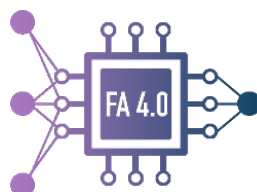


Abschlussbericht FA4.0



Zuschussempfänger: Robert Bosch GmbH Dieselstr. 6 72770 Reutlingen	Förderkennzeichen: 16ME0112
Vorhabensbezeichnung: Verbundprojekt: „Innovative Methoden der Fehleranalyse“ verbunden mit dem EUREKA CATRENE/EURIPIDES Projekt Failure Analysis 4.0 – Key for reliable electronic devices in smart mobility and industrial production.	
Laufzeit des Vorhabens: 01.04.2020 – 30.09.2023	
Berichtszeitraum: 01.04.2020 – 30.09.2023	
Erstelldatum: 29.02.2024	
BOSCH Projektleiter: Jörg Krinke, +49-173-8578603, joerg.krinke@de.bosch.com	
Vorgelegt bei Vertreter des Förderinstituts: VDI/VDE Innovation + Technik GmbH Zu Händen Dr. Mathias Müller Steinplatz 1 10623 Berlin Germany	

Reutlingen

29.02.2024

Ort

Datum

Unterschrift

Inhalt

1	KURZDARSTELLUNG.....	4
1.1	AUFGABENSTELLUNG.....	4
1.2	VORAUSSETZUNGEN.....	4
1.3	PLANUNG UND ABLAUF DES VORHABENS	4
1.4	WISSENSCHAFTLICHER UND TECHNISCHER STAND, ZUSAMMENARBEIT MIT ANDEREN STELLEN	5
1.5	WESENTLICHE ERGEBNISSE.....	6
2	ERGEBNISSE DER ARBEITSPAKETE.....	8
2.1	ARBEITSPAKET 1: SPEZIFIKATIONEN, ANFORDERUNGEN, REGELMÄßIGE STATUSANALYSE UND ABGLEICH MIT INTERNATIONALEN TRENDS	8
	AUFGABE 1.1: GAP-ANALYSE; GEGENÜBERSTELLUNG EXISTIERENDER METHODEN; BENCHMARKING	8
	AUFGABE 1.2: PROJEKT-MONITORING, REGELMÄßIGE STATUSANALYSE UND KONTINUIERLICHE MARKT-BEOBACHTUNG	8
2.2	ARBEITSPAKET 2: STANDARDISIERTE SCHNITTSTELLEN FÜR DEN ARBEITSABLAUF INNERHALB DER FEHLERANALYSE	9
	AUFGABE 2.1: STANDARDISIERTER PROBENHALTER.....	9
	AUFGABE 2.2: DATENBANK UND DEFINITION VON SCHNITTSTELLEN.....	25
	AUFGABE 2.3: DIGITALE ZWILLINGE	29
2.3	ARBEITSPAKET 3: ENTWICKLUNG VON ALGORITHMEN AUF DEM ANSATZ DER KÜNSTLICHEN INTELLI-GENZ UND DES MASCHINELLEN LERNENS FÜR DIE ERWEITERTE SIGNALVERARBEITUNG ZUR DEFECTIDENTIFIKATION IN DER FEHLERANALYSE	30
	AUFGABE 3.3: BILDERKENNUNG AUF BASIS DES MASCHINELLEN LERNENS.....	30
	AUFGABE 3.4: SIGNALANALYSE AUF BASIS DES MASCHINELLEN LERNENS.....	43
2.4	ARBEITSPAKET 4: WEITERENTWICKLUNG VON GERÄTEN DER FEHLERANALYSE	51
	AUFGABE 4.1: EIN AKUSTISCHES MIKROSKOP MIT IMPLEMENTIERTER SAFT UND KI-BASIERTER ANALYSE-FÄHIGKEIT	51
	AUFGABE 4.2.: LOKALES FRÄSWERKZEUG FÜR DIE DEKAPSULATION	64
	AUFGABE 4.3: EIN FIB/REM SYSTEM FÜR DAS KI-BASIERTE FEHLERSUCHE.....	65
	AUFGABE 4.4: MESSUNG VON THERMISCH BEDINGTEN VERBIEGUNGEN	66
	AUFGABE 4.5: ULTRAHOHE AUFLÖSUNG IN RÖNTGENAUFNAHMEN	75
2.5	ARBEITSPAKET 5: VERKÜPFUNG DER ANALYSEGERÄTE MIT DER KORRELATIVEN DATENAUSWERTUNG	86
	AUFGABE 5.2: KORRELATIVE DATENANALYSE MITTELS „DIGITAL TWINS“ UND FEHLERKATALOGEN.....	86
	AUFGABE 5.3: KOMBINIERTER DEFECTLOKALISIERUNG: WORKFLOWS FÜR MECHANISCHE-, LASER- UND FIB-QUERSCHNITTE	88

AUFGABE 5.4: MACHBARKEITSSTUDIE FÜR EIN GERÄT ZUM RÜCKDÜNNEN VON HALBLEITERMATERIALIEN MIT INTEGRIERTER RESTDICKENMESSUNG.....		91
3	ARBEITS-, ZEIT – UND KOSTENPLANUNG	92
3.1	ARBEITSPLANUNG	98
3.2	EINSATZ DER FÖRDERMITTEL	98
4	ERREICHUNG DER ZIELE.....	99
5	AKTUELLE INFORMATIONSRECHERCHEN UND F&E- ERGEBNISSE DRITTER.....	101
5.1	LITERATURRECHERCHE ZU ALLEN ARBEITSPAKETEN UND AUFGABEN AN DENEN BOSCH BETEILIGT IST.....	101
5.2	BESUCH VON FACHKONFERENZEN.....	101
5.3	DIREKTER KONTAKT ZU GERÄTEHERSTELLERN AUßERHALB DES PROJEKTES	101
6	FORTSCHREIBUNG DES VERWERTUNGSPLANES	101
6.1	ERFINDUNGEN /SCHUTZRECHTSANMELDUNGEN	101
6.2	TECHNISCHE VERWERTUNG	101
6.3	WIRTSCHAFTLICHE VERWERTUNG	101
7	ABKÜRZUNGEN	102

1 Kurzdarstellung

1.1 AUFGABENSTELLUNG

Das Projekt FA4.0 hatte die Aufgabe die Prozesskette einer physikalischen Analyse von Halbleiterbauelementen zu automatisieren und die bei einer solchen Analyse entstehenden Daten effizient auszuwerten.

Die Halbleiteranalyse ist ein hochspezialisierter Bereich, dementsprechend sind Analysemethoden und -geräte per se nicht standardisiert oder aufeinander abgestimmt. Ein wichtiger Eckpfeiler im Projekt war daher die Standardisierung von Schnittstellen für den Arbeitsablauf innerhalb einer physikalischen Analyse. Die effiziente Datenauswertung spielte eine große Rolle und bedurfte der Entwicklung von Algorithmen auf dem Ansatz der künstlichen Intelligenz und des maschinellen Lernens für die erweiterte Signalverarbeitung zur Defektidentifikation. Für die Implementierung der Algorithmen war in einem eigenen Arbeitspaket die Gerätehersteller zuständig unter Zuarbeit der Halbleiterindustrie und der Forschungseinrichtungen. Die Zusammenführung der Ergebnisse in einem Workflow für die Analyse sollte exemplarisch die zeitgemäßen Möglichkeiten in der Halbleiteranalyse darstellen.

1.2 VORAUSSETZUNGEN

Die Robert Bosch GmbH verfügt über mehr als vier Jahrzehnte Erfahrung in der Halbleiteranalyse. In Reutlingen betreiben wir unser Zentrallabor für die Halbleiteranalyse und in Renningen unser Zentrallabor für den Forschungsbereich. Beide Labore waren intensiv im Projekt tätig. Im Bereich der künstlichen Intelligenz wurde das Projekt FA4.0 von unserem AI-Bereich in Renningen unterstützt.

Wir verfügen über zahlreiche state-of-the-art Lokalisierungs-, Präparations- und Messmethoden, die in einer physikalischen Analyse von Halbleiterbauelementen benötigt werden und konnten daher zum einen sehr gut die Anforderungen an Standardisierung, Datenauswertung und Implementierung aufstellen. Zum anderen konnten wir die im Projekt entwickelten Lösungen bei uns im Labor testen und Feedback zu den Projektpartnern geben.

1.3 PLANUNG UND ABLAUF DES VORHABENS

Das Projekt war in sechs Arbeitspakete unterteilt, siehe dazu die Tabelle 1. In jedem Arbeitspaket gab es Unteraufgaben, sog. Tasks. Jedes Arbeitspaket hatte ein Leitungstandem und jeder Task einen eigenen Taskleiter. Das Projekt musste 2,5 Jahre mit rein virtuellen Treffen auskommen. Das hatte einerseits Vorteile, da bei allen Meetings auch immer alle Experten anwesend sein konnten. Aber natürlich gab es den Nachteil, dass der persönliche Austausch erschwert war. Der Projektfortschritt war trotzdem gut, eine Verlängerung um sechs Monate aber trotzdem notwendig, um die gesetzten Ziele zu erreichen.

Tabelle 1: Arbeitspakete des Gesamtvorhabens FA4.0, BOSCH ist an allen APs beteiligt

Arbeitspaket Nr.	Titel des Arbeitspakets (AP)	Arbeitspaketleiter	Startmonat	Endmonat
AP1	Spezifikationen, Anforderungen, regelmäßige Statusanalyse und Abgleich mit internationalen Trends	IFX	1	30
AP2	Standardisierte Schnittstellen für den Arbeitsablauf innerhalb der Fehleranalyse	IFX	1	36
AP3	Entwicklung von Algorithmen auf dem Ansatz der künstlichen Intelligenz und des maschinellen Lernens für die erweiterte Signalverarbeitung zur Defektidentifikation in der Fehleranalyse	IWMS	1	36
AP4	Weiterentwicklung von Geräten der Fehleranalyse	IWMS	1	36
AP5	Verknüpfung der Analysegeräte mit der korrelativen Datenauswertung	BOSCH	1	36
AP6	Abschließende Bewertung der KI-unterstützten Analysegeräte und Arbeitsabläufe	BOSCH	18	36

1.4 WISSENSCHAFTLICHER UND TECHNISCHER STAND, ZUSAMMENARBEIT MIT ANDEREN STELLEN

Bosch informiert sich über zahlreiche Kanäle über den aktuellen Stand der Technik bezüglich der Themen in den o.g. Arbeitspaketen. Hierzu zählen insbesondere:

- Literaturrecherche zu allen Arbeitspaketen und Aufgaben an denen Bosch beteiligt ist.
- Aktiver und passiver Besuch von Fachkonferenzen über den gesamten Projektzeitraum, sofern diese aufgrund der Pandemie stattfanden
CAM-Workshop Halle, 2022 und 2023
ESREF 2020, 2021 (virtuell), 2022, 2023 in Berlin und Toulouse
- Direkter Kontakt zu Geräteherstellern außerhalb des Projektes

1.5 WESENTLICHE ERGEBNISSE

In den Arbeitspaketen mit unserer Beteiligung haben wir einige Schwerpunkte gesetzt, um besonders vielversprechende Methodenentwicklungen voranzutreiben. Eine Beschreibung hierzu befindet sich in den jeweiligen Arbeitspaketen.

In den Arbeitspaketen 2, 3 und 4 wurden die Arbeiten entsprechend dem Arbeitsplan durchgeführt. BOSCH hat dazu in allen Aufgaben die notwendigen Beiträge geleistet. Es wurde mit allen beteiligten Projektpartnern an den vorbereiteten Themen gearbeitet. Besondere Highlights sind dabei in den folgenden Tasks entstanden:

- **Task 2.1: Standardisierte Probentransfersysteme**
Im dritten Projektjahr haben wir die zweite Version des Probenhalters entwickelt und die Herstellung beauftragt. Der Prototyp des Probenhalters wurde zuvor getestet und es wurden gute Ergebnisse erzielt. Dabei ist es gelungen einen Workflow vom Lichtmikroskop zum Rasterelektronenmikroskop durchzuführen und auf dem Projekttreffen in Grenoble Ende März 2023 vorgestellt.
- **Task 2.2 Datenbanken und Definition von Schnittstellen**
Für die geräteübergreifende Vernetzung wurde gemeinsam mit Infineon und ST der gemeinsame Datenheader finalisiert und auf dem Projekttreffen in Grenoble vorgestellt. Über eine menügeführte Oberfläche namens Headermaker kann dieser Header erstellt und editiert werden.
- **Task 2.3: Digitale Zwillinge für die Nachverfolgung von Proben und Anlagenparametern**
Das Konzept eines gemeinsamen Datenheaders wurde hier aufgegriffen und die Möglichkeit von Ontologien aufgezeigt. Hier profitierten alle Projektpartner vom Know-How der Universität Stuttgart. Der Datenheader, der bei den Maschinen- und Toolherstellern implementiert wird, ermöglicht die Nachverfolgung des gesamten Analyseprozesses.
- **Task 3.3: Bilderkennung auf der Basis des maschinellen Lernens**
Das KI-basierte Bildauswerteprogramm zum Thema IMC-Coverage wurde gemeinsam mit den Partnern ST und Matworks weiterentwickelt. Dabei handelt es sich um die Erweiterung des Trainingsdatensatzes mit anderen Materialien, wie z.B. Cu oder Ag. Die grafische Oberfläche ist mittlerweile per ausführbarer EXE-Datei für alle Analyse-Mitarbeiter verwendbar. Das Programm wurde bei Bosch im Automotive Geschäftsbereich vorgestellt und in der kompletten Analyseabteilung ausgerollt. Die Zeitersparnis bei der reinen Bildauswertung beträgt mindestens einen Faktor 10.
Auch die Arbeiten an den Themen SAM-Bilddatenauswertung, IR-Bildauswertung und Crateringtestauswertung wurden vorangebracht.
- **Task 3.4: Signalanalyse auf der Basis des maschinellen Lernens**
Die Auswertung der 5000 Sensor Bauelemente anhand ihrer z-Scans wurde erfolgreich abgeschlossen. Die physikalische Analyse und die Rückkopplung zur Datenauswertung wurde durchgeführt. Die dabei entstandenen Erkenntnisse werden ins Projekt FA2IR einfließen.
- **Task 4.1: Ein akustisches Mikroskop mit implementierter SAFT und KI-basierter Analysefähigkeit**
Im dritten Projektjahr wurden die Präparationsprozesse zur physikalischen Analytik optimiert, insbesondere hinsichtlich der Untersuchung im Toneburst-Modus, und vergleichende Auswertungen der Datensätze vorgenommen.

Bei der SAFT-Methode wurde gute Fortschritte erzielt. So ist es jetzt auch bei BOSCH möglich die Simulationen durchzuführen mit der durch PVA zur Verfügung gestellten Software. Die Algorithmen wurden zudem dergestalt angepasst, dass eine Rekonstruktion nun auch dann möglich ist, wenn der physikalische Fokus nicht auf der Probenoberfläche, sondern im Probeninneren liegt.

- **Task 4.2: Lokales Fräswerkzeug für die Dekapsulation**
BOSCH hat von der Kooperation mit KERN insoweit profitiert, dass wir den Implus genutzt haben unser In-House Equipment 3D-fähig zu machen.
- **Task 4.3: Ein FIB/REM System für die KI-basierte Fehlersuche**
Die Einführung des Data Headers bei TESCAN Geräten ist für uns von Vorteil und wird künftig mit in die Entscheidungsmatrix beim Kauf eines Gerätes einfließen.
- **Task 4.4: Messung von thermisch bedingten Verbiegungen**
Die Messsysteme von Cyber Technologies erschließen uns Untersuchungsmöglichkeiten, die wir heute noch nicht haben bzw. die wir nur sehr aufwändig durch manuelle Durchführung erreichen können. Die entwickelten Systeme können individuell an die jeweilige Messaufgabe angepasst werden und bieten einen hohen Grad an Automatisierung.
- **Task 4.5: Ultrahohe Auflösung in Röntgenaufnahmen**
Verzögerungen aufgrund der Hardware-Liefersituation führen dazu, dass die meisten Ergebnisse erst in der Projekt-Verlängerungszeit erzielt werden konnten. Zusammenfassend lässt sich sagen, dass X-Ray Scans von Excillum eine deutlich bessere Detailerkennbarkeit aufweisen als Scans von Bosch und dabei ca. doppelt so schnell sind verglichen mit Bosch. Die Projektergebnisse werden bei der Evaluierung künftiger Geräte eine große Rolle spielen.
- **WP 5: Integrierte Workflows**
Der Workflow Ultraschallmikroskopie und korrelierte FIB-Präparation wurde komplett automatisiert und das Ergebnis in einem 8 min Film dargestellt.
- **WP 6: Ergebniszusammenstellung**
Alle Ergebnisse wurde in der sog. Innovation Matrix detailliert zusammengestellt und auf dem Final Review vorgestellt.

2 Ergebnisse der Arbeitspakete

2.1 ARBEITSPAKET 1: SPEZIFIKATIONEN, ANFORDERUNGEN, REGELMÄßIGE STATUSANALYSE UND ABGLEICH MIT INTERNATIONALEN TRENDS

Aufgabe 1.1: Gap-Analyse; Gegenüberstellung existierender Methoden; Benchmarking

Bosch-intern fanden zahlreiche Treffen statt zur Abstimmung über die Arbeitspakete. Monatlich haben wir ein Review pro Arbeitspaket durchgeführt, um in jedem einzelnen Task die Fortschritte bei uns und den Projektpartnern zu bewerten und bei der Umsetzung zu unterstützen. Weiterhin wurden bei uns alle notwendigen Präparationen und die Probenherstellung durchgeführt, um eine reibungslose Arbeit in den Arbeitspaketen zu ermöglichen.

Bosch hat an allen Projekttreffen mit den Partnern teilgenommen. Konferenzen, wie dem CAM-Workshop oder der ESREF, haben wir für das Benchmarking genutzt.

Zwischen den Projekttreffen (General Assembly) fanden zahlreiche Telekons in den Arbeitspaketen statt. In den einzelnen Aufgaben wurde sich ebenso mittels Telekons, abgestimmt. Bilaterale Treffen waren erst ab Sommer 2022 wieder möglich.

Aufgabe 1.2: Projekt-Monitoring, Regelmäßige Statusanalyse und kontinuierliche Markt-Beobachtung

Bosch hat hier dem Gesamtprojektleiter zugearbeitet, der die Darstellung des Status übernimmt. Insbesondere verweisen wir an dieser Stelle auf den zugehörigen Meilensteinbericht. Zu diesem Meilenstein haben wir die Weichen für das letzte Projektjahr gestellt. Die Entscheidung über Themen an denen weitergearbeitet wird, stellen wir in den Beschreibungen der Arbeitspakete dar.

2.2 ARBEITSPAKET 2: STANDARDISIERTE SCHNITTSTELLEN FÜR DEN ARBEITSABLAUF INNERHALB DER FEHLERANALYSE

Aufgabe 2.1: Standardisierter Probenhalter

2.1.1 Stand der Technik

Im Zentrallabor für Ausfallanalyse bei BOSCH wird ein breites Spektrum von Analyse- und Präparationsgeräten unterschiedlichster Hersteller betrieben. Bei der Bearbeitung von Ausfallanalysen sind i.d.R. immer mehrere der unten genannten Geräte und deren Probenträger im Einsatz:

Beschreibung unserer aktuellen Probenhalter

Im Röntgengerät bzw im Röntgen-CT werden Proben so fixiert, dass sie gut durchstrahlbar bzw. optimal tomografierbar sind. Halbleiter- und Sensorchips werden auf Plexiglasscheiben aufgeklebt. In der CT muss zusätzlich darauf geachtet werden, dass die Probe stabil fixiert ist und sich nicht unkontrolliert bewegen kann. Dafür müssen sehr oft spezielle Halterungen gebaut werden; diese sind zunehmend mit CAD konstruiert und in 3D Druck ausgeführt, s. dazu Abb. 2.1.1.



Abb. 2.1.1: Diverse Fixierungsmöglichkeiten für die 2D-Röntgenanlage (links) und die Röntgentomografie (CT, rechts).

Der Bereich der Lichtmikroskopie umfasst ein sehr breites Spektrum an Mikroskopen. Vom Stereomikroskop, über verschiedene Metall- und Infrarotmikroskope, über optische 3D Messgeräte bis hin zum Weißlicht-interferometer (WLI) besitzen alle kein Probenträgersystem, s. Abb. 2.1.2, linkes Bild.

Für hochpräzisen Abtrag der Oberfläche wird die Mikrofräse zunehmend wichtiger. Diese Technik besitzt ein eigenes Probenträgersystem, das die zu bearbeitende Probe sicher und stabil in der Halterung fixiert, s. Abb. 2.1.2 rechtes Bild.

Die Ultraschallmikroskope (SAM) besitzen Probentische, aber kein Probenträger-system.

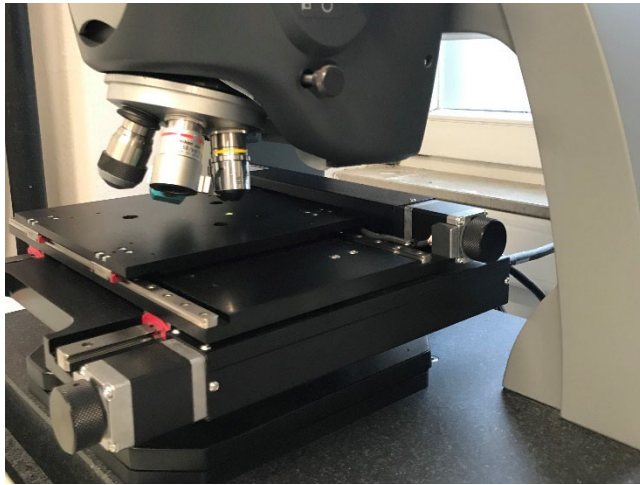


Abb. 2.1.2: Probentisch, WLI (links) und Probenhalter, Allied Mikrofräse (rechts) .

Im Bereich der Probenpräparation bspw. der Schliffpräparation in der Metallografie werden Proben in Kunstharz eingebettet und sind dort fixiert. Hierfür ist kein Probenträger erforderlich. Erst in nachfolgenden Analyseschritten, wie z.B. bei der Rasterelektronenmikroskopie (REM) wird für diese Proben ein Probenträgersystem benötigt, siehe dazu Abb. 2.1.3.

Hochauflösende Analyse- und Präparationstechniken kommen in der Ausfallanalyse ins Spiel, wenn die zu analysierenden Strukturen im sub-Mikrometerbereich liegen. Hier werden Rasterelektronenmikroskope (REM) und Focused-Ion-Beam Geräte (FIB) und auch Kombi-Geräte aus beiden Techniken eingesetzt. Einige Standard-Probenträger der Firmen Zeiss und FEI/Thermofischer sind in Abb.2.1.3 zu sehen.

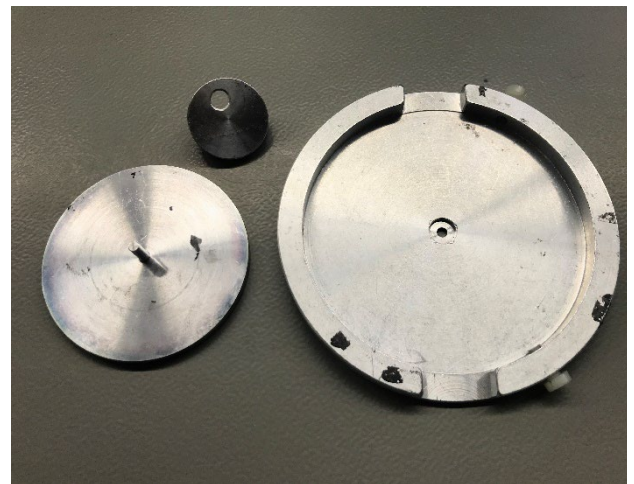


Abb. 2.1.3: Diverse Ausführungen von Probenträgern für REM (Zeiss, links) und FIB (FEI, rechts).

Zusammengefasst kann festgehalten werden, dass ein Großteil der verwendeten Geräte keine spezielle Probenfixierung besitzt und dass in den anderen Geräten jeweils unterschiedliche Probenträger verwendet werden. Nur vereinzelt existieren

Probenträgersysteme, die in zwei unterschiedlichen Anlagen verwendet werden können (bspw. Shuttle&Find von Zeiss, bzw die Weiterentwicklung der Firma Matworks für die Verknüpfung von Licht- und Rasterelektronenmikroskopie)

2.1.2 Anforderungen an einen universellen Probenhalter

Jede Mess- oder Präparationstechnik stellt ihre eigenen Anforderungen an den Probenträger. Diese sind im Folgenden kurz dargestellt und im Detail mit allen Projektpartnern abgestimmt:

- Röntgenmikroskopie erfordert Durchstrahlbarkeit, Fixierbarkeit und einfaches Handling an das Probenträgersystem
- CT benötigt neben Durchstrahlbarkeit, exakte Ausrichtbarkeit der Probe gemäß CT Anforderungen und eine stabile und dauerhafte Fixierung
- Ultraschallmikroskopie (SAM): DI-Wasser- / Korrosionsbeständigkeit
- REM/FIB: Vakuumbeständigkeit
- Allied / Mikrofräse: Wasser- / Korrosionsbeständigkeit, mechanische Stabilität
- Optische Mikroskopiertechniken: teilweise geringer Arbeitsabstand zur Probenoberfläche, Zugänglichkeit an die Probe

2.1.3 Untersuchte Beispielpuben / Kernstück des Probenträgersystems Version 0

Die Konstruktion des Probenträgers, nach Vorgabe der Projektpartner wurde von der Fa. Kern zur Verfügung gestellt und als Demoobjekt im 3D Drucker im eigenen Labor hergestellt. Dieses Demoobjekt bildet die Basis für erste grundsätzliche Versuche und weitere Optimierungen.

