

3 Experimentelles

3.1 Geräte

Im Rahmen dieser Arbeit steht das Feldemissionsrasterelektronenmikroskop CLARA der Firma Tescan im Mittelpunkt. Dieses Gerät, was im Kapitel Grundlagen ausführlich beschrieben wurde, wird an der Westsächsischen Hochschule in Zwickau eingesetzt.

Zum Vergleich der erreichbaren Hochoflösung wurde ergänzend das Feldemissionsrasterelektronenmikroskop GAIA3 (Modell 2016) der Firma Tescan mit fokussiertem Ionenstrahl (FIB) herangezogen. Dieses Gerät wird am Fraunhofer-Institut für Elektronische Nanosysteme eingesetzt.

3.2 Proben

Zur Bewertung der Anwendungsmöglichkeiten des Rasterelektronenmikroskops wurden verschiedene Proben verwendet.

Gold auf Kohle – Hochoflösungstestobjekt S1969

Das Hochoflösungstestobjekt besteht aus Goldpartikeln auf einem Kohlenstoffsubstrat. Die Partikel weisen Größen im Bereich von kleiner 3 nm bis etwa 50 nm auf. Die Probe eignet sich gut zur Beurteilung der Bildqualität von hochoflösenden Rasterelektronenmikroskopen, insbesondere von Systemen mit Feldemissionselektronenquelle. Für die Auflösung der Goldpartikel wird eine Vergrößerung von mindestens 80.000-fach gefordert. [22] Die Probe wurde verwendet, da die Goldpartikel besonders gut für rasterelektronenmikroskopische Abbildungen geeignet sind und sich damit die erreichbare Hochoflösung überprüfen lässt.



Abbildung 11: Hochoflösungstestobjekt

Berliner Blau

Berliner Blau ist ein tiefblaues mineralisches Pigment. [23] Charakteristisch sind kubische Kristalle, bestehend aus Kohlenstoff, Stickstoff und Eisen. [24] Diese Probe wurde gewählt, da sie eine ausgeprägte Topografie aufweist und sich somit besonders zur Untersuchung topografischer Kontraste eignet.

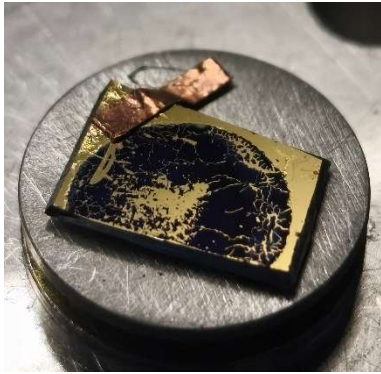


Abbildung 12: Berliner Blau

Eingebetteter Siliziumchip

Die Probe enthält einen in Epoxidharz eingebetteten Transistor. In Vorbereitung auf die Untersuchung im REM wurde die Probe mit Aluminiumband beklebt und anschließend mit etwa 6 nm Kohlenstoff beschichtet. Diese Probe wurde verwendet, da sich in einem Bild sowohl ausgeprägte Topografie als auch verschiedene Materialkontraste abbilden lassen.



Abbildung 13: eingebetteter Siliziumchip, präpariert, von Fraunhofer ENAS

Trägerfilm auf TEM-Gitter

Bei dieser Probe handelt es sich um einen Trägerfilm, der auf ein TEM-Gitter aufgebracht wurde. Die Probe wurde verwendet, um den STEM-Detektor zu testen.

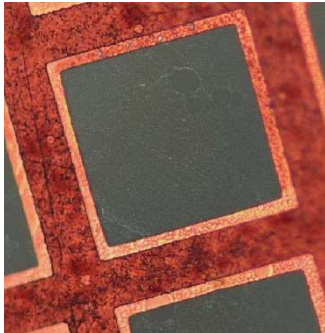


Abbildung 14: Trägerfilm auf TEM-Gitter

3.3 Ablauf der Analysen

Zur Bestimmung optimaler Abbildungsbedingungen wurden die Abbildungsparameter systematisch variiert, mit dem Ziel, die maximalen Informationen über Probe zu erhalten. Dabei wurde jeweils ein Parameter verändert, während alle übrigen konstant gehalten wurden, um den Einfluss jedes Parameters separat bewerten zu können. Untersucht wurden die Beschleunigungsspannung, der Strahlstrom, der Arbeitsabstand sowie die Kippung der Probe. Die Variation erfolgte probenabhängig, um eine bestmögliche Abbildung zu erreichen und gleichzeitig Probenbeschädigungen zu vermeiden.

Weiterhin wurden verschiedene Detektoren bei festen Parametern getestet. Zum Einsatz kamen der Everhart-Thornley-Detektor, der 4-Quadranten-BSE-Detektor, der In-Lens-Axial-Detektor, der In-Lens-Multidetektor sowie der STEM-Detektor.

Zur Überprüfung der Materialzusammensetzung der Proben wurde der Detektor für energiedispersive Röntgenspektroskopie (EDX) eingesetzt.

Zudem erfolgte eine Untersuchung verschiedener Abbildungsmodi („Wide Field“, „Overview“, „Analysis“, „Depth“ und „UH-Resolution“). Für die Modi „UH-Resolution“ und „Depth“ standen die Potenzialmodi „heller Strahl“, „axiale BSE“ und „universell“ zur Verfügung. Im „UH-Resolution“-Modus wurden die drei Potenzialmodi jeweils mit dem Everhart-Thornley-Detektor und dem In-Lens-Axial-Detektor getestet.

Die Hochauflösung wurde am Hochauflösungstestobjekt als gut geeigneter Probe sowie an Berliner Blau, als nicht idealer Probe für Hochauflösung untersucht. Dabei wurden die zuvor

gewonnenen Erkenntnisse aus der Variation der Abbildungsparameter, Detektoren und Abbildungsmodi berücksichtigt. Zum Vergleich wurde das gleiche Hochauflösendstestobjekt zusätzlich im Feldemissionsrastermikroskop GAIA von Tescan am Fraunhofer ENAS untersucht. Da das minimale Sichtfeld der beiden Rastermikroskope unterschiedlich ist, wurde das kleinstmögliche, für beide Geräte einstellbare Sichtfeld gewählt. Mit beiden Systemen wurde jeweils ein Bild mit dem Everhart Thornley Detektor im „Analysis“ Modus sowie mit dem In-Lens-Axial-Detektor im „UH-Resolution“ Modus aufgenommen. Die Bilder wurden mit gleichen beziehungsweise vergleichbaren Einstellungen und unter Durchführung identischer Arbeitsschritte aufgenommen. Die durchgeführten Arbeitsschritte sind im Ablauf zur hochauflösenden Abbildung beschrieben.

Auf Basis der Ergebnisse wurde eine Empfehlung für die Wahl geeigneter Abbildungsparameter, Detektoren und Abbildungsmodi für Untersuchungen am REM CLARA abgeleitet.

Ablauf zur hochauflösenden Abbildung:

1. Alle beweglichen Detektoren aus der Kammer fahren
2. Die Beschleunigungsspannung einstellen
3. Im „Overview“-Modus die Verzerrung in x- und y-Richtung mit dem Stigmator korrigieren
4. Im „Analysis“-Modus fokussieren
5. Arbeitsabstand & z-Abstand auf 5 mm einstellen
6. Zum „UH-Resolution“-Modus wechseln
7. Die Funktion zur automatischen Anpassung von Kontrast und Helligkeit ausführen
8. Die Säule entmagnetisieren
9. Den Strahlstrom einstellen
10. Die Funktion zur automatischen Anpassung von Kontrast und Helligkeit ausführen
11. Das Bild weiter vergrößern und fokussieren
12. Bei Bildverschiebungen während des Fokussierens, die Säule zentrieren
13. Durch weiteres Vergrößern sowie durch Anpassung von Stigmator und Arbeitsabstand wird das Bild optimiert

Zum Test der Hochauflösung an Berliner Blau wurden die Schritte 3 bis 12 zunächst auf dem Hochauflösendstestobjekt durchgeführt. Anschließend wurde der Arbeitsabstand vergrößert, die Probe mit Berliner Blau in den Elektronenstrahl gefahren und fokussiert. Danach wurde der zuvor eingestellte Arbeitsabstand wiederhergestellt und durch weiteres Vergrößern sowie durch Anpassung von Stigmator und Arbeitsabstand das finale Bild erzeugt.

4 Ergebnisse und Diskussion

4.1 Abbildungsparameter

Die Abbildungsparameter wurden in der Tescan-Essence-Software eingestellt und beeinflussen die Bildqualität. Untersucht wurden Beschleunigungsspannung, Strahlstrom, Arbeitsabstand und Kippwinkel der Probe.

Beschleunigungsspannung

Die Beschleunigungsspannung bestimmt die kinetische Energie der Primärelektronen im Elektronenstrahl. [14, S.49] Eine Erhöhung der Beschleunigungsspannung führt dazu, dass die Elektronen tiefer in die Probe eindringen. Dadurch vergrößert sich das Wechselwirkungsvolumen, und der Materialkontrast nimmt zu. Materialunterschiede werden deutlicher sichtbar. (Abb. 75, 76, 77) Eine hohe Beschleunigungsspannung ist daher sinnvoll, wenn Materialunterschiede untersucht werden. Bei niedriger Beschleunigungsspannung wird die Analyse oberflächensensitiver. Der Topografiekontrast nimmt zu, da das Wechselwirkungsvolumen näher an der Probenoberfläche ist. Gleichzeitig vergrößert sich jedoch der Strahldurchmesser, wodurch sich die laterale Auflösung verschlechtert und das Rauschen im Bild zunimmt. Die laterale Auflösung ist definiert als der minimale Abstand zweier Punkte, die noch getrennt voneinander wahrgenommen werden können [10, S.324]. Im Folgenden ist mit Auflösung immer die laterale Auflösung gemeint. Am Beispiel der Goldpartikel wurde bei 10kV die beste Auflösung erzielt (Abb. 17). Bei 5kV war das Bild aufgrund des geringeren Signals stärker verrauscht (Abb. 16). Eine Reduzierung der Scangeschwindigkeit wäre erforderlich, um ausreichend Signal zu sammeln. Damit erhöht sich die Zeit zur Aufnahme eines Bildes. Bei 15kV trat kaum Rauschen auf, jedoch war der Strahldurchmesser größer und die Goldpartikel wurden dadurch schlechter aufgelöst (Abb. 15). Die Abbildung wirkte insgesamt unschärfer. Für die Goldpartikel erwies sich daher eine Beschleunigungsspannung von 10kV als optimal, weil der Strahldurchmesser klein genug ist und ausreichend Elektronen emittiert werden. Für die daneben liegende Kohlenstoffschicht war hingegen eine höhere Spannung von 15kV vorteilhaft, da erst dann eine ausreichende Elektronenausbeute erreicht wurde. Allerdings traten dabei verstärkt Aufladungserscheinungen an den Partikeln auf. Bei schlecht leitfähigen oder strahlempfindlichen Proben muss die Beschleunigungsspannung geringgehalten werden, um

die Probe nicht zu zerstören. Wird bei Berliner Blau eine zu hohe Beschleunigungsspannung gewählt, reißt die Probe an den Grenzen der Würfelstrukturen.

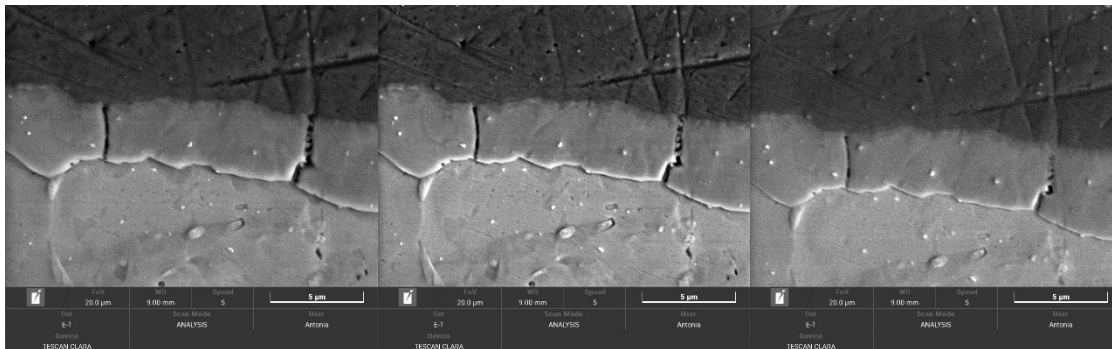


Abbildung 75, 76 und 77: 15 kV, 10 kV und 6 kV Beschleunigungsspannung; eingebetteter Chip

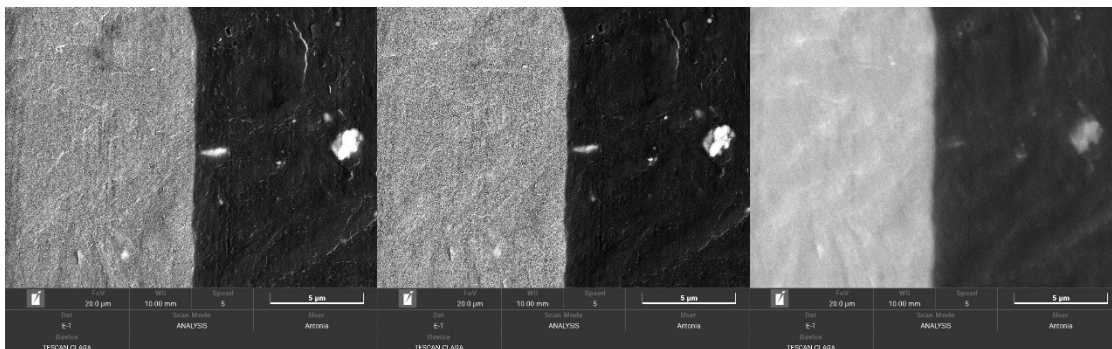


Abbildung 15, 17 und 16: 15 kV, 10 kV und 5 kV Beschleunigungsspannung; Hochauflösetestobjekt

Strahlstrom

Der Strahlstrom beschreibt die Anzahl der Elektronen des Elektronenstrahls, die pro Zeiteinheit auf die Probe treffen, beziehungsweise die Anzahl der aus dem Filament austretenden Elektronen [14, S.49] [10, S.320]. Ein hoher Strahlstrom erhöht die Signalintensität und verbessert das Signal-zu-Rausch-Verhältnis. Gleichzeitig steigt jedoch die Gefahr von Aufladungen und Strahlschäden, besonders bei schlecht leitfähigen Proben. Bei Berliner Blau erscheint das Material insgesamt dunkel, da es niedrige Ordnungszahlen (siehe EDX-Analyse 4) und damit eine geringe Elektronenausbeute hat. Helle Randbereiche entstehen durch Aufladungen infolge der geringen elektrischen Leitfähigkeit. Um Aufladungsartefakte zu reduzieren, ist ein niedriger Strahlstrom zu wählen. Gleichzeitig muss die Scangeschwindigkeit verringert werden, um trotz geringerer Elektronenzahl ein ausreichendes Signal zu sammeln. Eine Verringerung des Strahlstroms reduziert zudem den Strahldurchmesser und kann die

Auflösung Verbessern. In Abbildung 78 ist der Kontrast gut, jedoch sind die schlechtere Auflösung und Aufladungen sichtbar. Bei einem geringeren Strahlstrom verbessert sich die Auflösung, die Aufladung bleibt jedoch deutlich erkennbar (Abb. 76). In Abbildung 79 ist die Aufladung minimal reduziert, der Kontrast aber schwächer. Für Berliner Blau erwies sich ein Strahlstrom von 300 pA als günstig hinsichtlich der Auflösung (Abb. 113). Eine weitere Verringerung reduzierte die Aufladung nicht wesentlich, verschlechterte jedoch die Auflösung (Abb. 117). Ein zu hoher Strahlstrom würde zu Schäden bis hin zum Reißen der Probe führen.

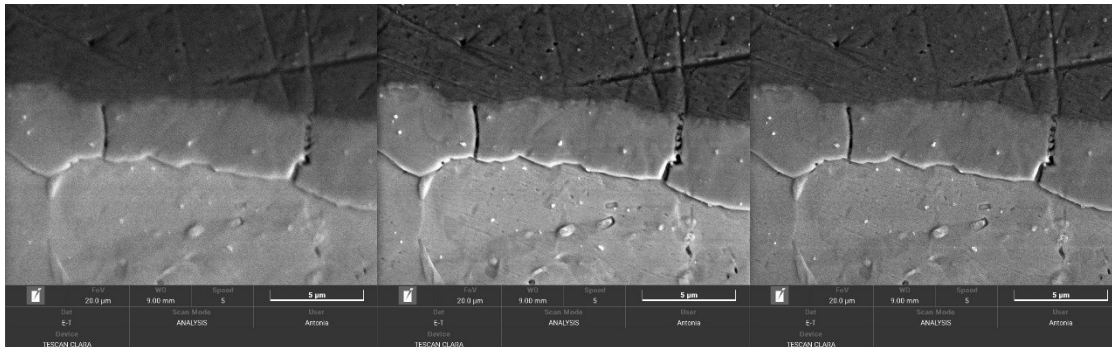


Abbildung 78, 76 und 79: 3 nA, 1 nA und 300 pA Strahlstrom;
eingebetteter Chip

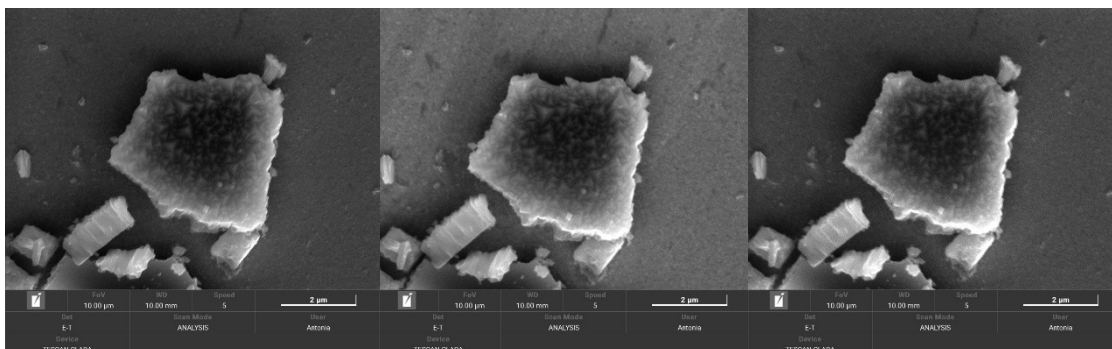


Abbildung 116, 113 und 117: 500 pA, 300 pA und 100 pA Strahlstrom;
Berliner Blau

Arbeitsabstand

Der Arbeitsabstand (WD) ist der Abstand zwischen der fokussierten Probenoberfläche und der Objektivlinse [10, S. 313]. Eine Vergrößerung des Arbeitsabstands erhöht die Schärfentiefe, den Bereich entlang der z-Achse, in dem das Bild als scharf wahrgenommen wird [11, S. 5]. Der größere Arbeitsabstand ist daher vorteilhaft bei stark topografischen Proben. Eine Verringerung des Arbeitsabstands führt zu einem kleineren Strahldurchmesser und verbessert somit die Auflösung. Der Strahldurchmesser wird als Durchmesser der Probenoberfläche

definiert, auf den 50% des Strahlstroms treffen [14, S.49] bzw. als Durchmesser des Elektronenstrahls beim Auftreffen auf die Probe [10, S.319]. Proben mit geringer Topografie können bei kleinen Arbeitsabständen und damit verbesserter lateraler Auflösung analysiert werden.

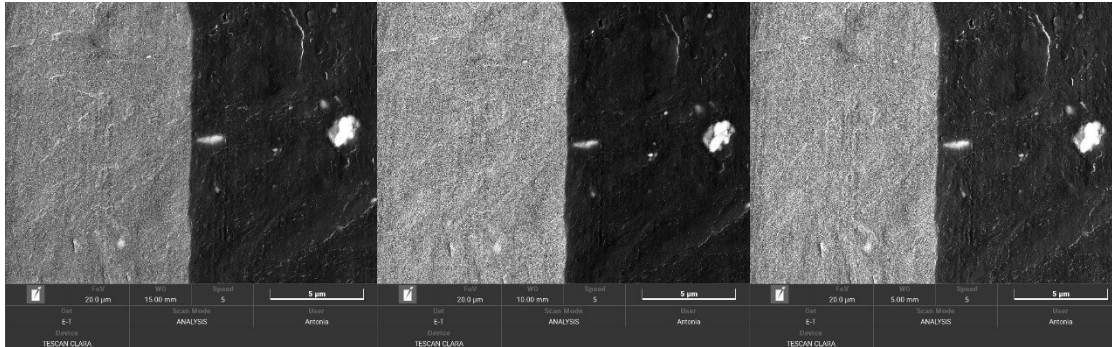


Abbildung 20, 17 und 21: 15 mm, 10 mm und 5 mm Arbeitsabstand;
Hochauflösetestobjekt

Kippwinkel der Probe

Durch Kippen der Probe wird das Anregungsvolumen oberflächennaher, wodurch topografische Details stärker hervortreten (Abb. 120). Dabei entsteht jedoch eine Verzerrung des Bildes. Diese kann mittels FSS-Korrektur kompensiert werden, in den Tests führte die Korrektur jedoch zu zusätzlichen Verzerrungen und die korrigierte Abbildung war weniger scharf. (Abb. 121)

Zudem traten dunkle rechteckige Bereiche auf, die durch das Fokussieren bei verkleinertem Sichtfeld entstanden. Laut Goldstein [19, S.143] handelt es sich hierbei um Kohlenstoff, der durch elektronenstrahlinduzierte Abscheidung auf der Probenoberfläche sichtbar wird. Dieser Effekt verstärkt sich mit zunehmender Scanzeit und höherem Strahlstrom (Abb. 22, 120).

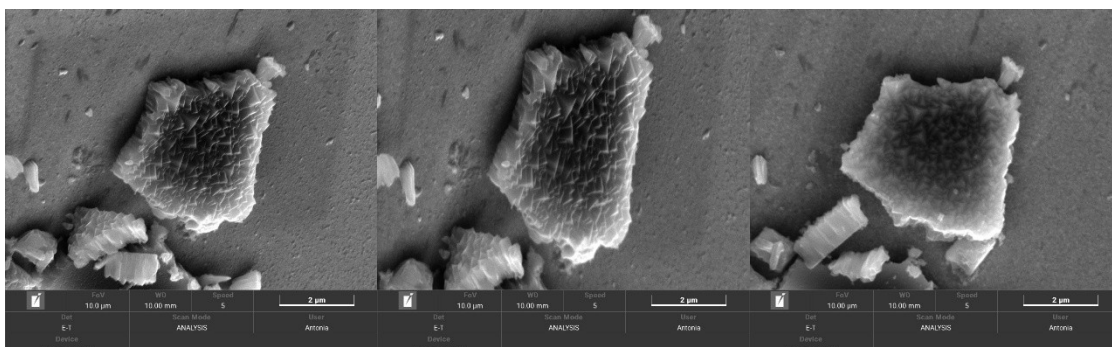


Abbildung 120, 121 und 113: 45°, 45° FSS und 0° Probenkippwinkel;
Berliner Blau

In Tabelle 1 ist zusammengefasst, wie Beschleunigungsspannung, Strahlstrom, Arbeitsabstand und Kippwinkel der Probe die Abbildung beeinflussen. Diese Parameter müssen je nach Analyseziel und verwendeter Probe angepasst werden.

Tabelle 1: Einfluss der Abbildungsparameter

große Eindringtiefe	Eng ↑			Winkel ↓
kleiner Strahldurchmesser	Eng ↑	BC ↓	WD ↓	Winkel ↓
hohe Auflösung	Eng ↑	BC ↓	WD ↓	Winkel ↓
geringe Aufladung	Eng ↓	BC ↓	WD ↑	
geringe Probenbeschädigung	Eng ↓	BC ↓	WD ↑	
geringes Rauschen	Eng ↑	BC ↑	WD ↓	Winkel ↓
topografischer Kontrast	Eng ↓			Winkel ↑
Materialkontrast	Eng ↑			Winkel ↓

4.2 Detektoren

Die Wahl des Detektors ist entscheidend dafür, welche Informationen über die Probe im Rasterelektronenmikroskop gewonnen werden. Am REM CLARA sind – wie im Kapitel Grundlagen beschrieben – ein Everhart-Thornley-Detektor, ein 4-Quadranten-BSE-Detektor sowie ein Transmissionselektronendetektor in der Kammer verbaut. Zudem befinden sich in der Elektronensäule ein Axialdetektor und ein Multidetektor.

Grundsätzlich lassen sich Detektoren danach unterscheiden, ob sie überwiegend topografischen oder materialabhängigen Kontrast liefern. Dies hängt von der Art der detektierten Elektronen sowie von der räumlichen Lage des Detektors relativ zur Probe ab.

Der Everhart-Thornley-Detektor erfasst hauptsächlich Sekundärelektronen und ist schräg oberhalb der Probe in der Kammer positioniert. Das resultierende Bild ist vom Flächenneigungseffekt und vom Kanteneffekt geprägt und liefert daher topografischen Kontrast. Am Beispiel von Berliner Blau lassen sich diese Effekte gut veranschaulichen. In Abb. 122 erscheint die dem Detektor zugewandte Fläche (unterer Rand des Clusters) besonders hell, während am gegenüberliegenden Rand lediglich die Kante aufgehellt ist und die Fläche schattiert wirkt. Zudem sind Aufladungen und Kratzer sichtbar und die Unterscheidung zwischen rauen und glatten Oberflächen ist möglich (Abb. 85). Beim Hochauflösungstestobjekt zeigt sich ein starker Kontrast zwischen den mit Goldpartikeln bedeckten Bereichen und dem kohlenstoffhaltigen Substrat (siehe EDX-Analyse 1). Aufgrund der höheren Ordnungszahl von Gold werden dort mehr Elektronen emittiert, zusätzlich begünstigt der Kanteneffekt das Austreten von Elektronen. Goldpartikel erscheinen daher deutlich heller als das Kohlenstoffsubstrat (Abb. 24).