In den Abb. 2.1.4 bis 2.1.6 ist der Prototyp in verschiedenen Ansichten dargestellt.



Abb. 2.1.4: Halte- und Fixierring mit 3 Fixiermarken, von oben (links) und von unten (rechts).



Abb. 2.1.5: Halte- und Fixierring mit Standard REM-Stub, von oben (links) und von unten (rechts).

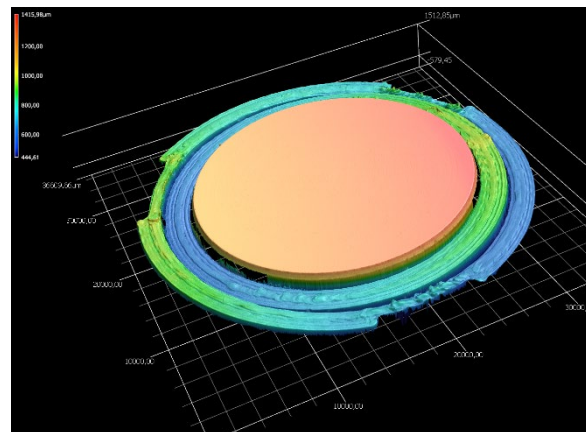
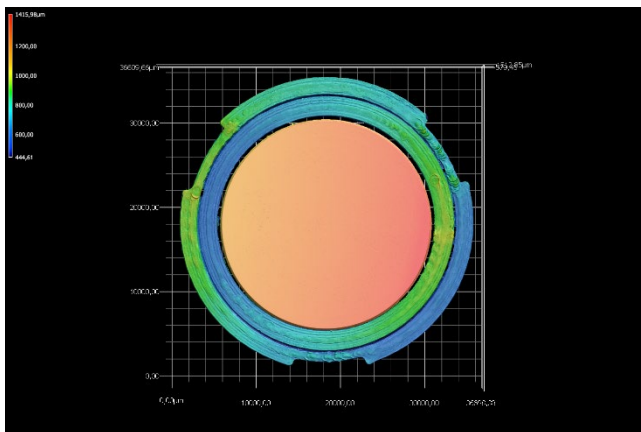


Abb. 2.1.6: Gesamtaufbau in 3D Darstellung, farbkodiert (links), etwas verkippt (rechts).

2.1.4 Erster Prototyp des Probenträgers, Version V0

Die Konstruktion des Probenträgers wurde unter den Projektpartner in der Planungsphase optimiert und weiterentwickelt und von der Firma Kern als Prototyp gefertigt und zur Verfügung gestellt.

In den Abbildungen 2.1.7 bis 2.1.11 ist das Probenträgersystem in verschiedenen Ansichten und in 3D dargestellt.

Das Probenträgersystem besitzt eine Aufnahme für standardisierte REM Stiftprobenteller (25mm), eine Verstellmöglichkeit, die es erlaubt, die Probe über zwei Achsen zu verkippen und eine Adapterplatte zur Anbindung des Trägers an verschiedene Analyse- und Präparations-Tools. Mit dieser Kippfunktion (Tilt) wird erreicht, dass die Ebene der Probenoberfläche so eingestellt werden kann, dass sie in der Ebene der drei Referenzmarken des Trägers liegen. Diese drei Marken bilden das Koordinatensystem des Trägers, worauf die Position der Probe referenziert wird. Diese Referenzmarken werden vom ‚Fraunhofer Institute for Microstructure of Materials and Systems IMWS‘ zur Verfügung gestellt. Sie wurden in einem Probenträger eingebaut und mit Planocarbon fixiert (Abb. 2.1.11).

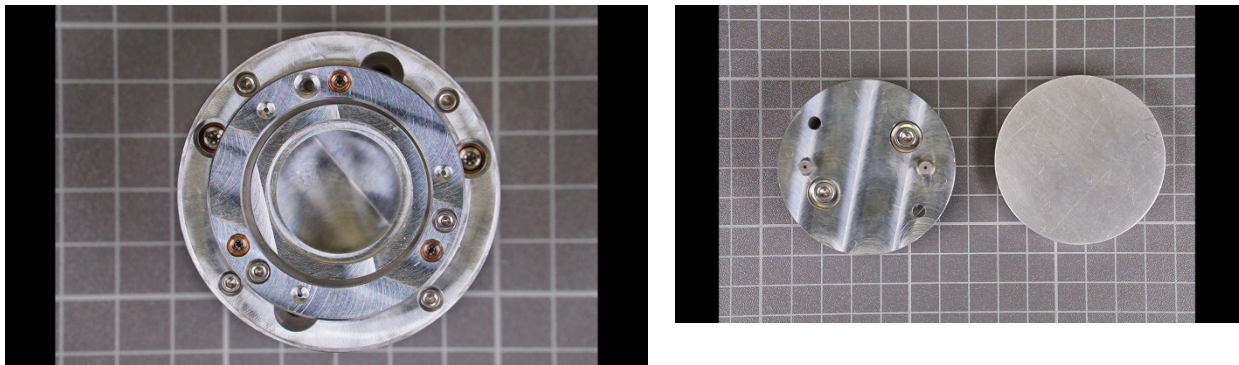


Abb. 2.1.7: Probenträgeransicht von oben (Bild links), Anschluss für die Adapterplatte, Unterseite (Bild rechts) mit Abschlussplatte für die Montage.



Abb. 2.1.8.: Probenträger mit Kippfunktion, Ansicht von der Seite (Bild links), Anschluss für die Adapterplatte für Zeiss Mikroskope (Bild rechts).

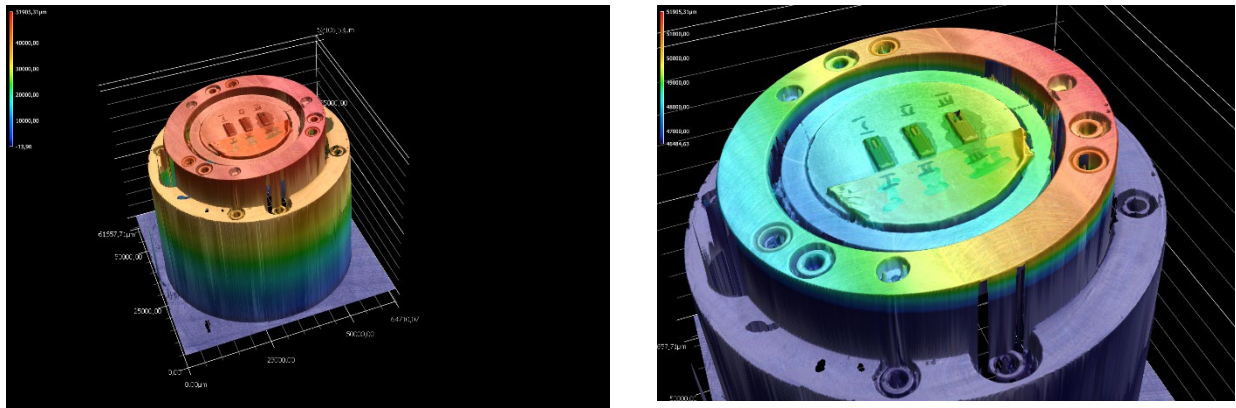


Abb. 2.1.9: 3D Ansicht des gesamten Trägers (links) und Detailansicht vom Probenträger in stark gekippter Position (rechts). Die z-Höheninformation ist farbkodiert.

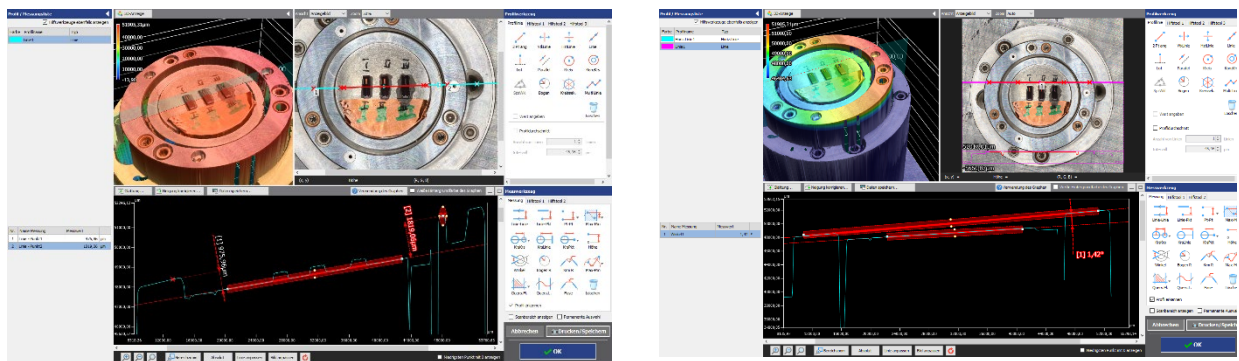


Abb. 2.1.10.: Exemplarischer linescan zur Höhenvermessung von Probe und Fixierring (links), Winkelmessung der Verkipfung zwischen der Probenebene und der Referenzebene des Fixierrings (rechts).

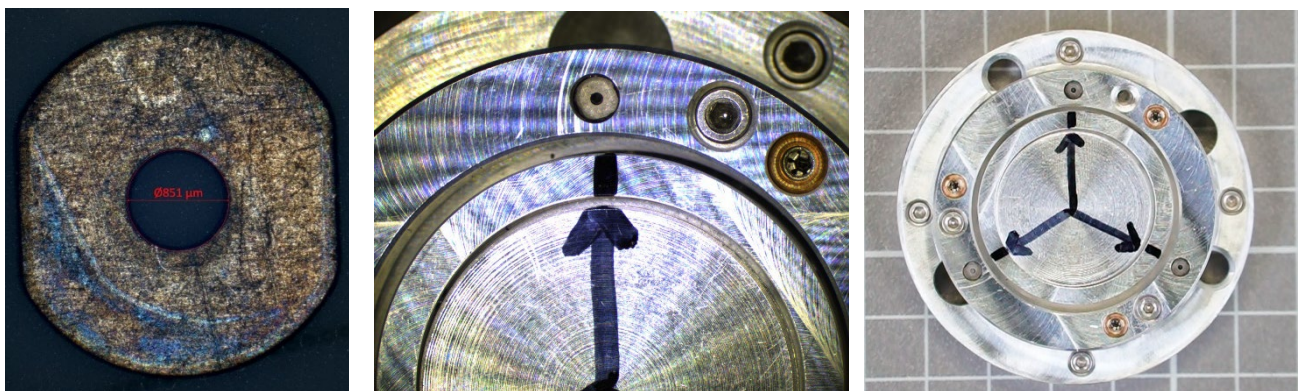


Abb. 2.1.11: Referenzmarke mit vermessenem Durchmesser von ca 850µm (links), eingebaute Referenzmarke (Mitte), eingebaute Referenzmarken auf dem gesamten Probenträger (rechts).

2.1.5 Weitere Anpassungen am Probenträgersystem

Für den vorliegenden Probenträger wurde in Eigenregie ein Adapter für das Zeiss Probenträgersystem gebaut, zur Verwendung des Trägers in diversen Mikroskopen. Dies ist die Voraussetzung für häufig genutzte workflows bspw. zwischen Licht- und Elektronenmikroskopen und ermöglicht den Einstieg in die korrelative Mikroskopie. Desweiteren wird uns die Firma PVA Tepla einen Probentisch zur Verfügung stellen, der es möglich macht, den Probenträger mit seinen Adaptionmöglichkeiten im Ultraschallmikroskop zu verwenden.

Das vorliegende Probenträgersystem kann aufgrund seiner Größe an der Allied Mikrofräse nicht verwendet werden (s. Abb. 2.1.2 und Abb. 2.1.8). Hier muss der Stiftprobenteller mit der Probe ausgebaut und dafür eine separate Halterung gebaut werden, die den Anforderungen der Fräse genügt (Abb. 2.1.12.). Nach diesem Präparationsschritt muss sichergestellt sein, dass der Stiftprobenteller exakt in seine vorherige Position wieder eingebaut werden kann. Dadurch bleiben die ursprünglichen Koordinaten der Probe erhalten und müssen nicht neu eingemessen werden.

Die Verwendung des Probenträgers an einem Focus Ion Beam Gerät (FIB) ist zu einem späteren Zeitpunkt geplant.

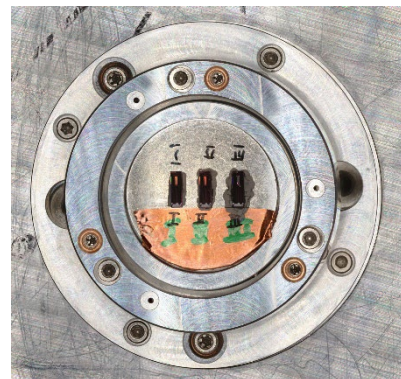


Abb. 2.1.12: Fixierplatte des Trägers an die Allied Mikrofräse (Bild links) und exakter Wiedereinbau des Stiftprobentellers in den Träger (Bild rechts)

Geplanter Einsatz des Probenträgersystems (Plandatum 1. Projektjahr)

Um Erfahrung im Umgang mit dem Träger zu sammeln, werden wir den Einsatz in verschiedenen Geräten jeweils testen und in deren Kombination, den sogenannten workflows untersuchen. Dabei steht die Bedienbarkeit im Vordergrund, insbesondere die zahlreichen Verstellmöglichkeiten. Bei der Messung möchten wir die erreichbare Präzision und Genauigkeit in der Navigation zur Probe und zwischen verschiedenen POIs testen. In der anschließenden Auswertung und Überlagerung verschiedener Messergebnisse werden wir die Überlagerbarkeit der korrelativ erzeugten Bilder untersuchen und mögliche Verbesserung daraus ableiten. In dieser ersten praktischen Testphase möchten wir außerdem, die vorerst manuelle Verwendung des fileheaders erlernen und nutzen.

Geplante Einsatzmöglichkeiten in verschiedenen Analyseabläufen:

- Lichtmikroskopie und REM
- REM und FIB
- Lichtmikroskopie und SAM
- SAM und Allied Mikrofräse

2.1.6. Weiterentwicklung des Probenträgers V0, erweiterte Anforderung V1

In der Version V0 des Probenträgers wurden alle grundsätzlichen Anforderungen umgesetzt (Abb. 2.1.13 und 2.1.14). Der Schwerpunkt lag in der Berücksichtigung aller Anforderungen, die der Träger in den Analyse- und Präparationsgeräten erfüllen muss.

Im praktischen Einsatz zeigte sich, dass die Größe und das Gewicht optimiert und dass die Bedienung des Probenträgers V0 verbessert werden kann.

Diesen erweiterten Anforderungskatalog setzte die Firma Kern in einem neuen Design V1 um. Die Lieferung der neuen Version V1 war im Sommer 2023 (Abb. 2.1.15):

- | | |
|---------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------|
| ✓ Sample Size (Diam / high) & Price... (basic Stub) | ✓ Multi modules Interfaces architecture holder |
| ✓ Conductive - <u>non magnetic</u> | ✓ Repeatability of clamping / <u>reclamping</u> |
| ✓ Tilt alignment | ✓ Reference marks (recognition) |
| ✓ Chemistry/ Plasma /T° resistant | ✓ Easy soft interface (navigation) |
| ✓ Tool/technic compatibility (through technic: X-ray and SAM) | |

Abb. 2.1.13 grundsätzliche Anforderungen an den Probenträger, hinsichtlich Aufbaus und Beständigkeit.

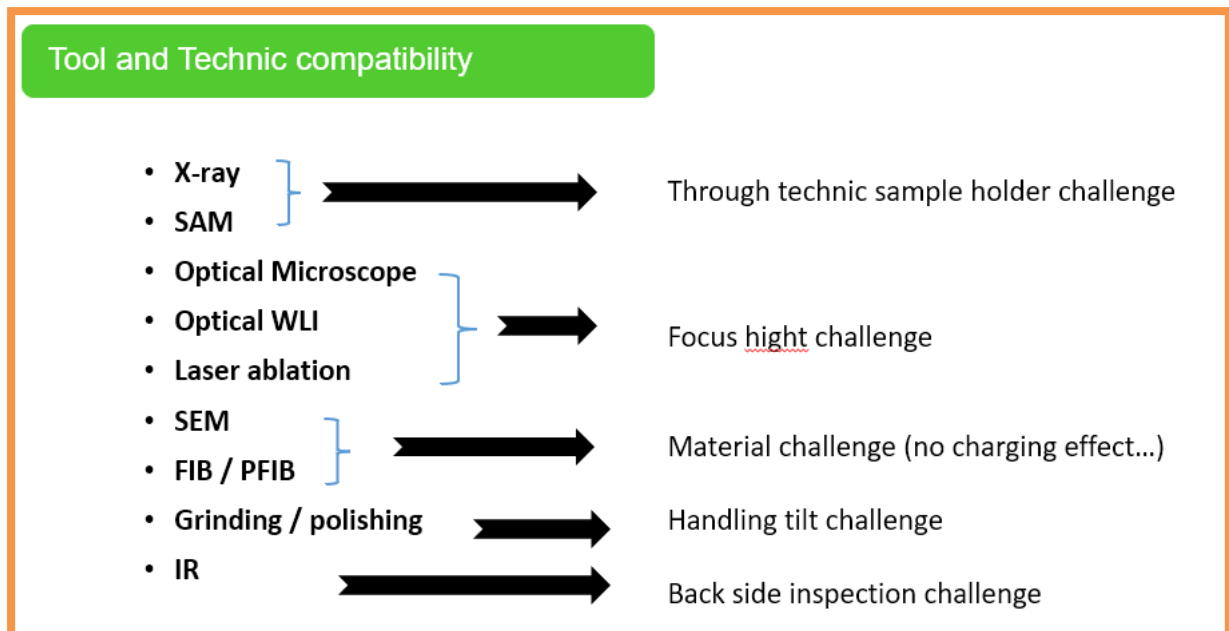


Abb. 2.1.14 grundsätzliche Anforderungen an dessen Einsatzgebiete in Analyse- und Präparationsgeräten.

Universeller Probenhalter, Version V1

In der Version V1 wurden verschiedene Optimierungen durchgeführt (Abb. 2.1.15):

Das Gewicht und die Größe wurden reduziert.

Das gesamte Design wurde asymmetrisch gestaltet und dadurch gegen Vertauschung gesichert.

Die Kippachsen (Tilt) stehen senkrecht aufeinander, was die Justage erleichtert.

Alle Schrauben sind direkt zugänglich.

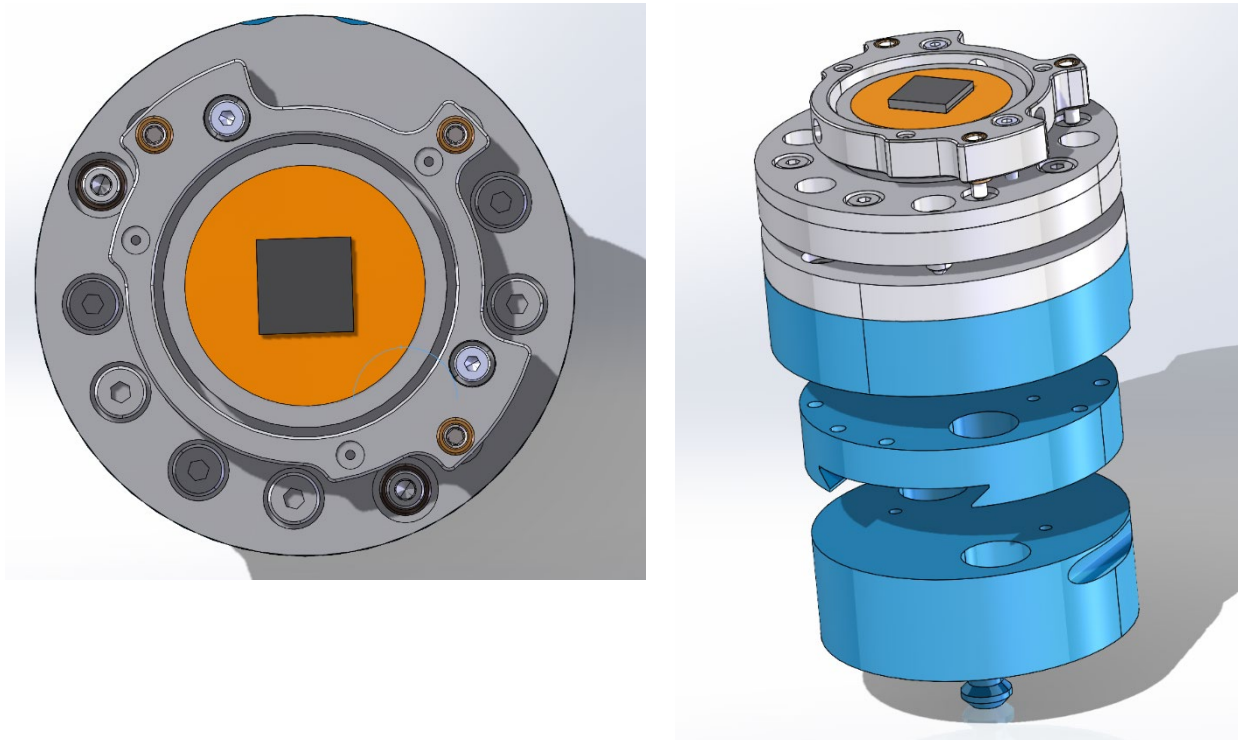


Abb. 2.1.15: Konstruktionszeichnung des neuen Probenhalters V1, Draufsicht (Bild links) und Seitenansicht des CAD-Modells (Bild rechts)

Probenhalter für die Allied μ Fräse

Es gibt Analyse- und Präparationsschritte, die nicht oder nur sehr eingeschränkt mit dem universellen Probenhalter durchgeführt werden können. In diesen Fällen kann die Probe mit dem Stub ausgebaut werden. Für die Allied Mikrofräse haben wir in Eigenregie einen speziellen, sehr flachen Träger entwickelt, auf dem der Probenstub montiert werden kann, s. Abb. 2.1.16



Abb. 2.1.16.: Spezialhalter für die Allied Mikrofräse, Seitenansicht (Bild links) mit Fixiermöglichkeit für zwei Stiftprobenteller, Draufsicht (Bild rechts)

2.1.7. Analyse workflows

Innerhalb einer komplexen Ausfallanalyse gibt es viele einzelne Arbeitsschritte. Diese sog. Analyseworkflows können dabei sehr unterschiedlich sein. Im Rahmen des Projekts haben wir uns mit den Projektpartnern auf einige typische Analyseworkflows verständigt. Wir haben uns auf zwei Analyseworkflows konzentriert, auf die wir den neuen Probenträger angewendet haben und weiter einsetzen möchten.

Analyseworkflow Lichtmikroskopie und REM

Die beiden Analyseschritte Lichtmikroskopie und REM werden im Laboralltag sehr häufig eingesetzt.

In diesen Arbeitsschritten kann die Handhabung des Trägers zuerst am Lichtmikroskop (Abb. 2.1.17) eingeübt und getestet werden. Dann folgt das Einmessen der Referenzmarken (Abb. 2.1.18.) und das Setzen und Definieren von interessanten Messpositionen (Abb. 2.1.19.), sog. POIs (points of interest). Im dann folgenden zweiten Arbeitsschritt am REM (Abb. 2.1.20.) können, nach analogem Einmessen der drei Referenzmarken, die zuvor am Lichtmikroskop definierten POIs angefahren werden.

Mit dem Probenträger und der damit verbundenen Steuerung und Datenverarbeitung werden folgende Schritte vereinfacht, verbessert und dokumentiert:

- Navigation
- Korrelative Mikroskopie und Bildüberlagerung
- Dokumentation der Arbeitsschritte

Aufgrund der fehlenden Einbindung unserer REMs im Rahmen des Projekts haben wir zu Testzwecken die Zeiss Software ZEN CORE benutzt und ein Template unseres Probenträgers angelegt (Abb. 2.1.20).

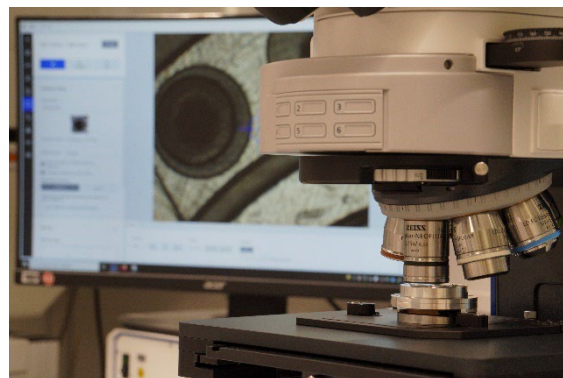


Abb. 2.1.17: Adapterplatte und Probenträger mit und ohne Tiltfunktion (Bild links) und eingebauter Probenträger V0 unter dem Lichtmikroskop (Bild rechts)

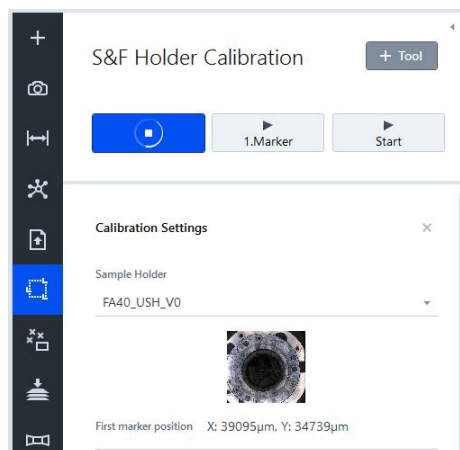
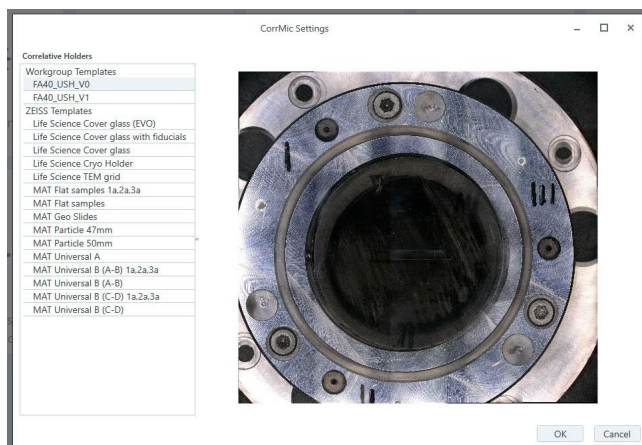


Abb. 2.1.18.: USH V0 als Template im Lichtmikroskop (Bild links) und Halterkalibrierung in ZEN CORE (Bild rechts)

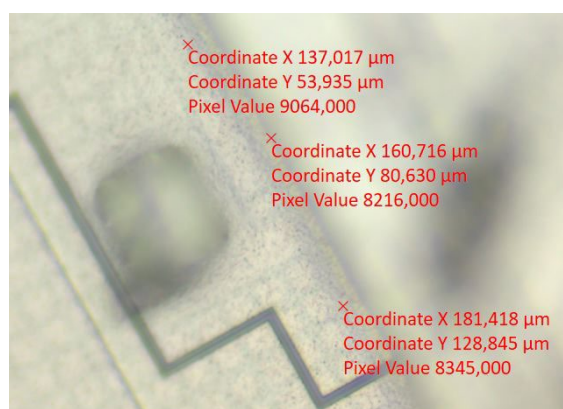
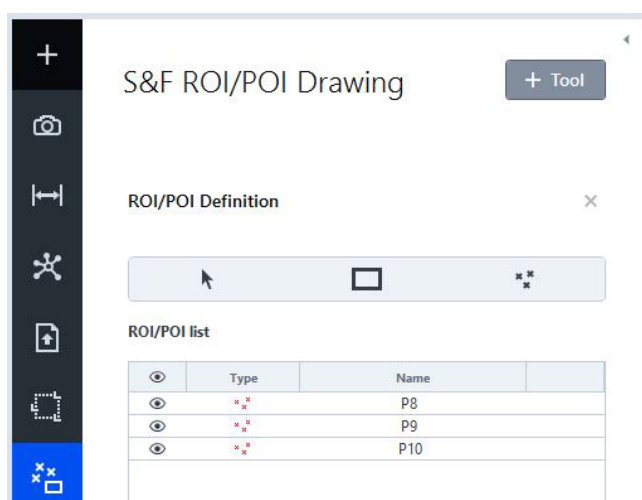


Abb. 2.1.19.: Festlegung von Regions und Points of Interest (ROI, POI) innerhalb ZEN CORE (Bild links), Bild der Probe mit den Koordinaten von 3 POIs (Bild rechts)

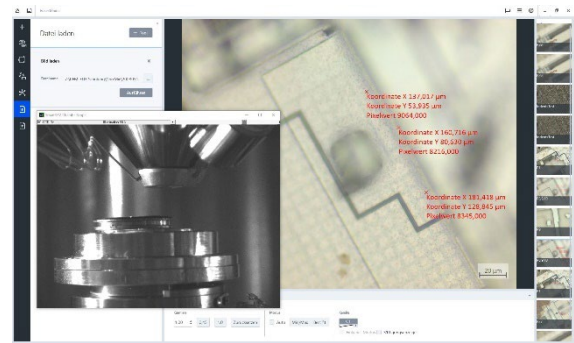
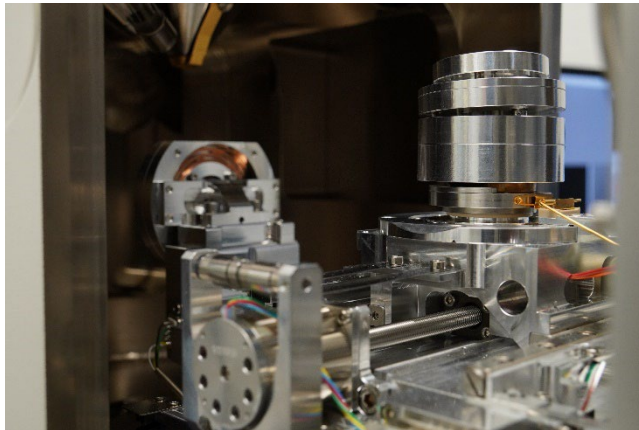


Abb. 2.1.20.: Probenträger (mit Tiltfunktion) im REM (Bild links), am Lichtmikroskop definierte POIs, auswählbar am REM mittels ZEN CORE (Bild rechts)

Analyseworkflow akustische Mikroskopie SAM – 3D Micromac Laser

Für diesen Arbeitsschritt hat uns PVA Tepla ein neues Modul innerhalb der WINSAM 8 Software für die Erzeugung eines ‚file headers‘ zur Verfügung gestellt.

Damit werden einige Geräteparameter und die Koordinaten, der 3 Referenzpunkte, sowie bspw der POIs auf der Probe ausgegeben. Laborversuche den Arbeitsschritt am Micromac Laser durchzuführen sind geplant, das entsprechende Modul, das den fileheader einliest stand bei der Berichterstellung noch nicht zur Verfügung. Den prinzipiellen Ablauf konnten wir beim Projekttreffen bei Infineon im workflow SAM – TESCAN pFIB live sehen und nachvollziehen. Der eigene workflow ‚SAM - Mikromac Laser‘ wird im Folgenden skizziert: Bildaufnahme und Erzeugung des json files am SAM301:

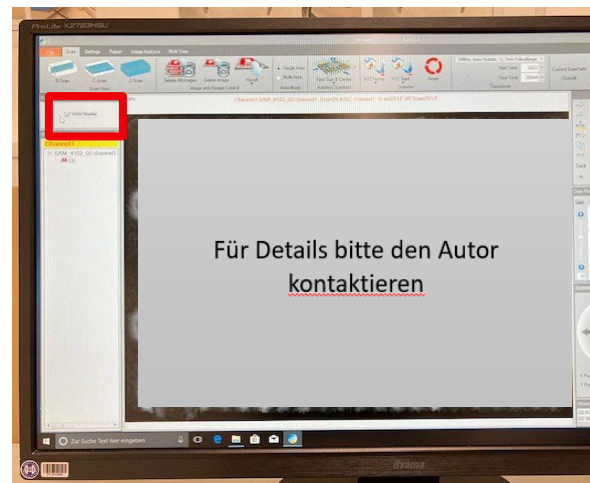
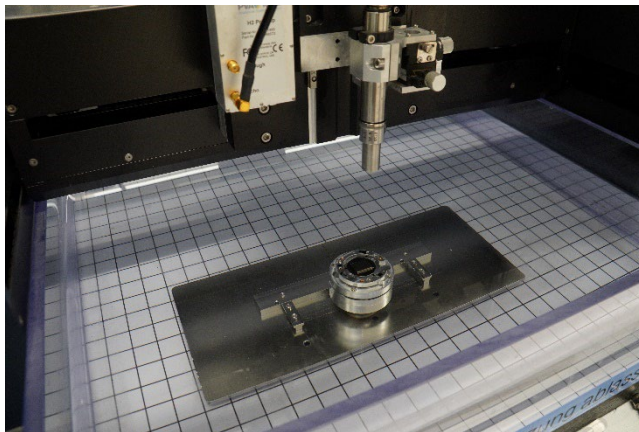


Abb. 2.1.21.: Ultraschallmikroskop SAM301 (Bild links) und Generierung des json files innerhalb der WINSAM8 Software von PVA Tepla (Bild rechts)

Einmessen der Referenzmarken:

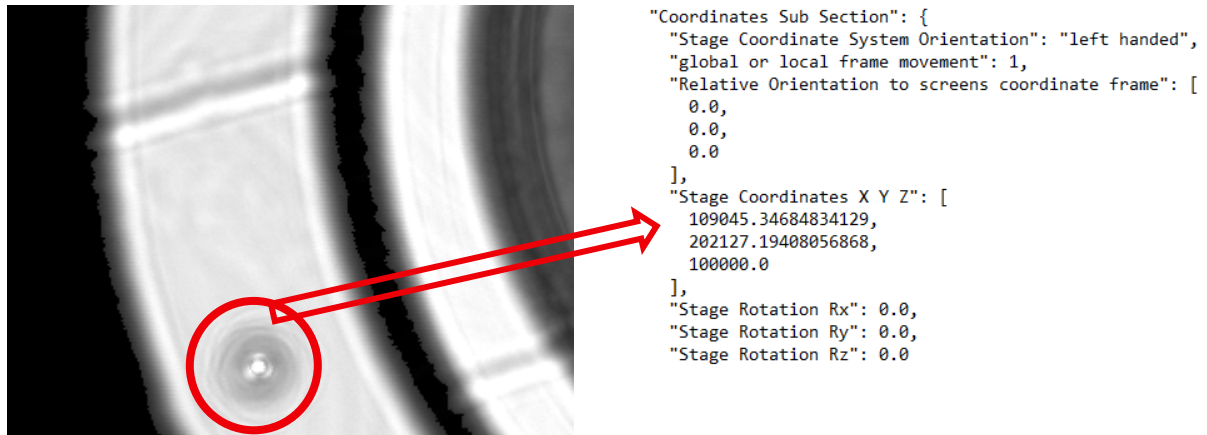


Abb. 2.1.22: Abbildung der Referenzmarke (Bild links) und Koordinate des Bildmittelpunkts im json file (Bild rechts)

Erzeugung des json files für die SAM Aufnahme:

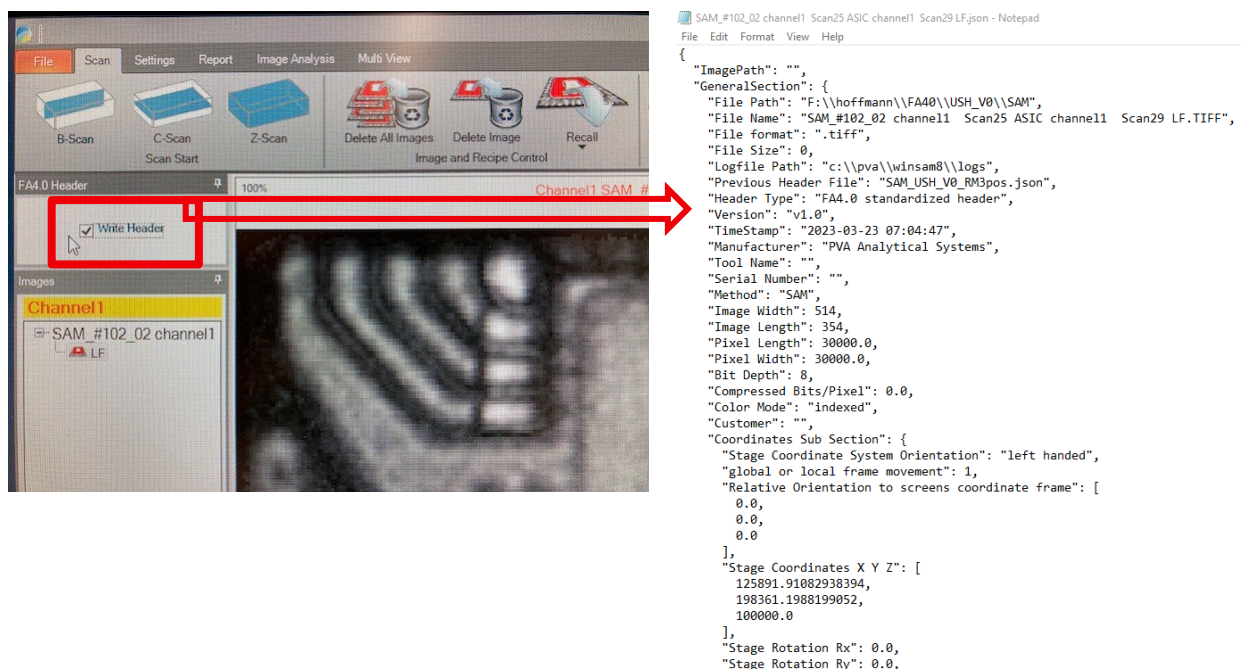


Abb. 2.1.23.: SAM-Aufnahme der zu untersuchenden Probe (Bild links), Koordinate des Bildmittelpunkts der SAM-Aufnahme im json file (Bild rechts)

Geplante nächster Arbeitsschritte:

Lokalisierung der POIs am SAM im nächsten Arbeitsschritt Laserpräparation

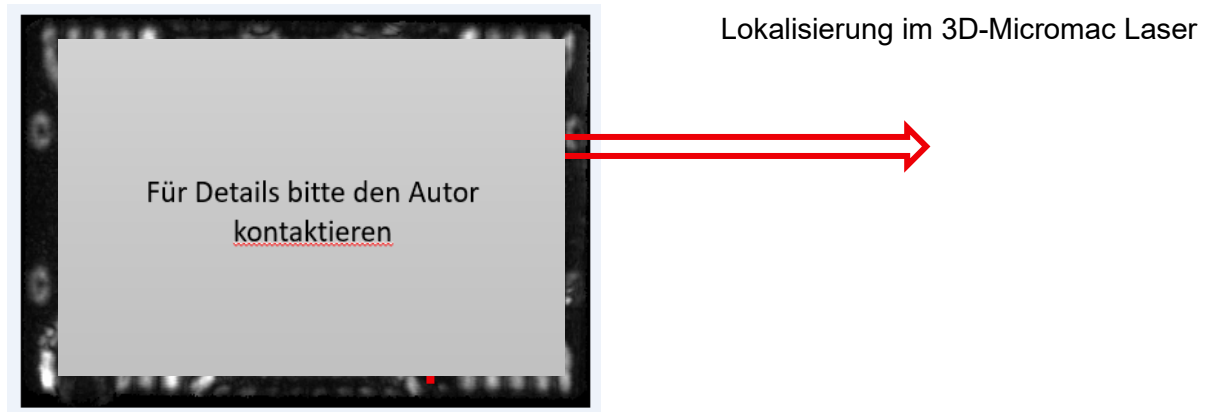


Abb. 2.1.24: in Planung: POI im SAM-Bild (Bild links) und Navigation im Micromac Laser zum POI im SAM (Bild rechts)

Einbindung des Headermakers in den workflow:

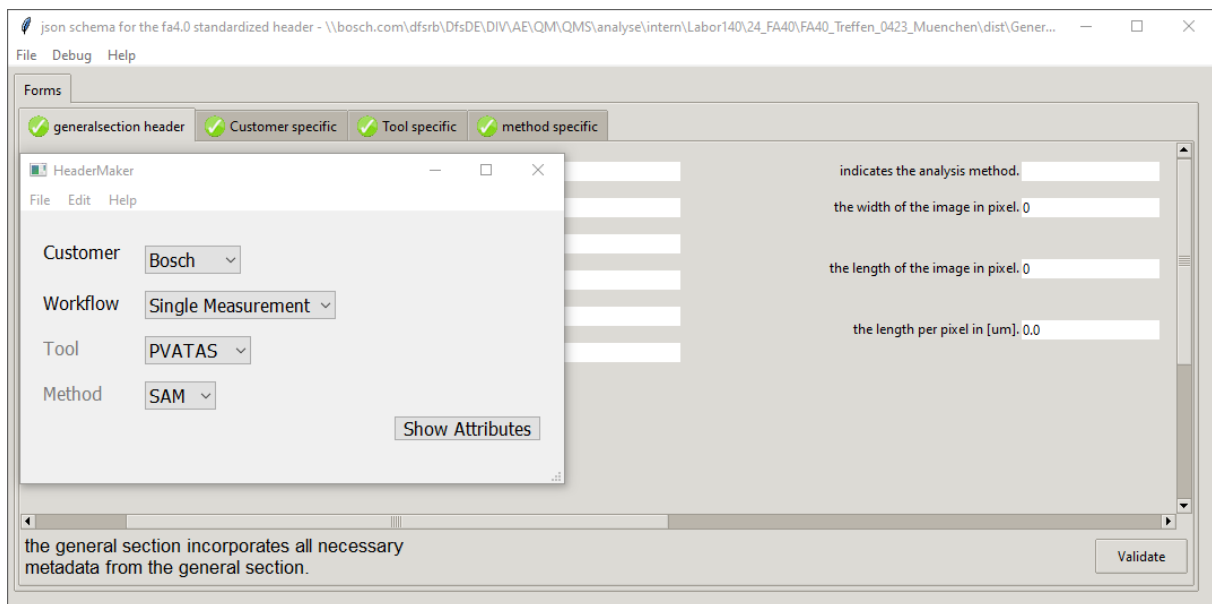


Abb. 2.1.25: Manuelle Pflege der Meta-Daten im Workflow

2.1.8 Stand der Arbeiten am Analyseworkflow mithilfe des Probenträgers

Der Aufbau und die Einführung unserer Analyseworkflow liefert folgende Erkenntnisse:

- Die Einführung von Probenkoordinaten, sowie POIs und ROIs vereinfacht die Navigation auf der Probe mit ausreichender Präzision.
- Korrelative Mikroskopie wird damit entscheidend erleichtert. Bilder können überlagert werden und über die Probenkoordinaten können zukünftig Analysedaten ähnlich google street view zur Verfügung gestellt werden.
- Neben den reinen Ortskoordinaten spielen alle übrigen Daten, die mithilfe des json file übertragen und dokumentiert werden, eine wichtige Rolle auf dem Weg einer workflow basierten Analysedatenerfassung.

Die damit verbundenen zusätzlichen Arbeitsschritte gehören aktuell im realen Laboralltag noch nicht zum Standardvorgehen. Die Voraussetzung dafür werden gerade geschaffen, desweiteren muss an folgenden Themen weitergearbeitet werden:

- Die im einzelnen notwendigen Gerätehersteller müssen die Schnittstelle dafür bereitstellen.
- Die Verarbeitung der json files muss sichergestellt werden.
- Für den Rollout werden alle Mitarbeiter geschult.

2.1.8.1 Workflow Lichtmikroskopie – Rasterelektronenmikroskopie zum Projektende

Für die in unseren Analyseaufträgen sehr häufig verwendeten Analyseschritte Lichtmikroskopie und Rasterelektronenmikroskopie steht ein Workflow bereit. Das Definieren und Anfahren der Messpunkte (POIs) wurde getestet und verfeinert. Die Genauigkeit und Wiederholbarkeit dieser Aktionen wurden systematisch untersucht und verbessert, wodurch wir eine Präzision, in abhängig vom verwendeten Objektiv, im einstelligen µm Bereich erreichen konnten. Die Genauigkeit wurde als ausreichend bewertet und für das gesamte Vorgehen wurde eine Anweisung verfasst. Sie kann als Schulungsunterlage verwendet werden.

Zur Anwendung kommt der Workflow bei der Untersuchung von MEMS Strukturen, bei der über 100 Messpunkte angefahren und mit dem REM dokumentiert werden müssen. Die vorangegangene optische Inspektion mit dem Lichtmikroskop wird dazu verwendet die eigentlichen Messpunkte am REM zu definieren, damit diese schneller gefunden und angefahren werden können.

2.1.8.2 Workflow Ultraschallmikroskopie – Laserpräparation zum Projektende

Im diesem zweiten Workflow, den wir auch maßgeblich weiterentwickelt haben, können die Referenzmarken auf dem Universalprobenträger per Sequenzscan automatisiert angefahren und die Bildkoordinaten abgespeichert werden. Die WINSAM8 Software von PVA Tepla bietet darüber hinaus die Möglichkeit das json file mit den notwendigen Informationen zu generieren und herauszuschreiben. Das Einlesen dieser Informationen am Laser steht aktuell leider noch nicht zur Verfügung. Letzte Details konnten mit dem Gerätehersteller final geklärt werden, so dass wir sehr zuversichtlich sind, diesen wichtigen Präparationsschritte bald durchführen zu können. Nach dem Befundungsschritt am SAM und der Lokalisierung der Schadstelle wird es möglich, mithilfe des json files präzise die darüber definierte Stelle

für einen Laserschnitt anzufahren und durchzuführen. Die einzelnen technischen Schritte dafür sind (analog Infineon workflow SAM - FIB):

- **SAM:**
 - Einmessen der 3 Referenzmarken (RM) per Sequenzscan
 - Eigentliche Messung am Bauteil und Suche nach Auffälligkeiten
 - Messung der Auffälligkeit, POI ist dabei in der Bildmitte, Generieren des json files für diese Messung, über ‚write header in der WINSAM8‘ zusätzlich zum SAM-TIFF Bild
- **Zwischenschritt / Headermaker:**
 - Einlesen des SAM-TIFF Bildes und des zugehörigen json files
 - Grafisches Festlegen von POIs und ROIs im Bild sowie der gewünschten Schnitteben für den folgenden Schritt Laserpräparation
- **Laserpräparation:**
 - Einmessen der 3 Referenzmarken (RM) auf dem Probenräger
 - Einlesen des SAM-TIFF Bildes und des zugehörigen json files
 - Koordinatentransformation zum Anfahren der POIs und ROIs, sowie der gewünschten Schnitteben
 - Durchführung der eigentlichen Präparation
 - Herausschreiben eines neuen json files nach Laserpräparation zur Dokumentation und
 - Weiterführung des workflows für den nächsten Schritt

2.1.8.3 Generelles Fazit zum Probenrägersystem mit json file (digitalem Zwilling)

Das einheitliche Probenrägersystem reduziert die Rüstzeiten innerhalb des workflows, beim Übergang zum nächsten Analysetool und bildet das Koordinatensystem für Proben und Messpunkte. Es erleichtert das Anfahren und Wiederauffinden bestimmter Punkte (POIs) und gibt den Messdaten einen Koordinatenpunkt im Analyseuniversum.

Die Verknüpfung dieser Messkoordinaten mit vielen weiteren Meta-Daten im json file zum digitalen Zwilling eröffnet zahlreiche weitere Möglichkeiten, die wir uns damit erschließen bzw. die wir mit viel geringerem Aufwand durchführen können:

Trotz all dieser Möglichkeiten stehen uns noch weitere Aufgaben auf verschiedenen Ebenen bevor:

- Rollout innerhalb unserer Abteilung weiter voranbringen
- FA40 Konzept bei Bosch in die Breite tragen und für weitere Rollouts in anderen Labors sorgen
- Bei Geräteneuanschaffungen den Toolherstellern die Kompatibilität mit FA40 als Anforderung ins Lastenheft schreiben (mechanische Schnittstelle zum Probenräger (CAD), Lesen und Schreiben des json files gemäß Definition)
- Mitarbeit in der Organisation zur Standardisierung des FA40 Konzept in der SEMI Organisation

Die Ergebnisse von FA40 waren so überzeugend, dass wir an all diesen Punkten mit viel Engagement weiterarbeiten.

Aufgabe 2.2: Datenbank und Definition von Schnittstellen

Aufgabe 2.2 und 2.3 sind wechselseitig stark voneinander abhängig. Deshalb haben Bosch und Infineon beide Aufgaben in gemeinsamen Meetings gleichzeitig bearbeitet. Die Ergebnisse werden aufgrund der engen Verzahnung auch gebündelt dargestellt. Während der kompletten Projektlaufzeit hatten wir in dieser Aufgabe eine besonders enge Zusammenarbeit mit dem WP 2.1.

2.2.1 Stand der Technik

Beschreibung der vorhandenen Technik, Datenbanklösungen

Bereits vorhandene IT-Systeme sollen weiterhin genutzt werden. Deswegen wurde in diesem Aufgabenpaket die Idee entwickelt, dass Applikationen über eine API auf das vorhandene Datenbanksystem zugreifen können.

In diesem Aufgabenpaket wurde die Spezifikation für eine solche API entwickelt, um die Anbindung der bereits vorhandenen IT-Systeme zu nutzen. Eine App soll mit dem existierenden IT-System über die App-API kommunizieren können.

Die Spezifikation der App-API soll im ersten Schritt zu einer „homogeneren Datenbanklandschaft“ zwischen den teilnehmenden Firmen führen. Die Abb. 2.2.1 zeigt die prinzipielle Idee der App-API. Das Datenbanksystem im inneren Bereich ist die existierende Datenbanklandschaft bei den einzelnen Firmen. Die Applikations-App baut die Verbindung zum Datenbanksystem auf. Geplant ist für jedes Tool eine spezifische App. Der Datentransfer kann auf zwei Wegen erfolgen: Die Datenbank nutzen oder die Benutzung eines Headers mit den erzeugten Daten.