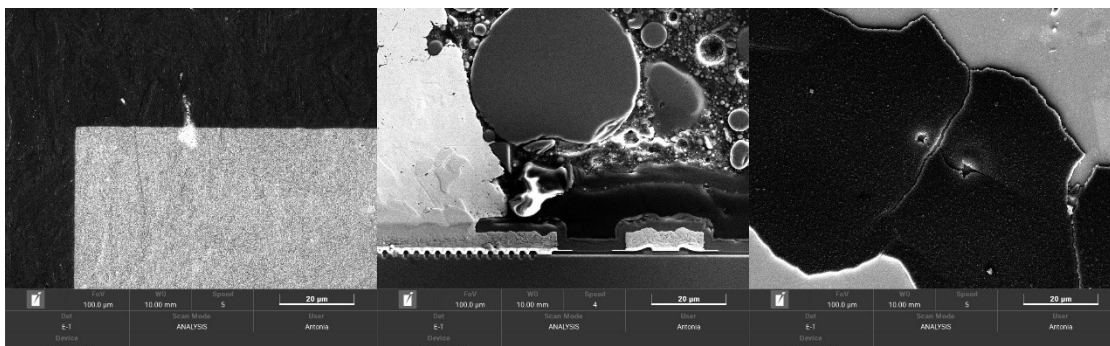


Abbildung 24, 85 und 122: E-T-Detektor; 100 µm Sichtfeld; Hochauflösungstestobjekt, eingebetteter Chip und Berliner Blau

Der 4-Quadranten-BSE-Detektor detektiert überwiegend Rückstreuelektronen. Er befindet sich ebenfalls in der Kammer und wird für die Detektion über der Probe positioniert. In der Standard-BSE-Betriebsart zeigt der Detektor Materialkontrast mit größerer Informationstiefe als der E-T-Detektor. Topografische Informationen treten in den Hintergrund, jedoch sind Risse deutlicher erkennbar. Auf glatten Oberflächen können zudem Korngrenzen sichtbar werden. Aufladungsartefakte treten kaum auf, und es lassen sich vor allem grobe Materialunterschiede unterscheiden. Das Bild wirkt insgesamt kontrastreich (Abb. 86).

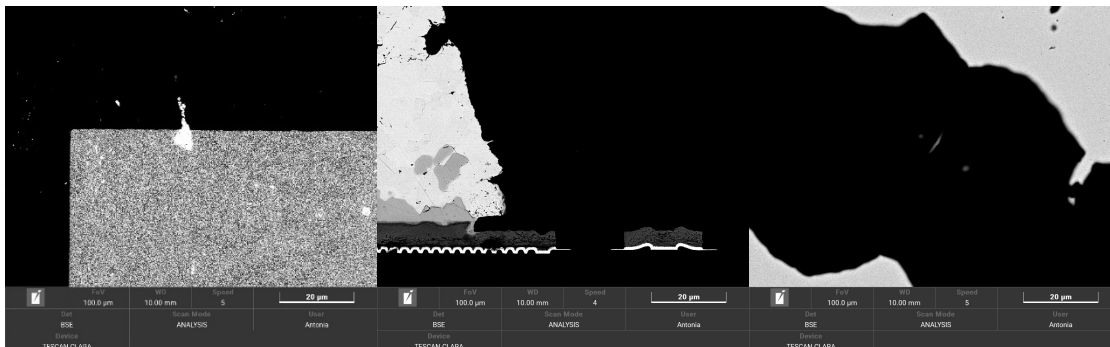


Abbildung 26, 86 und 123: BSE-Detektor; 100 µm Sichtfeld;
Hochauflösetestobjekt, eingebetteter Chip und Berliner Blau

Im COMPO-Modus des 4-Quadranten-BSE-Detektors werden weitwinklig gestreute Rückstreuelektronen erfasst. Auch hier dominiert der Materialkontrast. Der Kontrast ist geringer als im Standard-BSE-Modus, jedoch können feinere Materialunterschiede sichtbar werden. Risse und Poren sind dagegen schlechter erkennbar. Aufladungen sind nicht mehr sichtbar. (Abb. 87)

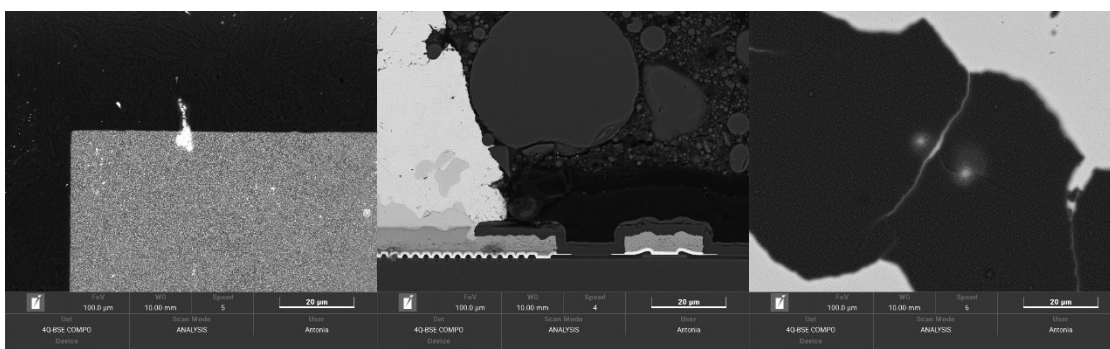


Abbildung 28, 87 und 124: 4-Q-BSE-Detektor Compo; 100 µm Sichtfeld;
Hochauflösetestobjekt, eingebetteter Chip und Berliner Blau

Im TOPO-Modus des 4-Quadranten-BSE-Detektors werden topografische Information dargestellt. Das Bild erscheint insgesamt kontrastarm und zeigt keinen Materialkontrast. Die Abbildung wirkt wie ein Abdruck der Probenoberfläche, teilweise erscheint die Topografie richtungsinvertiert. (Abb. 88)

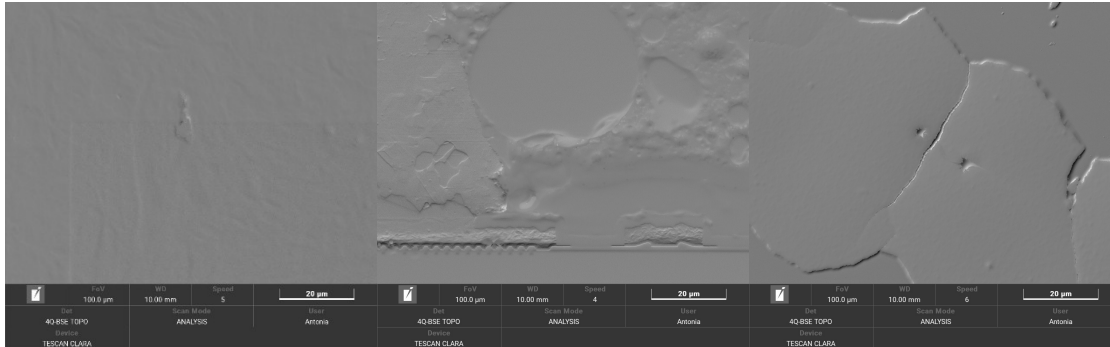


Abbildung 30, 88 und 125: 4-Q-BSE-Detektor Topo; 100 µm Sichtfeld; Hochauflösetestobjekt, eingebetteter Chip und Berliner Blau

Der Axialdetektor und Multidetektor sind in der Elektronensäule angeordnet. Beide erfassen insgesamt weniger Elektronen als die Kammerdetektoren, wodurch das Signal schwächer und das Bild stärker verrauscht ist. Bei kleinem Sichtfeld im Bereich weniger Mikrometer und Arbeitsabständen unter etwa 5 mm kann die Schärfe höher sein als bei den Kammerdetektoren. Gleichzeitig treten weniger Artefakte auf. Aufladungserscheinungen sind stark reduziert oder verschwinden, und SE3 aus dem Kammerinneren werden nicht erfasst, weil diese den Detektor nicht erreichen. Detektiert werden vor allem Rückstreuelektronen, die unter kleinen Winkeln nahe der optischen Achse austreten, weshalb das Bild überwiegend von Materialkontrast bestimmt ist (Abb. 89, 90). Damit sind die In-Lens-Detektoren besonders für hochauflösende Abbildungen bei kleinem Arbeitsabstand geeignet.

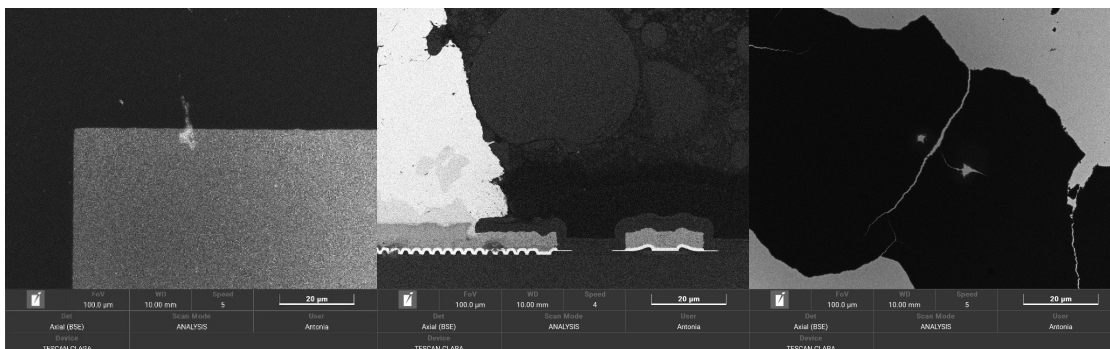


Abbildung 32, 89 und 126: Axial-Detektor; 100 µm Sichtfeld; Hochauflösetestobjekt, eingebetteter Chip und Berliner Blau

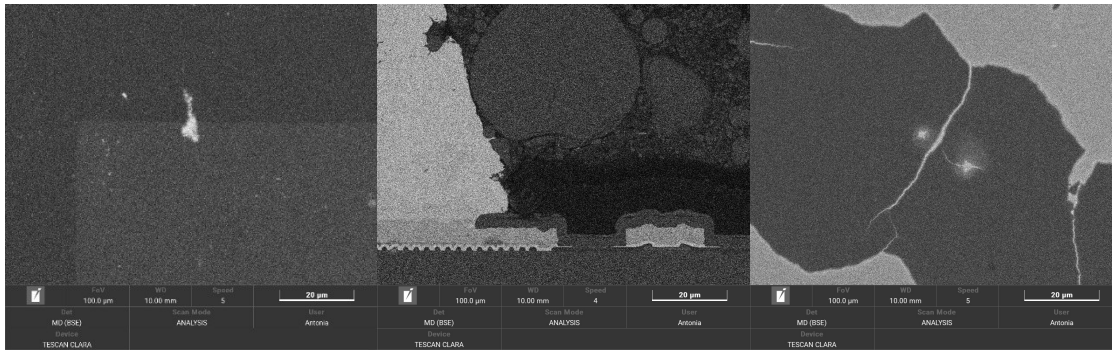


Abbildung 34, 90 und 127: Multi-Detektor; 100 µm Sichtfeld; Hochauflösetestobjekt, eingebetteter Chip und Berliner Blau

Der STEM-Detektor erfasst die durch die Probe transmittierten Elektronen, wofür eine hohe Beschleunigungsspannung von 30 kV erforderlich ist. Die Elektronen werden in der Probe unterschiedlich stark gestreut, sodass Informationen über Zusammensetzung und Struktur gewonnen werden können. Je nach mit dem Detektor erfasstem Streuwinkel entstehen verschiedene Kontraste. Im Hellfeld werden Elektronen detektiert, die nur schwach gestreut wurden. Die Dioden liegen in der optischen Achse. Bereiche mit geringer Streuung erscheinen hell, stärker streuende Bereiche dunkel. Der Kontrast ist empfindlich gegenüber schwacher Streuung. In Abbildung 152 ist eine netzartige Struktur erkennbar. Die Stege erscheinen an den Rändern aufgrund stärkerer Streuung dunkler, während sie in der Mitte heller wirken. Innerhalb der Stege sind vereinzelt Strukturen sichtbar. Am Netzknoten deutet ein dunkler Bereich auf höhere Dichte oder größere Schichtdicke hin. Im Dunkelfeld werden elastisch gestreute, transmittierte Elektronen bei größeren Streuwinkeln erfasst. Die entsprechenden Dioden liegen neben den Hellfelddioden. Schwach streuende Bereiche erscheinen dunkel, da diese Elektronen auf die Dioden zur Hellfelddetektion treffen, stärker streuende erscheinen hell. Dadurch werden Materialunterschiede sichtbar, weil die elastische Streuung von der Ordnungszahl abhängt. In Abbildung 153 streuen die Stege unter kleinem Winkel und wirken daher dunkler, während Ränder und der Bereich im Knotenzentrum heller hervortreten. [19, S. 160]

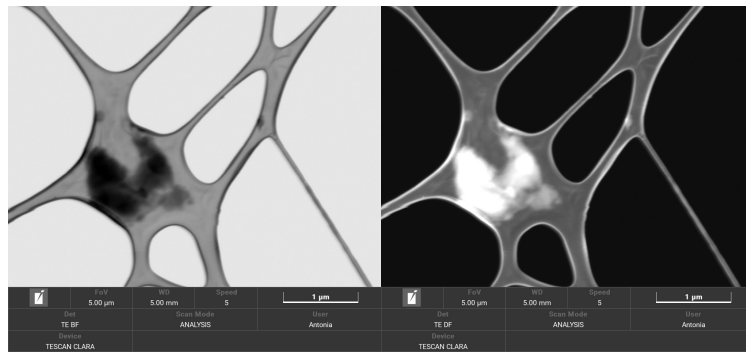


Abbildung 152 und 153: Hellfeld und Dunkelfeld mit STEM-Detektor; 5 µm Sichtfeld; Trägerfilm auf TEM-Gitter

Beim Hochwinkel-Dunkelfeld (HADF) werden Elektronen aus noch größeren Streuwinkeln detektiert. Die Dioden befinden sich weiter von der optischen Achse entfernt. Dieser Modus eignet sich besonders zur Darstellung von Materialkontrasten [19, S. 160]. Das Bild ist dem Dunkelfeldbild ähnlich, jedoch stärker verrauscht, da insgesamt weniger Elektronen in so großem Winkel gestreut werden und den Detektor erreichen (Abb. 154). Zusätzlich wurde ein Bild mit dem Everhart-Thornley-Detektor, von dem TEM-Gitter im STEM-Probenhalter, aufgenommen (Abb. 155). Obwohl der E-T-Detektor schräg oberhalb der Probe positioniert ist, ähnelt das Bild dem Dunkelfeld- bzw. HADF-Bild. Ursache ist, dass transmittierte Elektronen den STEM-Detektor treffen und den E-T-Detektor nicht erreichen. Aus stark streuenden Bereichen können hingegen Rückstreu- und Sekundärelektronen zum E-T-Detektor gelangen, wodurch diese Bereiche im Bild hell erscheinen. [19, S. 160] [14, S. 39]

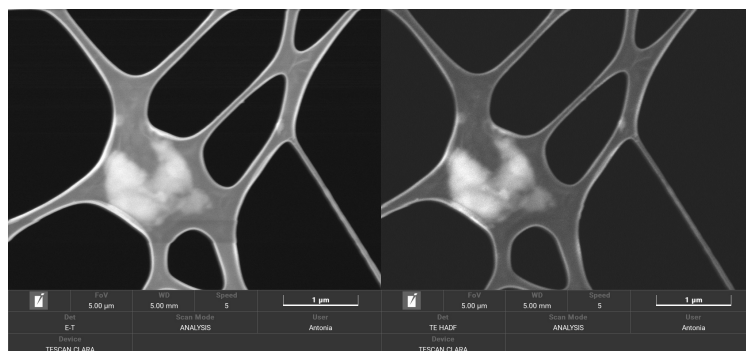


Abbildung 155 und 154: E-T-Detektor und Hochwinkeldunkelfeld mit STEM-Detektor; 5 µm Sichtfeld; Trägerfilm auf TEM-Gitter

Aufgrund der netzartigen Struktur ist anzunehmen, dass es sich um einen Kohlenstoffträgerfilm auf dem TEM-Gitter handelt. Solche Filme dienen zur Stabilisierung dünner oder

pulverförmiger Proben, sodass diese durch die Zwischenräume des Netzes untersucht werden können. [19, S. 161] [25]

4.3 Abbildungsmodi

Zur Bewertung der verschiedenen Abbildungsmodi wurden Aufnahmen bei unterschiedlichen Sichtfeldern erstellt und verglichen.

Die Aufnahmen bei 1 mm Sichtfeld dienen dem Vergleich der Modi „Analysis“, „Overview“ und „Widefield“ bei großem Sichtfeld.

Der „Analysis“-Modus zeigt das schärfste Bild, da hier mit Veränderung des Arbeitsabstands fokussiert werden kann. Topografie- und Materialkontrast sind gut sichtbar. Der Modus ist bezüglich des Arbeitsabstands universell einsetzbar und wird für analytische Untersuchungen wie beispielsweise energiedispersive Röntgenspektroskopie verwendet. (Abb. 91)

Der „Overview“-Modus ist für Übersichtsaufnahmen bei niedriger Vergrößerung konzipiert und auch für stark topografische Proben geeignet. Ein direktes Fokussieren ist nicht möglich, das Bild kann nur mit der Einstellung des Stigmators verbessert werden. Die Schärfentiefe ist größer als im „Analysis“-Modus und die Auflösung ist besser als im „Widefield“-Modus. Zudem ist das Bild weniger verzeichnet und Topografie- und Materialkontrast sind gut erkennbar. Auch geringe Materialunterschiede (siehe EDX-Analyse 2) werden gut wiedergegeben. Wenn im „Analysis“-Modus der Arbeitsabstand und Stigmator so stark verstellt wurden, dass sich das Bild nicht mehr korrigieren lässt, kann im „Overview“-Modus der Stigmator unabhängig vom Arbeitsabstand angepasst werden. (Abb. 97)

Der „Widefield“-Modus ermöglicht das größte Sichtfeld, liefert jedoch die geringste Auflösung. Das Bild wirkt insgesamt unschärfer, denn Fokussieren ist auch in diesem Modus nicht möglich, Korrekturen erfolgen ausschließlich über den Stigmator. Der Topografiekontrast ist gering, Materialunterschiede sind jedoch gut erkennbar. Der Modus dient primär der Probenorientierung und ist weniger zur Bildaufnahme geeignet. (Abb. 95)

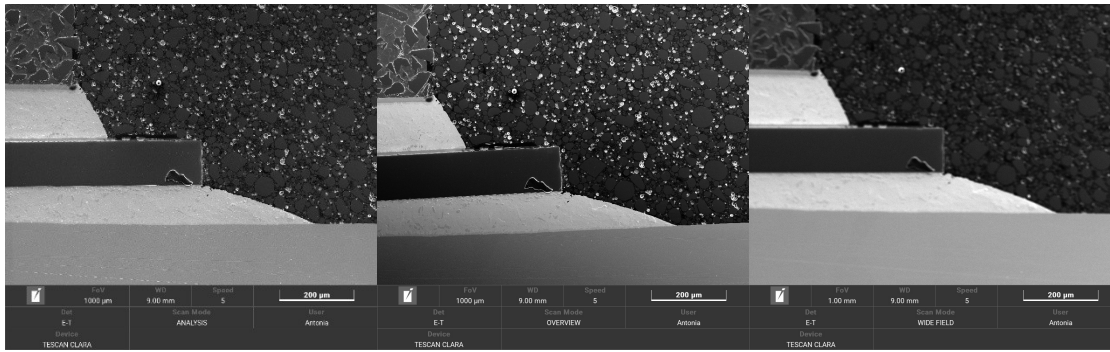


Abbildung 91, 97 und 95: „Analysis“- , „Overview“-
und „Wide Field“-Abbildungsmodus; 1 mm Sichtfeld; eingebetteter Chip

Bei maximalem Sichtfeld des „Widefield“-Modus (8,3 mm bei einem Arbeitsabstand von 5 mm) war deutlich eine tonnenförmige Verzeichnung erkennbar. Das minimale Sichtfeld von 250 µm war unscharf. Deshalb empfiehlt sich bei Sichtfeldern unter 2 mm den „Overview“- oder „Analysis“-Modus zu verwenden.

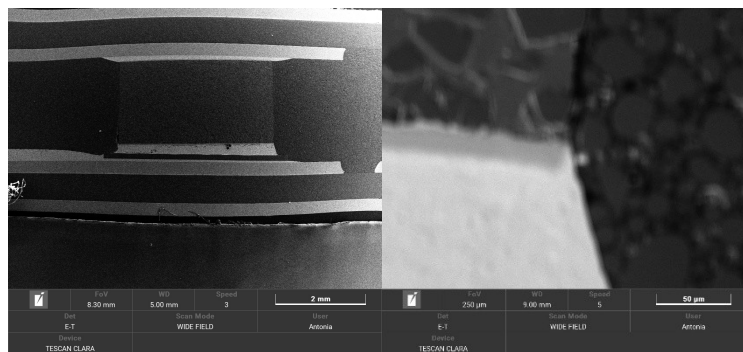


Abbildung 94 und 96: 8,3 mm und 250 µm Sichtfeld;
„Wide Field“-Abbildungsmodus; eingebetteter Chip

Zur Bewertung der Abbildungsmodi bei hoher Vergrößerung wurden Aufnahmen bei 20 µm Sichtfeld im „Analysis“- , „UHR“- und „Depth“-Modus erstellt.

Der „UHR“-Modus liefert die höchste Auflösung. Auch kleinste Strukturen sind scharf abgebildet, und Aufladungen sind weniger sichtbar als im „Analysis“-Modus. Für optimale Ergebnisse wird ein kleiner Arbeitsabstand (ca. 1 mm) empfohlen [14, S. 23]. Dies kann aber, je nach Topografie und Befestigung der Probe, riskant sein. Der Modus erfordert eine präzise Fokussierung und Einstellung des Stigmators.

Der „Depth“-Modus ist auf eine hohe Schärfentiefe ausgelegt. Bei Proben mit geringer Topografie zeigte sich keine deutliche Verbesserung gegenüber dem „UH-Resolution“-Modus.

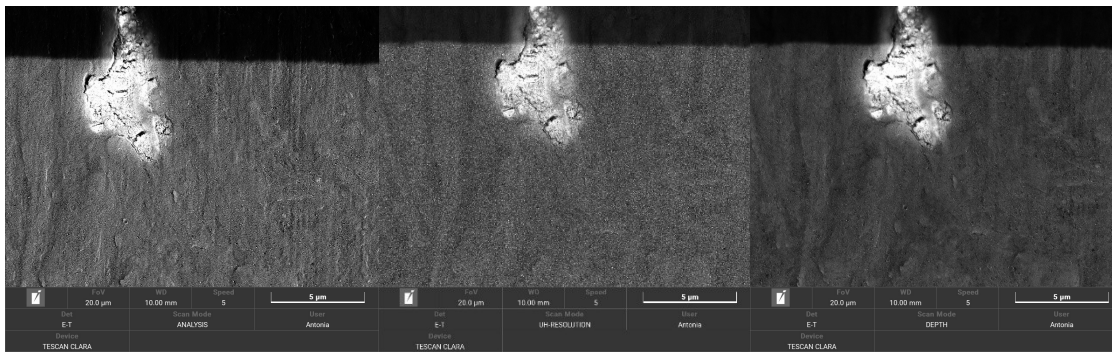


Abbildung 46, 37 und 43: „Analysis“-, „UHR“- und „Depth“-Abbildungsmodus; 20 µm Sichtfeld; Hochauflösetestobjekt

Bei stark topografischen Bereichen wie in Abbildung 101 und 102 bei einem Höhenunterschied von 200 µm bei 500 µm Sichtfeld, konnten im „Depth“-Modus beide Bereiche gleichzeitig scharf abgebildet werden (Abb. 98). Im „UHR“-Modus war jeweils nur die fokussierte Ebene scharf, während nicht fokussierte Bereiche durch die automatische Helligkeitsanpassung zu hell oder zu dunkel erschienen. Im „Depth“-Modus waren alle Ebenen fokussiert, jedoch mit geringfügig reduzierter Auflösung im Vergleich zum „UHR“-Modus. Die Aufladung war in allen Modi gleich. Ein Kompromiss zwischen Auflösung und Schärfentiefe kann alternativ durch Kippen der Probe erreicht werden, um unterschiedlich hohe Bereiche in eine Fokusebene zu bringen.

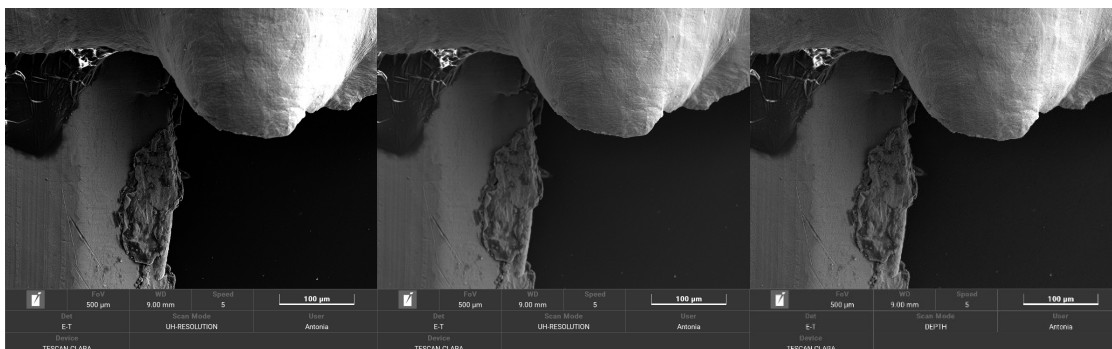


Abbildung 102, 101 und 98: „UHR“- und „Depth“-Abbildungsmodus; 500 µm Sichtfeld; eingebetteter Chip

An einem Probenbereich mit Bruchkante zeigte sich, dass im „Analysis“-Modus die Helligkeitsanpassung ungünstig war. Bei der Fokussierung auf die Bruchfläche erschien die Oberfläche zu dunkel und war nicht mehr erkennbar. Der „UHR“- und auch der „Depth“-Modus waren besser geeignet, wobei der Bruch im „Depth“-Modus am schärfsten abgebildet werden konnte.