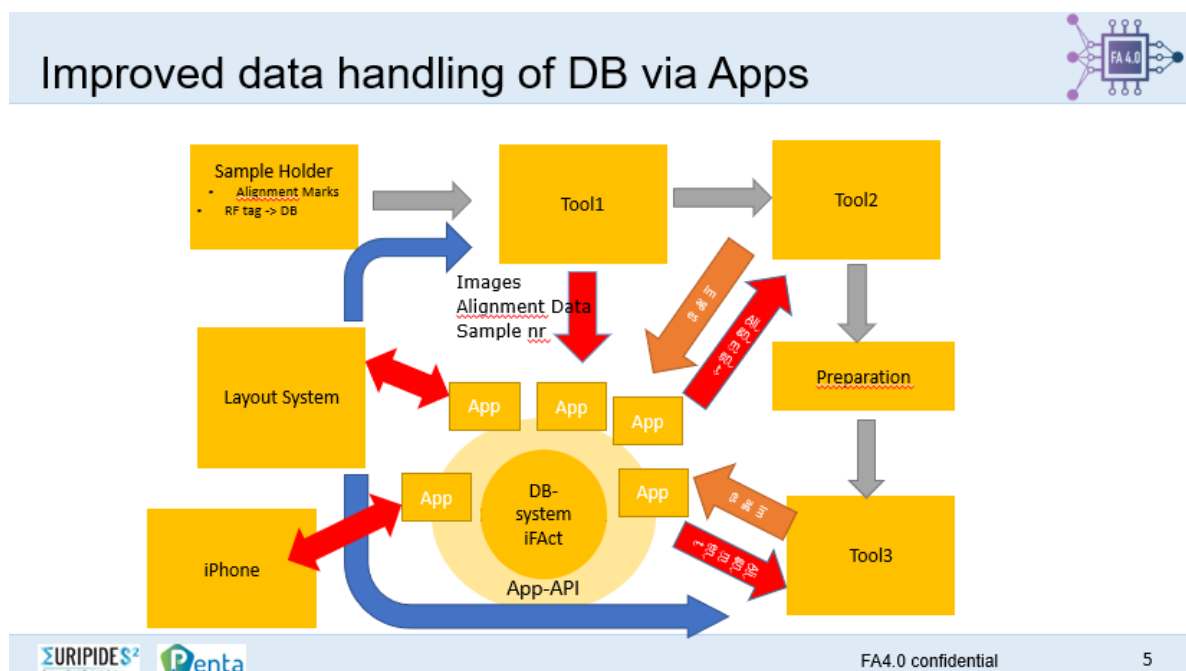


Abb. 2.2.1 Übersicht der App-API und ein möglicher Anwendungsfall

2.2.2 Definition der App-API

Vom vorhandenen IT-System zur App-API

Die vorhandenen IT-Systeme der einzelnen Firmen und Institute wurden erfasst. Die Systeme sind komplett unterschiedlich, allerdings kann man doch Gemeinsamkeiten erfassen:

- Hierarchie der einzelnen Aufgaben – Aufgabe/Technik – Probe
- Ordner auf den Netzlaufwerken für KI-Applikationen
- Individuelles Design der IT-Systeme

Aus diesen Punkten heraus ergibt sich, dass es nicht möglich ist die existierenden IT-Systeme zu verändern. Es wurde beschlossen die vorhandenen IT-Systeme zukunftssicher und KI-auswertefähig zu machen.

Beschreibung der App-API

Eine App in diesem Kontext ist eine Softwareapplikation, die während eines Arbeitsvorgangs zur Fehleranalyse mehrere Aspekte bearbeiten kann, wie z.B. Verbindung zum IT-System, Verarbeitung der erhaltenen Rohdaten. Eine API ist ein standardisiertes „Application Programming Interface“, das die Verbindung zum IT-System und den Datenaustausch realisiert. Aufgrund der unterschiedlichen IT-Systeme ist es notwendig, ein gemeinsames Interface zu definieren, um die Verbindung zu den IT-Systemen zu gewährleisten. Auf der anderen Seite soll das App-Interface eine standardisierte Struktur mit verschiedenen Apps zur Verfügung stellen. Diese App kann durch die Halbleiterhersteller, Gerätehersteller, Universitäten und Drittlieferanten entwickelt werden. Während die App-API standardisiert ist, muss die Verbindung zum geschützten IT-System durch die Halbleiterhersteller individuell realisiert werden.

Ein Beispiel eines Anwendungsfalles:

- Verbindung zum Layoutsystem für die interne Navigation innerhalb der Halbleiterhersteller
- Bildanpassung für einen nahtlosen und „einfachen Überlapp“ der Bilder aus verschiedenen Quellen
- Abwicklung/Übergabe der Messungen des Datenprocessings von einem Tool zum nächsten Tool
- Spezielle Visualisierung der Rohdaten sollen mit einer maßgeschneiderten App realisiert werden

Als reales Anwendungsbeispiel wurde ein Workflow der Fehleranalyse aus Arbeitspaket 5.3 herangezogen.

In diesem Beispiel wird eine Oberflächenprofilmessung eines Halbleiterproduktes aufgenommen unter Benutzung eines Profilometers vom Projektpartner Cyber Technologies oder eines Scanning Acoustic Microscopes (SAM) vom Projektpartner PVA TePla.

Der aufgenommene Datensatz wird dem geschützten IT-System über die App oder direkt über die implementierte App-API der Anwendungssoftware von PVA TePla oder Cyber Technologies zur Verfügung gestellt.

Im nächsten Schritt übergibt die Kommunikations-App die Rohdaten aus dem Vorgängerprozess und führt eine Datenumwandlung für den nächsten Schritt durch. Die Weiterverarbeitung erfolgt aufgrund der realen Topographie aus dem Profilometer. Der weitere Fräsprozess aus der realen Topographie hat das Ziel einer homogenen Form der Siliziumdicke. Dies ist ausschlaggebend für den nächsten Analysenprozess. Das Frästool des Projektpartners Kern liest den modifizierten Datensatz ein und führt den weiteren Fräsprozess danach aus.

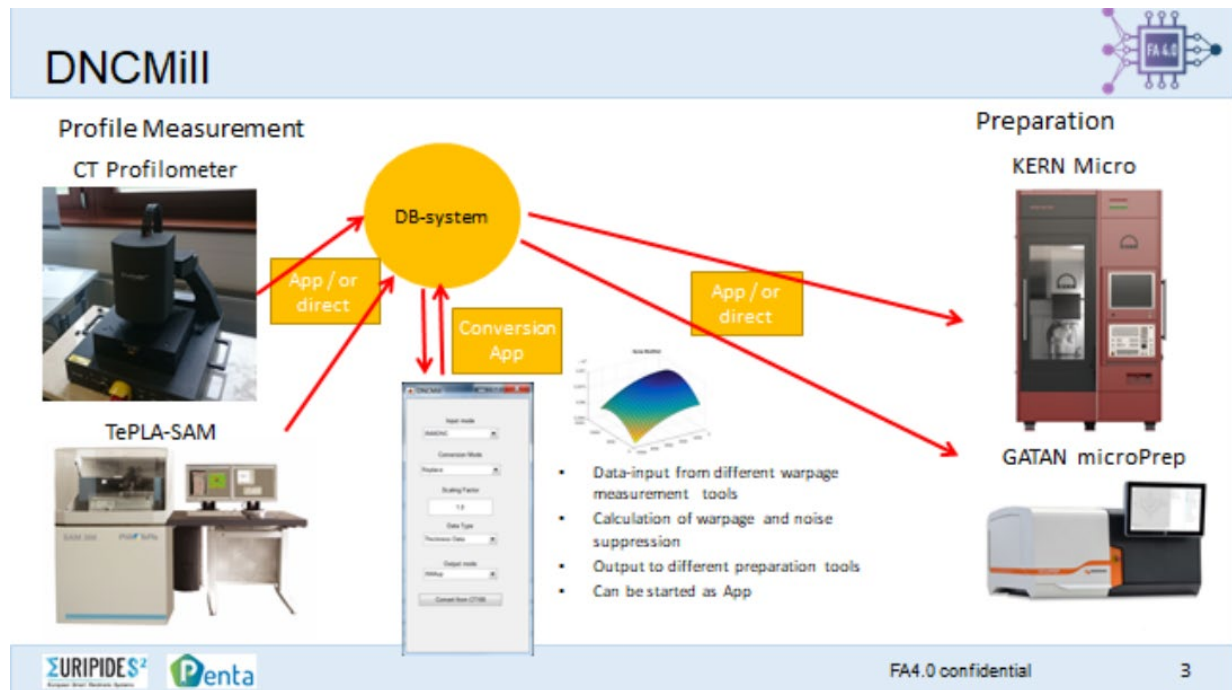


Abb. 2.2.2 Schematischer Workflow aus Task 5.3

Spezifikation der App-API

Als nächsten Schritt wird die Definition der App-API vorgenommen. Eine Liste von generellen Eigenschaften der App-API wird hier aufgelistet:

- Die App kann über einen Software-Knopf, Barcode oder Scanner-click gestartet werden
- Die App bekommt Zugang zu den geschützten IT-Systemen der Firmen beim Start
- Die App tauscht alle notwendigen Daten über die API aus (upload/download)
- Zugangslevel der App: Job (Basissicherheit), Multijob (höhere Sicherheitsstufe)
- Appstore / Updates über die geschützten IT-Systeme möglich
- Feedback zur Schnittstellenentwicklung
- Kunden können ebenfalls Apps starten um einen Analysedatenaustausch möglich zu machen
- Komplette Dokumentation der Analysen innerhalb der Datenbank
- Gemeinsame Entwicklung der Apps innerhalb des FA4.0 Projektes
- Möglichkeit für die Zulieferer auf das Datenbanksystem zuzugreifen über die App (KI-tools für Bilderkennung)
- Möglichkeit von Analysen über die Datenbanken der Halbleiterhersteller

2.2.3 Datenheader und Spezifikation

Um einen produktiven Anwendungsfall mit der App-API zu ermöglichen - mit Fokus auf künstliche Intelligenz - muss ein Datenheader eingeführt werden. Der Datenheader muss standardisiert sein, um eine einfache Verbindung zu den Halbleiterhersteller Firmen zu gewährleisten. Die Entwicklung des Headers ist abgeschlossen und soll nach Projektende auf GIT-Hub verfügbar gemacht werden.

Hier die generellen Eigenschaften des Headers:

- Informationsaustausch zwischen den Halbleiterfirmen über die Analysenmethoden und Analysengeräte
- Standardisierte Headerbeschreibung:
 - Allgemeiner Abschnitt
 - Method specific section
 - Tool specific section
 - Customer specific section

Ein Beispiel eines Headers:

```
FA40 %Identifier
fileheaderlen=71; %fileheader length of file
headertype=1; %standardized Type of Header format. Number defines how the data file
looks like
version=1; %Version
Timestamp; %Start or End timestamp
Manufacturer;
Toolname=string; %Model name
SerialNumber;
%Block for standardized Header according Header type "1"
subheaderlen=71; %headerlänge of standardized header
%Example for data of Profilometer
PixelWidth=fread(fid,1,'int');
PixelHeight=fread(fid,1,'int');
ResolutionX;
ResolutionY;
CoordinateOrientation; %8 possible incl back/fronside, discussion if necessary or
standardized
Offset(x,y,z); %depending on fiducials of sample holder
SequenceOfDataStorage; %define how data is stored, w.r.t. x,y; discussion if
necessary or standardize
Accuracy(x,y,z);
%Block for Tool specific Header according Header type from above
subheaderlen=71; % fileheader length of Tool spezific Header
headerIdentifier; %includes version & subheader type for tool specific header
Sensortype(param1,param2);
HealthParam(p1,...,Pn);
...
%Block for Customer specific Header according Header type. E.g. Customer Logistics
systems connection
subheaderlen=71; % fileheader length des Customer specific
headerIdentifier; %includes version & subheader type for customer specific header
Sampleorientation; %e.g. frontside, backside. For orientation "F"
Analysisnumber;
SampleID;
CustomerlogisticSystemID; %e.g. Task ID
CustomerITSYSTEMPath; %Filesystem path
CloudStorageID;
LeoToolname;
```


Der Headermaker (Umsetzung über WP-Mitglied S. Kamm, Uni-Stuttgart) erstellt über eine menügeführte Oberfläche das oben als Beispiel gezeigte JSON-file.

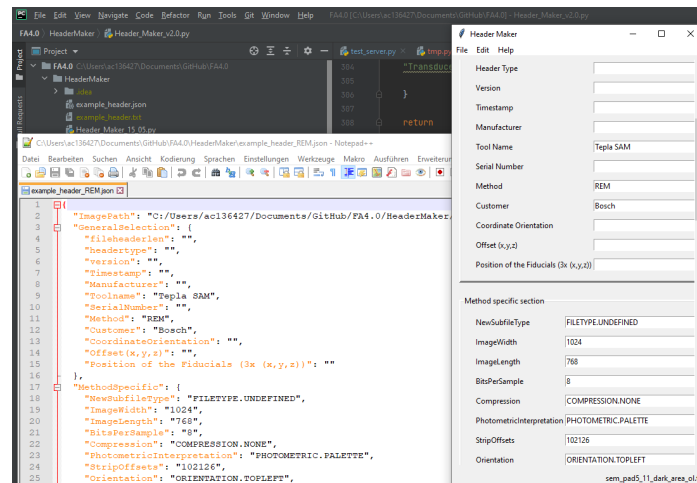


Abb. 2.2.3 Headermaker 2.0

Hierbei wurde der Workflow aus WP 5.3 herangezogen und im Headermaker umgesetzt. Ziel hierbei ist es, nach erstmaliger Erstellung eines Headerfiles mit dem Headermaker eine Übergabe an das nächste Analysengerät im Workflow zu realisieren. Dies geschah in Abstimmung mit den Geräteherstellern im Projekt. Das heißt, die Toolhersteller „implementieren“ das Headerfile in ihre Software und realisieren hiermit die Lesbarkeit bzw. die Übergabe der erzeugten Analysenschritte. Im ersten Schritt wird dies erst einmal manuell realisiert werden – Ziel soll es aber sein, den Workflow automatisiert ablaufen zu lassen.

Jedes Analysengerät muss vor Beginn der Analyse die „Justagemarken“ auf dem universalen Probenhalter aus WP 2.1 ermitteln und im Headerfile ablegen bzw. einen Abgleich vornehmen. Um möglichst viele verschiedene Workflows für die Zukunft zu realisieren, wurde beschlossen, ein zweites Koordinatensystem einzuführen. Es gibt dann neben dem Koordinatensystem für den Probenhalter ein weiteres Koordinatensystem für die Probe. Dies hat den Vorteil, dass man die Probe innerhalb des Workflows entfernen kann. Die Umsetzung findet aktuell im Headermaker statt und zur Anwendung kommt es im Pilotversuch beim Projektpartner Infineon.

Durch den Headermaker bzw. das Headerfile und nun auch des universalen Probenhalters war es möglich, den Workflow als Pilot beim Projektpartner Infineon umzusetzen und auf der Test-Plattform zu testen. Das Headerfile bzw. der Headermaker sind hierbei sehr flexibel in der Anpassung bzw. auch neue Workflows sind möglich.

Die stand-alone JSON Header Reader / Writer Software wurde weiter überarbeitet und an die Projektmitglieder verteilt. Die Gerätehersteller PVA TePla und Tescan haben die Gerätesoftware soweit überarbeitet, dass der Datenheader gelesen oder geschrieben werden kann.

Aufgabe 2.3: Digitale Zwillinge

Siehe Aufgabe 2.2

2.3 ARBEITSPAKET 3: ENTWICKLUNG VON ALGORITHMEN AUF DEM ANSATZ DER KÜNSTLICHEN INTELLIGENZ UND DES MASCHINELLEN LERNENS FÜR DIE ERWEITERTE SIGNALVERARBEITUNG ZUR DEFECTIDENTIFIKATION IN DER FEHLERANALYSE

Aufgabe 3.3: Bilderkennung auf Basis des maschinellen Lernens

Im Rahmen dieses Arbeitspaktes wurden mehrere unterschiedliche Anwendungsfälle der Bilderkennung bearbeitet. Der Fokus lag dabei vor allem auf Problemstellungen des Supervised Learnings, da diese Methoden die genauesten und zuverlässigsten Ergebnisse liefern. Der Ausgangspunkt hierfür sind allerdings ausreichend genau gelabelte Daten. Die Qualität des Labelns ist dabei sehr wichtig, da die Machine-Learning-Modelle keine verlässlichen Ergebnisse liefern können, wenn sie mit ungenau gelabelten Daten trainiert werden. Dementsprechend wurde vom Projektpartner Matworks während des ersten Projektjahres ein Workshop zum Thema Labeling durchgeführt. Dabei wurden verschiedene Labeling-Tools vorgestellt, die als Open Source Pakete verfügbar sind. Dennoch steckt in der Erzeugung von gelabelten Datensätzen nach wie vor ein enormer Aufwand. In der Literatur werden unterschiedliche Aufgabenstellungen der Bildauswertung unterschieden, die in Abbildung 3.3.1 dargestellt sind.

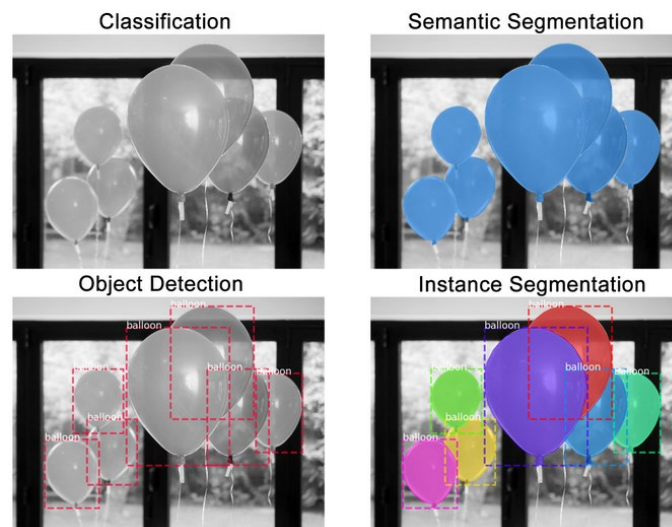


Abb. 3.3.1 Aufgabenstellungen der Bildauswertung [1]

Für jede dieser Aufgabenstellungen eignen sich bestimmte Architekturen von neuronalen Netzen. Die Einordnung der im Projekt bearbeitenden Anwendungsfälle erfolgt im Folgenden:

Es wurden mehrere Anwendungsfälle der semantischen Segmentierung bearbeitet. Dazu zählen die „Auswertung der IMC-Bilder“ und die „Crateringtest-Bildauswertung“. Die semantische Segmentierung ist dadurch gekennzeichnet, dass jedem Pixel genau eine Kategorie zugeordnet wird. Zusätzlich wurde der Anwendungsfall „Bestimmung der Bondballpositionen auf Pad“ bearbeitet, bei dem es sich um eine Problemstellung aus dem Bereich Instance Segmentation handelt. Dabei werden die Pixel einzelner Objekte segmentiert, wobei ein Pixel auch Teil von mehreren Objekten sein kann. Bei dem

Anwendungsfall „Infrarot-Bildauswertung von mikromechanischen Defekten“ wurden dagegen vor allem Methoden des Unsupervised Learnings angewendet.

3.3.1 Auswertung sog. IMC-Bilder

Im Rahmen von Bonddrahtuntersuchungen wird die Anbindungsfläche eines Bondballs anhand des Flächenanteils der intermetallischen Phase (IMC: Intermetallic Compound) charakterisiert. Zu diesem Zweck wird ein KOH-Test durchgeführt, d.h. die Padmetallisierung aus Aluminium wird selektiv mittels KOH gegenüber der AuAl-IMC gelöst. Dann kann die Unterseite des Balls lichtmikroskopisch untersucht werden.

Die erzeugten Bilder werden anschließend ausgewertet. Das bedeutet, es wird der Flächenanteil der intermetallischen Phase am Gesamtbondball abgeschätzt. Wenn dieser Anteil einen Schwellwert übersteigt, wird die Verbindung als gut klassifiziert. Um diese ungenaue und aufwändige Auswertung zu verbessern, sollte dieser Vorgang soweit wie möglich automatisiert werden.

Im Rahmen des Projekts wurde von Bosch ein Datensatz bestehend aus 75 Bildern mit zugehörigem RGB-Bild Labeln erzeugt. Die Label wurden sowohl teilautomatisiert mit Hilfe von ImageJ als auch mit Hilfe eines Matlab-Programms erzeugt. Dieser Datensatz wurde vom Projektpartner Matworks genutzt, um verschiedene Deep Learning Modelle zu trainieren. Die besten Ergebnisse erreicht eine U-Net-Architektur, wobei ein IOU-Score (Intersection over Union) von ca. 95% erreicht wurde. Das bedeutet, das Modell war in der Lage 95% der Pixel von Testbildern korrekt zu klassifizieren. Die Ausgabe des Modells ist in Abbildung 3.3.2 dargestellt: Das linke Bild entspricht dem Ursprungsbild, für das der Algorithmus jedes Pixel einer der drei Klassen Gold, Intermetallic bzw. Hintergrund zuordnen soll.

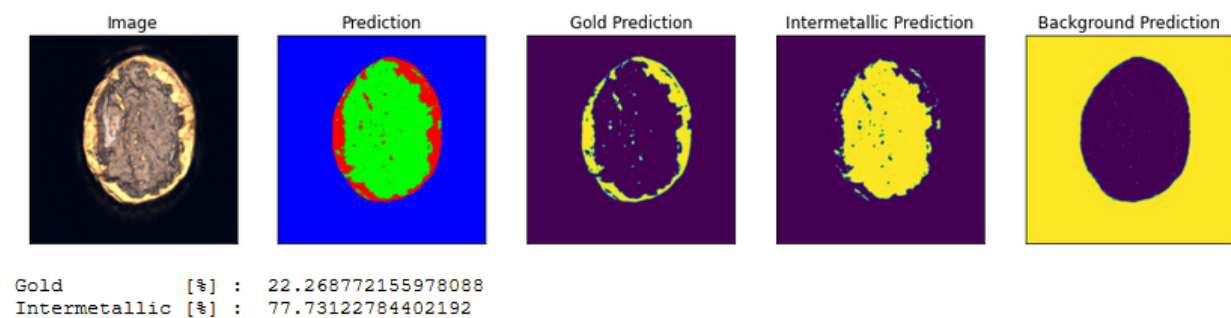


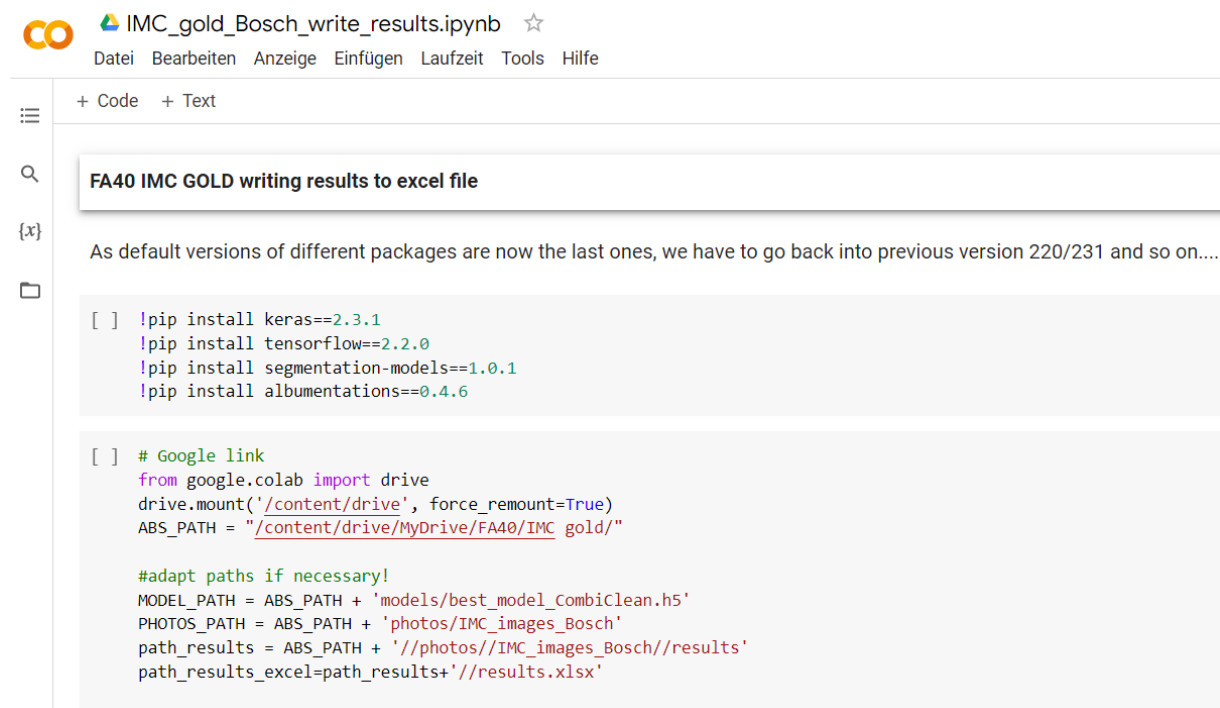
Abb. 3.3.2 Ergebnis des Jupyter-Notebooks

Das zweite Bild entspricht der Gesamtvorhersage des Modells, wobei der Hintergrund blau, der Goldbereich rot und der Intermetallic-Bereich grün dargestellt sind. Danach folgen 3 Bilder in einer One-versus-All-Darstellung. Das bedeutet, die Modellvorhersage einer einzelnen Klasse (gelb) wird dem Rest (schwarz) gegenübergestellt. Wie zu erkennen ist, liefert das Modell sowohl qualitativ als auch quantitativ gute Ergebnisse.