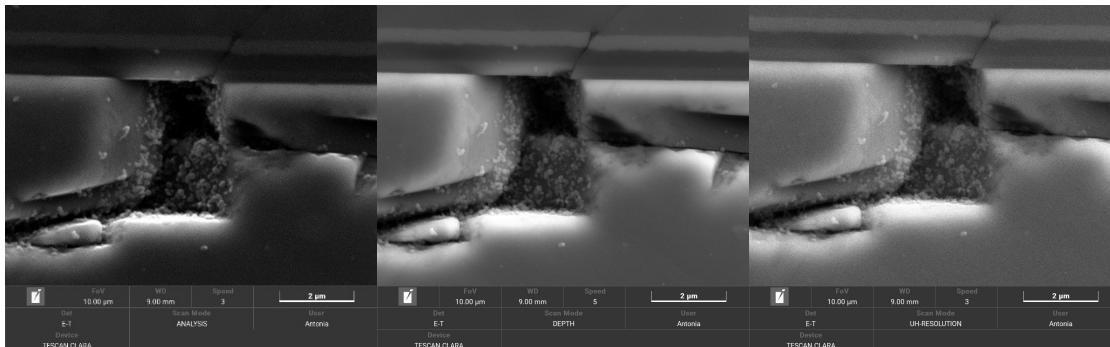


Abbildung 93, 100 und 105: „Analysis“- , „Depth“- und „UHR“- heller Strahl
Abbildungsmodus; 10 µm Sichtfeld; eingebetteter Chip

Zur Überprüfung der Maßstabsgenauigkeit und des Sichtfelds wurde das Gitter des Hochauflösetestobjekts vermessen. Der „Analysis“-Modus diente bei einem Sichtfeld von 2,13 mm als Referenz, da keine Herstellerangabe zur Maschenweite vorlag. Mit der Referenz verglichen wurden die Modi „Analysis“, „Widefield“, „Overview“, „Depth“ und „UH-Resolution“ bei einem Sichtfeld von 900 µm.

Im Vergleich zur Referenz zeigte sich in allen Modi eine leichte Vergrößerung der gemessenen Maschenweite gegenüber dem Maßstab. Folglich wird die Probe zu groß abgebildet. Die stärkste Abweichung von 1,38 % trat im „Widefield“-Modus auf, was die eingeschränkte Eignung für quantitative Analysen bestätigt. Der „Overview“-Modus wies eine geringe Abweichung von 0,73 % auf. Auch im „Analysis“-Modus trat im Vergleich zum größeren Sichtfeld eine geringe Abweichung von 0,37 % auf. Diese Abweichung ist mit 0,84 µm über die Maschenweite von 226,20 µm bei einem Sichtfeld von 900 µm gering. Im „UHR“- und „Depth“-Modus lag die Abweichung bei 1,00 % und 0,97 %.

Insgesamt ist der „Analysis“-Modus am besten zur maßstabsgetreuen Abbildung geeignet. Große Probenbereiche lassen sich gut im „Overview“-Modus abbilden, während der „Widefield“-Modus weniger für die Aufnahme von Bildern geeignet ist. Im „UHR“ und „Depth“-Modus wäre aufgrund der hohen Auflösung eine geringe Abweichung zu erwarten. Gemessen wurde aber eine größere Abweichung als im „Overview“-Modus. Ursache dafür kann das große

Sichtfeld sein, für das die hochauflösenden Abbildungsmodi nicht ausgelegt sind. Weitere Bilder (Abb. 55 bis 59) sowie eine Tabelle der gemessenen Maschenweiten befindet sich im Anhang.



Abbildung 55, 57 und 58: „Analysis“- , „Wide Field“- und „Overview“-
Abbildungsmodus; Hochauflösendstestobjekt

Die Potenzialmodi „heller Strahl“, „axiale BSE“ und „universell“ wurden im „UH-Resolution“-Modus, jeweils detektiert mit E-T-Detektor und Axial-Detektor, verglichen.

Der Potenzialmodus beschreibt die an die Potenzialröhre angelegte Spannung und beeinflusst, welche Elektronen vom Detektor erfasst werden können.

Mit dem In-Lens-Axial-Detektor können im Modus „axiale BSE“ ausschließlich entlang der optischen Achse zurückgestreute Elektronen erfasst werden. In andere Winkel gestreute Elektronen treffen nicht auf den Detektor in der Elektronensäule. Dadurch entsteht nahezu kein Topografiekontrast, während der Materialkontrast (siehe EDX-Analyse 3) stark ausgeprägt ist. Im Modus „heller Strahl“ werden Sekundärelektronen detektiert, die entlang der optischen Achse austreten und die Auflösung ist verbessert. Es treten Kanteneffekte auf, die für Topografiekontrast sorgen. Der Modus „universell“ stellt einen Kompromiss dar. Es werden Sekundärelektronen detektiert, aber der Kanteneffekt tritt geringer als bei „heller Strahl“ auf, der Materialkontrast ist erkennbar und die Auflösung ist besser als im Modus „axiale BSE“. [14, S. 26]

Mit dem E-T-Detektor werden aufgrund der Detektion schräg über der Probe in allen drei Potenzialmodi topografische Rückstreuelektronen erfasst, wodurch sowohl Topografie- als auch Materialkontrast sichtbar sind. Aufladungen erscheinen schwächer. Auch hier liefert der Modus „heller Strahl“ die beste Auflösung. [14, S. 26]

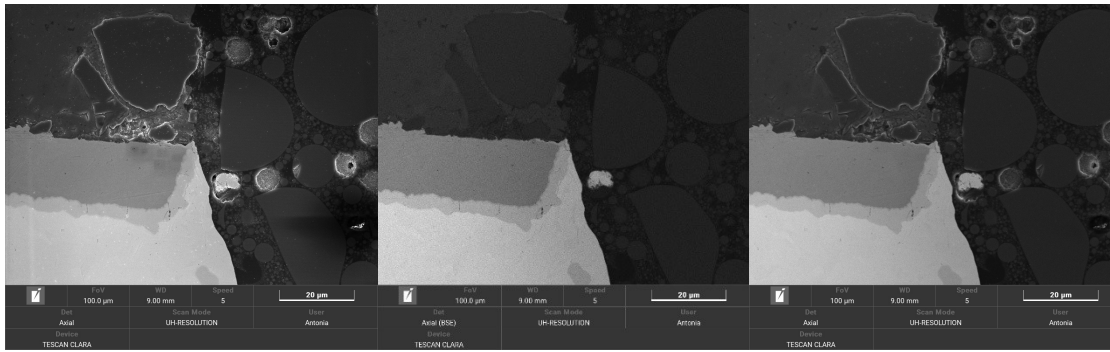


Abbildung 110, 111 und 112: „UHR“-Abbildungsmodus mit Potenzialmodus heller Strahl, axiale BSE und universell mit Axial-Detektor; 100 µm Sichtfeld; eingebetteter Chip

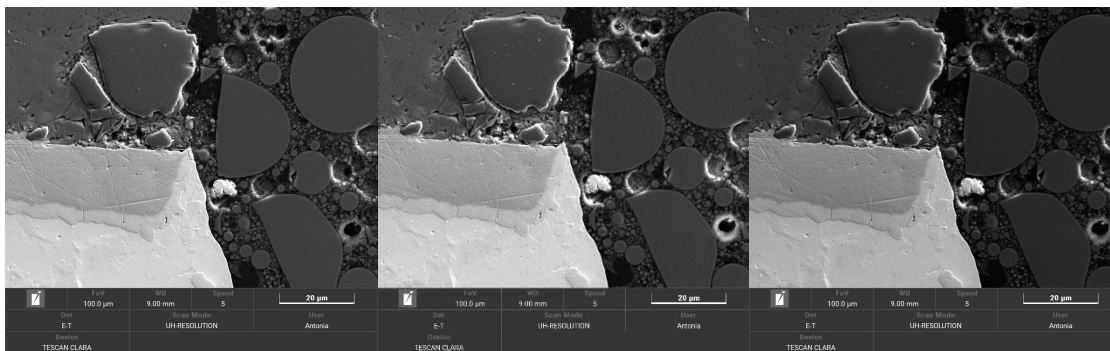


Abbildung 103, 106 und 108: „UHR“-Abbildungsmodus mit Potenzialmodus heller Strahl, axiale BSE und universell; ET-Detektor; 100 µm Sichtfeld; eingebetteter Chip

4.4 Hocharauflösung

4.4.1 gerätespezifischer Vergleich: REM CLARA und REM GAIA

Im Rahmen des Hocharauflösungsvergleichs wurden die beiden Rasterelektronenmikroskope CLARA und GAIA unter Verwendung der gleichen Probe (Goldpartikel auf Kohlenstoff) und identischen Abbildungsparametern miteinander verglichen. Da die maximale Vergrößerung der GAIA (1.000.000-fach mit In-Lens-Detektor) geringer ist als die der CLARA (> 4.000.000-fach mit In-Lens-Detektor), wurden die Bilder bei der maximalen Vergrößerung am REM GAIA aufgenommen und anschließend am REM CLARA reproduziert. Trotz gleichem Vorgehen, gleichen Parametern und der gleichen Probe zeigten sich deutliche Unterschiede in den aufgenommenen Bildern der grundsätzlich gut vergleichbaren Elektronenmikroskope.

Das mit dem E-T-Detektor am REM CLARA aufgenommene Bild wirkt stärker topografisch, was sich durch helle und dunkle Bereiche zeigt. Das am REM GAIA aufgenommene Bild hat

hingegen ähnliche Graustufen mit geringerem Kontrast. Das Bild erscheint dadurch harmonischer. Daraus lässt sich schließen, dass die automatische Kontrast- und Helligkeitsanpassung das Bild bei beiden Geräten unterschiedlich beeinflusst. Während der Aufnahme der Bilder konnte festgestellt werden, dass das Vergrößern mit anschließendem Scharfstellen und Anpassen des Stigmators am REM CLARA deutlich mehr Zeit als am REM GAIA benötigt. Trotz des Mehraufwands blieb das Bild unschärfer.

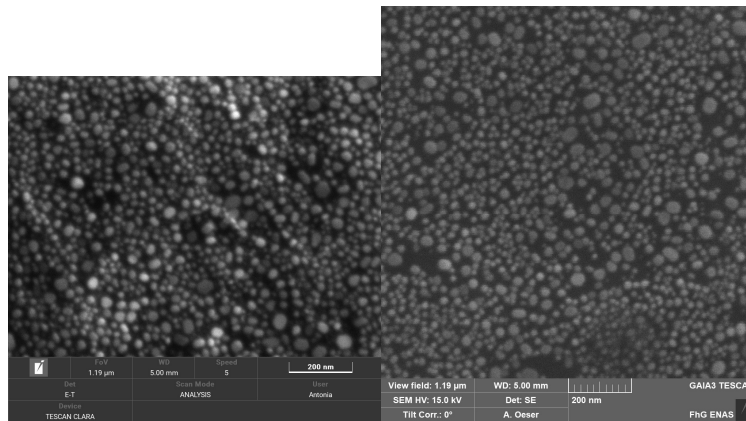


Abbildung 61 und 64: Hochauflösung; E-T-Detektor; CLARA und GAIA; 100 µm Sichtfeld; Hochauflösetestobjekt

Bei Verwendung des In-Lens-Axial-Detektors zeigt sich ein deutlicher Unterschied zwischen den aufgenommenen Bildern. In den am REM GAIA aufgenommenen Bildern sind Strukturen auf großen Goldpartikeln und auch kleine Partikel mit Durchmessern von 5 nm sowie Wabenstrukturen im Kohlenstoffsubstrat gut erkennbar. Die Aufnahmen am REM CLARA wurden deutlich schlechter aufgelöst. Der Sondendurchmesser betrug am REM GAIA 2,1 nm und am REM CLARA 4,3 nm, was den beobachteten Unterschied erklärt. Kontrast und Helligkeit hingegen wurde an beiden Rasterelektronenmikroskopen gut automatisch angepasst.

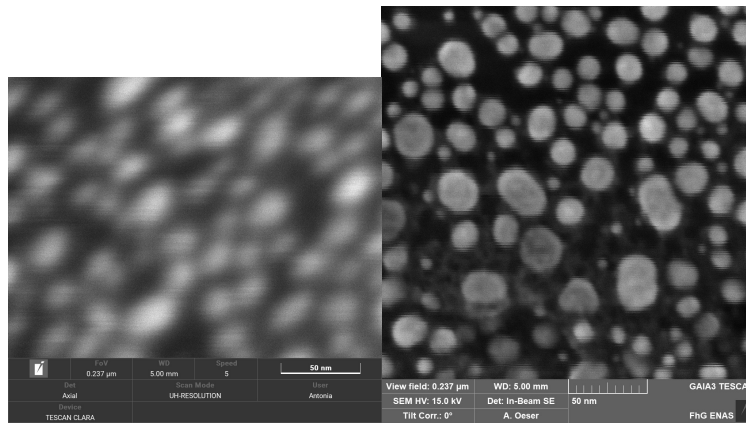


Abbildung 73 und 72: Hochauflösung; In-Lens-Axial-Detektor; CLARA und GAIA;
0,237 µm Sichtfeld; Hochauflösungstestobjekt

Durch Reduktion von Beschleunigungsspannung und Strahlstrom am REM CLARA konnte die Auflösung verbessert und der Sondendurchmesser von 4,3 nm auf 2,8 nm verringert werden. Das Bild wurde schärfer, und die Konturen größerer Goldpartikel wurden sichtbar. Dennoch blieb die Abbildungsqualität schlechter als am REM GAIA und Goldpartikel waren nur bis zu einem Durchmesser von 10 nm erkennbar.

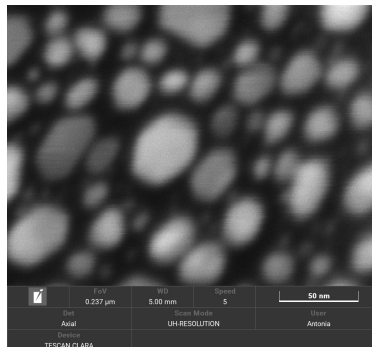


Abbildung 74: Hochauflösung; In-Lens-Axial-Detektor; CLARA mit angepassten
Abbildungsparametern; 0,237 µm Sichtfeld; Hochauflösungstestobjekt

Laut Herstellerangaben beträgt die Auflösung des REM CLARA 0,9 nm bei 15 kV, während für das REM GAIA 0,7 nm bei 15 kV angegeben sind. Da im praktischen Test mit der CLARA keine entsprechend bessere Auflösung erreicht wurde, kann geschlossen werden, dass das Gerät leistungsfähig, jedoch anspruchsvoller zu bedienen ist. In den Gerätebeschreibungen ist zu erkennen, dass das REM GAIA auf maximale Hochauflösung und präzise Probenbearbeitung ausgelegt ist, während das REM CLARA als universelles UHR-SEM für eine breite materialwissenschaftliche Charakterisierung konzipiert ist.

4.4.2 probenbasierter Vergleich: Gold auf Kohlenstoff und Berliner Blau

Zur Bewertung der Hochauflösungsfähigkeit verschiedener Proben wurde das Hochauflösungstestobjekt sowie Berliner Blau im REM CLARA miteinander verglichen. Das Hochauflösungstestobjekt ist gut zur Aufnahme von hochauflösenden Abbildungen geeignet, Berliner Blau ist anspruchsvoller abzubilden. Die Aufnahmen erfolgten jeweils mit dem E-T-Detektor im „Analysis“ Modus sowie mit dem Axial-Detektor im „UH-Resolution“-Modus.

Goldpartikel auf Kohlenstoff

Das minimal einstellbare Sichtfeld im „Analysis“-Modus mit E-T-Detektor beträgt $0,1 \mu\text{m}$. Eine scharfe Abbildung des Hochauflösungstestobjekts konnte jedoch nur bis zu einem Sichtfeld von $0,237 \mu\text{m}$ erzielt werden (Abb. 64). Dabei war die Form der Goldpartikel noch klar erkennbar, die Partikelgrößen ließen sich gut bestimmen und passen zur angegebenen Maximalgröße von 50 nm . Bei einem Sichtfeld von $0,1 \mu\text{m}$ waren die unterschiedlichen Graustufen der Goldpartikel nicht mehr unterscheidbar. Erst durch die Verringerung des Arbeitsabstands auf 3 mm wurden die Unterschiede wieder sichtbar (Abb. 65).

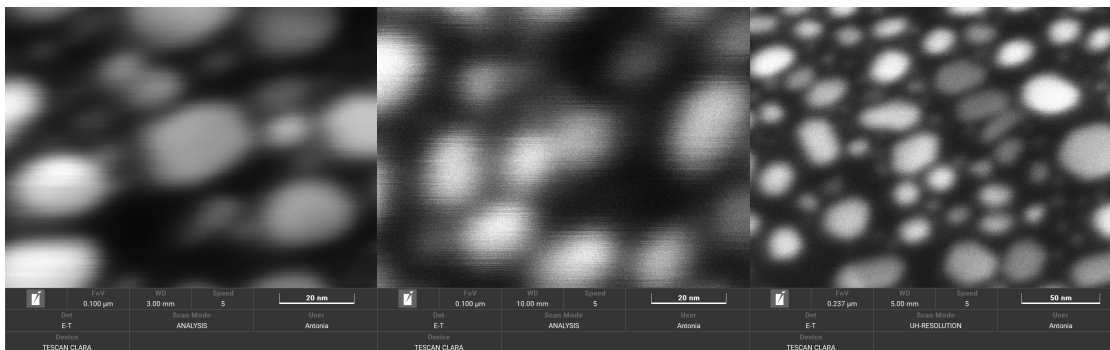


Abbildung 65, 66 und 64: Hochauflösung mit E-T-Detektor; $0,1 \mu\text{m}$ Sichtfeld mit 3 mm Arbeitsabstand, $0,1 \mu\text{m}$ Sichtfeld mit 10 mm Arbeitsabstand, $0,237 \mu\text{m}$ Sichtfeld mit 5 mm Arbeitsabstand; Hochauflösungstestobjekt

Bei einem größeren Arbeitsabstand von 10 mm und größerem Sichtfeld von $1 \mu\text{m}$ wirkt das Bild topografisch. Zudem sind die Goldpartikel bei gleichem Sichtfeld mit unterschiedlichem Arbeitsabstand verschieden groß dargestellt.

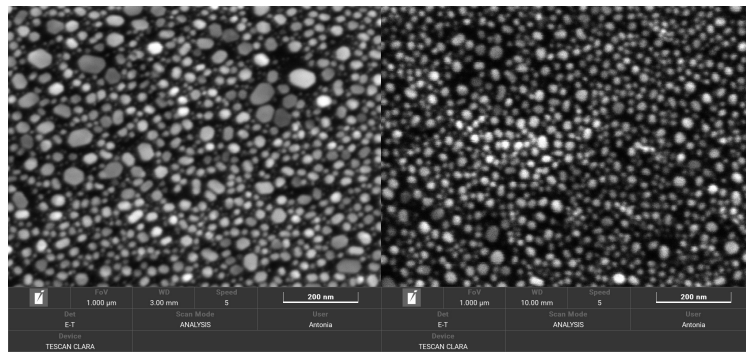


Abbildung 63 und 62: Hochauflösung mit E-T-Detektor; 1 µm Sichtfeld mit 3 mm Arbeitsabstand und 1 µm Sichtfeld mit 10 mm Arbeitsabstand; Hochauflösungstestobjekt

Mit Verwendung des Axial-Detektors im „UH-Resolution“-Modus konnte ein minimales Sichtfeld von 0,069 µm eingestellt werden. Für kleine Sichtfelder bis etwa 1 µm zeigte sich eine bessere Auflösung im Vergleich zum E-T-Detektor. Kontrast und Helligkeit wurden jedoch schlechter angepasst. Bei größerem Sichtfeld war der Unterschied der Auflösungen zwischen beiden Detektoren vernachlässigbar klein.

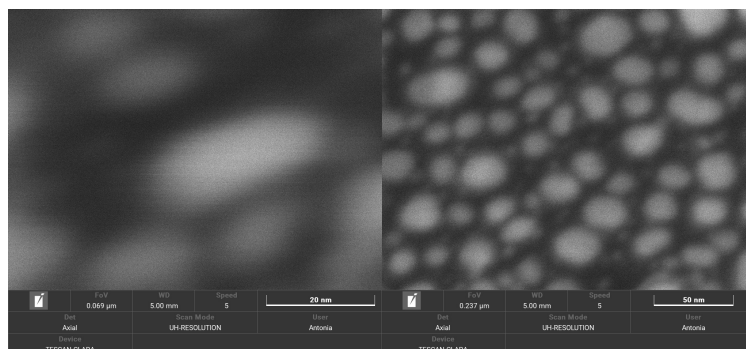


Abbildung 70 und 69: Hochauflösung mit In-Lens-Axial-Detektor; 0,069 µm Sichtfeld und 0,237 µm Sichtfeld mit 5 mm Arbeitsabstand; Hochauflösungstestobjekt

Berliner Blau

Im Gegensatz zu den Goldpartikeln konnte Berliner Blau bei Verwendung des E-T-Detektors im „Analysis“-Modus nur bis zu einem Sichtfeld von etwa 1 µm scharf abgebildet werden. Erkennbar ist eine kubisch kristalline Struktur mit Kantenlängen von 100 bis 500 nm. Die Würfel bilden in Clustern etwa 1 µm dicke Schichten (Abb. 113 im Anhang). Die Kanten der pyramidenförmigen Kristalle waren nur bis zu einem Sichtfeld von etwa 2 µm deutlich erkennbar. Bei höherer Vergrößerung wurden die Kanten zunehmend unscharf. Besonders störend wirken Staubpartikel. In der Nähe stark aufgeladener Bereiche, wurde die Fokussierung

zusätzlich erschwert. Das bei den Goldpartikeln erreichten Sichtfeld von 0,237 μm konnte hier nicht fokussiert werden.

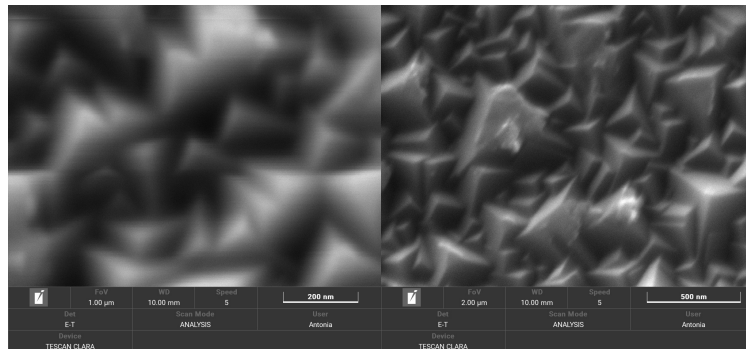


Abbildung 148 und 149: Hochauflösung mit E-T-Detektor; 1 μm und 2 μm Sichtfeld mit 10 mm Arbeitsabstand; Berliner Blau

Mit dem Axial Detektor im „UH-Resolution“-Modus aufgenommen, erschien das Bild insgesamt schärfer. Die Kanten der Pyramiden waren bei einem Sichtfeld von 1 μm noch klar erkennbar. Eine weitere Verringerung des Sichtfelds war jedoch auch hier nicht möglich, da die Topografie und das Material von Berliner Blau die erreichbare Hochauflösung begrenzen.

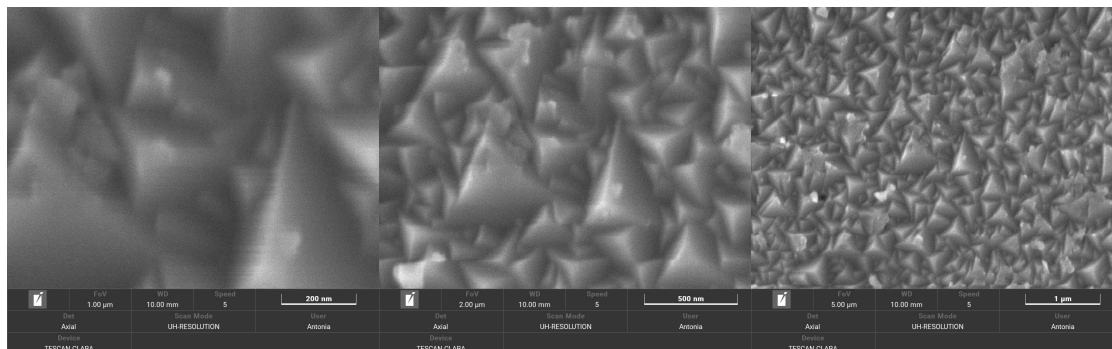


Abbildung 151, 150 und 149: Hochauflösung mit In-Lens-Axial-Detektor; 1 μm , 2 μm und 5 μm Sichtfeld mit 10 mm Arbeitsabstand; Berliner Blau

Der Vergleich zeigt, dass die erreichbare Hochauflösung stark von den Proben abhängt. Während die Goldpartikel auf Kohlenstoff aufgrund ihrer geringen Topografie, hohen Elektronenausbeute und klaren Materialgrenzen eine hohe Auflösung ermöglichen, begrenzen bei Berliner Blau die Topografie und Aufladungseffekte die maximale Auflösung. Zudem wird deutlich, dass der Axial-Detektor im „UH-Resolution“-Modus bei kleinem Sichtfeld eine höhere Auflösung ermöglicht, während die Proben mit dem E-T-Detektor im „Analysis“ Modus kontrastreicher abgebildet werden.

Die Unterschiede in der Abbildungsqualität lassen sich anhand der Probenzusammensetzung erklären. Gold besitzt eine hohe elektrische Leitfähigkeit, sodass Elektronen gut die Probe verlassen können. Berliner Blau ist hingegen schlechter leitfähig, wodurch es verstärkt zur Aufladung kommt und die Bildqualität beeinträchtigt wird. Zudem besitzt Gold eine hohe Ordnungszahl ($Z = 79$), wodurch die Elektronenausbeute größer ist. Da die Goldpartikel kleiner 3 nm bis etwa 50 nm groß sind, wird zusätzlich das Kohlenstoffsubstrat ($Z = 6$) mit detektiert [22]. Berliner Blau besteht aus Elementen mit überwiegend niedrigen Ordnungszahlen (Kohlenstoff $Z = 6$, Stickstoff $Z = 7$, Sauerstoff $Z = 8$ und Eisen $Z = 26$), wie die energiedispersive Röntgenspektroskopie ergab (siehe EDX-Analyse 4). Die insgesamt geringere mittlere Ordnungszahl führt zu einer niedrigeren Elektronenausbeute und damit zu einem schwächeren Signal. Damit zeigt sich, dass die erreichbare Hochauflösung nicht allein vom Mikroskop, sondern auch von den Materialeigenschaften der Probe abhängt.

5 Zusammenfassung und Ausblick

In dieser Arbeit wurden Abbildungsmodi, Detektoren sowie Abbildungsparameter des Rasterelektronenmikroskops untersucht und deren Einfluss auf die Bildentstehung analysiert. Die Ergebnisse zeigen, wie Beschleunigungsspannung, Strahlstrom, Arbeitsabstand und Kippwinkel der Probe die Abbildung beeinflussen. Eine gezielte Anpassung dieser Parameter ist erforderlich, um optimale Abbildungsbedingungen zu erreichen. Unterschiedliche Abbildungsmodi sind jeweils für spezifische Analyseziele geeignet. Während der „Overview“-Modus eine schnelle Orientierung auf der Probe ermöglicht und der „Analysis“-Modus für Charakterisierungen wie energiedispersive Röntgenspektroskopie geeignet ist, erlauben Modi mit höherer Auflösung, wie der „UHR“-Modus, eine detaillierte Untersuchung feiner Strukturen. Auch die Wahl des Detektors beeinflusst die Bildinformationen, da die Detektoren verschiedene Signalarten erfassen und damit unterschiedliche Kontraste hervorheben. Für die Untersuchung topografischer Merkmale ist eine niedrige Beschleunigungsspannung vorteilhaft, um ein oberflächennahes Anregungsvolumen zu erhalten. Gleichzeitig muss die Beschleunigungsspannung ausreichend hoch sein, um ein starkes Signal zu gewährleisten. Eine zusätzliche Probenkippung verstärkt den topografischen Kontrast. Der Everhart-Thornley-Detektor liefert im „Analysis“-Modus den stärksten Topografiekontrast. Für hochauflösende Oberflächenabbildungen eignet sich der In-Lens-Axial-Detektor im „UH-Resolution“-Modus mit Potenzialmodus „heller Strahl“, da hier die beste laterale Auflösung erreicht wird. Der COMPO Modus des 4-Quadranten-BSE-Detektors stellt Risse und Poren deutlich dar. Für die Darstellung des Materialkontrasts ist eine höhere Beschleunigungsspannung vorteilhaft, während die Probe möglichst ohne Kippung ausgerichtet werden sollte, um topografische Kontraste zu minimieren. Der 4-Quadranten-BSE-Detektor im COMPO Modus liefert Materialkontrast mit topografischen Anteilen, während der In-Lens-Multi-Detektor im „Analysis“ Modus Materialkontrast weitgehend ohne topografischen Einfluss ermöglicht. Im „UH-Resolution“-Modus können mit dem In-Lens-Multidetektor im Potenzialmodus „axiale BSE“ mit Energiefilterung Rückstreuelektronen nach Energie selektiert werden. Die höchste laterale Auflösung mit Materialkontrast wird mit dem In-Lens-Axial-Detektor im „UH-Resolution“ Modus mit Potenzialmodus „axiale BSE“ erreicht, wobei auch Korngrenzen sichtbar werden können. Im Test der Hochauflösung konnte am REM GAIA eine bessere Auflösung als am REM CLARA erzielt werden. Es zeigte sich jedoch, dass auch Proben mit eingeschränkter Eignung für Hochauflösungsabbildungen untersucht werden

können. Die weitere Optimierung der Abbildungsparameter könnte die Hochauflösung verbessern. Zudem bieten der Niedrigvakuummodus sowie Analysen mittels energiedispersiver Röntgenspektroskopie und Ramanspektroskopie weitere Möglichkeiten der Probencharakterisierung, die in dieser Arbeit nicht durchgeführt wurden.

Quellenverzeichnis

- [1] Schimmel, Gerhard: Elektronenmikroskopische Methodik. Springer, Berlin, 1969.
- [2] https://www.bfs.de/DE/themen/opt/sichtbares-licht/sichtbares-licht_node.html (02.03.2026)
- [3] <https://virtuelle-experimente.de/elektronenbeugung/wellenlaenge/de-broglie-wellenlaenge.php> (02.03.2026)
- [4] <https://www.gloorinstruments.ch/microscopy/electron-microscopy/p/multisem> (02.03.2026)
- [5] TESCAN ORSAY HOLDING, a.s.: GAIA3 model 2016. Brochure, Brno, 2016.
- [6] <https://www.zeiss.com/microscopy/de/produkte/sem-und-fib-sem/sem/die-geminisem-produktfamilie.html> (02.03.2026)
- [7] <https://www.hitachi-hightech.com/global/en/products/microscopes/sem-tem-stem/fe-sem/su9600.html> (02.03.2026)
- [8] TESCAN ORSAY HOLDING, a.s.: TESCAN CLARA for materials science. Product Datasheet, Brno, 2023.
- [9] Schmidt, Peter Fritz: Praxis der Rasterelektronenmikroskopie und Mikrobereichsanalyse. expert verlag, Renningen-Malmsheim, 1994.
- [10] Linnemann, Alexander; Kühl, Susanne: Grundlagen der Licht- und Elektronenmikroskopie. Verlag Eugen Ulmer, Stuttgart, 2018.
- [11] Leng, Yang: Materials characterization: introduction to microscopic and spectroscopic methods (2. ed.). Wiley-VCH, Weinheim, 2013.
- [12] Colliex, Christian: Elektronenmikroskopie: eine anwendungsbezogene Einführung. Wissenschaftliche Verlagsgesellschaft, Stuttgart, 2008.
- [13] Egerton, Ray: Physical Principles of Electron Microscopy: An Introduction to TEM, SEM, and AEM. Springer, Boston, 2005.
- [14] TESCAN ORSAY HOLDING, a.s.: TESCAN CLARA instructions for use. Manual, Brno, 2022.
- [15] TESCAN ORSAY HOLDING, a.s.: TESCAN Essence Help > Tutorials > Vacuum Modes. 2023.
- [16] <https://tescan.com/product-portfolio/sem/clara> (23.02.2026)
- [17] TESCAN ORSAY HOLDING, a.s.: TESCAN Essence Help > Tutorials > Load Lock. 2023.
- [18] Watt, Ian M.: The principles and practices of electron microscopy (2. ed.). Cambridge University Press, Cambridge, 1997.

- [19] Goldstein, Joseph et. al.: Scanning electron microscopy and X-ray microanalysis (4. ed.). Springer, New York, 2018.
- [20] Joy, David C.; Pawley, James B.: High-resolution scanning electron microscopy. In: Ultramicroscopy 47 S.80-100, 1992.
- [21] TESCAN ORSAY HOLDING, a. s.: TESCAN CLARA: Ideal for imaging of life science samples also in cryo conditions. Application Example, Brno, 2019.
- [22] <https://www.plano-em.de/s1969/rem-hochaufloesungstestobjekt-gold-auf-kohle-teilchengroesse-3-nm-50-nm> (23.02.2026)
- [23] https://www.chemie.de/lexikon/Berliner_Blau.html (24.02.2026)
- [24] <https://www.spektrum.de/lexikon/chemie/berliner-blau/1050> (24.02.2026)
- [25] <https://qd-europe.com/de/de/neuigkeiten/produkt-und-anwendungsneuigkeiten-spectrum/kohlenstofftraegerfilme-fuer-tem-lochfilme-ein-anwenderbericht-von-wiebke-frandsen-fhi-berlin/> (27.02.2026)

Anhang

Anhangsverzeichnis

Tabellen	A-1
REM-Bilder	A-6
Abbildungsparameter	A-6
Detektoren	A-10
Abbildungsmodi	A-15
Hochauflösung	A-26
EDX-Analysen	A-29

Tabelle 2: Abbildungen Hoचाuflösungstestobjekt

Charakterisierung	REM	Detektor	Eng	Modus	Pot.-modus	BC	Spd	WD	Kippung	Viewfield	Abb.
Abb.-parameter	CLARA	E-T	15 kV	Analysis	aus	1 nA	10 µs/px	10 mm	0°	20 µm	15
Abb.-parameter	CLARA	E-T	5 kV	Analysis	aus	1 nA	10 µs/px	10 mm	0°	20 µm	16
Abb.-parameter	CLARA	E-T	10 kV	Analysis	aus	1 nA	10 µs/px	10 mm	0°	20 µm	17
Abb.-parameter	CLARA	E-T	10 kV	Analysis	aus	3 nA	10 µs/px	10 mm	0°	20 µm	18
Abb.-parameter	CLARA	E-T	10 kV	Analysis	aus	300 pA	10 µs/px	10 mm	0°	20 µm	19
Abb.-parameter	CLARA	E-T	10 kV	Analysis	aus	1 nA	10 µs/px	15 mm	0°	20 µm	20
Abb.-parameter	CLARA	E-T	10 kV	Analysis	aus	1 nA	10 µs/px	5 mm	0°	20 µm	21
Abb.-parameter	CLARA	E-T	10 kV	Analysis	aus	1 nA	10 µs/px	10 mm	45°	20 µm	22
Abb.-parameter	CLARA	E-T	10 kV	Analysis	aus	1 nA	10 µs/px	10 mm	45° FSS	20 µm	23
Detektoren	CLARA	E-T	10 kV	Analysis	aus	1 nA	10 µs/px	10 mm	0°	100 µm	24
Detektoren	CLARA	E-T	10 kV	Analysis	aus	1 nA	10 µs/px	10 mm	0°	20 µm	25
Detektoren	CLARA	BSE	10 kV	Analysis	aus	1 nA	10 µs/px	10 mm	0°	100 µm	26
Detektoren	CLARA	BSE	10 kV	Analysis	aus	1 nA	10 µs/px	10 mm	0°	20 µm	27
Detektoren	CLARA	4Q-BSE Compo	10 kV	Analysis	aus	1 nA	10 µs/px	10 mm	0°	100 µm	28
Detektoren	CLARA	4Q-BSE Compo	10 kV	Analysis	aus	1 nA	10 µs/px	10 mm	0°	20 µm	29
Detektoren	CLARA	4Q-BSE Topo	10 kV	Analysis	aus	1 nA	10 µs/px	10 mm	0°	100 µm	30
Detektoren	CLARA	4Q-BSE Topo	10 kV	Analysis	aus	1 nA	10 µs/px	10 mm	0°	20 µm	31
Detektoren	CLARA	In-Lens-Axial	10 kV	Analysis	aus	1 nA	10 µs/px	10 mm	0°	100 µm	32
Detektoren	CLARA	In-Lens-Axial	10 kV	Analysis	aus	1 nA	10 µs/px	10 mm	0°	20 µm	33
Detektoren	CLARA	In-Lens-MD	10 kV	Analysis	aus	1 nA	10 µs/px	10 mm	0°	100 µm	34
Detektoren	CLARA	In-Lens-MD	10 kV	Analysis	aus	1 nA	10 µs/px	10 mm	0°	20 µm	35
Abbildungsmodi	CLARA	E-T	10 kV	Analysis	aus	1 nA	10 µs/px	10 mm	0°	1 mm	36
Abbildungsmodi	CLARA	E-T	10 kV	Analysis	aus	1 nA	10 µs/px	10 mm	0°	20 µm	37
Abbildungsmodi	CLARA	E-T	10 kV	Analysis	aus	1 nA	10 µs/px	10 mm	0°	10 µm	38
Abbildungsmodi	CLARA	E-T	10 kV	Widefield	aus	1 nA	10 µs/px	10 mm	0°	8,3 mm	39
Abbildungsmodi	CLARA	E-T	10 kV	Widefield	aus	1 nA	10 µs/px	10 mm	0°	1 mm	40
Abbildungsmodi	CLARA	E-T	10 kV	Widefield	aus	1 nA	10 µs/px	10 mm	0°	250 µm	41
Abbildungsmodi	CLARA	E-T	10 kV	Overview	aus	1 nA	10 µs/px	10 mm	0°	1 mm	42
Abbildungsmodi	CLARA	E-T	10 kV	Depth	heller Strahl	1 nA	10 µs/px	10 mm	0°	20 µm	43
Abbildungsmodi	CLARA	E-T	10 kV	Depth	heller Strahl	1 nA	10 µs/px	10 mm	0°	10 µm	44
Abbildungsmodi	CLARA	E-T	10 kV	UHR	heller Strahl	1 nA	10 µs/px	10 mm	0°	100 µm	45
Abbildungsmodi	CLARA	E-T	10 kV	UHR	heller Strahl	1 nA	10 µs/px	10 mm	0°	20 µm	46
Abbildungsmodi	CLARA	E-T	10 kV	UHR	heller Strahl	1 nA	10 µs/px	10 mm	0°	10 µm	47
Abbildungsmodi	CLARA	E-T	10 kV	UHR	axial BSE	1 nA	10 µs/px	10 mm	0°	100 µm	48
Abbildungsmodi	CLARA	E-T	10 kV	UHR	axial BSE	1 nA	10 µs/px	10 mm	0°	20 µm	49
Abbildungsmodi	CLARA	E-T	10 kV	UHR	universell	1 nA	10 µs/px	10 mm	0°	100 µm	50
Abbildungsmodi	CLARA	E-T	10 kV	UHR	universell	1 nA	10 µs/px	10 mm	0°	20 µm	51
Abbildungsmodi	CLARA	In-Lens-Axial	10 kV	UHR	heller Strahl	1 nA	10 µs/px	10 mm	0°	100 µm	52
Abbildungsmodi	CLARA	In-Lens-Axial	10 kV	UHR	axial BSE	1 nA	10 µs/px	10 mm	0°	100 µm	53
Abbildungsmodi	CLARA	In-Lens-Axial	10 kV	UHR	universell	1 nA	10 µs/px	10 mm	0°	100 µm	54
Abbildungsmodi	CLARA	E-T	10 kV	Analysis	aus	1 nA	1 µs/px	10 mm	0°	2,13 mm	55
Abbildungsmodi	CLARA	E-T	10 kV	Analysis	aus	1 nA	1 µs/px	10 mm	0°	900 µm	56
Abbildungsmodi	CLARA	E-T	10 kV	Widefield	aus	1 nA	1 µs/px	10 mm	0°	900 µm	57
Abbildungsmodi	CLARA	E-T	10 kV	Overview	aus	1 nA	1 µs/px	10 mm	0°	900 µm	58
Abbildungsmodi	CLARA	E-T	10 kV	Depth	heller Strahl	1 nA	1 µs/px	10 mm	0°	900 µm	59
Abbildungsmodi	CLARA	E-T	10 kV	UHR	heller Strahl	1 nA	1 µs/px	10 mm	0°	900 µm	60
Hoचाuflösung	CLARA	E-T	15 kV	Analysis	aus	2,65 nA	10 µs/px	5 mm	0°	1,19 µm	61
Hoचाuflösung	CLARA	E-T	10 kV	Analysis	aus	300 pA	10 µs/px	10 mm	0°	1 µm	62
Hoचाuflösung	CLARA	E-T	10 kV	Analysis	aus	1 nA	10 µs/px	3 mm	0°	1 µm	63
Hoचाuflösung	CLARA	E-T	10 kV	UHR	heller Strahl	300 pA	10 µs/px	5 mm	0°	0,237 µm	64
Hoचाuflösung	CLARA	E-T	10 kV	Analysis	aus	1 nA	10 µs/px	3 mm	0°	0,1 µm	65
Hoचाuflösung	CLARA	E-T	10 kV	Analysis	aus	300 pA	10 µs/px	10 mm	0°	0,1 µm	66
Hoचाuflösung	CLARA	In-Lens-Axial	10 kV	UHR	heller Strahl	150 pA	10 µs/px	5 mm	0°	1 µm	67
Hoचाuflösung	CLARA	In-Lens-Axial	10 kV	UHR	heller Strahl	150 pA	10 µs/px	5 mm	0°	0,5 µm	68
Hoचाuflösung	CLARA	In-Lens-Axial	10 kV	UHR	heller Strahl	150 pA	10 µs/px	5 mm	0°	0,237 µm	69

Hochauflösung	CLARA	In-Lens-Axial	10 kV	UHR	heller Strahl	300 pA	10 µs/px	5 mm	0°	0,069 µm	70
Hochauflösung	GAIA	E-T	15 kV	Analysis	-	2,65 nA	10 µs/px	5 mm	0°	1,19 µm	71
Hochauflösung	GAIA	In-Lens-Axial	15 kV	UHR	-	2,65 nA	10 µs/px	5 mm	0°	0,237 µm	72
Hochauflösung	CLARA	In-Lens-Axial	15 kV	UHR	heller Strahl	2,65 nA	10 µs/px	5 mm	0°	0,237 µm	73
Hochauflösung	CLARA	In-Lens-Axial	10 kV	UHR	heller Strahl	500 pA	10 µs/px	5 mm	0°	0,237 µm	74

Tabelle 3: Abbildungen eingebetteter Chip

Charakterisierung	REM	Detektor	Eng	Modus	Pot.-Modus	BC	Spd	WD	Kippung	Viewfield	Abb.
Abb.-parameter	CLARA	E-T	15 kV	Analysis	aus	1 nA	10 µs	9 mm	0°	20 µm	75
Abb.-parameter	CLARA	E-T	10 kV	Analysis	aus	1 nA	10 µs	9 mm	0°	20 µm	76
Abb.-parameter	CLARA	E-T	6 kV	Analysis	aus	1 nA	10 µs	9 mm	0°	20 µm	77
Abb.-parameter	CLARA	E-T	10 kV	Analysis	aus	3 nA	10 µs	9 mm	0°	20 µm	78
Abb.-parameter	CLARA	E-T	10 kV	Analysis	aus	300 pA	10 µs	9 mm	0°	20 µm	79
Abb.-parameter	CLARA	E-T	10 kV	Analysis	aus	1 nA	10 µs	20 mm	0°	20 µm	80
Abb.-parameter	CLARA	E-T	10 kV	Analysis	aus	1 nA	10 µs	5 mm	0°	20 µm	81
Abb.-parameter	CLARA	E-T	10 kV	Analysis	aus	1 nA	10 µs	12 mm	45°	20 µm	82
Abb.-parameter	CLARA	E-T	10 kV	Analysis	aus	1 nA	10 µs	12 mm	45° FSS	20 µm	83
Abb.-parameter	CLARA	E-T	10 kV	Analysis	aus	1 nA	10 µs	12 mm	0°	20 µm	84
Detektoren	CLARA	E-T	10 kV	Analysis	aus	1 nA	3,2 µs	10 mm	0°	100 µm	85
Detektoren	CLARA	BSE	10 kV	Analysis	aus	1 nA	3,2 µs	10 mm	0°	100 µm	86
Detektoren	CLARA	4Q-BSE Compo	10 kV	Analysis	aus	1 nA	3,2 µs	10 mm	0°	100 µm	87
Detektoren	CLARA	4Q-BSE Topo	10 kV	Analysis	aus	1 nA	3,2 µs	10 mm	0°	100 µm	88
Detektoren	CLARA	In-Lens-Axial	10 kV	Analysis	aus	1 nA	3,2 µs	10 mm	0°	100 µm	89
Detektoren	CLARA	In-Lens-MD	10 kV	Analysis	aus	1 nA	3,2 µs	10 mm	0°	100 µm	90
Abbildungsmodi	CLARA	E-T	10 kV	Analysis	aus	1 nA	10 µs	9 mm	0°	1 mm	91
Abbildungsmodi	CLARA	E-T	10 kV	Analysis	aus	1 nA	3,2 µs	5 mm	0°	20 µm	92
Abbildungsmodi	CLARA	E-T	10 kV	Analysis	aus	1 nA	1 µs	9 mm	0°	10 µm	93
Abbildungsmodi	CLARA	E-T	10 kV	Widefield	aus	1 nA	10 µs	5 mm	0°	8,3 mm	94
Abbildungsmodi	CLARA	E-T	10 kV	Widefield	aus	1 nA	10 µs	9 mm	0°	1 mm	95
Abbildungsmodi	CLARA	E-T	10 kV	Widefield	aus	1 nA	10 µs	9 mm	0°	250 µm	96
Abbildungsmodi	CLARA	E-T	10 kV	Overview	aus	1 nA	10 µs	9 mm	0°	1 mm	97
Abbildungsmodi	CLARA	E-T	10 kV	Depth	heller Strahl	1 nA	10 µs	9 mm	0°	500 µm	98
Abbildungsmodi	CLARA	E-T	10 kV	Depth	heller Strahl	1 nA	10 µs	9 mm	0°	20 µm	99
Abbildungsmodi	CLARA	E-T	10 kV	Depth	heller Strahl	1 nA	10 µs	9 mm	0°	10 µm	100
Abbildungsmodi	CLARA	E-T	10 kV	UHR	heller Strahl	1 nA	10 µs	9 mm	0°	500 µm	101
Abbildungsmodi	CLARA	E-T	10 kV	UHR	heller Strahl	1 nA	10 µs	9 mm	0°	500 µm	102
Abbildungsmodi	CLARA	E-T	10 kV	UHR	heller Strahl	1 nA	10 µs	9 mm	0°	100 µm	103
Abbildungsmodi	CLARA	E-T	10 kV	UHR	heller Strahl	1 nA	3,2 µs	5 mm	0°	20 µm	104
Abbildungsmodi	CLARA	E-T	10 kV	UHR	heller Strahl	1 nA	1 µs	9 mm	0°	10 µm	105
Abbildungsmodi	CLARA	E-T	10 kV	UHR	axiale BSE	1 nA	10 µs	9 mm	0°	100 µm	106
Abbildungsmodi	CLARA	E-T	10 kV	UHR	axiale BSE	1 nA	3,2 µs	5 mm	0°	20 µm	107
Abbildungsmodi	CLARA	E-T	10 kV	UHR	universell	1 nA	10 µs	9 mm	0°	100 µm	108
Abbildungsmodi	CLARA	E-T	10 kV	UHR	universell	1 nA	3,2 µs	5 mm	0°	20 µm	109
Abbildungsmodi	CLARA	In-Lens-Axial	10 kV	UHR	heller Strahl	1 nA	10 µs	9 mm	0°	100 µm	110
Abbildungsmodi	CLARA	In-Lens-Axial	10 kV	UHR	axiale BSE	1 nA	10 µs	9 mm	0°	100 µm	111
Abbildungsmodi	CLARA	In-Lens-Axial	10 kV	UHR	universell	1 nA	10 µs	9 mm	0°	100 µm	112