Im Rahmen eines Projektmeetings wurden die guten Ergebnisse des IMC-Tools sowohl von ST Microelectronics als auch von Bosch durch Anwenden des Programms auf neue Testbilder bestätigt. Dementsprechend hat sich die U-Net-Architektur des neuronalen Netzes bewährt. Das Konsortium einigte sich darauf, dass Modell kontinuierlich verbessern zu

wollen, indem das Modell auf neue Problemstellungen und Bilder angewendet wird. Diese Bilder können Aufnahmen desselben Bondballs wie bisher sein.

Es können allerdings auch Aufnahmen von Bondballs anderer Werkstoffe wie z.B. Kupfer verwendet werden. Zusätzlich besteht die Möglichkeit, statt Lichtmikroskop-Aufnahmen andere Bilder wie z.B. Rasterelektronen-Mikroskop- oder Röntgenmikroskop-Aufnahmen einzubinden. Je stärker die Bilder vom ursprünglichen Trainingsdatensatz abweichen, desto ungenauer wird die Modell-Vorhersage sein. Daher ist es wünschenswert, dass ein erneutes Training mit zusätzlichen bzw. anderen Bilder erfolgen kann. Um dies realisieren zu können, hat sich Matworks bereit erklärt, den Projektpartnern Infineon, Bosch und STM ein Jupyter-Notebook zur Ausführung des Modelltrainings zur Verfügung zu stellen. Um den Datenaustausch und das gemeinsame Training von Modellen zu ermöglichen, wurde auf Vorschlag von ST Microelectronics ein gemeinsamer Google Colab Account eingerichtet. In Abbildung 3.3.3 ist ein Auszug des Jupyter-Notebooks zur Ausführung des IMC-Modells dargestellt. Die Colab Plattform bietet die Möglichkeit, diese Notebooks auf Google-Servern auszuführen und ermöglichte dadurch eine komfortable Zusammenarbeit zwischen den Projektpartnern. Sowohl ST Microelectronics als auch Bosch haben bereits Bilder auf Colab hochgeladen und Ergebnisse erzeugt.



```
IMC_gold_Bosch_write_results.ipynb ☆
Datei Bearbeiten Anzeige Einfügen Laufzeit Tools Hilfe

+ Code + Text

FA40 IMC GOLD writing results to excel file

As default versions of different packages are now the last ones, we have to go back into previous version 220/231 and so on...

[ ] !pip install keras==2.3.1
    !pip install tensorflow==2.2.0
    !pip install segmentation-models==1.0.1
    !pip install albumentations==0.4.6

[ ] # Google link
    from google.colab import drive
    drive.mount('/content/drive', force_remount=True)
    ABS_PATH = "/content/drive/MyDrive/FA40/IMC gold/"

    #adapt paths if necessary!
    MODEL_PATH = ABS_PATH + 'models/best_model_Combiclean.h5'
    PHOTOS_PATH = ABS_PATH + 'photos/IMC_images_Bosch'
    path_results = ABS_PATH + '//photos//IMC_images_Bosch//results'
    path_results_excel=path_results+'//results.xlsx'
```

Abb. 3.3.3 Auszug des Jupyter-Notebooks zur Ausführung des IMC-Modells auf Google Colab

Neben der Weiterentwicklung und Verbesserung der Modellperformance steht für Bosch vor allem die Anwendbarkeit der Machine Learning Tools im Fokus. Personen, die beispielsweise die IMC-Auswertungen in der Praxis durchführen, haben häufig wenig Bezug zu Python, Programmierung oder Machine Learning. Für einen erfolgreichen Transfer der entwickelten Tools an die Endnutzer ist es daher notwendig, die Hürden für den Einsatz möglichst niedrig zu gestalten.

Um dieses Problem zu lösen, wurde für das IMC Machine Learning Tool eine einfache grafische Benutzeroberfläche (GUI: Graphical User Interface) erstellt. Hierfür wurde die Python-Bibliothek Tkinter verwendet. Anschließend wurde mit Hilfe der Python-Bibliothek pyinstaller eine ausführbare Exe-Datei des Programms erzeugt. Beim Start dieser Exe-Datei erscheint die in Abbildung 3.3.4 dargestellte GUI.

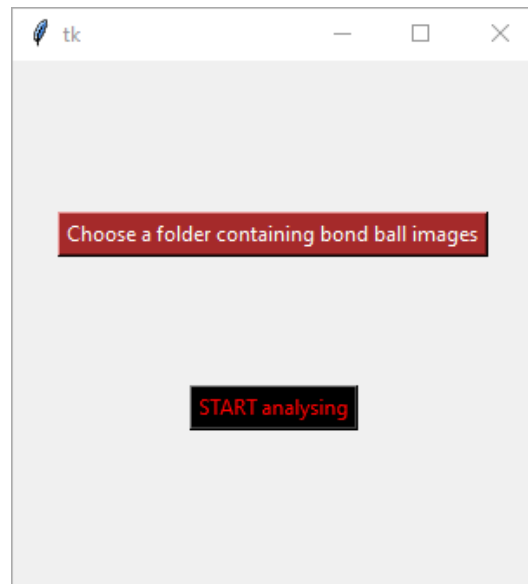


Abb. 3.3.4 Grafische Benutzeroberfläche des Programms zur Auswertung der IMC-Bilder

Diese besteht aus zwei Buttons und ist damit sehr einfach aufgebaut. Zur Analyse von neuen Bildern klickt der Nutzer zunächst auf den oberen rötlich hinterlegten Button mit der Aufschrift „Choose a folder containing bond ball images“. Anschließend wird über einen Browser das Verzeichnis ausgewählt, in dem die auszuwertenden IMC-Bilder liegen. Durch Klicken auf den „START analysing“- Button werden die Bondballs analysiert und ausgewertet. Die Ergebnisse werden als RGB-Bilder in das „results“-Unterverzeichnis im Verzeichnis der Bilder abgespeichert.

In Abbildung 3.3.5 ist ein Bild des Bondballs mit entsprechendem Ergebnis-RGB-Bild dargestellt.

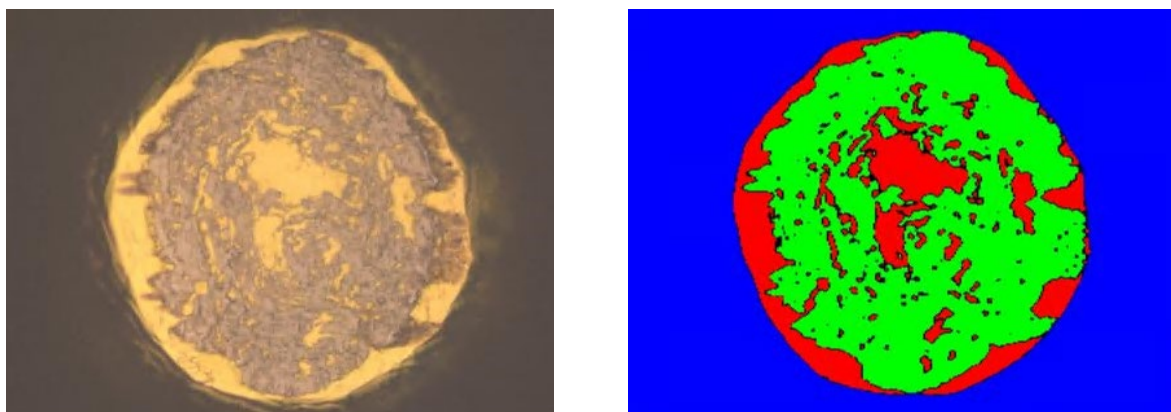


Abb. 3.3.5 Ergebnis des IMC-Programms: Ursprungsbild (links), ausgewertetes RGB-Bild (rechts)

Zusätzlich werden die Anteile von Gold bzw. Intermetallic am Bondball aller ausgewerteten Bilder in einer Excel-Tabelle abgespeichert. Die Tabelle ist in Abbildung 3.3.6 dargestellt.

Name	Gold [%]	Intermetallic [%]
IMC_0001_o.jpg	27.6	72.4
IMC_0004_o.jpg	25.1	74.9
IMC_0010_o.jpg	21.3	78.6
IMC_0011_o.jpg	18.7	81.3

Abb. 3.3.6 Ergebnis-Tabelle aus dem IMC-Tool

Ein Vorteil des IMC-Exe-Programms besteht darin, dass die trainierten Gewichtungen des neuronalen Netzes in einer externen hdf5-Datei gespeichert werden. Folglich muss nach einem erneuten Training des Modells z.B. mit Hilfe der beschriebenen Colab-Trainingspipeline lediglich das File mit den Gewichtungen ersetzt werden.

Abschließend wurde die Genauigkeit des Machine Learning Tools mit den bisher verwendeten Analysemethoden verglichen. Zu diesem Zweck wurden vier Bondball-Bilder definiert, deren Intermetallic-Anteil mit drei unterschiedlichen Methoden bestimmt wurde. Das Ergebnis der ersten beiden Methoden (ImageJ und Matlab) ist in der zweiten und dritten Zeile in Abbildung 3.3.7 dargestellt. Diese Methoden basieren darauf, dass entweder für die Grauwerte oder die RGB-Kanäle Schwellwerte festgelegt werden, nach denen Hintergrund, Intermetallic und Gold unterschieden werden. Diese Verfahren sind in der Regel nicht sehr robust. Das bedeutet, die Schwellwerte müssen meistens für jedes Bild individuell angepasst werden. Anschließend wird die Pixelanzahl für die entsprechenden Bereiche bestimmt und daraus der Anteil der Intermetallic am Bondball bestimmt.

Der qualitative Ergebnisvergleich der drei Methoden in Abbildung 3.3.7 zeigt eine gute Übereinstimmung. Bei quantitativer Auswertung des Intermetallic-Anteils (vgl. Abbildung 3.3.8) fällt allerdings auf, dass das ML-Tool im Vergleich zu den konventionellen Analysen etwas höhere Intermetallic-Anteile (ca. 2,5-4%) liefert. Bei genauerer Betrachtung der Bilder in Abbildung 3.3.7 lässt sich die Ursache hierfür erkennen: Im Randbereich der Bondballs sind häufig Artefakte durch die Beleuchtung zu erkennen, die sich vom Goldbereich kaum unterscheiden lassen. Dies führt dazu, dass der Goldbereich am Rand vom ML-Modell tendenziell zu stark abgeschnitten wird. Dadurch wird die Größe des Bondballs unterschätzt. Da die absolute Intermetallic-Fläche bei allen Auswertemethoden vergleichbar ist, ist der Intermetallic-Anteil bei der ML-Auswertung höher. Da die Abweichungen im einstelligen Prozentbereich liegen, ist die Genauigkeit des ML-Tools dennoch ausreichend hoch.

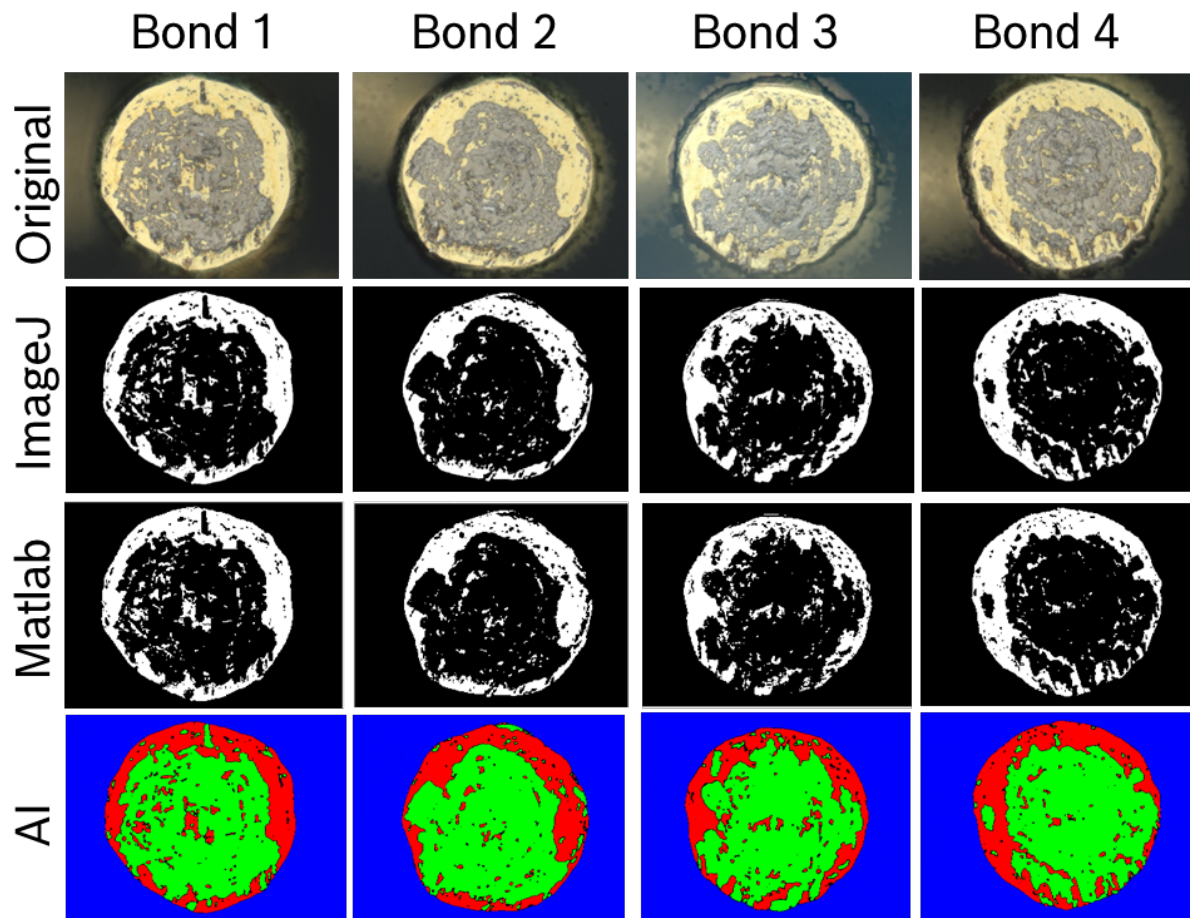


Abb. 3.3.7 Ergebnisvergleich der Auswertemethoden: Originalbilder (1. Zeile), Auswertung mit ImageJ (2. Zeile), Auswertung mit Matlab (3. Zeile), Auswertung mit ML-Tool (4. Zeile)

COMPARISON OF IMAGEJ, MATLAB, AI

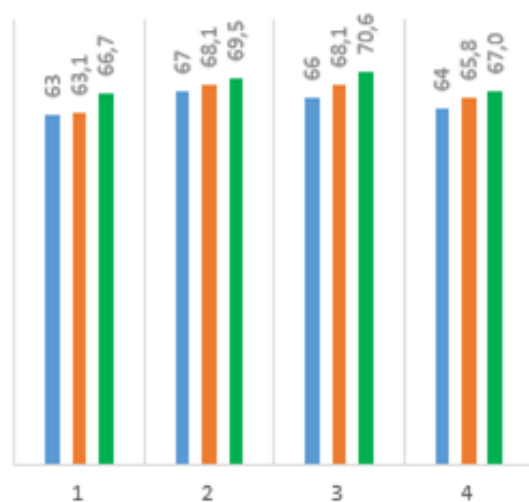


Abb. 3.3.8 Quantitativer Vergleich des Intermetallic-Anteils

3.3.2 Infrarot-Bildauswertung von mikromechanischen Defekten

Für die Detektion von mikromechanischen Defekten in einem Sensor-Bauteil wurde bereits ein Anwendungsfall definiert. Wie in Abb. 3.3.9 zu erkennen ist, sind diese Fehler aufgrund der äußerst feinen Sensorstrukturen auf einem Einzelbild mit bloßem Auge kaum zu erkennen. Dementsprechend können sehr viele unterschiedliche Defekte auftreten. Es ist folglich kaum möglich, einen gelabelten Datensatz mit der notwendigen Varianz an Fehlern zu generieren, so dass das Machine Learning Modell auf andere Defekte verallgemeinern kann. Dementsprechend ist es in diesem Fall sinnvoll, das Problem als ein Anomaly Detection Problem zu behandeln. Diese Probleme zählen zu den unsupervised Learning Methoden und somit ist hier kein Labeln der Daten notwendig.



Abb. 3.3.9: Beispiel von mikromechanischen Defekten in einem Sensor

In Absprache mit dem Projektpartner Matworks wurde zunächst ein Variational Autoencoder trainiert. Hierfür hat Bosch einige wenige Infrarotbilder an den Projektpartner Matworks geschickt. Die ersten Ergebnisse waren allerdings aufgrund des zu kleinen Datensatzes und der äußerst anspruchsvollen Aufgabe unbefriedigend.

Ein weiterer einfacher Ansatz aus dem Bereich der konventionellen Bildanalyse bestand darin, die Defekte in einem Schlechtteilbild durch Subtraktion von einem Gutteilbild sichtbar zu machen. Aufgrund der feinen Sensorstrukturen werden häufig nur Ausschnitte des Bildes untersucht. Dementsprechend bestand die erste Aufgabe darin, den Ausschnitt im Gutteilbild zu finden. Hierfür wurde die Python-Bibliothek OpenCV verwendet. Das Ergebnis ist in Abbildung 3.3.10 dargestellt. Wie zu erkennen ist, kann mit Hilfe von OpenCV der Bildausschnitt zuverlässig gefunden werden.

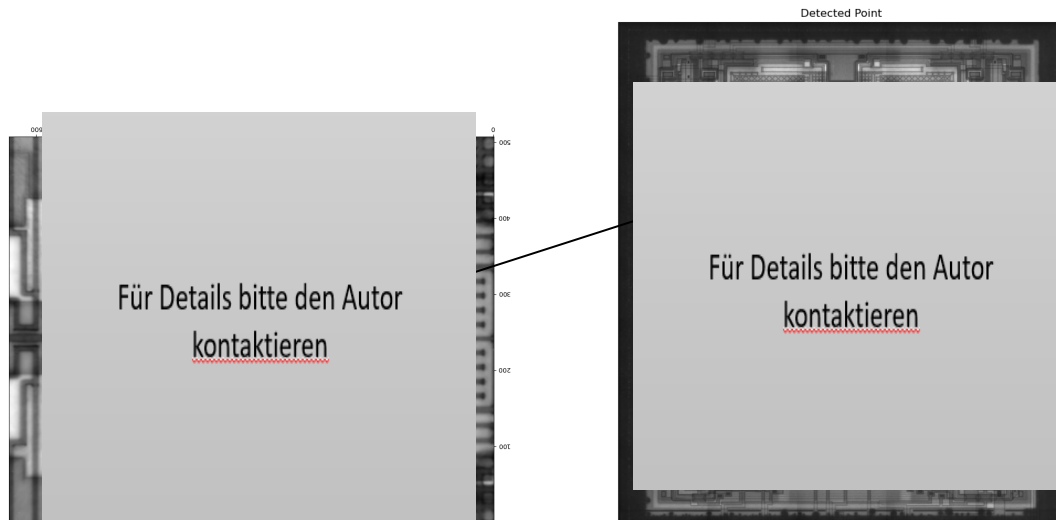


Abb. 3.3.10: Finden eines Bildausschnitts im Gesamtbild

Im zweiten Schritt werden die Grauwerte des Ausschnitts normiert und die Differenz der beiden Bilder berechnet und dargestellt. Das Ergebnis ist in Abbildung 3.3.11 abgebildet. Wie zu erkennen ist, sind die rot markierten Defekte im Differenzbild erkennbar. Allerdings sind sehr viele zusätzliche Artefakte sichtbar. Da die Defekte in diesem Beispiel bereits ungewöhnlich groß sind, ist das Ergebnis unbefriedigend.

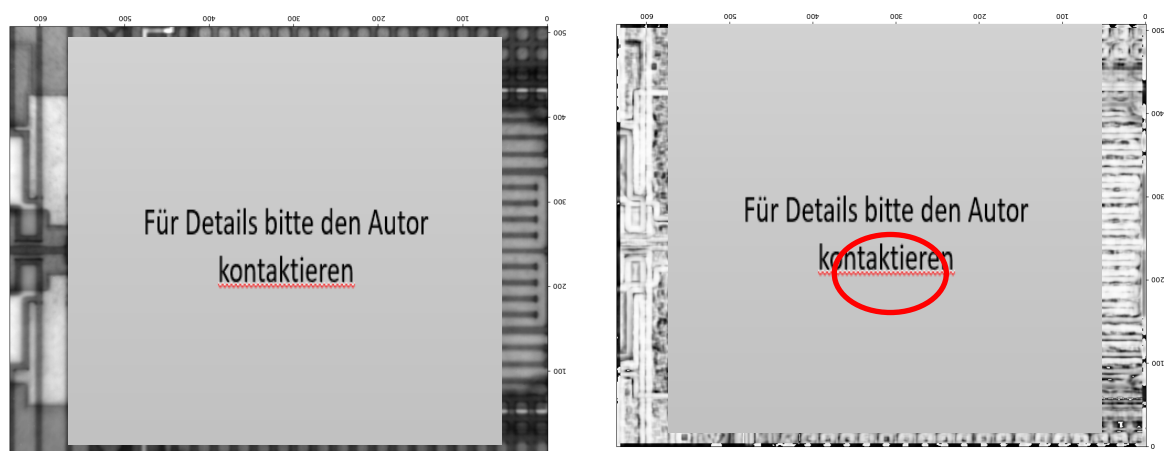


Abb. 3.3.11: Bauteilausschnitt mit Defekten (links), Ergebnis der Differenzbildung: Gutbild wird von Schlechtbild abgezogen (rechts)

Bei Bildern mit Defekten wird die Fokusebene typischerweise auf die Defekte gelegt. Bei defektfreien Bildern wird dagegen auf die Sensorstruktur fokussiert. Aus diesem Grund entstehen bei der Differenzbildung sehr viele Artefakte, die eine klare Abgrenzung der Defekte verhindern. Deshalb werden im nächsten Schritt mehrere IR-Bilder sowohl von Gutteilbildern als auch Schlechtteilbildern erzeugt, deren Fokusebenen variieren. Auf dieser Datenbasis werden dann weitere Machine Learning Modelle und auch klassische Bildanalyse-Methoden evaluiert.

3.3.3 Crateringtest-Bildauswertung

Bei Crateringtests müssen optische Aufnahmen von Bondpads in unterschiedlichen Stadien nach verschiedenen chemischen Präparationsschritten gemacht werden. Die manuelle Durchführung ist ein zeitaufwändiger Prozess, da je nach Bauteiltyp teilweise mehr als 100 Bondpads angefahren werden müssen. Aus diesem Grund wurde in der Vergangenheit bereits ein teilautomatisiertes Vorgehen etabliert.

Nach jedem chemischen Präparationsschritt wird die Probe dafür unter dem Mikroskop manuell ausgerichtet. Mittels Zeiss Software Zen blue werden anschließend automatisiert alle Bondpads nacheinander angefahren, fokussiert und fotografiert. Dafür muss jedoch vorab eine Liste der Bondpadpositionen für jeden zu untersuchenden Bauteiltyp manuell erstellt werden. Die Erstellung dieser Positionsliste soll nun über eine automatische Bondpaderkennung anhand eines Übersichtsbilds des Bauteils ebenfalls automatisiert erfolgen.

Zur Lösung dieser Aufgabe wurden dem Projektpartner Matworks ein paar Bilder zur Verfügung gestellt, um ein supervised Learning Modell zu trainieren. Wie bei der Analyse der IMC-Bilder liefert eine U-Net-Architektur für semantische Segmentierung sehr gute Ergebnisse, die in Abbildung 3.3.12 dargestellt sind. Wie zu erkennen ist, werden die Bondpads sehr genau segmentiert. Im zweiten Schritt wird auf Basis dieser Segmentierung eine Positionsliste der einzelnen Bondpads angefertigt. Zusätzlich können Referenzpunkte auf der Probe definiert werden, um die Ausrichtung zu definieren.

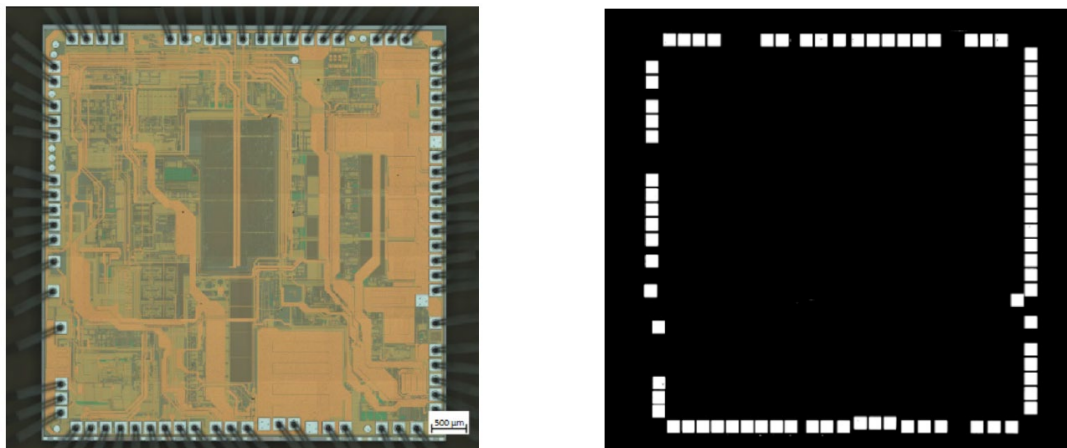


Abb. 3.3.12: Bondpaderkennung: Originalbild (links), Binärbild mit erkannten Bondpads (rechts)

Das Programm wurde vom Projektpartner Matworks in einem Makro in der Zeiss Software Zen Core umgesetzt und wurde in die Bosch Workflows eingebunden.

3.3.4 Bestimmung der Bondballpositionen auf Pad

Um die Übertragbarkeit und Anwendbarkeit der im Projekt bearbeiteten Machine- Learning- Methoden zu testen, wurde ein weiterer Anwendungsfall definiert. Die Aufgabenstellung ist in Abbildung 3.3.13 dargestellt. Es handelt sich dabei um Lichtmikroskop-Aufnahmen von Bondpads mit Bondballs. Ziel ist es, die Position des Bondballs auf dem Pad zu bestimmen. Dabei ist insbesondere der Abstand des Bondballs zum Rand des Pads relevant, da es bei zu geringem Abstand zu elektrischen Kurzschlüssen kommen kann.

Zur Lösung des Problems wurde zunächst mit dem Open Source Labeling Tool Labelme ein Datensatz mit ca. 100 gelabelten Bildern erzeugt. Eines dieser Bilder ist in Abbildung 3.3.14 dargestellt. Da es sich hier um ein Problem der Objekterkennung handelt, wurde wie bei anderen Aufgabenstellungen im Rahmen des Projekts ein Mask-RCNN-Netzwerk trainiert. Die Grundlage bildet dabei ein Resnet101-Backbone, das als Feature Extractor dient. Es wurden nur die letzten Layer des Netzes trainiert.

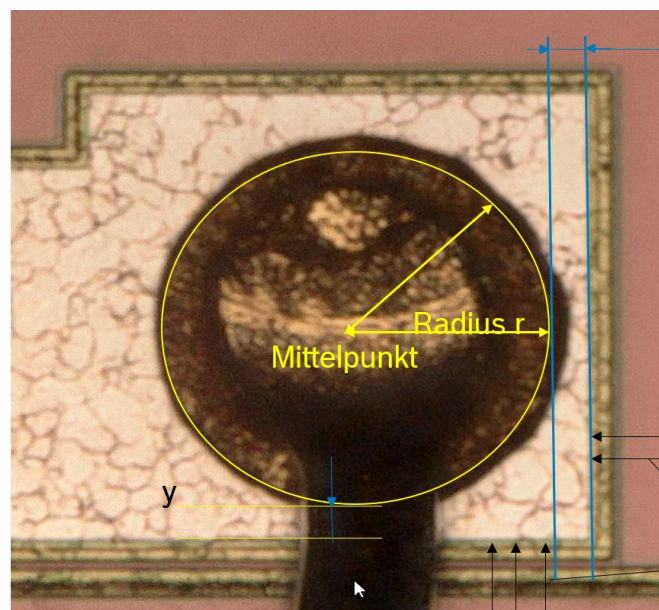


Abb. 3.3.13: Aufgabenstellung: Bondballposition auf Pad

In Abbildung 3.3.15 ist das Ergebnis des Mask-RCNN-Netzwerks bei Anwendung auf ein Testbild dargestellt. Wie zu erkennen ist, werden alle Bondballs und Pads zuverlässig erkannt.

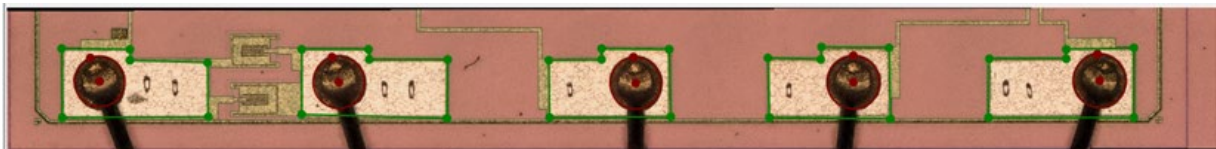


Abb. 3.3.14: Beispiel eines mit Labelme gelabelten Bildes: grüne Polygone entsprechen Bondpads, rote Kreise entsprechen Bondballs

Nach der Erkennung der Objekte bestand die zweite Aufgabe darin, die entsprechenden Abstände von Bondball zum Pad zu bestimmen. Zu diesem Zweck wurde zunächst der Mittelpunkt der Bondpads bestimmt.

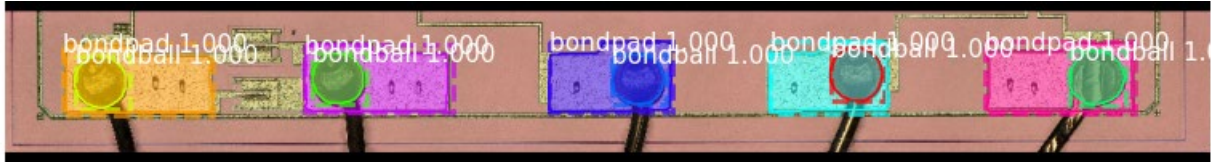


Abb. 3.3.15: Ergebnis des Machine Learning Modells bei der Anwendung auf ein Testbild:
Erkennung der Bondballs und Pads

Dazu wird jeweils der Mittelwert der Extremwerte des Bondballs in x- bzw. y-Richtung berechnet. Der Radius des Kreises berechnet sich dann als mittlerer Abstand der Kreispunkte vom Mittelpunkt.

Zur Bestimmung der Position der Bondpads wurden die Eckpunkte der Bounding Box der Pads bestimmt. Diese sind in Abbildung 3.3.16 dargestellt. Als Maße werden dabei jeweils die kleineren Abstände der Kreismittelpunkte zu diesen Eckpunkten in x- und y-Richtung eingezeichnet.

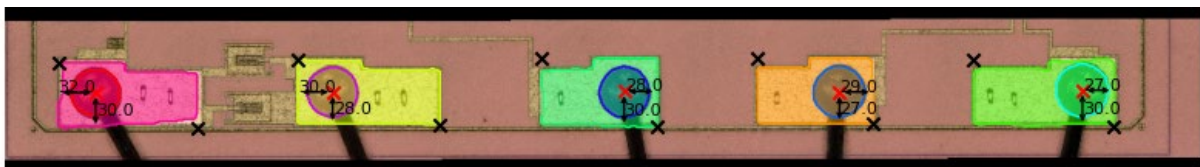


Abb. 3.3.16: Automatisierte Bestimmung der Abstände zwischen Bondballs und Pads,
Abstände in Pixel

Da das Machine Learning Modell ausschließlich mit Pixeln arbeitet, ist für die Bemaßung ein Maßstab notwendig, um von Pixeln in μm umzurechnen. Glücklicherweise waren für die Analyse einige ältere Bilder verfügbar, die bereits händisch vermessen wurden. Die händische Auswertung für das Bild aus Abbildung 3.3.16 ist in Abbildung 3.3.17 dargestellt.

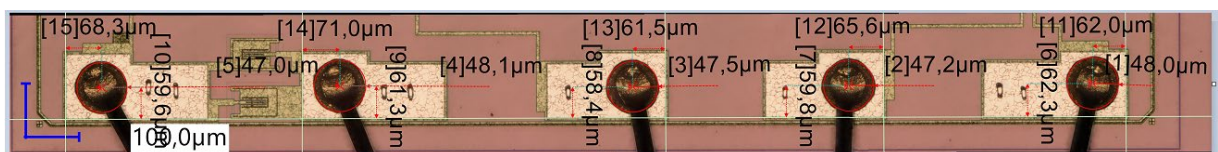


Abb. 3.3.17: Beispiel für die händische Auswertung

Mit Hilfe einer linearen Regression wurde der Maßstab von Pixeln in ein tatsächliches Maß in μm berechnet. Daraus resultiert ein Maßstab von $2,2517\mu\text{m pro Pixel}$. Die Regression ist in Abbildung 3.3.18 visualisiert.

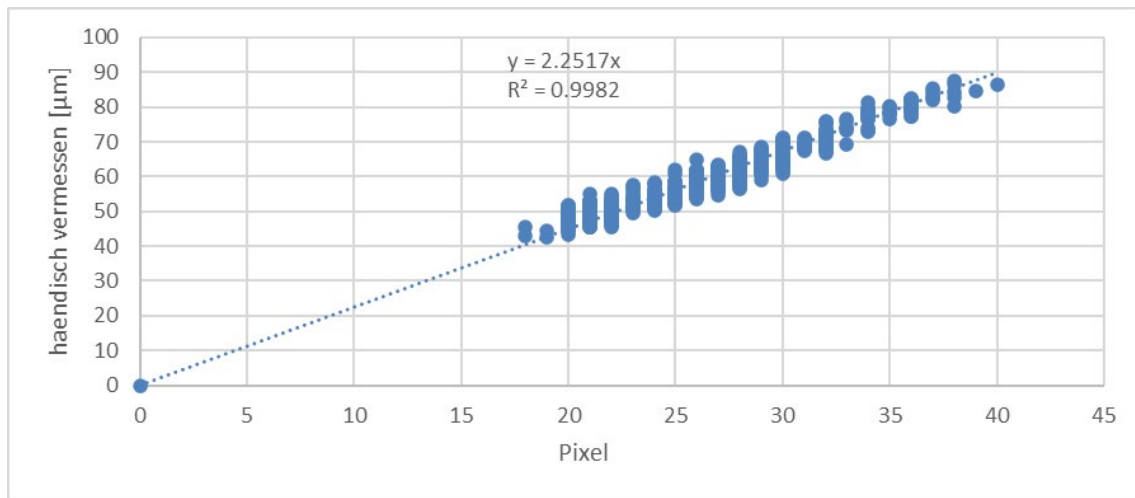


Abb. 3.3.18: Linear Regression zur Bestimmung des Maßstabs (von Pixel in μm)

Anschließend wurde die Genauigkeit der automatisierten Auswertung untersucht. Zu diesem Zweck wurde die Abweichungen zwischen den manuell bestimmten Maßen und der automatisierten Auswertung berechnet. Dabei wurden insgesamt 50 Bilder analysiert. Das Ergebnis dieser Untersuchung ist im Histogramm in Abbildung 3.3.19 dargestellt.

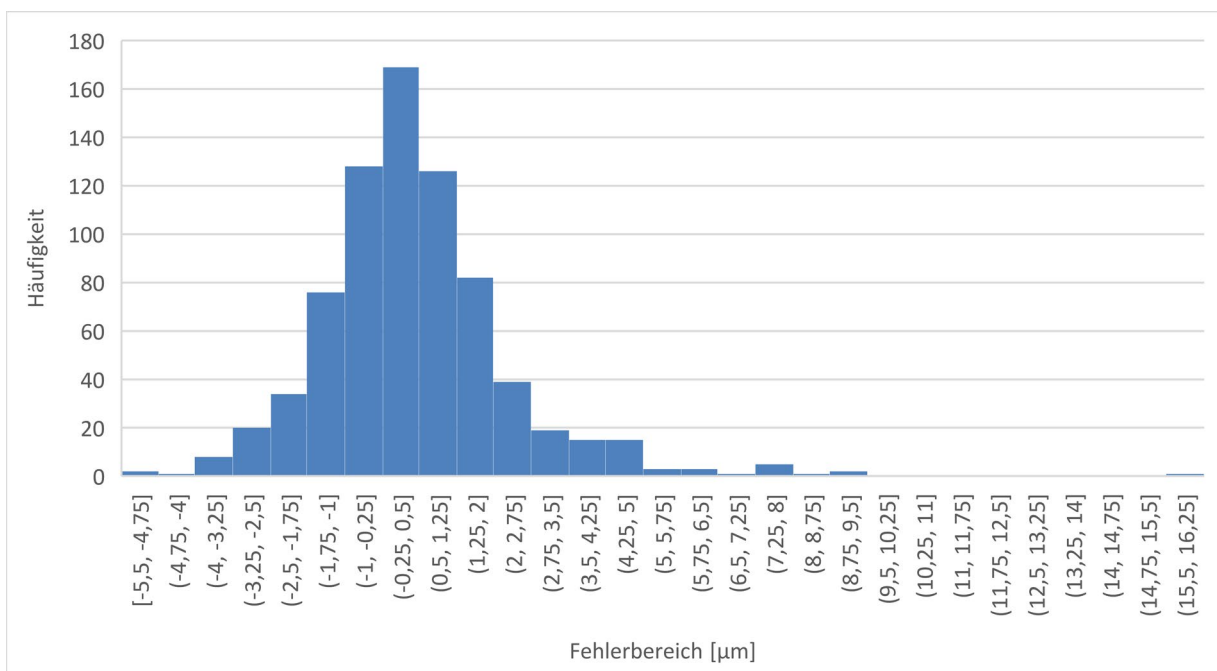


Abb. 3.3.19: Histogramm mit den Abweichungen zwischen händisch und automatisiert gemessenen Bildern

Als Ergebnis erfüllen 97,9% der Maße die Genauigkeitsanforderung von $\pm 5\mu\text{m}$. Die Ausreißer mit Abweichungen größer $5\mu\text{m}$ können fast alle auf eine fehlerhafte Bildaufnahme zurückgeführt werden. Ein Beispiel hierfür ist in Abbildung 3.3.20 dargestellt. In diesem Fall

wurde am Mikroskop die falsche Vergrößerung eingestellt. Dies ist daran zu erkennen, dass auf der rechten Seite des Bildes der Hintergrund zu sehen ist. Das Modell hat in diesem Fall die Bondballs und Pads richtig erkannt. Aufgrund der falschen Vergrößerung ist der Maßstab zur Umrechnung von Pixeln in μm jedoch nicht korrekt.

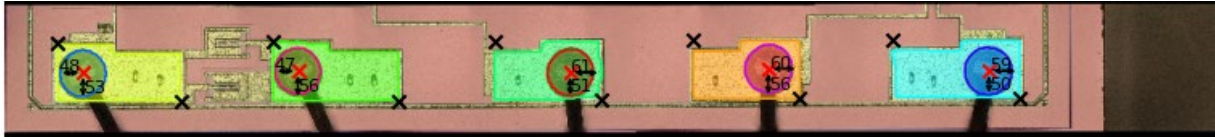


Abb. 3.3.20: Linear Regression zur Bestimmung des Maßstabs (von Pixel in μm)

Um das Modell einfach nutzbar zu machen, wurde die GUI aus Abbildung 3.3.3 wiederverwendet.

[1] Quelle: <https://engineering.matterport.com/splash-of-color-instance-segmentation-with-mask-r-cnn-and-tensorflow-7c761e238b46>

Aufgabe 3.4: Signalanalyse auf Basis des maschinellen Lernens

Im Rahmen dieses Arbeitspakets wurden ausschließlich Problemstellungen des Supervised Learnings bearbeitet. Hierfür sind gelabelte Datensätze notwendig, die in der Erzeugung mit beträchtlichem Aufwand verbunden sind. Aus diesem Grund hat sich das Konsortium auf einen Anwendungsfall aus dem Bereich der Ultraschallmikroskopie konzentriert und hierfür einen gelabelten Datensatz erzeugt. Auf Basis dieses Datensatzes wurden Machine Learning Modelle trainiert. Die Modelle verwenden als Input Zeitreihen und sind dementsprechend auf andere Analysemethoden, die ähnliche Datensätze erzeugen, übertragbar.

3.4.1 Auswertung z-Scan Daten eines verkappten Sensorwafers

Als Anwendungsfall für die Ultraschallmikroskopie wird ein verkappter MEMS-Sensor (Mikro-elektromechanisches System) betrachtet. Es handelt sich dabei um einen Beschleunigungssensor, der bereits in Serie gefertigt wird. Dementsprechend sind potenziell sehr viele Daten verfügbar. Der Aufbau des Sensors ist in Abb. 3.4.1 dargestellt. Untersucht wird die grün hervorgehobene Verbindungszone.

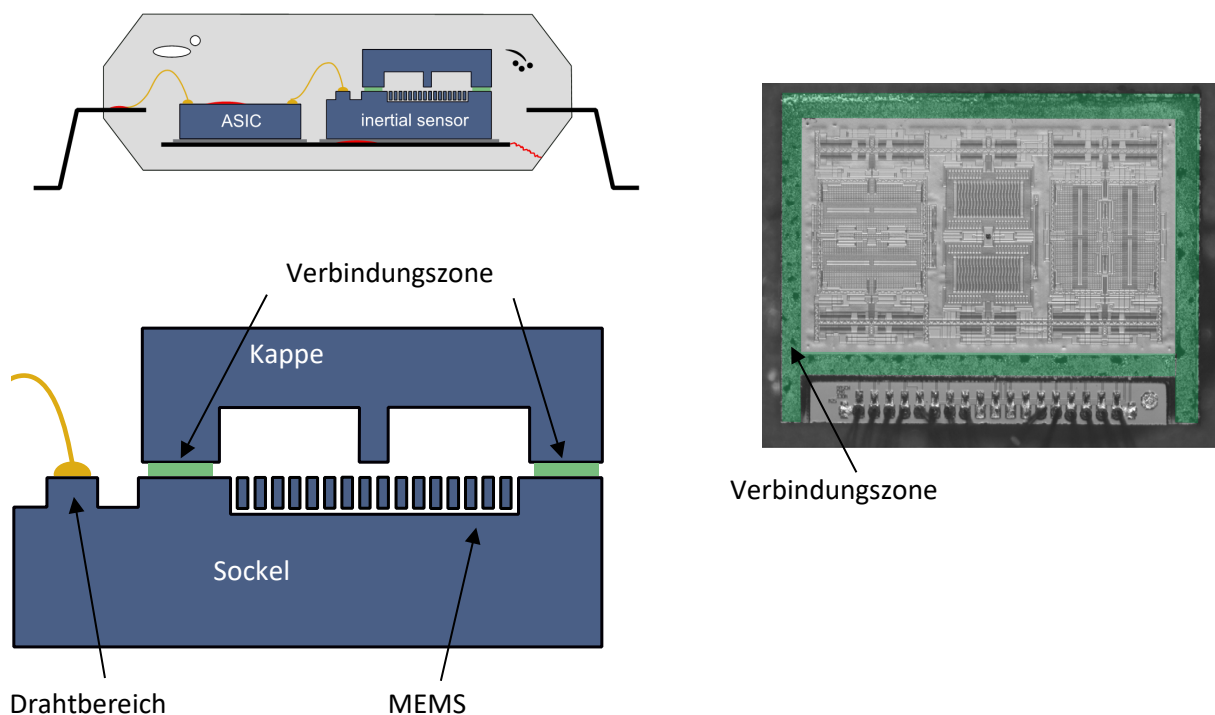


Abb. 3.4.1: Bauteil für Machine Learning

Die Verbindungszone verbindet den Sockel, in dem sich die empfindlichen Sensor-Strukturen befinden, mit der Kappe. Dadurch wird die Sensorstruktur vor Feuchte und Partikeln geschützt. Zusätzlich kann ein konstanter Druck im Sensorinneren definiert werden. In der Serienfertigung werden ca. 5000 Sensoren gleichzeitig auf einem Wafer gefertigt. Ein solcher Wafer ist in Abb. 3.4.2 dargestellt. Für eine optische Inspektion der Bauteilfertigung werden bei Bosch seit einiger Zeit bereits SAM-Aufnahmen des gesamten Wafers gemacht.

Die Anlage vom Projektpartner PVA Tepla erzeugt auf Basis der SAM-Rohdaten Einzelbilder der Sensoren und gibt diese aus. Die Rohdaten werden bisher allerdings nicht gespeichert.

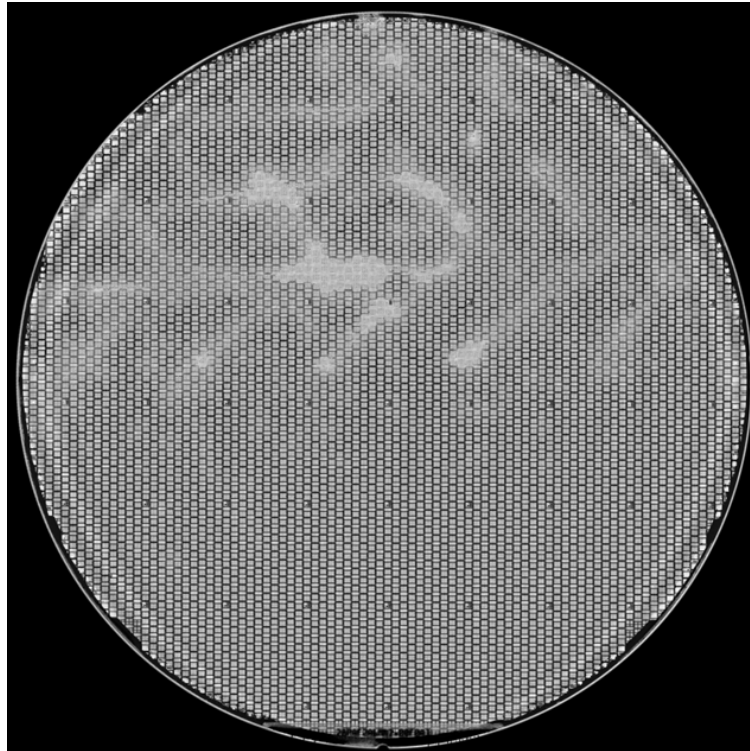


Abb. 3.4.2: SAM-Aufnahme eines kompletten Sensorwafers

Im Rahmen des Arbeitspakets 3.4 sollen allerdings nicht die SAM-Bilder, sondern vor allem die SAM-Rohdaten analysiert werden. Diese beinhalten mehr Information als die Bilder und erlauben daher präzisere Auswertungen. Die SAM-Rohdaten bestehen aus den vom Transducer detektierten Echosignalen für jedes einzelne Pixel. Eine typische Kurve dieses Zeitsignals ist in Abbildung Abb. 3.4.3 dargestellt. Die Rohdaten können prinzipiell vom Anlagenhersteller PVA Tepla zusammen mit einem Header in einem eigenen Datenformat mit der Dateiendung „.wzs“ abgespeichert werden. Der Header beinhaltet Metadaten der Messung wie z.B. Auflösung und Sample Rate. Im Beispiel aus Abb. 3.4.3 werden für jedes Pixel 1850 Datenpunkte gespeichert. Dementsprechend erhält man für ein Bild mit einer Auflösung von 245x130 Pixeln, was der Aufnahme eines Sensors in der Serienfertigung entspricht, eine Datenmenge von ca. 60 MB. Hochgerechnet auf den gesamten Wafer mit ca. 5000 Sensoren erhält man eine enorme Datenmenge von ca. 300 GB. Um die Datenmenge zu reduzieren, wurde vom Projektpartner PVA Tepla das z-Gate-Datenformat entwickelt. Dabei wird nicht das gesamte Zeitsignal abgespeichert, sondern lediglich der relevante Bereich von ca. 40-120ns.

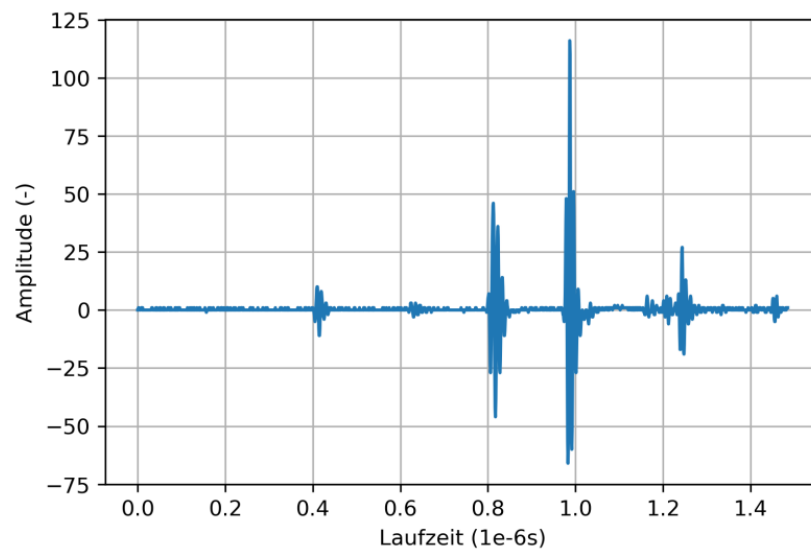
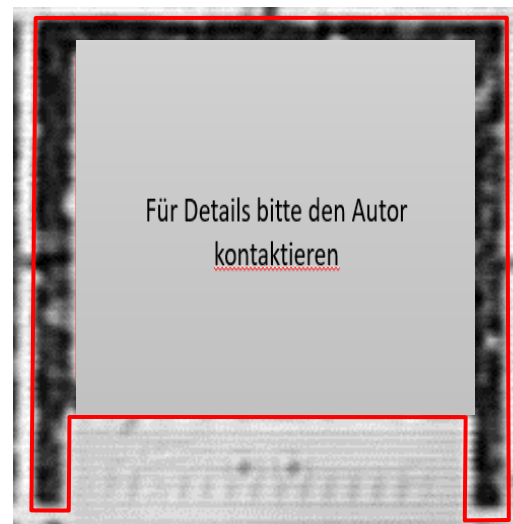


Abb. 3.4.3: Vom Transducer detektiertes Echosignal

Um Supervised Learning Methoden anwenden zu können, muss der Bereich der Verbindungszone identifiziert und gelabelt werden. Das bedeutet, jedem einzelnen Pixel wird zugeordnet, ob es sich um eine „gute“ oder „schlechte“ Verbindung handelt. Um dies zu bewerkstelligen, wurde vom Projektpartner Fraunhofer IMWS die selbstentwickelte Software SAManalysis zur Verfügung gestellt.