Tabelle 4: Abbildungen Berliner Blau

Charakterisierung	REM	Detektor	Eng	Modus	Pot.-Modus	BC	Spd	WD	Kippung	Viewfield	Abb.
Abb.-parameter	CLARA	E-T	10 kV	Analysis	aus	300 pA	10 µs/px	10 mm	0°	20 µm	113
Abb.-parameter	CLARA	E-T	5 kV	Analysis	aus	300 pA	10 µs/px	10 mm	0°	20 µm	114
Abb.-parameter	CLARA	E-T	3 kV	Analysis	aus	300 pA	10 µs/px	10 mm	0°	20 µm	115
Abb.-parameter	CLARA	E-T	10 kV	Analysis	aus	500 pA	10 µs/px	10 mm	0°	20 µm	116
Abb.-parameter	CLARA	E-T	10 kV	Analysis	aus	100 pA	10 µs/px	10 mm	0°	20 µm	117
Abb.-parameter	CLARA	E-T	10 kV	Analysis	aus	300 pA	10 µs/px	15 mm	0°	20 µm	118
Abb.-parameter	CLARA	E-T	10 kV	Analysis	aus	300 pA	10 µs/px	5 mm	0°	20 µm	119
Abb.-parameter	CLARA	E-T	10 kV	Analysis	aus	300 pA	10 µs/px	10 mm	45°	20 µm	120
Abb.-parameter	CLARA	E-T	10 kV	Analysis	aus	300 pA	10 µs/px	10 mm	45° FSS	20 µm	121
Detektoren	CLARA	E-T	10 kV	Analysis	aus	300 pA	10 µs/px	10 mm	0°	100 µm	122
Detektoren	CLARA	BSE	10 kV	Analysis	aus	300 pA	10 µs/px	10 mm	0°	100 µm	123
Detektoren	CLARA	4Q-BSE Compo	10 kV	Analysis	aus	300 pA	10 µs/px	10 mm	0°	100 µm	124
Detektoren	CLARA	4Q-BSE Topo	10 kV	Analysis	aus	300 pA	10 µs/px	10 mm	0°	100 µm	125
Detektoren	CLARA	In-Lens-Axial	10 kV	Analysis	aus	300 pA	10 µs/px	10 mm	0°	100 µm	126
Detektoren	CLARA	In-Lens-MD	10 kV	Analysis	aus	300 pA	10 µs/px	10 mm	0°	100 µm	127
Abbildungsmodi	CLARA	E-T	10 kV	Analysis	aus	300 pA	10 µs/px	10 mm	0°	1 mm	128
Abbildungsmodi	CLARA	E-T	10 kV	Analysis	aus	300 pA	10 µs/px	10 mm	0°	20 µm	129
Abbildungsmodi	CLARA	E-T	10 kV	Analysis	aus	300 pA	10 µs/px	10 mm	0°	10 µm	130
Abbildungsmodi	CLARA	E-T	10 kV	Widefield	aus	300 pA	10 µs/px	10 mm	0°	8,3 mm	131
Abbildungsmodi	CLARA	E-T	10 kV	Widefield	aus	300 pA	10 µs/px	10 mm	0°	1 mm	132
Abbildungsmodi	CLARA	E-T	10 kV	Widefield	aus	300 pA	10 µs/px	10 mm	0°	250 µm	133
Abbildungsmodi	CLARA	E-T	10 kV	Overview	aus	300 pA	10 µs/px	10 mm	0°	1 mm	134
Abbildungsmodi	CLARA	E-T	10 kV	Depth	heller Strahl	300 pA	10 µs/px	10 mm	0°	20 µm	135
Abbildungsmodi	CLARA	E-T	10 kV	Depth	heller Strahl	300 pA	10 µs/px	10 mm	0°	10 µm	136
Abbildungsmodi	CLARA	E-T	10 kV	UHR	heller Strahl	300 pA	10 µs/px	10 mm	0°	100 µm	137
Abbildungsmodi	CLARA	E-T	10 kV	UHR	heller Strahl	300 pA	10 µs/px	10 mm	0°	20 µm	138
Abbildungsmodi	CLARA	E-T	10 kV	UHR	heller Strahl	300 pA	10 µs/px	10 mm	0°	10 µm	139
Abbildungsmodi	CLARA	E-T	10 kV	UHR	axial BSE	300 pA	10 µs/px	10 mm	0°	100 µm	140
Abbildungsmodi	CLARA	E-T	10 kV	UHR	axial BSE	300 pA	10 µs/px	10 mm	0°	20 µm	141
Abbildungsmodi	CLARA	E-T	10 kV	UHR	universell	300 pA	10 µs/px	10 mm	0°	100 µm	142
Abbildungsmodi	CLARA	E-T	10 kV	UHR	universell	300 pA	10 µs/px	10 mm	0°	20 µm	143
Abbildungsmodi	CLARA	In-Lens-Axial	10 kV	UHR	heller Strahl	300 pA	10 µs/px	10 mm	0°	100 µm	144
Abbildungsmodi	CLARA	In-Lens-Axial	10 kV	UHR	axial BSE	300 pA	10 µs/px	10 mm	0°	100 µm	145
Abbildungsmodi	CLARA	In-Lens-Axial	10 kV	UHR	universell	300 pA	10 µs/px	10 mm	0°	100 µm	146
Hochauflösung	CLARA	E-T	10 kV	Analysis	aus	300 pA	10 µs/px	10 mm	0°	2 µm	147
Hochauflösung	CLARA	E-T	10 kV	Analysis	aus	300 pA	10 µs/px	10 mm	0°	1 µm	148
Hochauflösung	CLARA	In-Lens-Axial	5 kV	UHR	heller Strahl	300 pA	10 µs/px	10 mm	0°	5 µm	149
Hochauflösung	CLARA	In-Lens-Axial	5 kV	UHR	heller Strahl	300 pA	10 µs/px	10 mm	0°	2 µm	150
Hochauflösung	CLARA	In-Lens-Axial	5 kV	UHR	heller Strahl	300 pA	10 µs/px	10 mm	0°	1 µm	151

Tabelle 5: Abbildungen Kohlenstoffträgerfilm auf TEM-Gitter

Probe	Detektor	Modus	Eng	BC	Spd	WD	Viewfield	Abb.
Hansen 2	STEM	Hellfeld	30 kV	1 nA	10 µs/px	5 mm	5 µm	152
Hansen 2	STEM	Dunkelfeld	30 kV	1 nA	10 µs/px	5 mm	5 µm	153
Hansen 2	STEM	Hochwinkeldunkelfeld	30 kV	1 nA	10 µs/px	5 mm	5 µm	154
Hansen 2	E-T	-	30 kV	1 nA	10 µs/px	5 mm	5 µm	155
Hansen 2	STEM	Hellfeld	30 kV	1 nA	10 µs/px	5 mm	20 µm	156
Hansen 2	STEM	Dunkelfeld	30 kV	1 nA	10 µs/px	5 mm	20 µm	157
Hansen 2	STEM	Hochwinkeldunkelfeld	30 kV	1 nA	10 µs/px	5 mm	20 µm	158
Hansen 2	E-T	-	30 kV	1 nA	10 µs/px	5 mm	20 µm	159
Fröschke 5	STEM	Hellfeld	30 kV	1 nA	10 µs/px	5 mm	5 µm	160
Fröschke 5	STEM	Dunkelfeld	30 kV	1 nA	10 µs/px	5 mm	5 µm	161
Fröschke 5	STEM	Hochwinkeldunkelfeld	30 kV	1 nA	10 µs/px	5 mm	5 µm	162
Fröschke 5	E-T	-	30 kV	1 nA	10 µs/px	5 mm	5 µm	163

Tabelle 6: Maschenweite bei verschiedenen Abbildungsmodi

Gitterabstand [µm]					Mittelwert [µm]	Mittelwert ges. [µm]	Abweichung
Referenz: „Analysis“-Modus mit 2,13 mm Sichtfeld							
x-Richtung	222,02	224,68	225,89	228,55	229,30	226,09	226,20
y-Richtung	225,40	226,65	225,90	227,66	225,95	226,31	
„Analysis“-Modus mit 900 µm Sichtfeld							
x-Richtung	227,28	227,94	226,44	226,56		227,06	227,04
y-Richtung	226,85	227,71	226,48	227,07		227,03	0,37 %
„Wide Field“-Modus mit 900 µm Sichtfeld							
x-Richtung	230,38	230,85	229,19	228,53		229,74	229,33
y-Richtung	228,98	230,06	227,77	228,89		228,93	1,38 %
„Overview“-Modus mit 900 µm Sichtfeld							
x-Richtung	227,34	227,71	228,02	226,80		227,47	227,86
y-Richtung	228,59	228,99	226,44	228,98		228,25	0,73 %
„Depth“-Modus mit 900 µm Sichtfeld							
x-Richtung	228,17	229,85	227,67	227,96		228,41	228,40
y-Richtung	228,43	229,11	227,80	228,23		228,39	0,97 %
„UH-Resolution“-Modus mit 900 µm Sichtfeld							
x-Richtung	228,19	229,55	227,81	227,99		228,39	228,47
y-Richtung	228,60	228,95	228,01	228,65		228,55	1,00 %

Tabelle 7: Vergleich REM CLARA und REM GAIA

	CLARA			GAIA	
Arbeitsabstand WD	5 mm			5 mm	
Scangeschwindigkeit Spd	10 μ s			10 μ s	
Beschleunigungsspannung Eng	15 kV		10 kV	15 kV	
Strahlstrom BC	2,65 nA		500 pA	2,65 nA	
Detektor	E-T	In-Lens-Axial	In-Lens-Axial	E-T	In-Lens-Axial
Sichtfeld	1,19 μ m	0,237 μ m	0,237 μ m	1,19 μ m	0,237 μ m
Vergößerung	234.622x	1.178.049x	1.178.059x	200.000x	1.000.000x
Sondendurchmesser	10,7 nm	4,3 nm	2,8 nm	8,2 nm	2,1 nm

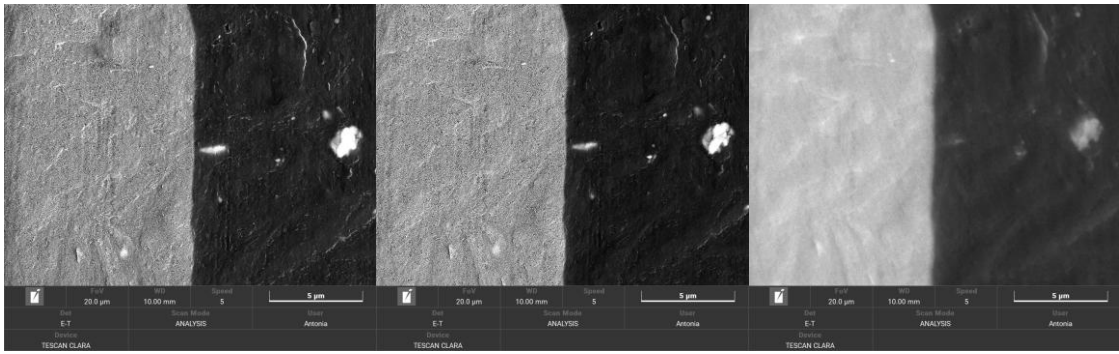


Abbildung 15, 17 und 16: 15 kV, 10 kV und 5 kV Beschleunigungsspannung;
Hochauflösetestobjekt

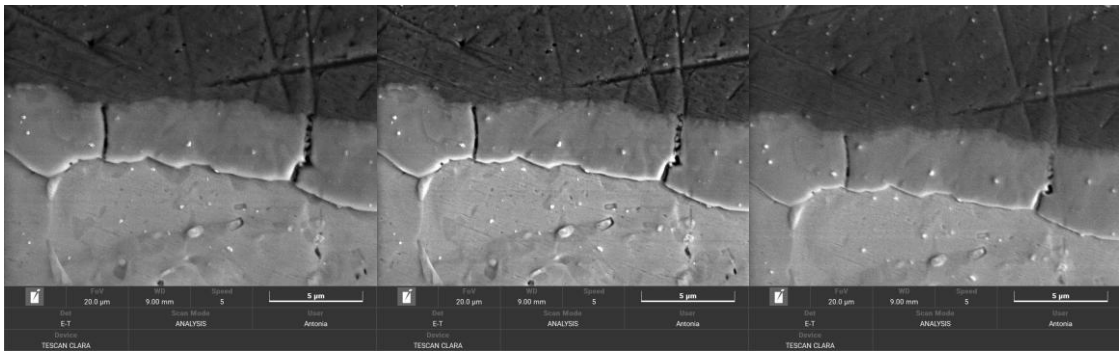


Abbildung 75, 76 und 77: 15 kV, 10 kV und 6 kV Beschleunigungsspannung;
eingebetteter Chip

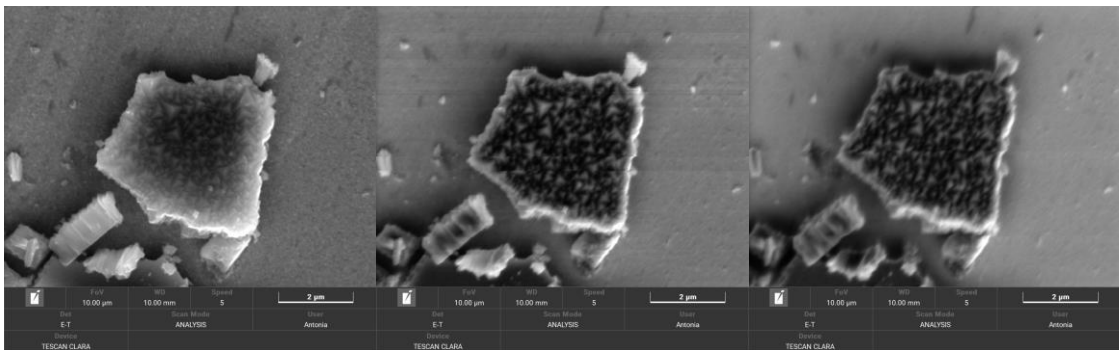


Abbildung 113, 114 und 115: 10 kV, 5 kV und 3 kV Beschleunigungsspannung;
Berliner Blau

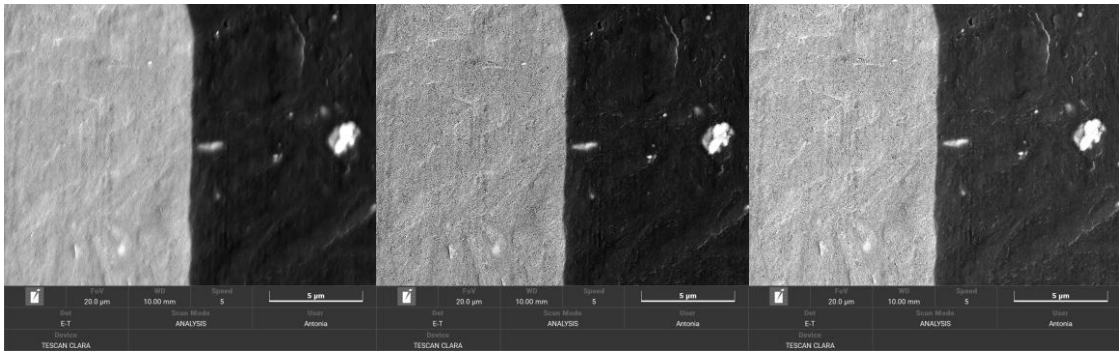


Abbildung 18, 17 und 19: 3 nA, 1 nA und 300 pA Strahlstrom;
Hochauflösetestobjekt

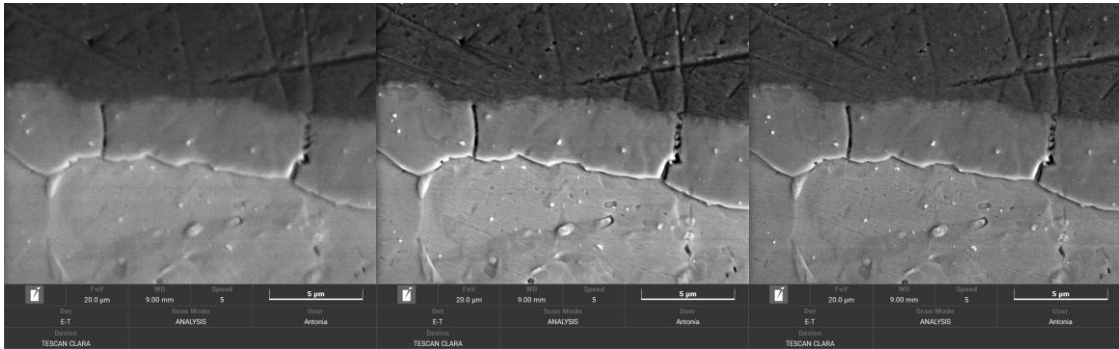


Abbildung 78, 76 und 79: 3 nA, 1 nA und 300 pA Strahlstrom;
eingebetteter Chip

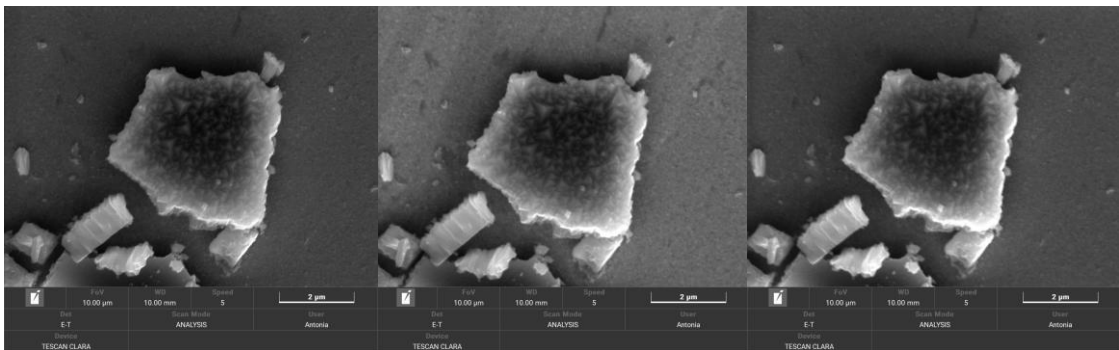


Abbildung 116, 113 und 117: 500 pA, 300 pA und 100 pA Strahlstrom;
Berliner Blau

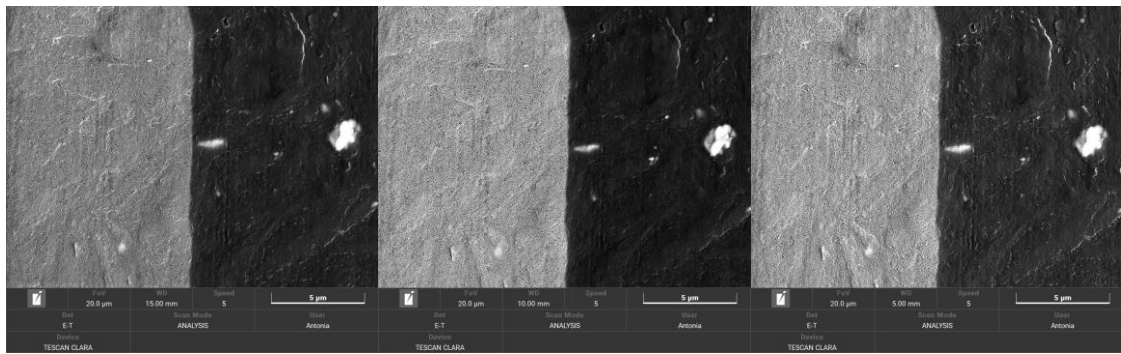


Abbildung 20, 17 und 21: 15 mm, 10 mm und 5 mm Arbeitsabstand;
Hochauflösetestobjekt

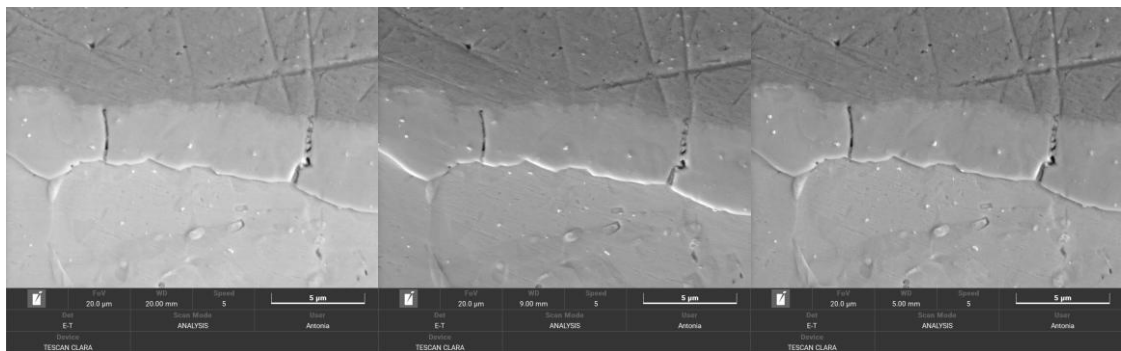


Abbildung 80, 76 und 81: 20 mm, 9 mm und 5 mm Arbeitsabstand;
eingebetteter Chip

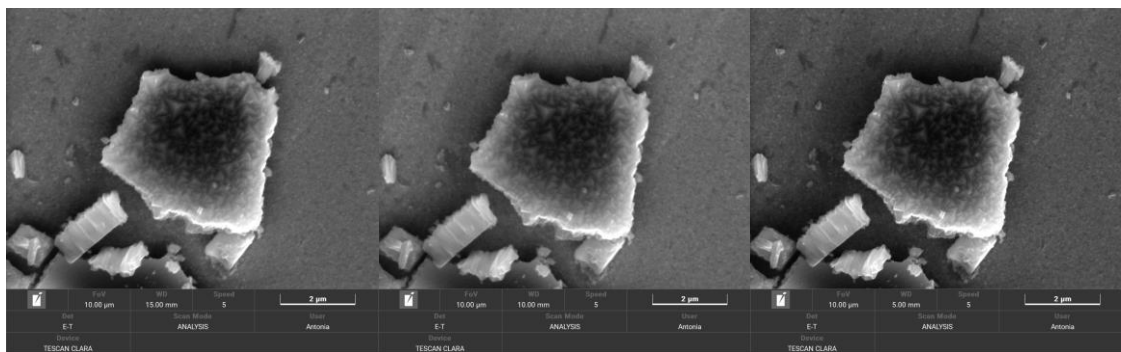


Abbildung 118, 113 und 119: 15 mm, 10 mm und 5 mm Arbeitsabstand;
Berliner Blau

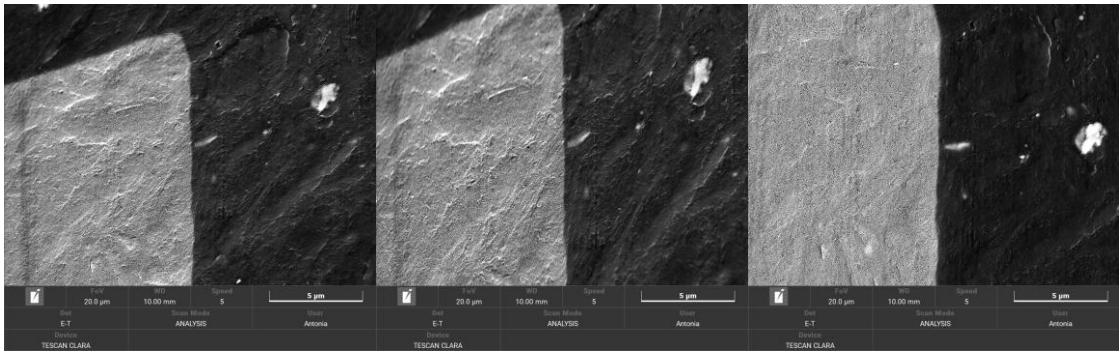


Abbildung 22, 23 und 17: 45°, 45° FSS und 0° Probenkippwinkel;
Hochauflösetestobjekt

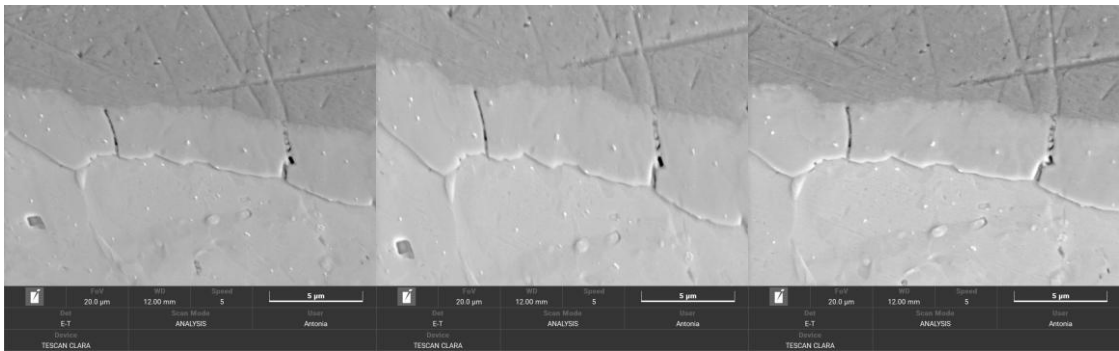


Abbildung 82, 83 und 84: 45°, 45° FSS und 0° Probenkippwinkel;
eingebetteter Chip

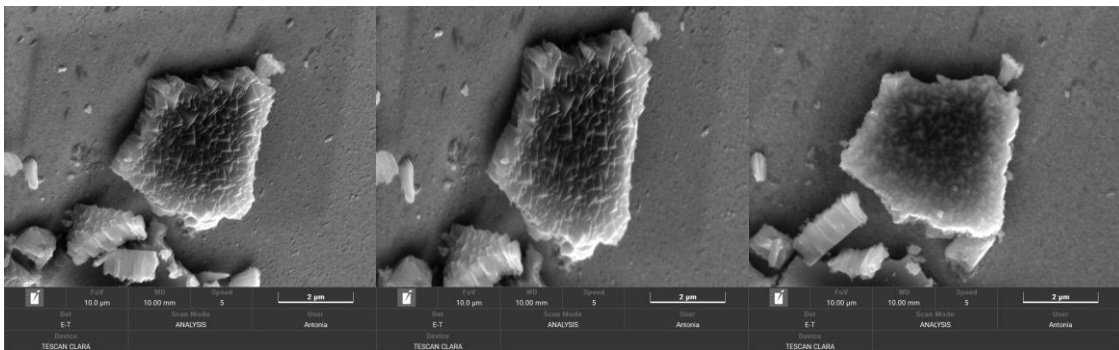


Abbildung 120, 121 und 113: 45°, 45° FSS und 0° Probenkippwinkel;
Berliner Blau

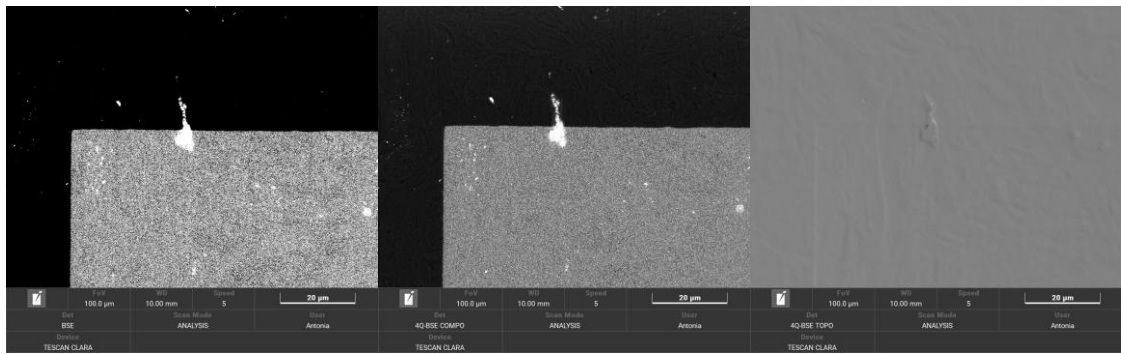


Abbildung 26, 28 und 30: BSE-Detektor, 4-Q-BSE-Detektor Compo und 4-Q-BSE-Detektor Topo; 100 µm Sichtfeld; Hochauflösetestobjekt