Gutteil



Schlechtteil

Abb. 3.4.4 SAM-Messungen eines Gut- bzw. Schlechtheils

Diese Software ermöglicht das Einlesen und die Bearbeitung von wzs.-Files. Zusätzlich können SAM-Daten auf Basis von Bildern und Machine Learning Modelle trainiert werden. Um die Bedienbarkeit und das Labeln zu testen, wurden erste Datensätze auf Basis von Grauwertbildern händisch gelabelt. Der Projektpartner Fraunhofer IMWS hat auf diese Weise einen gelabelten Datensatz erzeugt, bei dem jedem SAM-Echosignal eine von sechs

Kategorien zugeordnet wird. Die Kategorien für die einzelnen Bereiche sind in Abbildung 3.4.5 dargestellt. Von Interesse sind dabei vor allem die Kategorien „Defect_BondFrame“ und „Intact_BondFrame“. Die übrigen Kategorien wurden eingeführt, um eine höhere Genauigkeit des Machine Learning Modells zu erreichen.

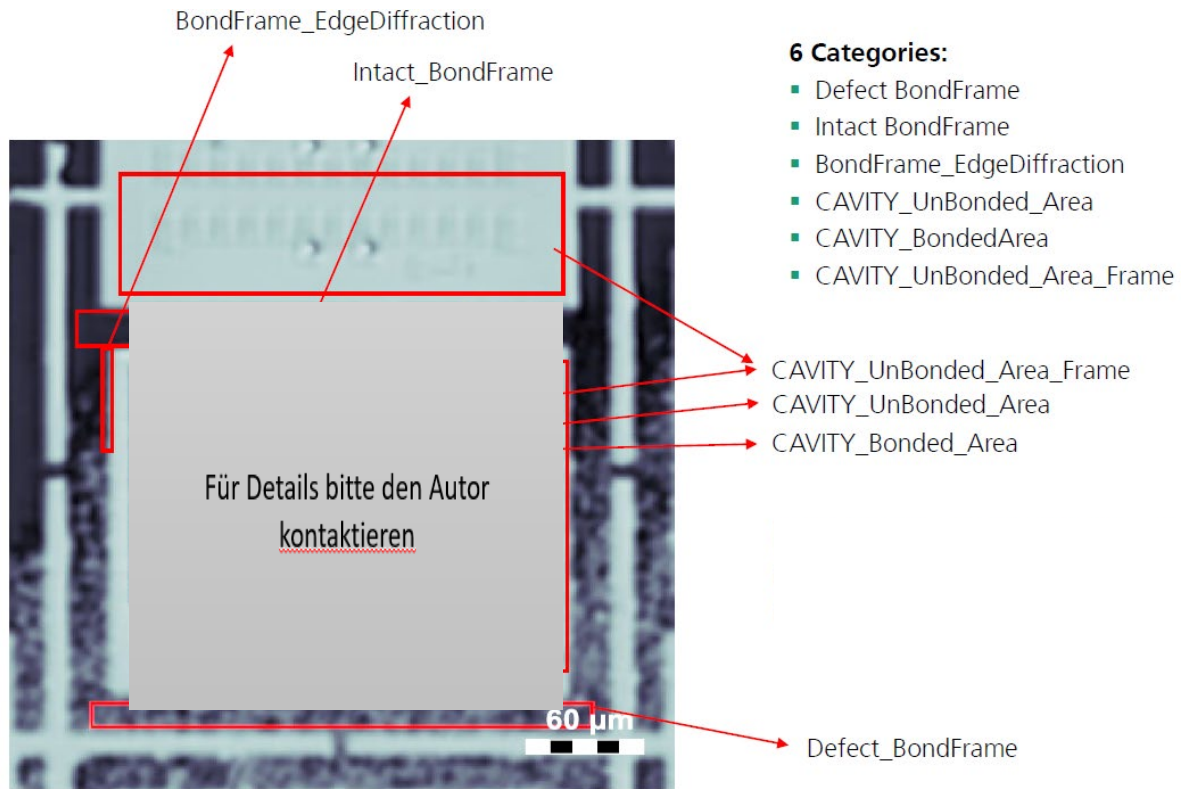


Abb. 3.4.5 Kategorien im SAM-Grauwertbild für einen einzelnen MEMS-Sensor

In Abbildung 3.4.6 sind Beispiele für Echosignale der verschiedenen Kategorien dargestellt. Wie zu erkennen ist, ist beispielsweise der Signalverlauf von „Cavity_Unbonded_Frame“ und „Cavity_EdgeDiffraction“ sehr unterschiedlich. Daher wurden zwei getrennte Kategorien für diese beiden Bereiche vergeben, um dem Modell die Klassifikation zu erleichtern.

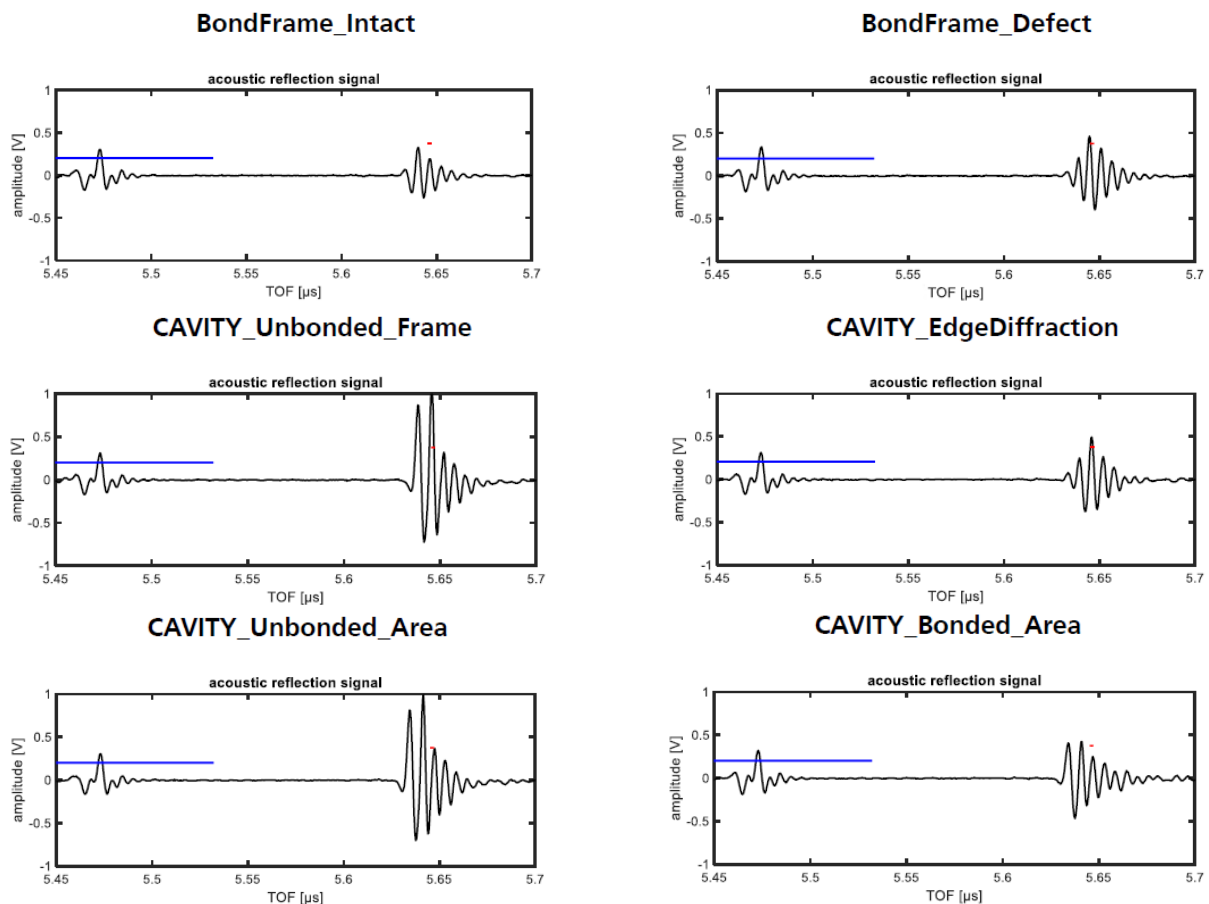


Abb. 3.4.6 Unterschiede im Signalverlauf für einzelne Kategorien

Auf Basis des gelabelten Datensatzes wurden von mehreren Projektpartnern Machine Learning Modelle trainiert. Alle Partner haben dabei künstliche neuronale Netze (kurz: ANN für artificial neural network) verwendet, um das Klassifikationsproblem zu lösen. Im Gegensatz zu anderen Machine Learning Methoden erfolgt bei den ANN keine separate Feature Extraktion, da das Modell die relevanten Merkmale aus den Zeitreihen selbstständig lernt. Darin liegt ein wesentlicher Vorteil dieser Methode im Vergleich zu anderen Modellen, bei denen zunächst Features aus den Zeitreihen extrahiert werden müssen.

Das Fraunhofer IMWS und Bosch haben ausschließlich Convolutional Neural Networks (CNNs) trainiert, während bei PVA Tepla zusätzlich zu den CNNs auch LSTMs (Long Short-Term Memory) trainiert wurden.

Im Folgenden wird das CNN, das bei Bosch trainiert wurde, vorgestellt. Die Architektur des Netzes ist in Abbildung 3.4.7 dargestellt: Das CNN besteht aus drei Convolutional Layern. Als Aktivierungsfunktion wurde dabei die Relu-Funktion verwendet. Nach den Convolutions folgt ein Dense-Layer und schließlich eine Softmax-Funktion, die die Wahrscheinlichkeiten für die einzelnen Kategorien berechnet. Das Netzwerk wurde mit der Bibliothek Tensorflow in Python aufgebaut und trainiert. Der Trainingsdatensatz bestand aus 3500 Zeitreihen. In Abbildung 3.4.8 ist die Confusion Matrix für den Testdatensatz dargestellt, um die Modellgüte zu bewerten.

```

layers:
  - type: Conv1D
    n_filters: 10
    kernel_size: 3
    strides: 1
    padding: valid
  - type: activation
    activation: relu
  - type: maxpooling1d
  - type: Conv1D
    n_filters: 20
    kernel_size: 5
    strides: 1
    padding: valid
  - type: activation
    activation: relu
  - type: maxpooling1d
  - type: Conv1D
    n_filters: 40
    kernel_size: 5
    strides: 1
    padding: valid
  - type: activation
    activation: relu
  - type: maxpooling1d

  - type: dense
    size: 50
    activation: relu
    
```

Abb. 3.4.7: Architektur des CNNs für SAM-Echosignale

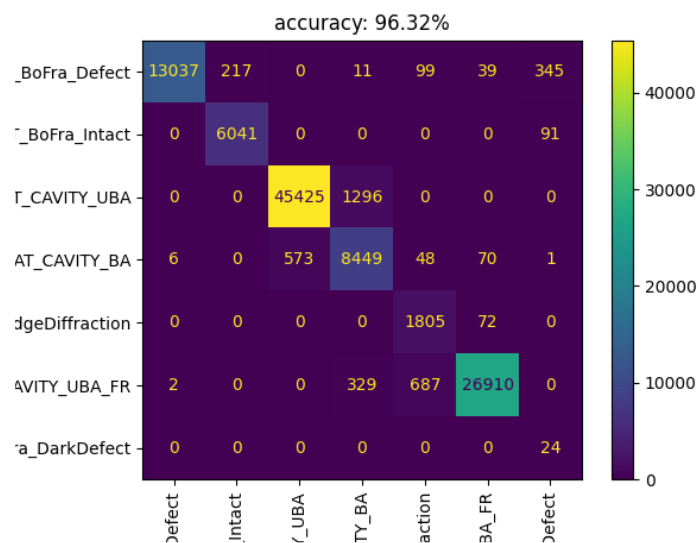


Abb. 3.4.8: Confusion Matrix für Testdatensatz

Wie zu erkennen ist, beträgt die Genauigkeit des Modells ca. 96,3%. Das bedeutet, für 96,3% der Zeitreihen wird die Kategorie korrekt vorhergesagt.

Um die Ergebnisse der trainierten Modelle der Projektpartner IMWS, PVA Tepla und Bosch zu vergleichen, sind in Abbildung 3.4.9 die Modellvorhersagen der ANNs der einzelnen Partner dargestellt. Wie zu erkennen ist, werden durch die drei Machine Learning Modelle ähnliche Bereiche als Defekte markiert (grüne bzw. rote Bereich in den Bildern). Im Gegensatz zum IMWS- und Bosch-Modell werden bei PVA im inneren Bereich der MEMS-Struktur fälschlicherweise einige Pixel als Defekte markiert.

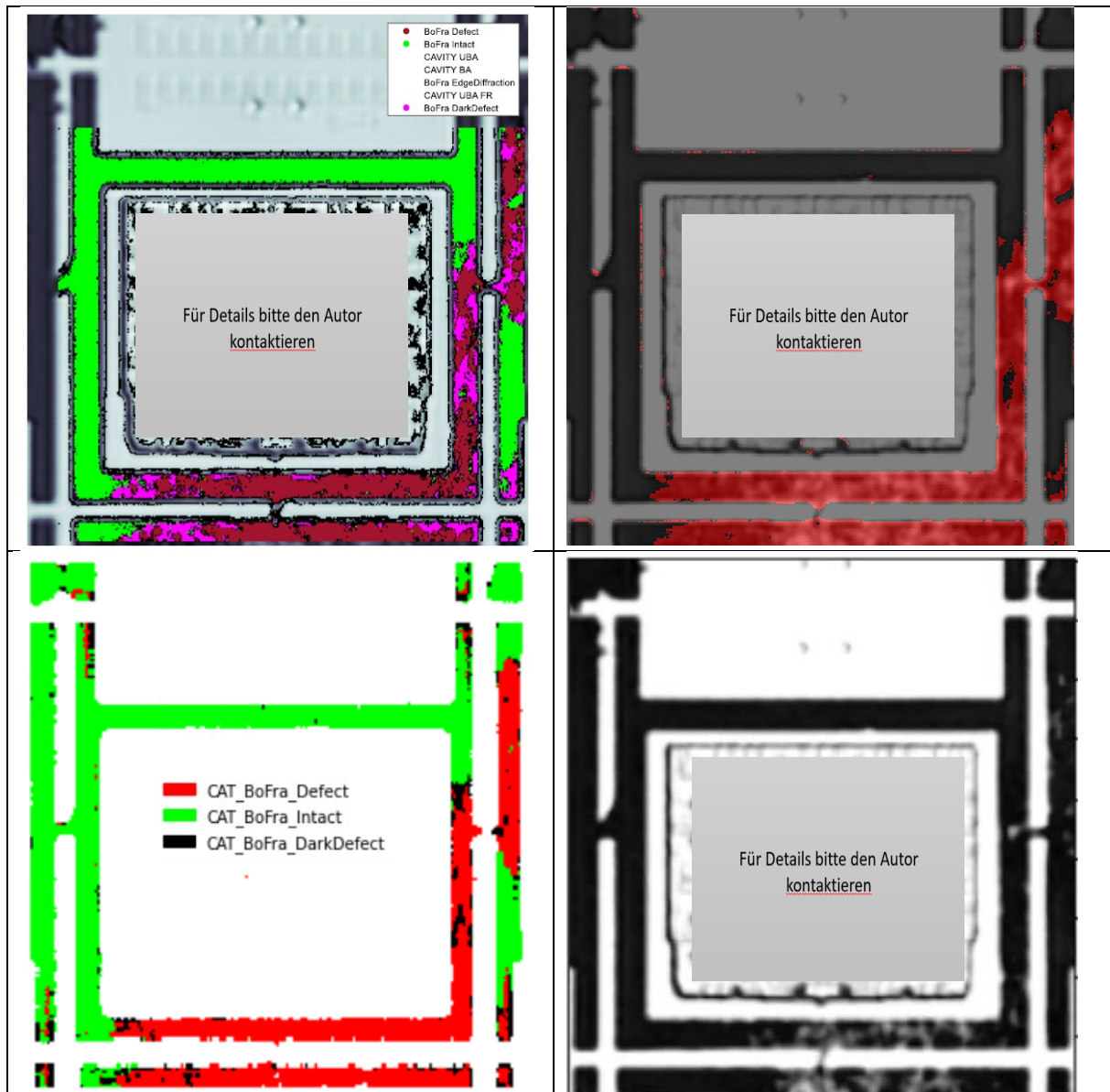


Abb. 3.4.9: Vergleich der Ergebnisse für den MEMS-Sensor X27-Y9: Ergebnis der Samnanalyse (Fraunhofer IMWS, oben links), Ergebnis PVA Tepla (oben rechts), Ergebnis Bosch (unten links), klassisches Grauwert-SAM-Bild (unten rechts)

Dies ist möglicherweise der Tatsache geschuldet, dass dort weniger Kategorien eingeführt wurden als bei den anderen beiden Modellen. Beim Vergleich mit der klassischen-Grauwert-

SAM-Analyse (Bild unten rechts) fällt auf, dass dort die Defekte sehr viel schlechter zu erkennen sind. Dementsprechend liefert die Analyse der Zeitreihen im Vergleich zur konventionellen bildbasierten Analyse der SAM-Daten einen signifikanten Gewinn an Genauigkeit bei der Identifikation von Defekten.

Der Datensatz, der für das Training der Machine Learning Modelle verwendet wurde, wurde auf Basis von konventionellen SAM-Grauwertbildern gelabelt. Um die Methode des Labelns und die Ergebnisse der Machine Learning Modelle abschließend bewerten zu können, werden hochauflösende physikalische Analysen durchgeführt. Zu diesem Zweck wurden einzelne MEMS-Sensoren auf dem Wafer identifiziert (vgl. Abbildung 3.4.10), die für die Auswertung von besonders großer Relevanz sind.

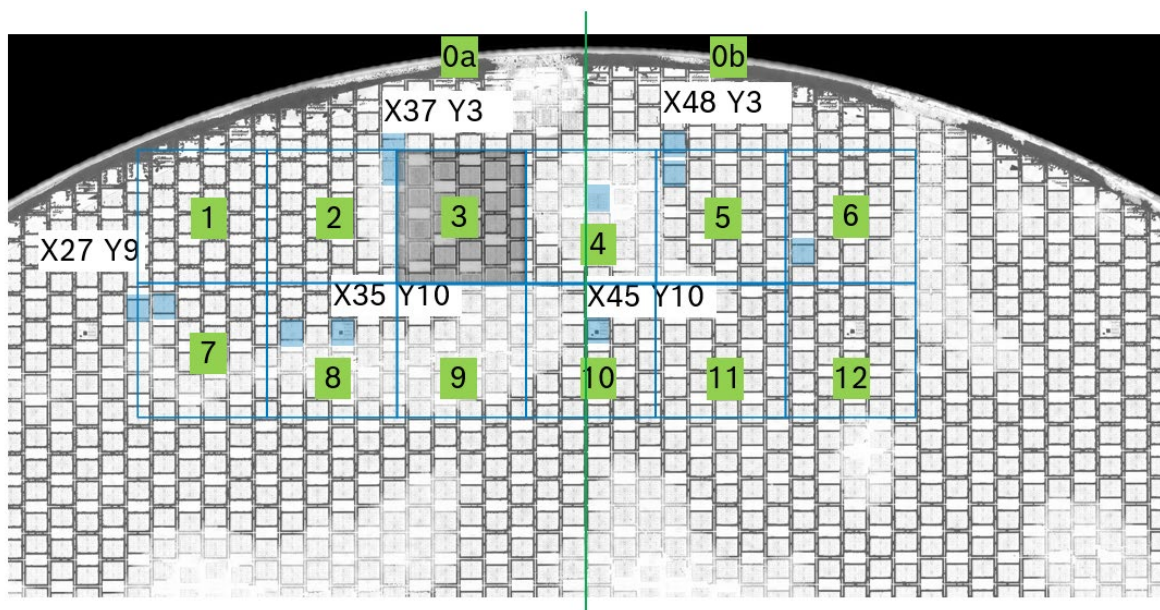


Abb. 3.4.10: Confusion Matrix für Testdatensatz

Einer der relevanten Sensoren ist beispielsweise der Sensor X27-Y9, für den die Ergebnisse der Machine Learning Modelle in Abbildung 3.4.9 dargestellt sind. Der erste Präparationsschritt bestand darin, den Wafer in kleinere Teile zu zerteilen. Hierfür wurde eine Bandsäge im Musterbau im Bosch-Werk in Reutlingen verwendet.

Die physikalische Detailanalyse mit Zuordnung Signal zu Pixel wurde in Arbeitspaket 4.1 bearbeitet.

2.4 ARBEITSPAKET 4: WEITERENTWICKLUNG VON GERÄTEN DER FEHLERANALYSE

Aufgabe 4.1: Ein akustisches Mikroskop mit implementierter SAFT und KI-basierter Analysefähigkeit

Im ersten Projektjahr wurden zunächst geeignete Testproben definiert und hergestellt. Zum Einsatz sollen sowohl Sensorchips auf Wafer-Level kommen, welche in vergleichbarem Zustand auf Serien-Fertigungsanlagen untersucht werden, als auch Sensorbauelemente, die mehrere Einzelchips in einer Mold-Umverpackung enthalten und typischerweise im Rahmen einer Fehleranalyse untersucht werden.

Im zweiten Projektjahr lag der Schwerpunkt auf der ultraschallmikroskopischen Untersuchung der Testproben, wobei im Regelfall Datensätze mit kompletter Zeitreiheninformation aufgenommen wurden. Um angesichts der großen Datenmengen die Verarbeitbarkeit der Datensätze zu gewährleisten, führte PVA TePla neue Features in die Aufnahme-Software ein. Es erfolgten erste Auswertungen der Daten seitens PVA TePla und Fraunhofer IMWS; einzelne Software-Pakete beider Partner wurden Bosch zur Verfügung gestellt und dort getestet.

Im dritten Projektjahr wurden die Präparationsprozesse zur physikalischen Analytik optimiert, insbesondere hinsichtlich der Untersuchung im Toneburst-Modus, und vergleichende Auswertungen der Datensätze vorgenommen.

4.1.1 Aufgabenstellung 1: Defekterkennung auf Waferlevel

Als Testprobe dient hier ein MEMS-Wafer, der auch in WP 3.4 verwendet wird. Der komplette Wafer besteht aus ca. 5000 Einzelchips. Unter Anwendung von hohem Druck und Temperatur wird die Sensorseite des Wafers, welche die funktionalen MEMS-Strukturen enthält, mit der Kappenseite des Wafers verbunden (AlGe-Bond). Dadurch wird die MEMS-Struktur hermetisch versiegelt. Die Stabilität und Dichtheit der Bondverbindung ist eine wichtige Voraussetzung für die Zuverlässigkeit des Sensorchips über die Lebenszeit. Um Defekte in ausreichend hohem Maße zu provozieren, wurden die Al-Strukturen des Sensorwafers vor dem Bondprozess selektiv auf einer Waferhälfte mittels einer Pinzette entfernt, so dass beim Aufschmelzen und Wiedererstarren des eutektischen Materials Fehlstellen entstehen (Abb. 4.1.1).

Bei der ultraschallmikroskopischen Untersuchung zeigen diese Fehlstellen ein abweichendes Verhalten im Zeitsignal (A-Scan). Das Zeitsignal wird normalerweise integrativ über ein Datengate in ein 2-dimensionales Graustufenbild (C-Scan) überführt, welches dann mit Bildauswertungsalgorithmen bearbeitet werden kann. Defekte wie Delaminationen, Risse oder Lunker im Bondmaterial manifestieren sich üblicherweise als erhöhter Kontrast im Vergleich zum intakten Bondrahmen, allerdings geht über die integrative Darstellung Information verloren.

Im Fehleranalyseprozess wie auch im Fertigungsprozess erfolgt die Bewertung der Bonddefekte momentan ausschließlich anhand des C-Scans. Während im Fertigungsprozess bereits kommerzielle KI-Algorithmen zur Bildbewertung eingesetzt werden, ist dies im Fehleranalyseprozess noch nicht der Fall, da in den meisten Fällen kein ausreichendes Datenmaterial zum Training eines KI-Modells vorhanden ist. Bosch stellt den MEMS-Wafer zur Verfügung, um diese Lücke zu schließen.