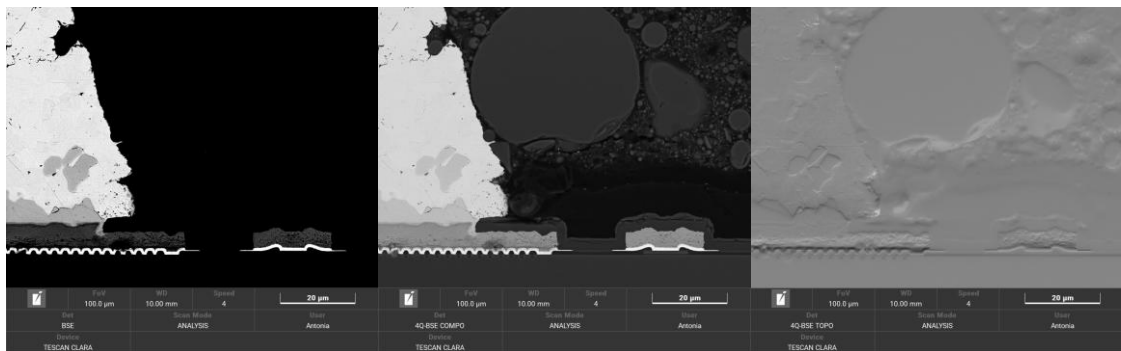


Abbildung 86, 87 und 88: BSE-Detektor, 4-Q-BSE-Detektor Compo und 4-Q-BSE-Detektor Topo; 100 µm Sichtfeld; eingebetteter Chip

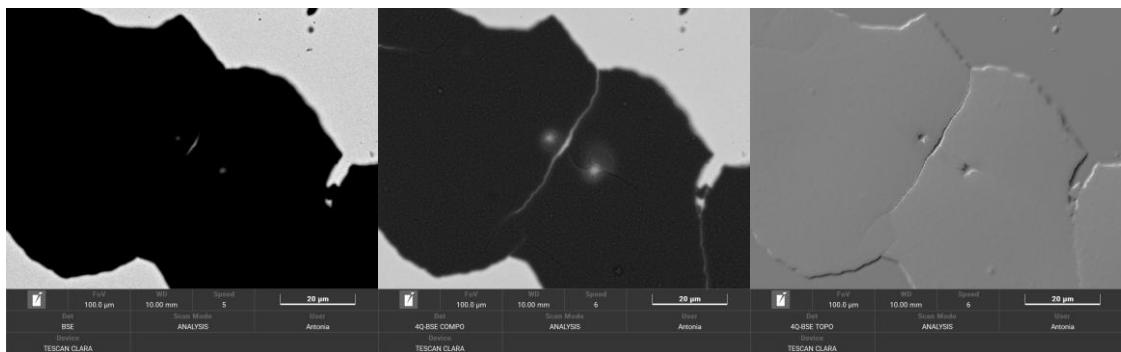


Abbildung 123, 124 und 125: BSE-Detektor, 4-Q-BSE-Detektor Compo und 4-Q-BSE-Detektor Topo; 100 µm Sichtfeld; Berliner Blau

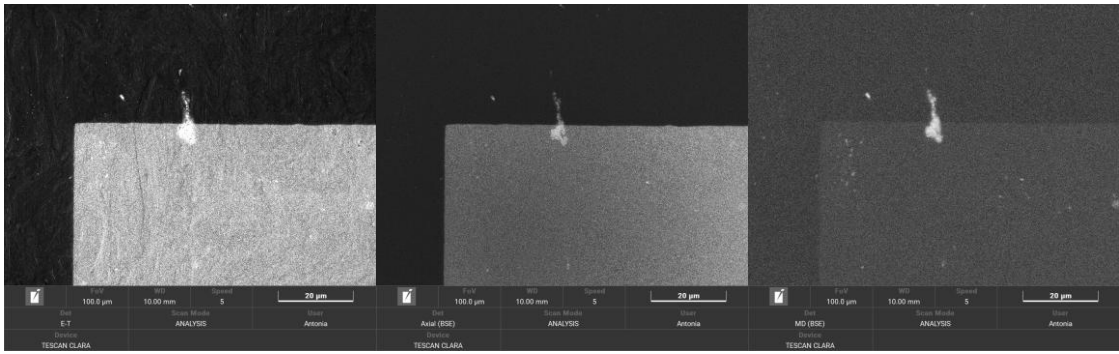


Abbildung 24, 32 und 34: E-T-, Axial- und Multi-Detektor; 100 µm Sichtfeld; Hochauflösetestobjekt

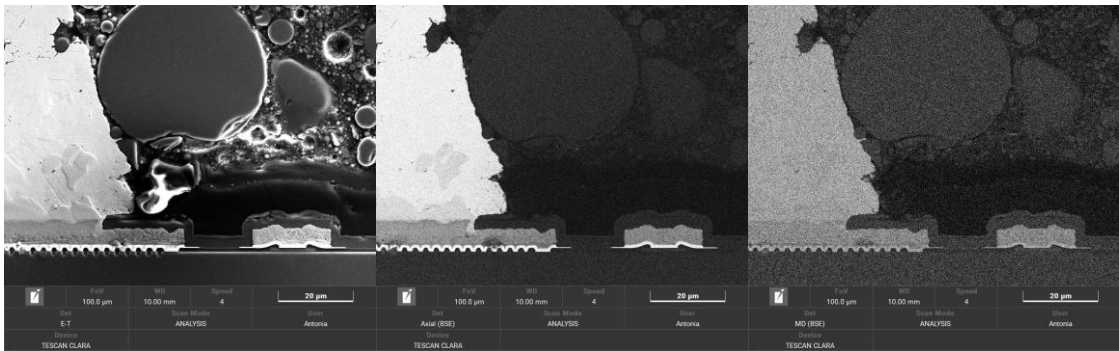


Abbildung 85, 89 und 90: E-T-, Axial- und Multi-Detektor; 100 µm Sichtfeld; eingebetteter Chip

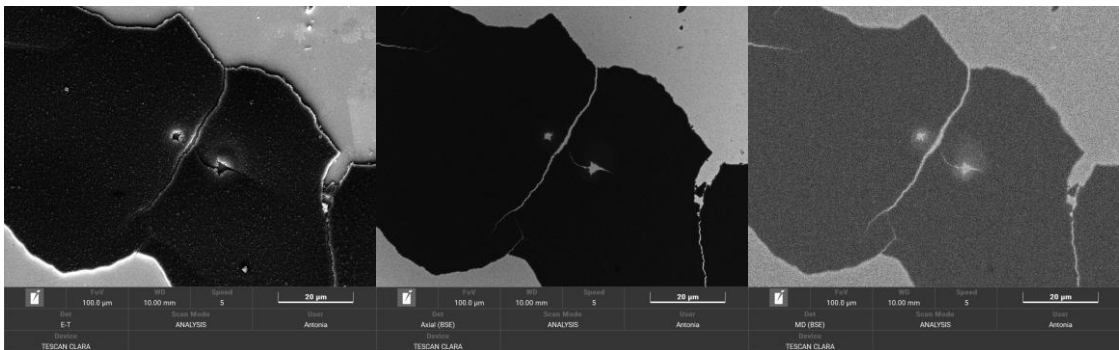


Abbildung 122, 126 und 127: E-T-, Axial- und Multi-Detektor; 100 µm Sichtfeld; Berliner Blau

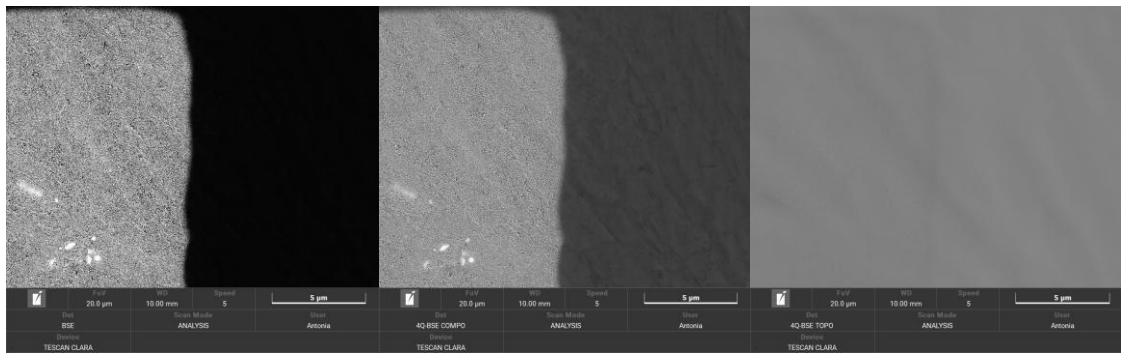


Abbildung 27, 29 und 31: BSE-Detektor, 4-Q-BSE-Detektor Compo und 4-Q-BSE-Detektor Topo; 20 µm Sichtfeld; Hochauflösetestobjekt

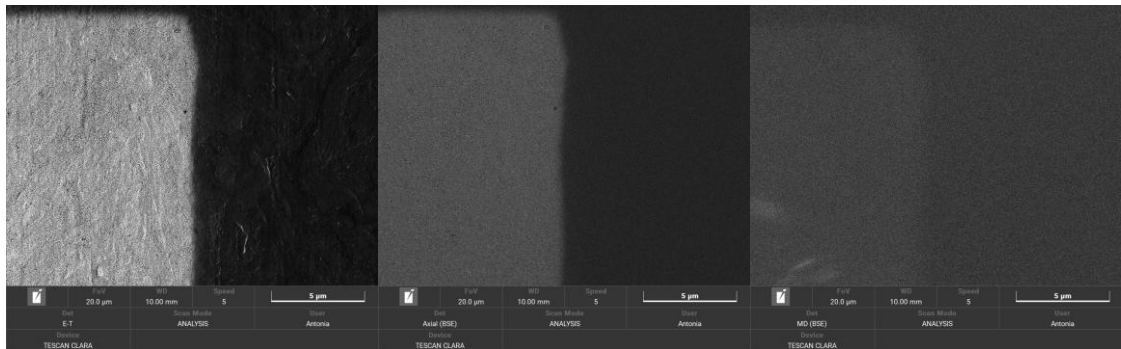


Abbildung 25, 33 und 35: E-T-, Axial- und Multi-Detektor; 20 µm Sichtfeld; Hochauflösetestobjekt

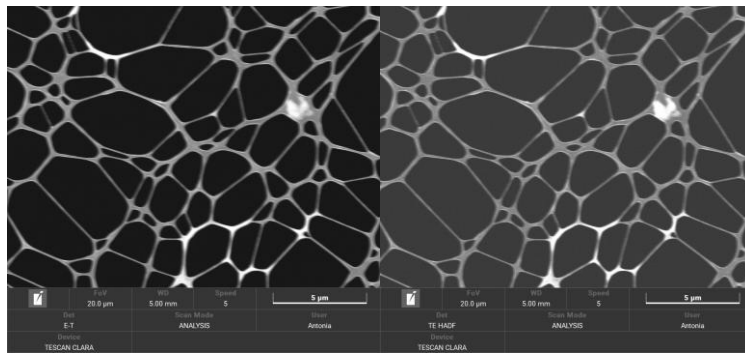


Abbildung 159 und 158: E-T-Detektor und Hochwinkeldunkelfeld mit STEM-Detektor; 20 µm Sichtfeld; Trägerfilm auf TEM-Gitter

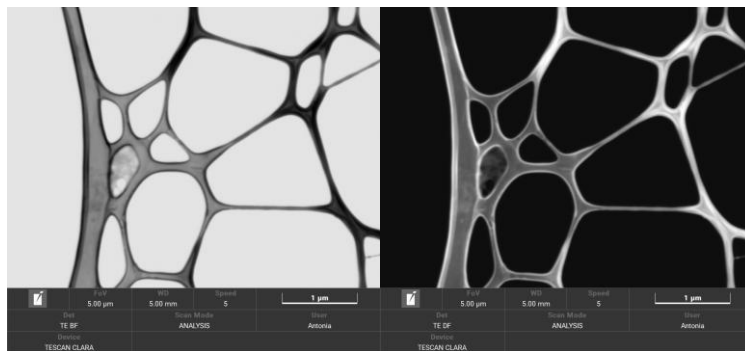


Abbildung 160 und 161: Hellfeld und Dunkelfeld mit STEM-Detektor; 5 µm Sichtfeld; Trägerfilm auf TEM-Gitter

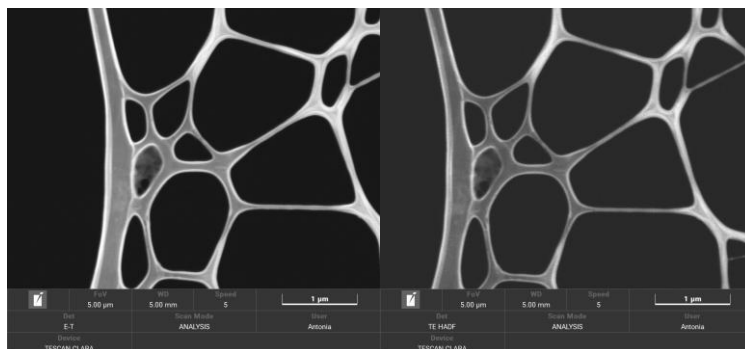


Abbildung 163 und 162: E-T-Detektor und Hochwinkeldunkelfeld mit STEM-Detektor; 5 µm Sichtfeld; Trägerfilm auf TEM-Gitter

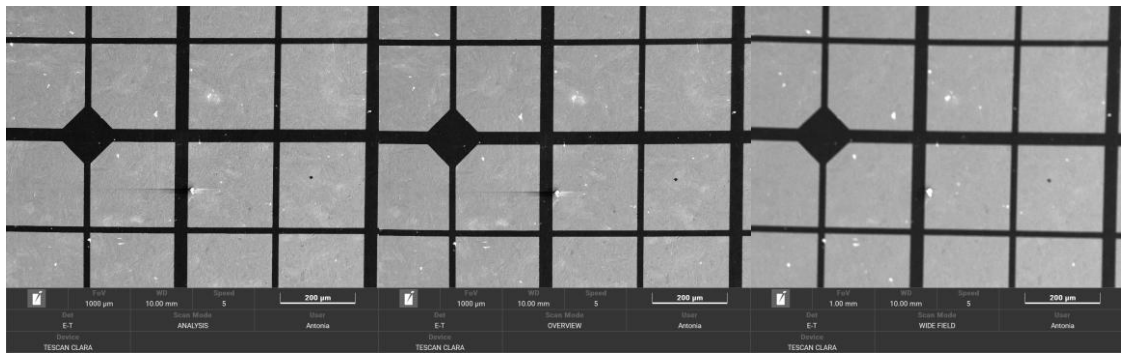


Abbildung 36, 42 und 40: „Analysis“-, „Overview“- und „Wide Field“-
Abbildungsmodus; 1 mm Sichtfeld; Hochauflösungstestobjekt

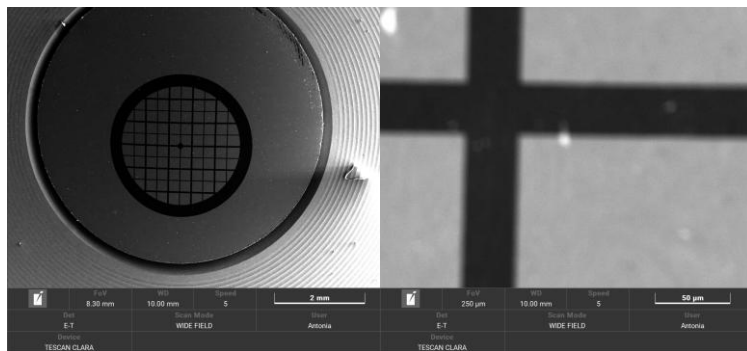


Abbildung 39 und 41: 8,3 mm und 250 µm Sichtfeld; „Wide Field“-
Abbildungsmodus; Hochauflösungstestobjekt

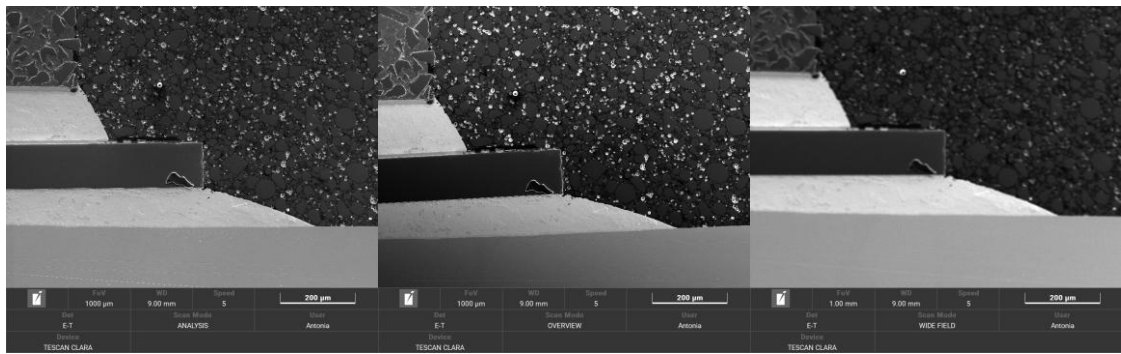


Abbildung 91, 97 und 95: „Analysis“-, „Overview“- und „Wide Field“-Abbildungsmodus; 1 mm Sichtfeld; eingebetteter Chip

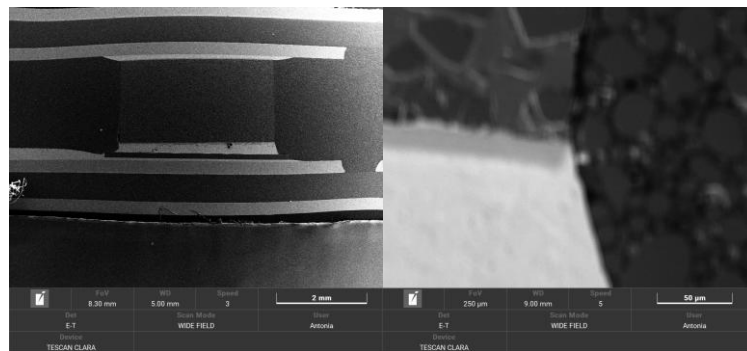


Abbildung 94 und 96: 8,3 mm und 250 µm Sichtfeld; „Wide Field“-Abbildungsmodus; eingebetteter Chip

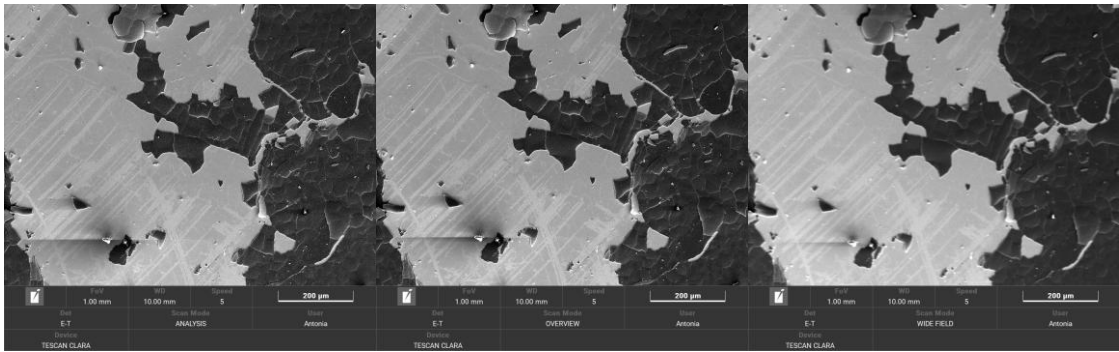


Abbildung 128, 134 und 132: „Analysis“-, „Overview“-
und „Wide Field“-Abbildungsmodus; 1 mm Sichtfeld; Berliner Blau

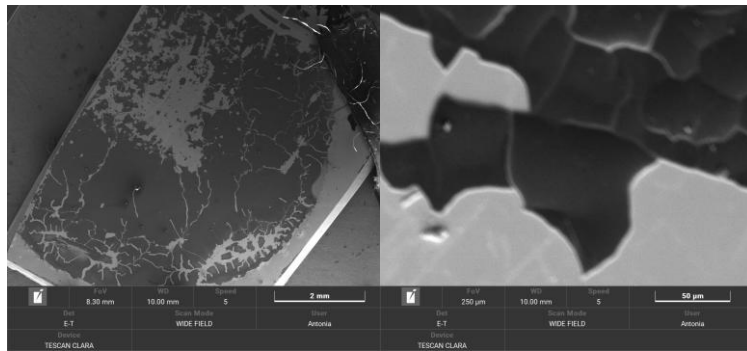


Abbildung 131 und 133: 8,3 mm und 250 µm Sichtfeld;
„Wide Field“-Abbildungsmodus; Berliner Blau

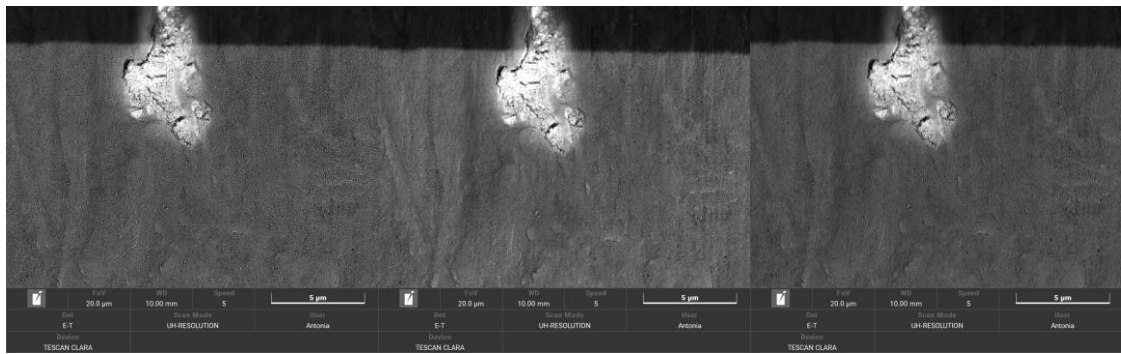


Abbildung 46, 49 und 51: „UHR“-Abbildungsmodus mit Potenzialmodus heller Strahl, axiale BSE und universell; 20 µm Sichtfeld; Hochauflösetestobjekt

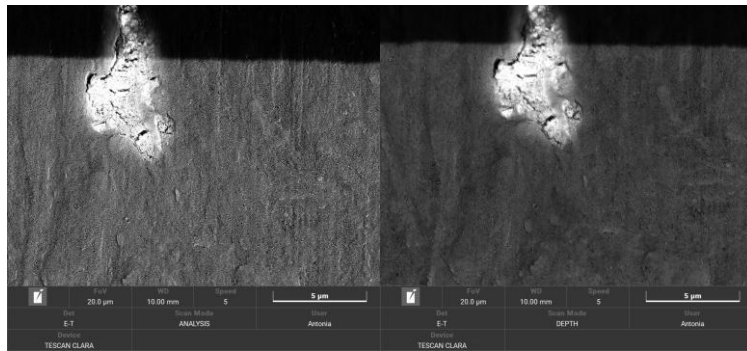


Abbildung 37 und 43: „Analysis“- und „Depth“- Abbildungsmodus; 20 µm Sichtfeld; Hochauflösetestobjekt

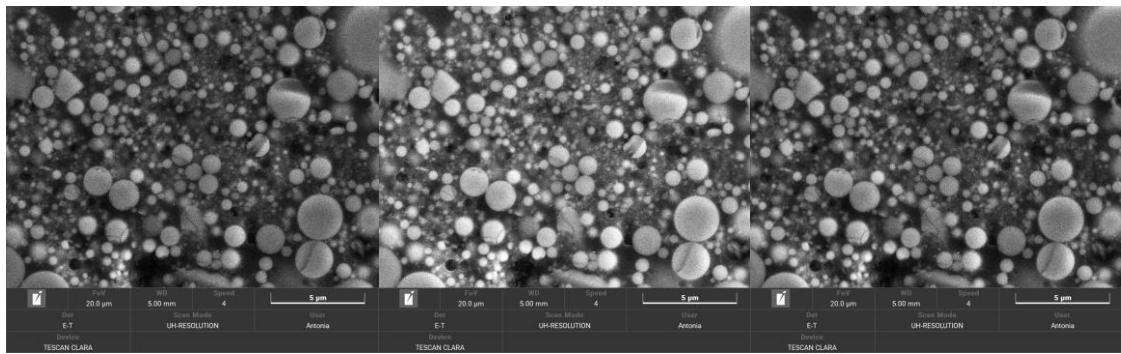


Abbildung 104, 107 und 109: „UHR“-Abbildungsmodus mit Potenzialmodus heller Strahl, axiale BSE und universell; 20 µm Sichtfeld; eingebetteter Chip

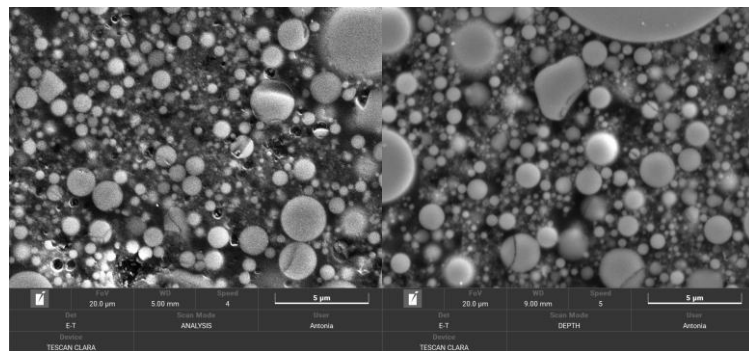


Abbildung 92 und 99: „Analysis“- und „Depth“- Abbildungsmodus; 20 µm Sichtfeld; eingebetteter Chip

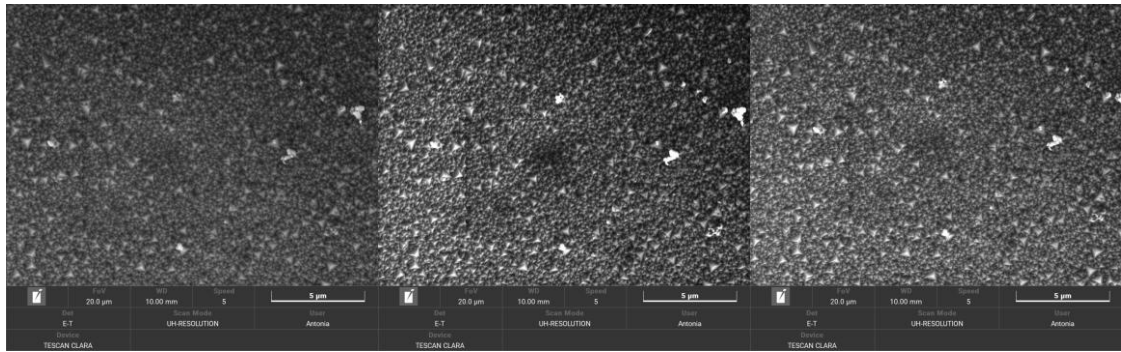


Abbildung 138, 141 und 143: „UHR“-Abbildungsmodus mit Potenzialmodus heller Strahl, axiale BSE und universell; 20 µm Sichtfeld; Berliner Blau

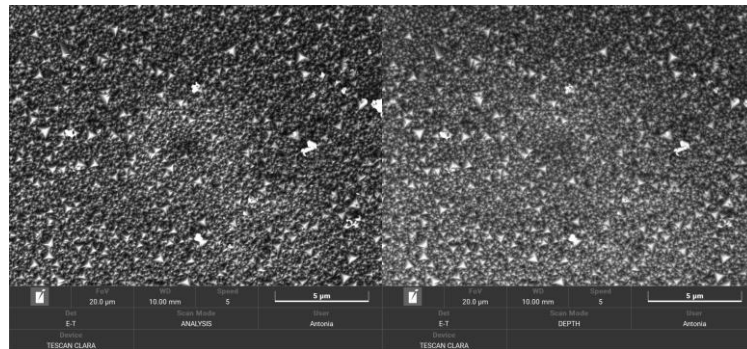


Abbildung 129 und 135: „Analysis“- und „Depth“- Abbildungsmodus; 20 µm Sichtfeld; Berliner Blau

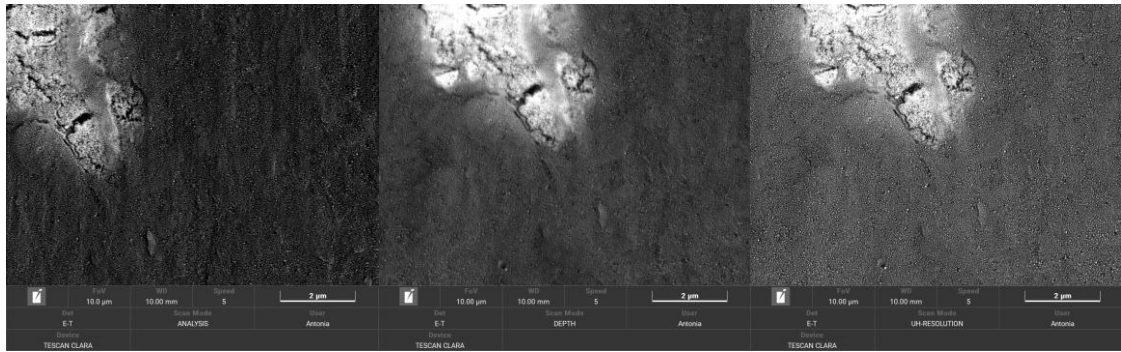


Abbildung 38, 44 und 47: „Analysis“- , „Depth“- und „UHR“- heller Strahl
Abbildungsmodus; 10 µm Sichtfeld; Hochauflösetestobjekt

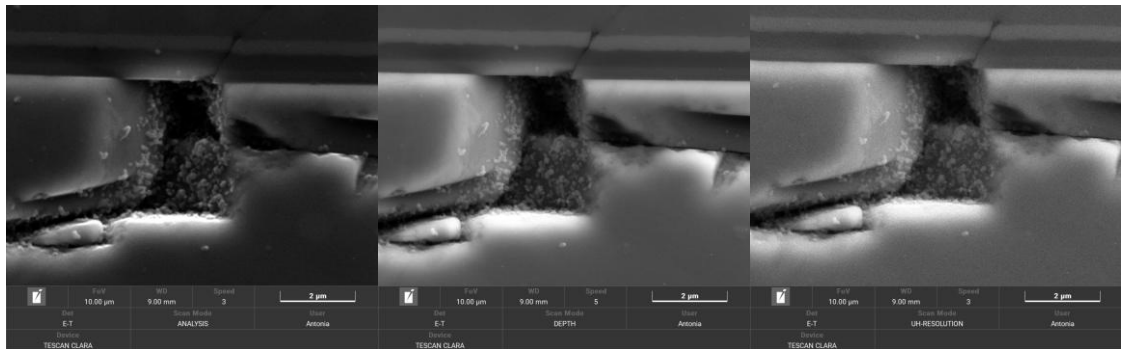


Abbildung 93, 100 und 105: „Analysis“- , „Depth“- und „UHR“- heller Strahl
Abbildungsmodus; 10 µm Sichtfeld; eingebetteter Chip

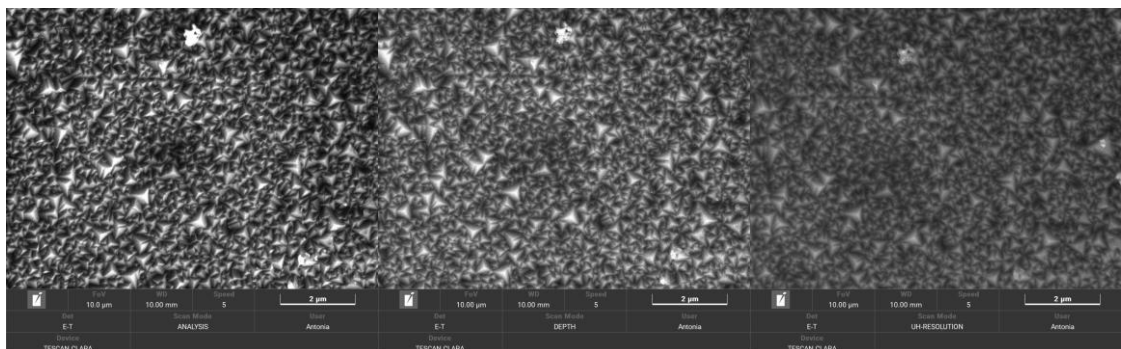


Abbildung 130, 136 und 139: „Analysis“- , „Depth“- und „UHR“- heller Strahl
Abbildungsmodus; 10 µm Sichtfeld; Berliner Blau

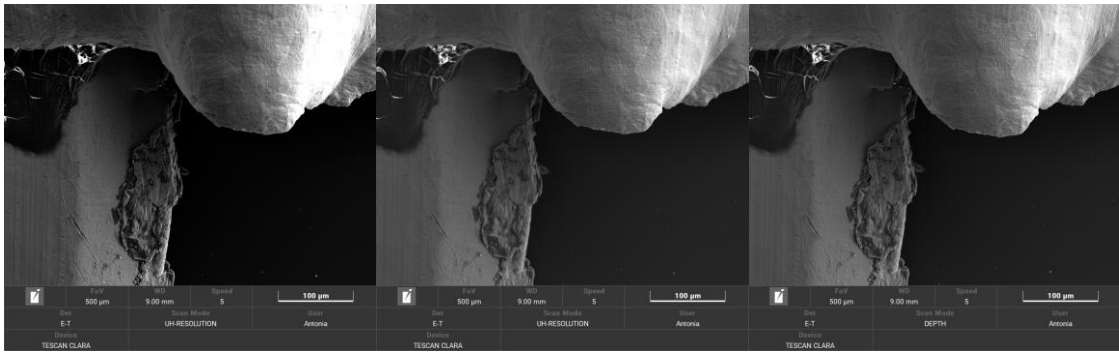


Abbildung 102, 101 und 98: „UHR“- und „Depth“-Abbildungsmodus; 500 µm Sichtfeld; eingebetteter Chip

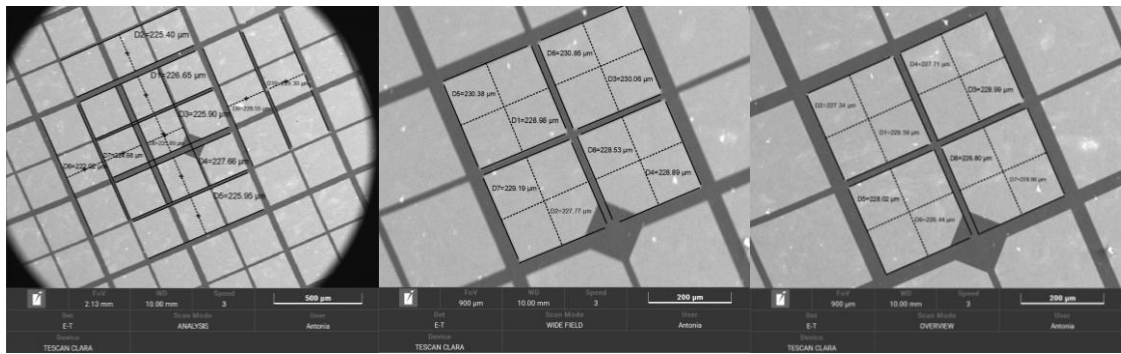


Abbildung 55, 57 und 58: „Analysis“- , „Wide Field“- und „Overview“-
Abbildungsmodus; Hochauflösetestobjekt

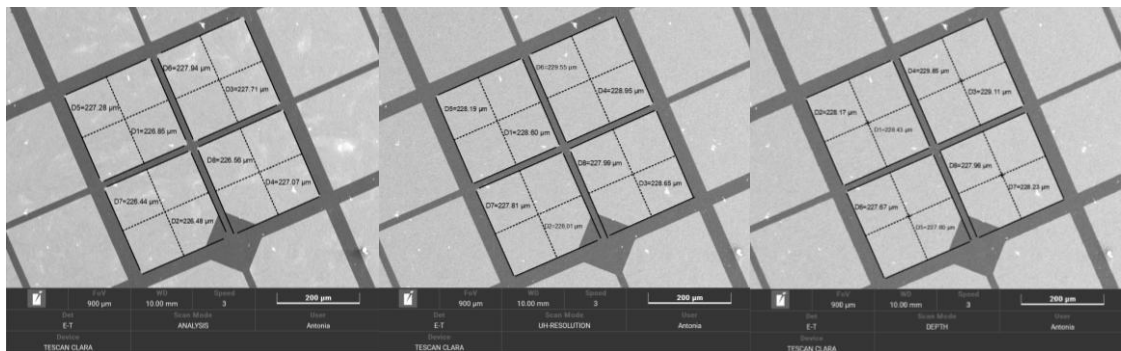


Abbildung 56, 60 und 59: „Analysis“- , „UHR“- und „Depth“-
Abbildungsmodus; Hochauflösetestobjekt

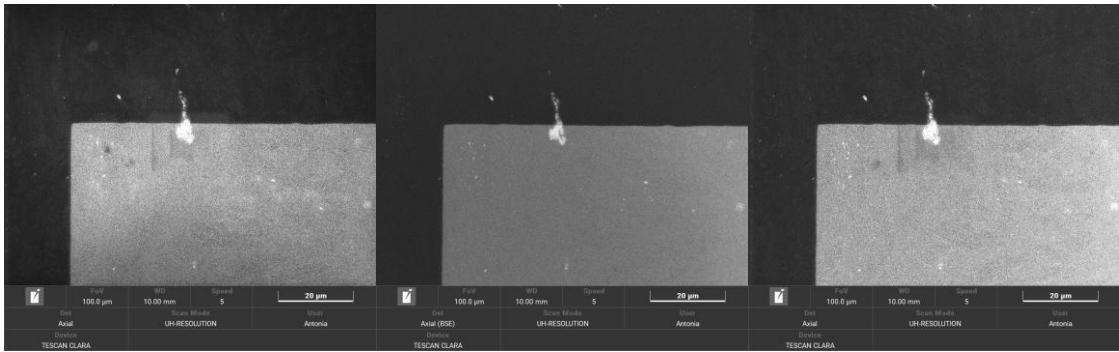


Abbildung 45, 48 und 50: „UHR“-Abbildungsmodus mit Potenzialmodus heller Strahl, axiale BSE und universell; ET-Detektor; 100 µm Sichtfeld; Hochauflösetestobjekt

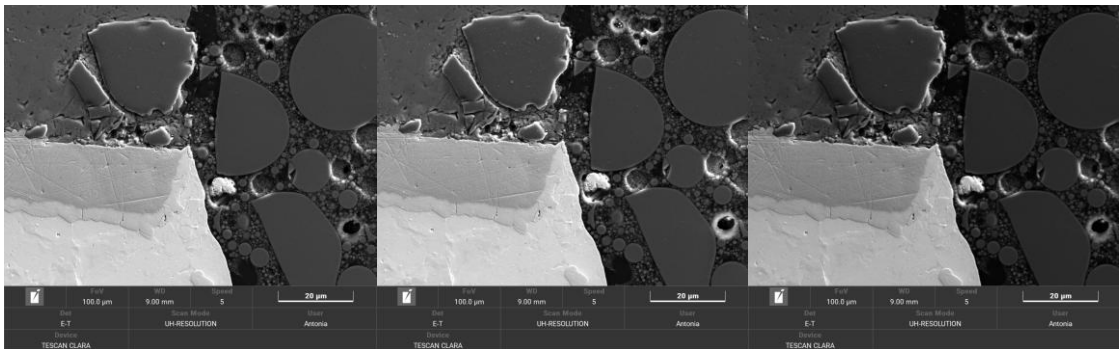


Abbildung 103, 106 und 108: „UHR“-Abbildungsmodus mit Potenzialmodus heller Strahl, axiale BSE und universell; ET-Detektor; 100 µm Sichtfeld; eingebetteter Chip

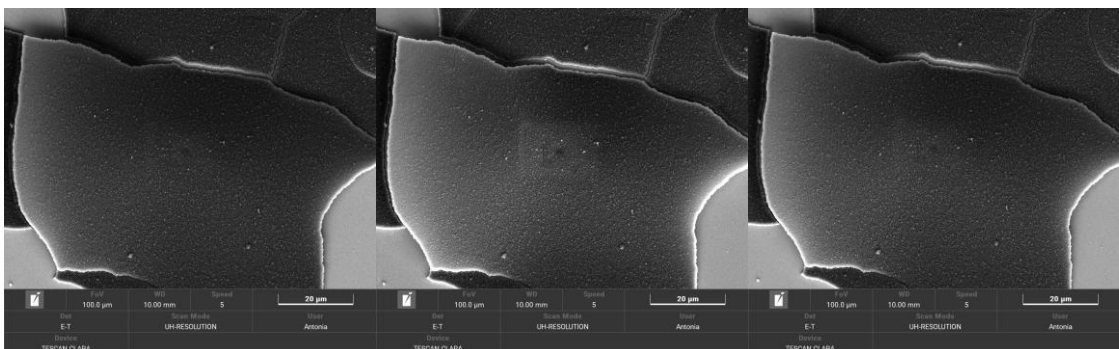


Abbildung 137, 140 und 142: „UHR“-Abbildungsmodus mit Potenzialmodus heller Strahl, axiale BSE und universell; ET-Detektor; 100 µm Sichtfeld; Berliner Blau

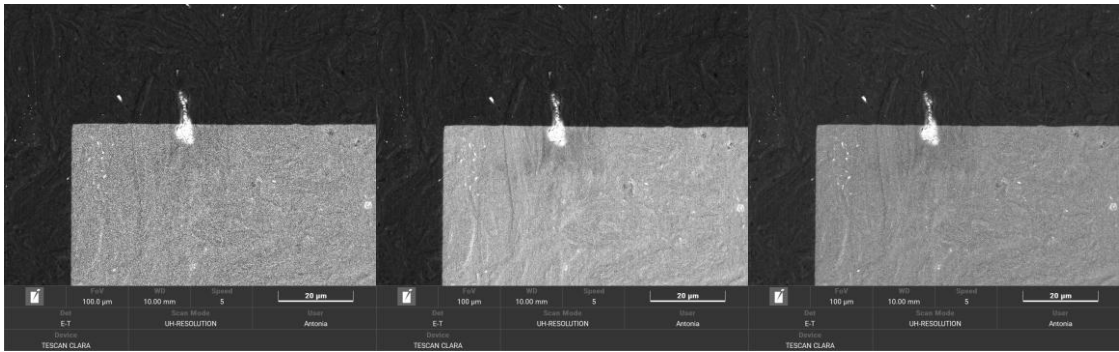


Abbildung 52, 53 und 54: „UHR“-Abbildungsmodus mit Potenzialmodus heller Strahl, axiale BSE und universell mit Axial-Detektor; 100 µm Sichtfeld; Hochauflösetestobjekt

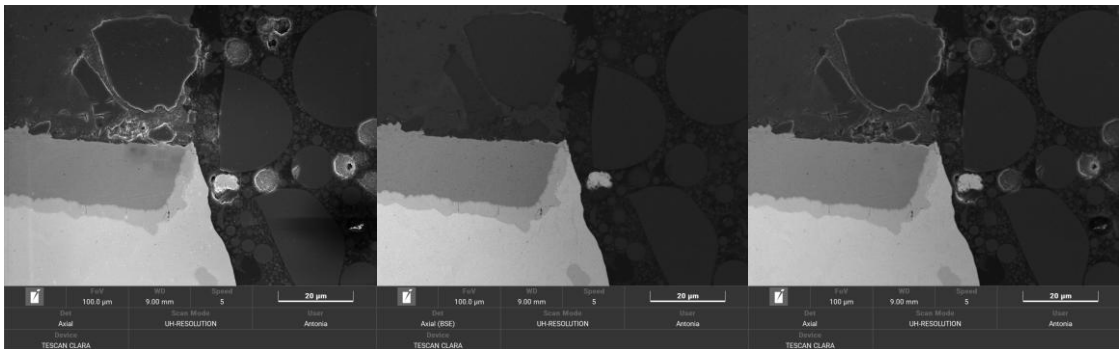


Abbildung 110, 111 und 112: „UHR“-Abbildungsmodus mit Potenzialmodus heller Strahl, axiale BSE und universell mit Axial-Detektor; 100 µm Sichtfeld; eingebetteter Chip

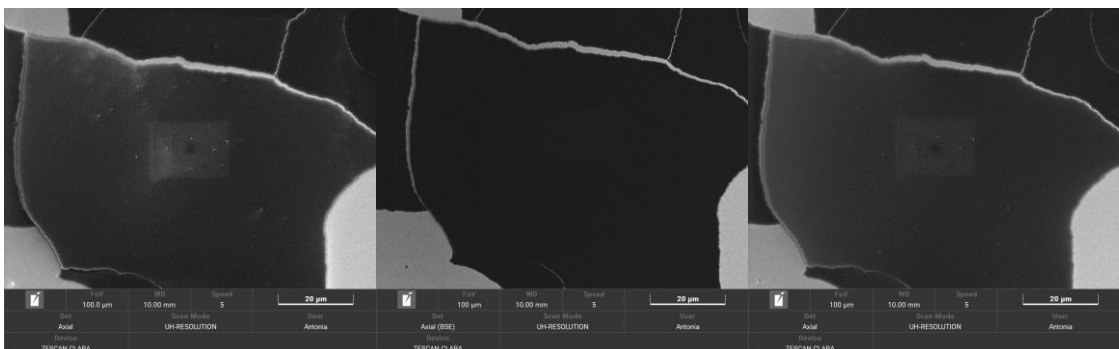


Abbildung 144, 145 und 146: „UHR“-Abbildungsmodus mit Potenzialmodus heller Strahl, axiale BSE und universell mit Axial-Detektor; 100 µm Sichtfeld; Berliner Blau

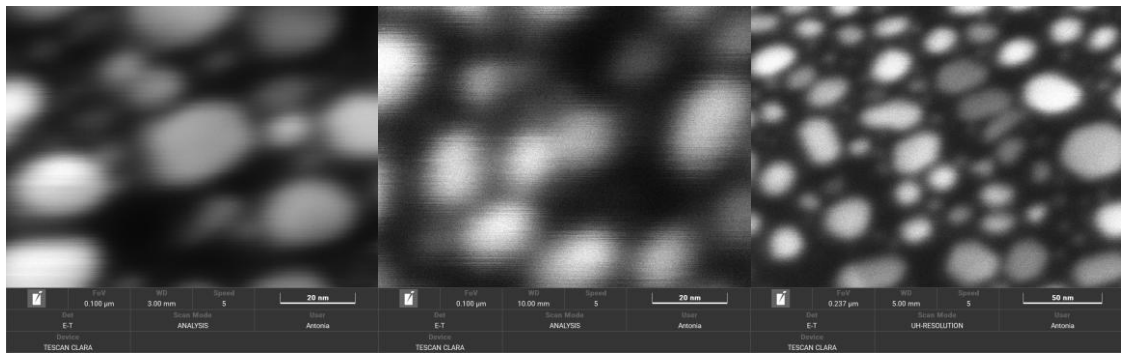


Abbildung 65, 66 und 64: Hochoauflösung mit E-T-Detektor; 0,1 µm Sichtfeld mit 3 mm Arbeitsabstand, 0,1 µm Sichtfeld mit 10 mm Arbeitsabstand, 0,237 µm Sichtfeld mit 5 mm Arbeitsabstand; Hochoauflösungstestobjekt

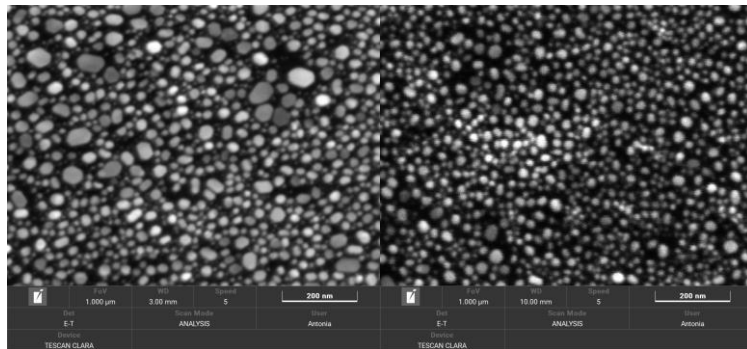


Abbildung 63 und 62: Hochoauflösung mit E-T-Detektor; 1 µm Sichtfeld mit 3 mm Arbeitsabstand und 1 µm Sichtfeld mit 10 mm Arbeitsabstand; Hochoauflösungstestobjekt

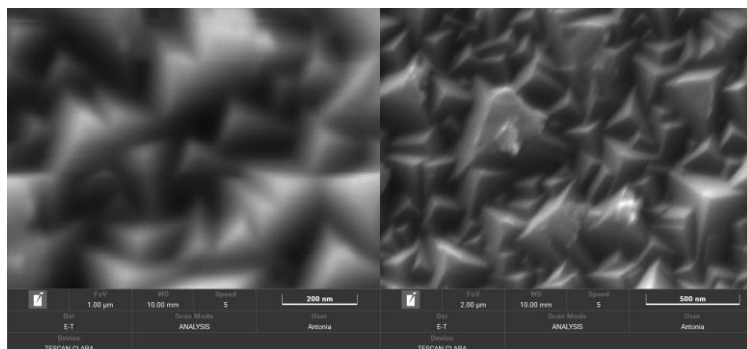


Abbildung 148 und 149: Hochoauflösung mit E-T-Detektor; 1 µm und 2 µm Sichtfeld mit 10 mm Arbeitsabstand; Berliner Blau

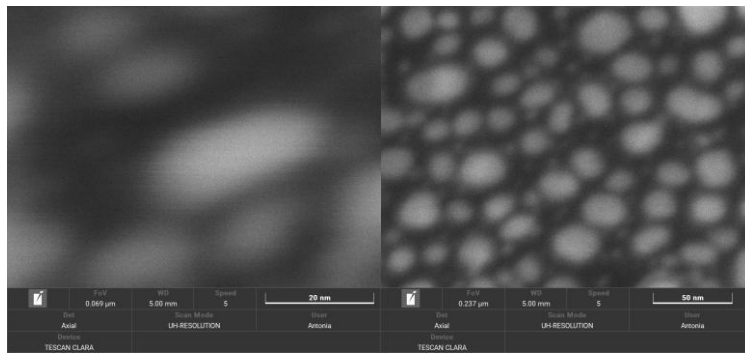


Abbildung 70 und 69: Hocharauflösung mit In-Lens-Axial-Detektor; 0,069 μm Sichtfeld und 0,237 μm Sichtfeld mit 5 mm Arbeitsabstand; Hocharauflösungstestobjekt

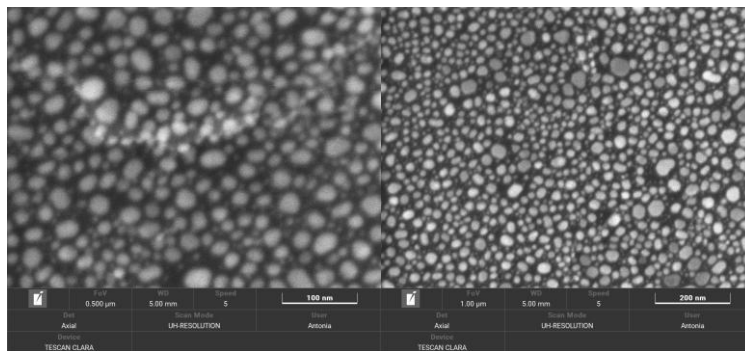


Abbildung 68 und 67: Hocharauflösung mit In-Lens-Axial-Detektor; 0,5 μm Sichtfeld und 1 μm Sichtfeld mit 5 μm Arbeitsabstand; Hocharauflösungstestobjekt

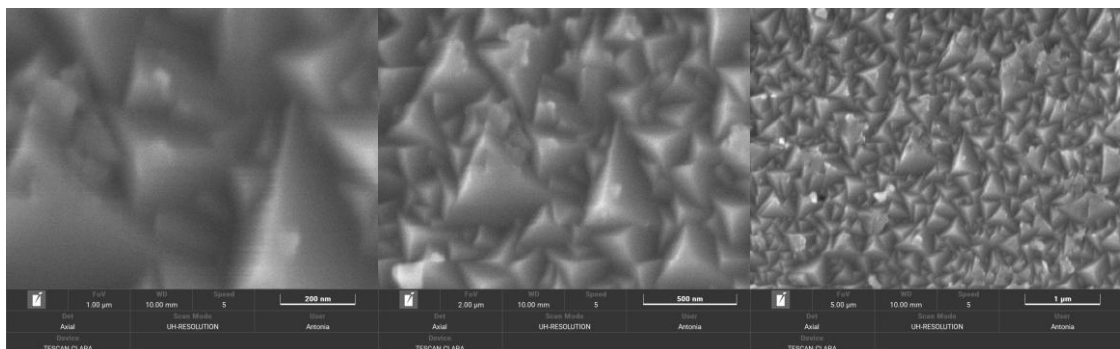


Abbildung 151, 150 und 149: Hocharauflösung mit In-Lens-Axial-Detektor; 1 μm , 2 μm und 5 μm Sichtfeld mit 10 mm Arbeitsabstand; Berliner Blau

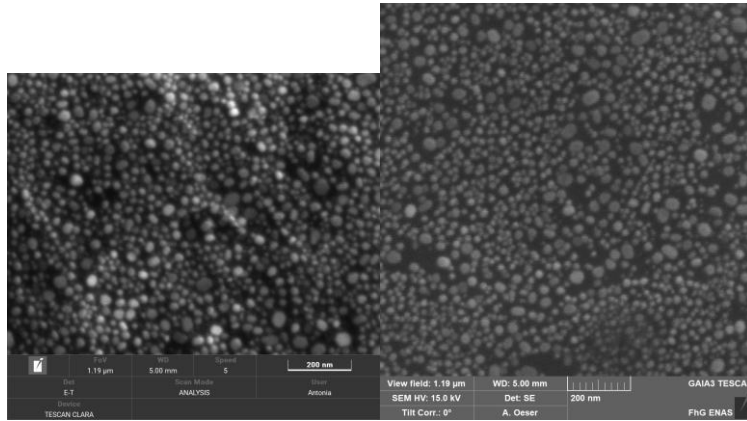


Abbildung 61 und 64: Hochoauflösung; E-T-Detektor; CLARA und GAIA; 100 µm Sichtfeld; Hochouflösungstestobjekt

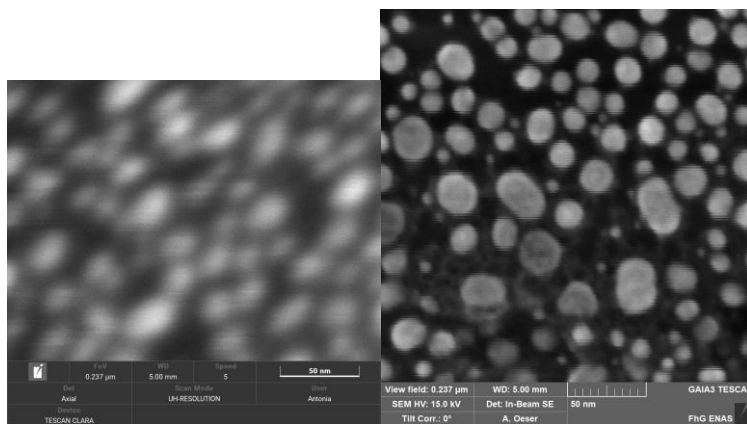


Abbildung 73 und 72: Hochoauflösung; In-Lens-Axial-Detektor; CLARA und GAIA; 0,237 µm Sichtfeld; Hochouflösungstestobjekt

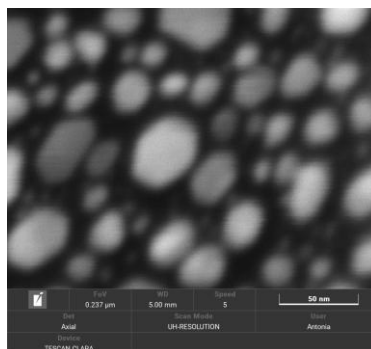
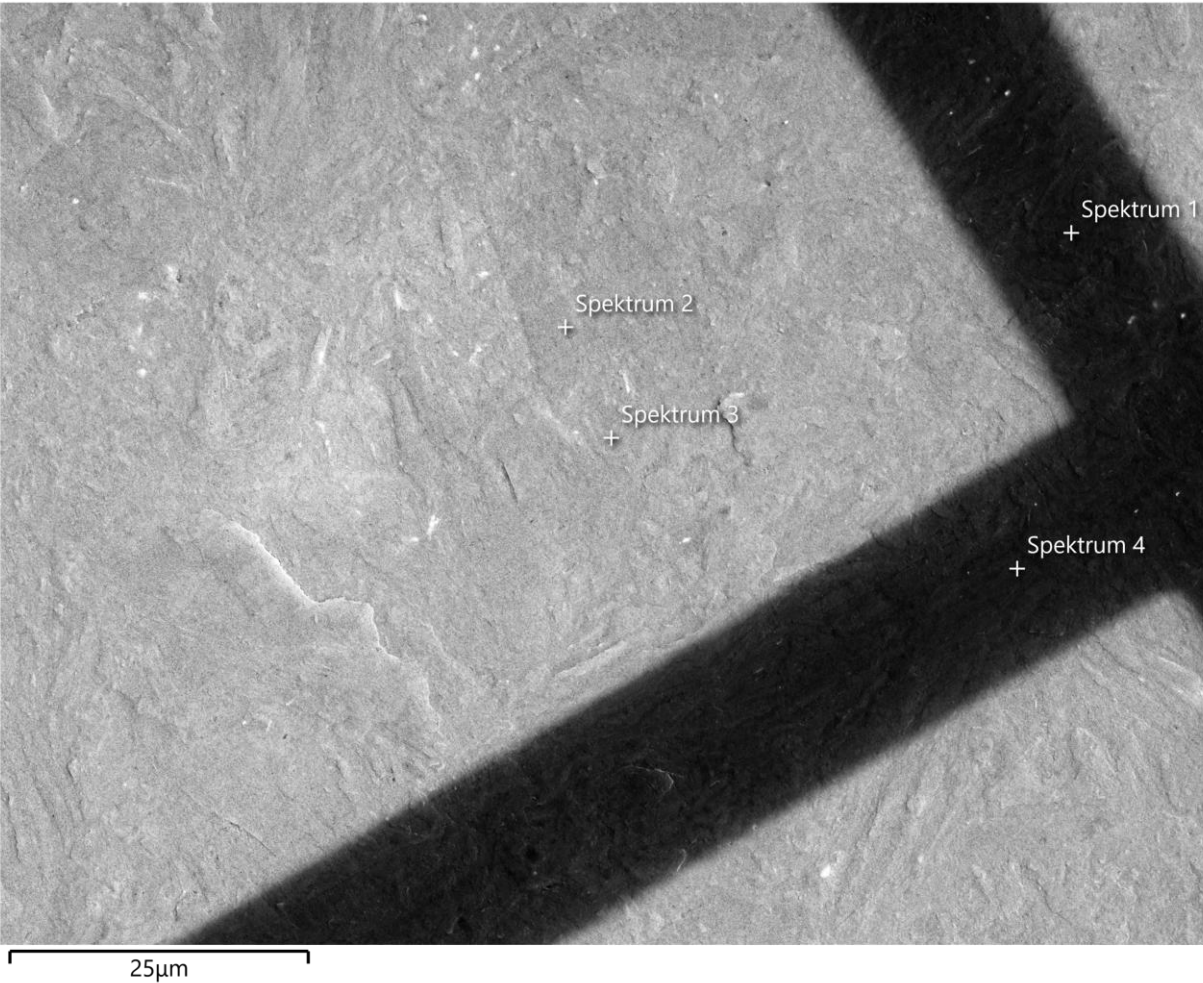


Abbildung 74: Hochoauflösung; In-Lens-Axial-Detektor; CLARA mit angepassten Abbildungsparametern; 0,237 µm Sichtfeld; Hochouflösungstestobjekt

EDX-Analyse 1: 100 µm Sichtfeld; Hochauflösungstestobjekt



Spektrum 1	
	At%
C	100.0

Unterstützt durch Tru-Q®

Spektrum 2	
	At%
C	99.7
Au	0.3

Unterstützt durch Tru-Q®

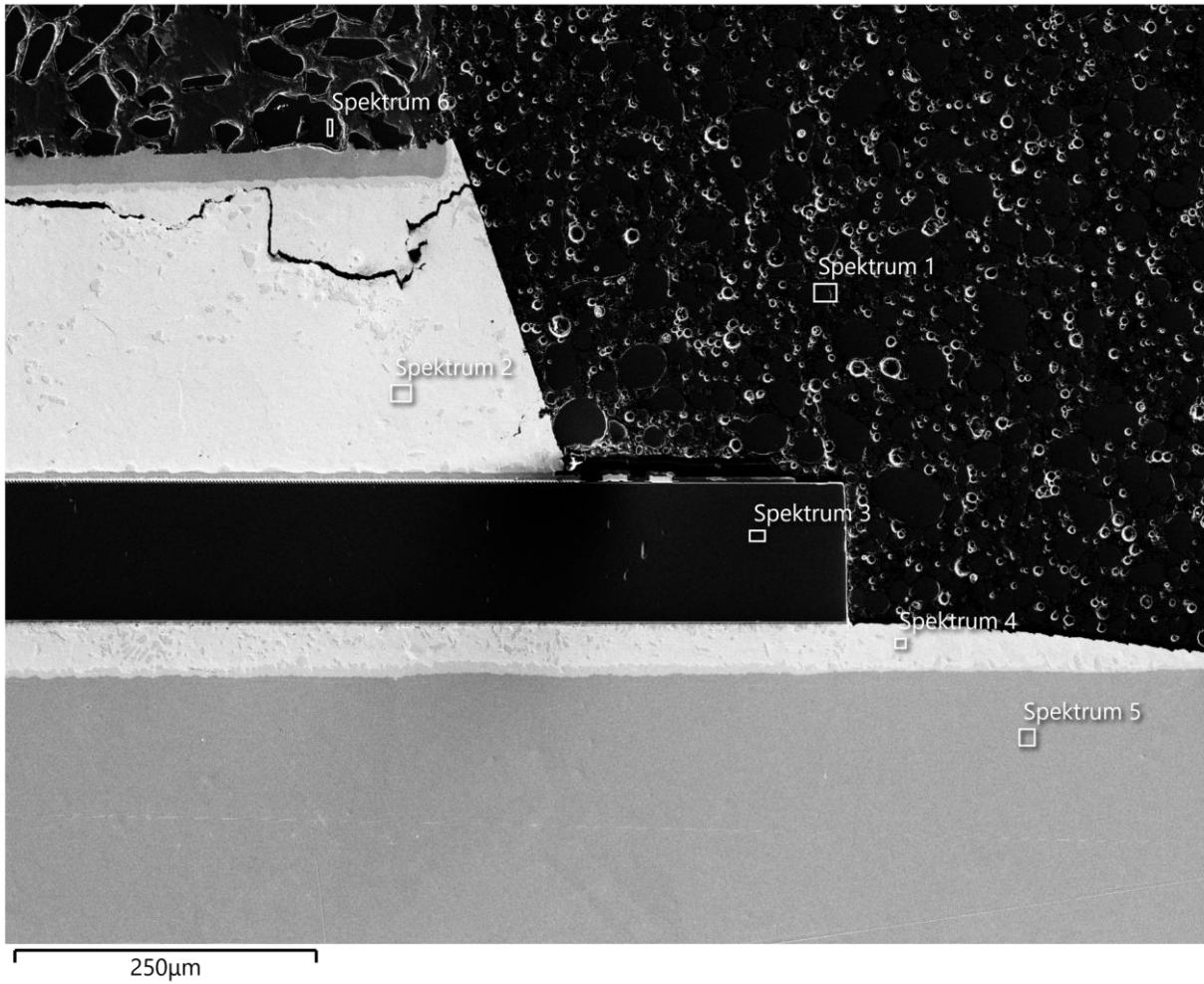
Spektrum 3	
	At%
C	98.7
O	0.8
Au	0.4
Al	0.0

Unterstützt durch Tru-Q®

Spektrum 4	
	At%
C	100.0

Unterstützt durch Tru-Q®

EDX-Analyse 2: 1 mm Sichtfeld; eingebetteter Chip



Spektrum 1	
	At%
O	44.1
C	37.0
Si	18.9

Unterstützt durch Tru-Q®

Spektrum 2	
	At%
Sn	88.3
Sb	10.2
Al	1.1
Si	0.5

Unterstützt durch Tru-Q®

Spektrum 3	
	At%
C	60.3
Si	39.7

Unterstützt durch Tru-Q®

Spektrum 4	
	At%
Sn	90.2
Sb	8.7
Al	1.0

Unterstützt durch Tru-Q®

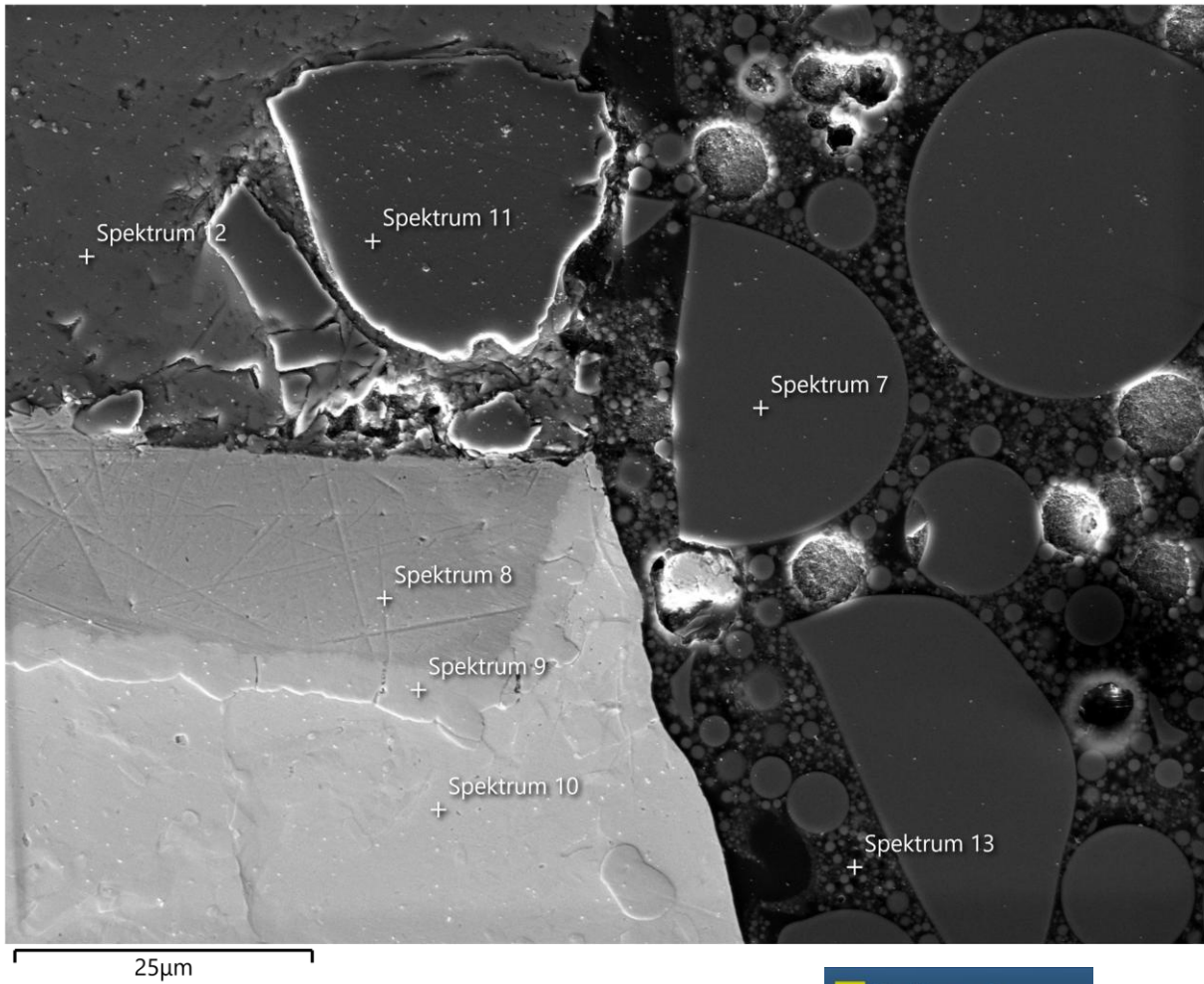
Spektrum 5	
	At%
Cu	59.8
C	40.2

Unterstützt durch Tru-Q®

Spektrum 6	
	At%
C	59.0
Si	40.4
O	0.6

Unterstützt durch Tru-Q®

EDX-Analyse 3: 100 µm Sichtfeld; eingebetteter Chip



Spektrum 7	
	At%
O	59.4
Si	30.6
C	10.0

Unterstützt durch Tru-Q®

Spektrum 8	
	At%
Cu	59.5
C	38.3
O	2.1
Re	0.2

Unterstützt durch Tru-Q®

Spektrum 9	
	At%
C	39.1
Cu	27.5
Sn	24.3
O	7.3
Sb	1.2
Pd	0.7
Ce	0.0
Nd	0.0

Unterstützt durch Tru-Q®

Spektrum 10	
	At%
Sn	92.9
Sb	5.4
Al	1.1
Si	0.6

Unterstützt durch Tru-Q®

Spektrum 11	
	At%
C	59.5
Si	40.5

Unterstützt durch Tru-Q®

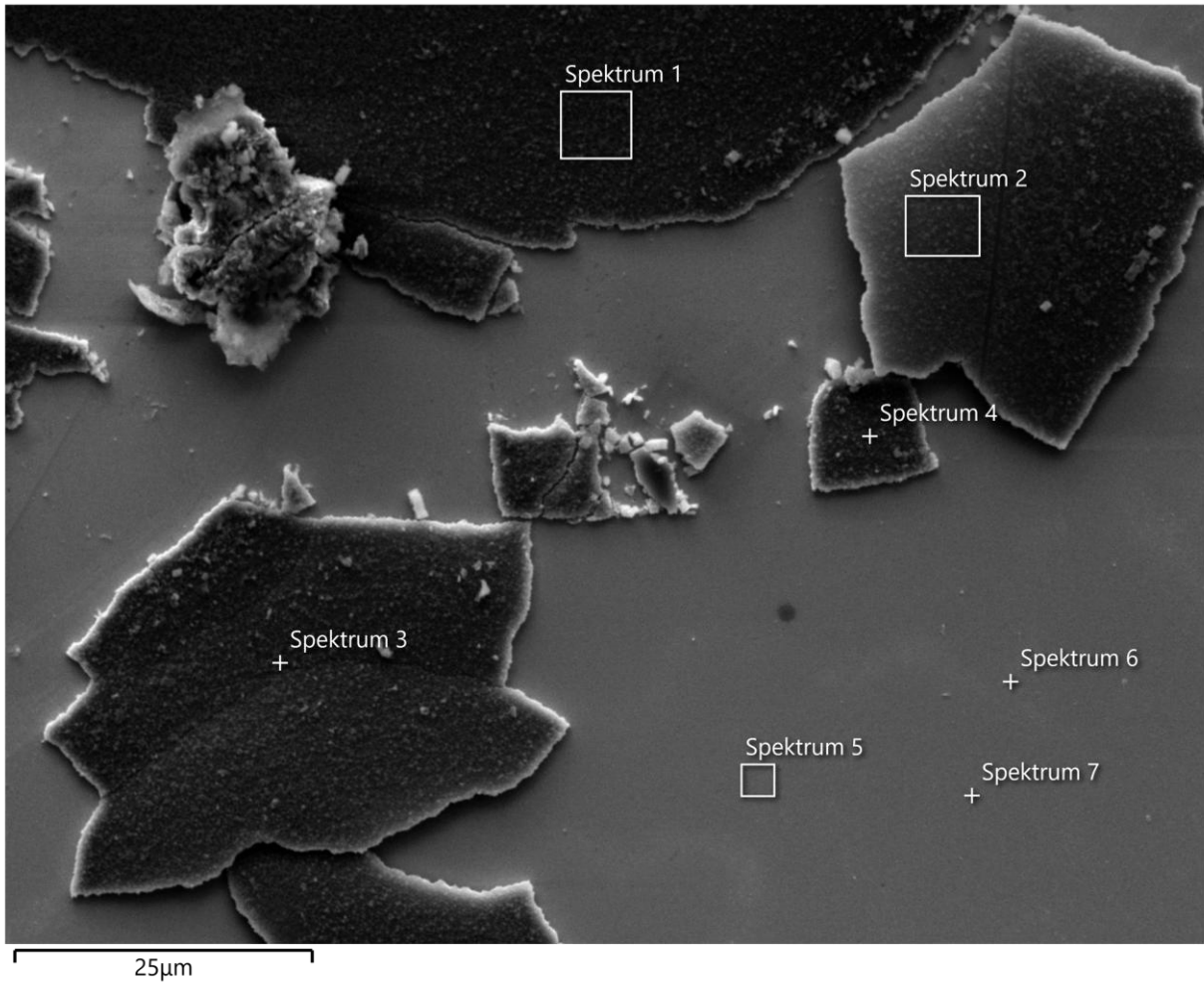
Spektrum 12	
	At%
Al	78.2
C	19.3
O	1.5
Ag	1.0

Unterstützt durch Tru-Q®

Spektrum 13	
	At%
C	43.2
O	38.3
Si	18.5

Unterstützt durch Tru-Q®

EDX-Analyse 4: 100 µm Sichtfeld; Berliner Blau



Spektrum 1	
	At%
C	36.2
N	31.6
O	15.5
Fe	10.8
Na	2.0
Au	2.0
Si	1.8

Unterstützt durch Tru-Q®

Spektrum 2	
	At%
C	38.3
N	33.1
Fe	11.6
O	11.3
Au	2.2
Si	2.0
Na	1.4

Unterstützt durch Tru-Q®

Spektrum 3	
	At%
C	36.8
N	31.6
O	15.9
Fe	10.6
Au	1.9
Na	1.7
Si	1.6

Unterstützt durch Tru-Q®

Spektrum 4	
	At%
C	37.4
N	31.5
O	14.0
Fe	11.3
Au	2.2
Si	2.0
Na	1.6

Unterstützt durch Tru-Q®

Spektrum 5	
	At%
Si	47.4
C	37.1
Au	14.6
Cr	1.0

Unterstützt durch Tru-Q®

Spektrum 6	
	At%
Si	48.4
C	35.8
Au	14.4
Cr	1.4

Unterstützt durch Tru-Q®

Spektrum 7	
	At%
Si	47.5
C	37.1
Au	14.4
Cr	1.0

Unterstützt durch Tru-Q®

Eigenständigkeitserklärung

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Arbeit in allen Teilen selbstständig angefertigt und keine anderen als die in der Arbeit angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe, und dass die Arbeit in gleicher oder ähnlicher Form in noch keiner anderen Prüfung vorgelegen hat. Mir ist bewusst, dass ich Autor/in der vorliegenden Arbeit bin und volle Verantwortung für den Text trage.

Ich erkläre, dass ich wörtlich oder sinngemäß aus anderen Werken – dazu gehören auch Internetquellen – übernommene Inhalte als solche kenntlich gemacht und die entsprechenden Quellen angegeben habe.

Mir ist bewusst, dass meine Arbeit auf Plagiate überprüft werden kann. Mir ist bekannt, dass es sich bei der Abgabe eines Plagiats um ein schweres akademisches Fehlverhalten handelt und dass Täuschungen nach der für mich gültigen Prüfungsordnung geahndet werden.

Zusätzlich versichere ich, dass ich auf künstlicher Intelligenz (KI) basierende Werkzeuge nur in Absprache mit den Prüfern verwendet habe. Dabei stand meine eigene geistige Leistung im Vordergrund, und ich habe jederzeit den Prozess steuernd bearbeitet.

Diese Werkzeuge habe ich im Quellenverzeichnis in der Rubrik „Übersicht verwendeter Hilfsmittel“ mit ihrem Produktnamen und einer Übersicht des im Rahmen dieser Prüfungs-/Studienarbeit genutzten Funktionsumfangs unter Angabe der Textstelle in der Arbeit vollständig aufgeführt.

Ich versichere, dass ich keine KI-basierten Tools verwendet habe, deren Nutzung die Prüfer explizit schriftlich ausgeschlossen haben. Ich bin mir bewusst, dass die Verwendung von Texten oder anderen Inhalten und Produkten, die durch KI-basierte Tools generiert wurden, keine Garantie für deren Qualität darstellt.

Ich verantworte die Übernahme jeglicher von mir verwendeter maschinell generierter Passagen vollumfänglich selbst und trage die Verantwortung für eventuell durch die KI generierte fehlerhafte oder verzerrte Inhalte, fehlerhafte Referenzen, Verstöße gegen das Datenschutz- und Urheberrecht oder Plagiate.

Gensdorf, 09.03.2026

.....

Ort, Datum

A.Q.

.....

Unterschrift