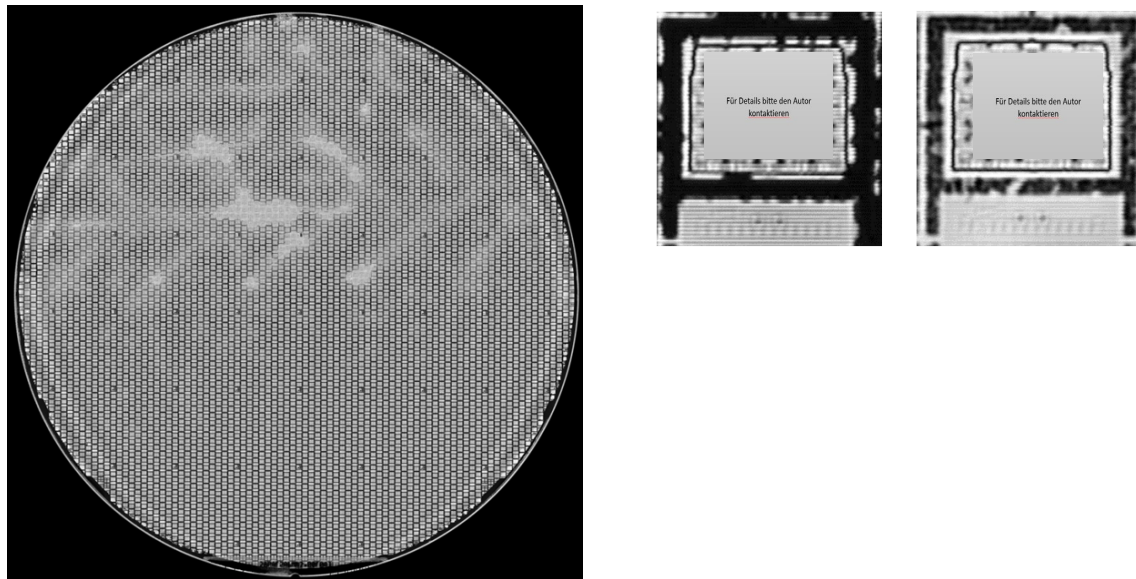


Abb. 4.1.1 C-Scan von komplettem MEMS-Wafer (links) und Einzelbauteilen (rechts)

Die Aufnahme des MEMS-Wafers bei PVA TePla erfolgte in unterschiedlichen Aufnahmemodi, mit unterschiedlichen akustischen Transducern und mit unterschiedlichen lateralen Auflösungen, um eine möglichst große Bandbreite der Datenauswertung zu ermöglichen. Dies erforderte wegen der großen Zahl der Einzelchips auf dem Wafer einen erheblichen Zeitaufwand (bis zu mehreren Tagen pro Komplettskan des Wafers mit einem Parametersatz). Es kamen zum einen Standard-Fertigungstransducer zum Einsatz mit einer Mittenfrequenz von 110 MHz (VHF), zum anderen höherfrequente Transducer mit 130 MHz und 195 MHz Mittenfrequenz (UHF). Als Auflösung der mechanischen Abtastung wurden Werte von 7 μm , 10 μm und 15 μm gewählt. Die Zeitreihen wurden in Form von z-Scans und z-Gates aufgenommen. Während die z-Scans einen festen Zeitbereich des A-Scans für jeden Messpunkt abbilden, was üblicherweise Oberflächenpeak und Datengate des interessierenden Zeitbereiches umfasst, wird bei den z-Gate-Datensätzen nur der Inhalt des Datengates abgelegt. Damit ergeben sich für die z-Gate-Datensätze deutlich geringere Dateigrößen, was die spätere Verarbeitung erleichtert.

PVA TePla hat mit Hilfe der Komplet-Datensätze des Wafers verschiedene KI-Modelle erstellt, welche nach Projektende in die Geräte-Software implementiert werden sollen. Damit kann die KI-Auswertung auch bei der Fehleranalyse von Einzelbauteilen genutzt werden. Darüber hinaus können anhand des Datensatzes Aussagen darüber getroffen werden, welches Datenmaterial minimal erforderlich ist für eine aussagekräftige Bewertung. Durch die Nutzung des Datensatzes in WP 3.4 kann gleichzeitig ein Vergleich erfolgen zwischen verschiedenen Modell-Ansätzen und auch zwischen verschiedenen Auswertemethoden (Bildauswertung versus Zeitsignalauswertung).

Das Labelling fürs Training der KI-Modelle erfolgt zunächst anhand der C-Scans, also anhand einer Bildauswertung der Graustufenbilder. Einzelne Defekte sind hier über Kontrastabweichungen identifizierbar (Abb.4.1.2), wobei die Bewertung weitgehend auf der Erfahrung des Fehleranalyse-Ingenieurs beruht. Mit diesen vorläufigen Trainingsdaten lässt sich ein vorläufiges KI-Modell erstellen, welches dann dazu verwendet werden kann, weitere Defekte auf dem Wafer zu identifizieren. Bei PVA TePla wurden zwei verschiedene Modelle trainiert: Modell 1 weist eine einzige Klasse für alle Defekte auf, Modell 2 unterscheidet zwischen Defekten mit hellem und dunklem Kontrast.

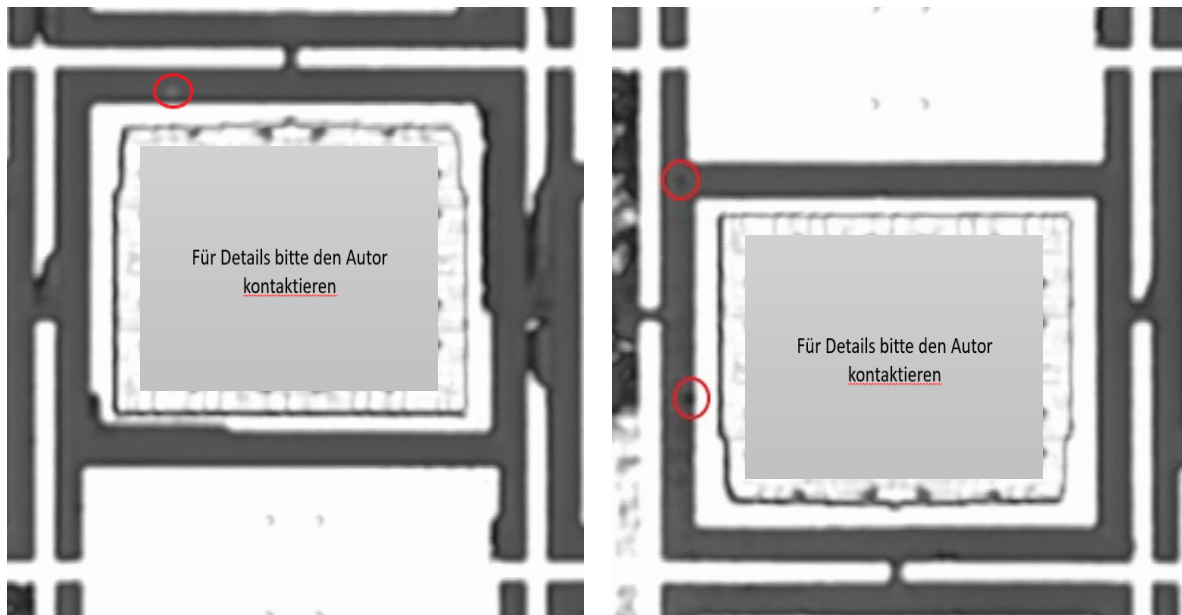


Abb. 4.1.2 C-Scan von Einzelbauteilen, Defekte sind markiert

Sowohl PVA TePla als auch das Fraunhofer IMWS stellten Bosch Software-Pakete zum Labelling zur Verfügung. Exemplarische Daten wurden bei Bosch bereits bearbeitet, allerdings wird der Gesamt-Workflow aus Labelling, Training und Auswertung zunächst bei den Projektpartnern etabliert, bevor dann in einem zukünftigen Schritt der funktionierende Workflow an Bosch übergeben wird.

Die endgültige Bewertung, um welchen Defekt-Typ es sich handelt, kann allerdings erst nach der physikalischen Analyse des Defekt erfolgen. Nachdem die kompletten Datensätze des Wafers digital vorlagen, wurden nun Arrays aus 5 x 5 Einzelchips entnommen und zerstörend untersucht. Im zentralen Halbleiter-Analyselabor der Robert Bosch GmbH stehen hierfür zahlreiche Methoden zur Verfügung, von mechanischer Schliffpräparation über Focussed Ion Beam (FIB) und Röntgen-Computertomographie (CT) Methoden bis hin zu hochauflösender Elektronenstrahlmikroskopie.

Mit steigender Frequenz erhöht sich die physikalische Auflösung der Transducer – prinzipiell sollten also die höherfrequenten Aufnahmen eine höhere Sensitivität bezüglich Defekten aufweisen. Dies muss anhand der erstellten Modelle geprüft werden, und die Modelle müssen unter diesem Aspekt verglichen werden.

Sobald Einzelchips aus dem Wafer entnommen werden können, ist auch die Anwendung von noch höher auflösenden Methoden wie der akustischen Mikroskopie im GHz-Bereich möglich. Hierfür ist eine umfangreiche Präparation der Proben notwendig, da die Eindringtiefe der akustischen Wellen in diesem Frequenzbereich stark limitiert ist. Mit der Methode lassen sich jedoch laterale Auflösungen von wenigen Mikrometern erreichen, was eine deutlich bessere Charakterisierung der Defekte ermöglicht.

Array #6 wurde in Epoxidharz eingebettet und es wurde ein metallographischer Schliff erstellt (Abb. 4.1.3). Etwa 300 µm entfernt von der Bauteilkante ist im Querschliff eine Lunkerkette auffällig (Abb. 4.1.4. blauer Rahmen). Die laterale Ausdehnung der Lunker beträgt maximal 25 µm, die Höhe der Lunker maximal 2 µm entsprechend der Bondhöhe (Abb. 4.1.5). Diese

Lunkerkette korreliert mit einem hell kontrastierten SAM-Defekt. Eine zweite Lunkerkette, die weiter entfernt ist von der Bauteilkante und eine maximale laterale Ausdehnung der Lunker von 10 μm aufweist, ist im SAM-Bild nicht mehr auffällig (Abb. 4.1.4 grüner Rahmen und Abb. 4.1.6).

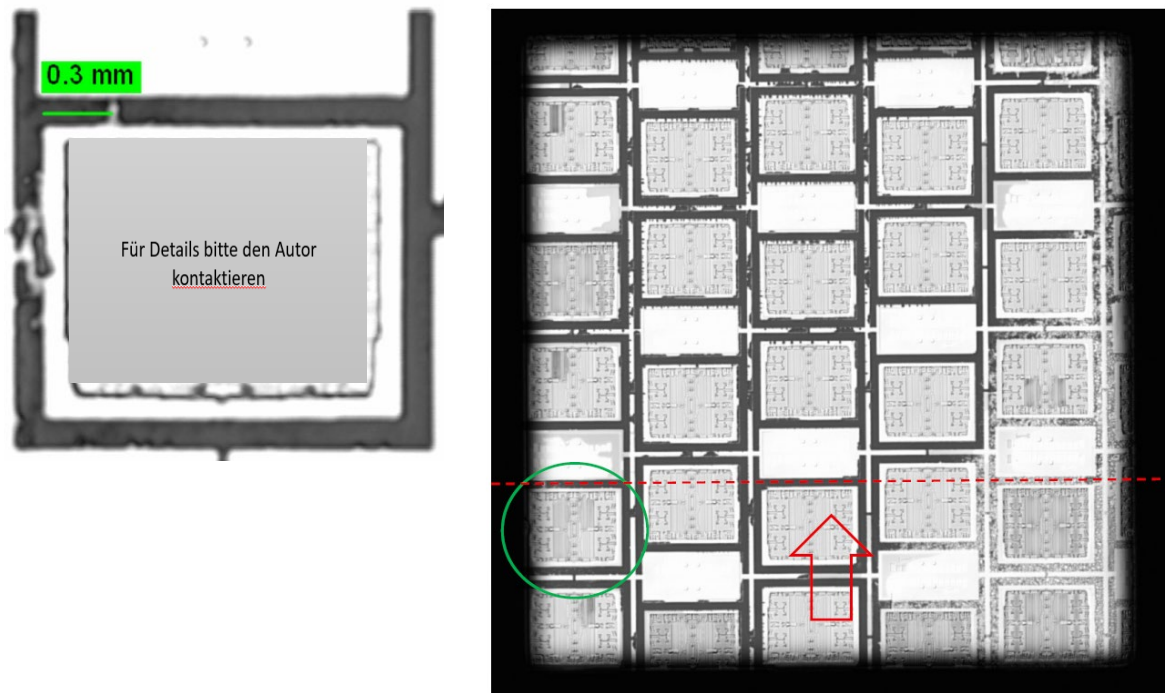


Abb. 4.1.3 C-Scan (VHF) von einem BE auf Waferlevel (links) und C-Scan (UHF) von Array #6 mit eingezeichneter Schliffebene (rechts)

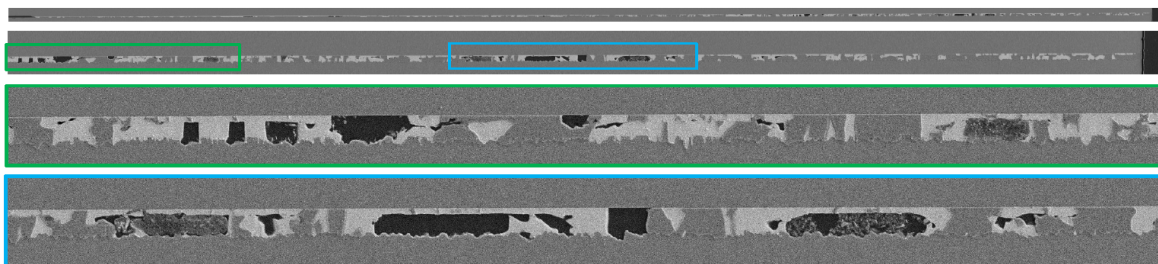


Abb. 4.1.4 REM-Untersuchung der eutektischen Bondung von Array #6

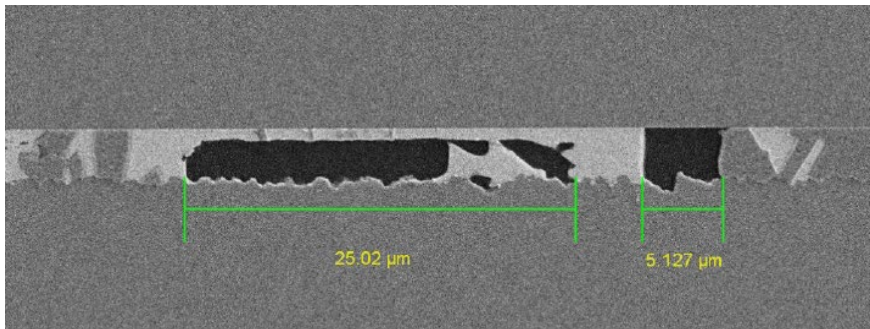


Abb. 4.1.5 REM-Untersuchung der eutektischen Bondung von Array #6, Lunkerkette blau

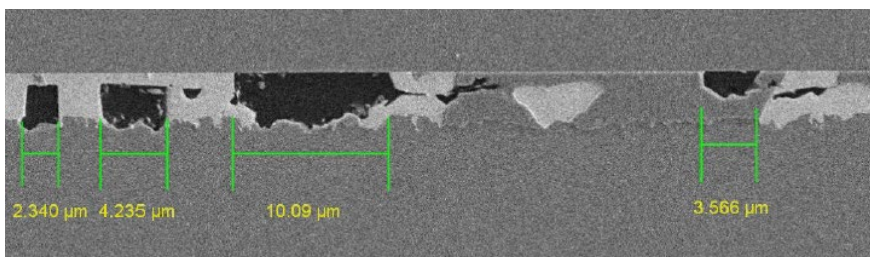


Abb. 4.1.6 REM-Untersuchung der eutektischen Bondung von Array #6, Lunkerkette grün

Ein Abgleich mit dem KI-Modell Modell 2 von PVA TePla ergibt, dass die Lunkerkette mit maximal 25 µm breiten Lunkern eindeutig als Defekt mit hellem Kontrast klassifiziert wird. Im Bereich der zweiten Lunkerkette mit maximal 10 µm breiten Lunkern klassifiziert das Modell einen großräumigen Bereich als Defekt mit dunklem Kontrast (Abb. 4.1.7). Möglicherweise wirken sich die kleineren Lunker hier bereits auf das akustische Signal aus. Allerdings zeigt die höher auflösende UHF-Aufnahme zusätzliche helle Defekte, die vom Modell nicht punktuell erfasst werden. Die Klassifizierung „Defekt mit dunklem Kontrast“ kann also höchstens als grober Anhaltspunkt für Störungen in der Bondung verwendet werden.



Abb. 4.1.7: C-Scan (VHF) auf Waferlevel mit Klassifizierung: rot = heller Defekt, blau = dunkler Defekt (links), C-Scan (UHF) auf Waferlevel (rechts)

Anhand von Referenzteilen aus dem Gut-Bereich des Wafers wurde ein Workflow für das Dünnen der Proben entwickelt. Durch eine Abfolge aus isotropem SF_6/O_2 -Plasma-Ätzprozess, mechanischem Politurprozess, erneutem isotropem und abschließend anisotropem SF_6/O_2 -Plasma-Ätzprozess lässt sich die Si-Restdicke eines Arrays von 5 x 5 Bauteilen auf $< 15 \mu\text{m}$ verringern, was Untersuchungen mit Transducern der Frequenz 400 MHz, 600 MHz und 950 MHz im Toneburst-Modus ermöglicht. Es zeigt sich, dass fast alle Bauteile von Array #3 höchstauflösend dargestellt werden können (Abb. 4.1.8).

Die Detaildarstellung einer Chipecke mit Pixelgröße $1 \mu\text{m}/\text{pixel}$ zeigt ein charakteristisches Muster von hell und dunkel kontrastierten Bereichen (Abb. 4.1.9). Der Kontrast kann im Toneburst-Modus nicht mehr eindeutig dem Befund intakter oder defekter Bondrahmen zugeordnet werden, da Interferenzeffekte zu Kontrastmodulationen in Abhängigkeit vom Fokalabstand führen.

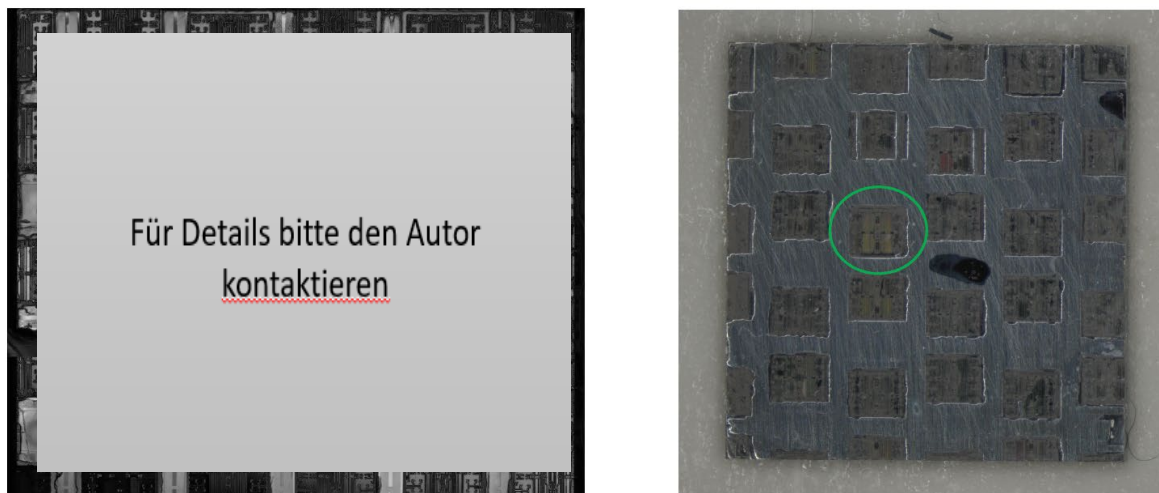


Abb. 4.1.8: C-Scan (Toneburst) von Array #3 (links), Stereomikroskopische Aufnahme von Array #3 (rechts), Einzelchip für Detailanalysen ist grün markiert

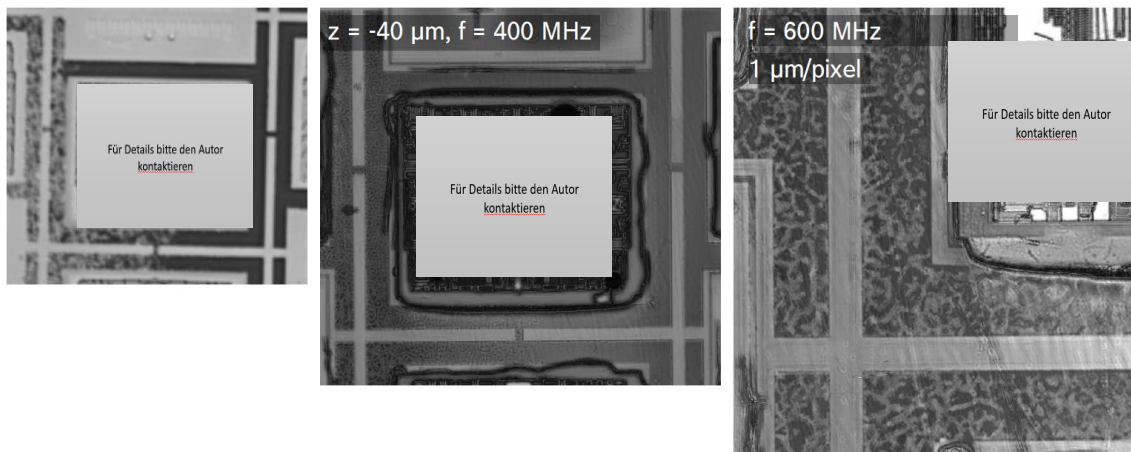


Abb. 4.1.9: C-Scan (UHF) von Einzelchip aus Array #3 (links), C-Scan (Toneburst 400 MHz) von Einzelchip (Mitte), C-Scan (Toneburst 600 MHz) von Einzelchip (rechts)



Abb. 4.1.10: C-Scan (UHF) von Einzelchip aus Array #3 (links), C-Scan (Toneburst 600 MHz) mit Überlagerung des UHF-Bilds in blau (Mitte), CT-Scan von Einzelchip (rechts)

4.1.2 Aufgabenstellung 2: Defekterkennung auf Bauteil-Level

Die ultraschallmikroskopische Untersuchung von gemoldeten Bauteilen geschieht grundsätzlich bei niedrigeren Frequenzen als die Untersuchung von MEMS-Einzelchips, da die Moldmasse Füllstoffe enthält, welche das Signal bei höheren Frequenzen stark dämpfen. Üblicherweise werden Schallköpfe mit einer maximalen Frequenz von 125 MHz und hoher Fokussierung eingesetzt, um die bestmögliche Auflösung zu erreichen. Wegen der geringen Tiefenschärfe dieser Schallköpfe sind jedoch Aufnahmen in verschiedenen Fokuspositionen notwendig, um alle Einzelchips der Chipstapel abzubilden. Darüber hinaus gibt es Abschattungseffekte durch überstehende Chipkanten und Bonddrähte, welche die Bildinterpretation erschweren. Bauteile, die zusätzlich eine Leiterplatte als Trägermaterial enthalten, können nur von der Vorderseite untersucht werden, da die Glasfaserstränge in der Leiterplatte das Signal noch stärker dämpfen als die Moldmasse.

Mit der Synthetic Aperture Focus Technique (SAFT) entwickelt PVA TePla eine Methode, mit der die o.g. Probleme adressiert werden. Die Apertur der Schallquelle wird synthetisch vergrößert, indem das ultraschallmikroskopische Bild aus vielen verschiedenen Schallkopfpositionen rekonstruiert wird. Dadurch können Auflösung und Kontrast verbessert werden, und es ist eine 3D-Rekonstruktion möglich. Im Rahmen dieses Arbeitspakets soll anhand von typischen Sensorbauelementen geprüft werden, welcher Zeit- und Auflösungsgewinn durch die SAFT-Methode erreichbar ist. Hierzu kommen Automotive- und Consumer-Inertialsensorpackages zum Einsatz, die einen komplexen Stackaufbau der Einzelchips aufweisen (siehe Abb. 4.1.11 und 4.1.12). Zudem wird die Methode an relativ einfach aufgebauten Multichip-Modulen getestet, welche sich aufgrund der Bauteilgröße als Demonstratoren eignen.

PVA TePla führte zunächst Grundlagenuntersuchungen an Testproben aus Polycarbonat mit verschiedenen Rekonstruktionsalgorithmen durch: Time Domain (TD-) SAFT und Frequency Domain (FD-) SAFT. Grundsätzlich sind beide Methoden geeignet, haben aber spezifische Stärken und Schwächen. So ist die Rechenzeit bei FD-SAFT deutlich kürzer als bei TD-SAFT, allerdings kommt es bei FD-SAFT zu Verzerrungseffekten, und direkt übereinanderliegende Defekte können unter Umständen nicht rekonstruiert werden. Beide Methoden reduzieren typische Messartefakte, können aber zu zusätzlichen Rekonstruktionsartefakten führen. Mit der von PVA TePla zur Verfügung gestellten Software auf Matlab-Basis wurden bei Bosch erste Versuche durchgeführt.

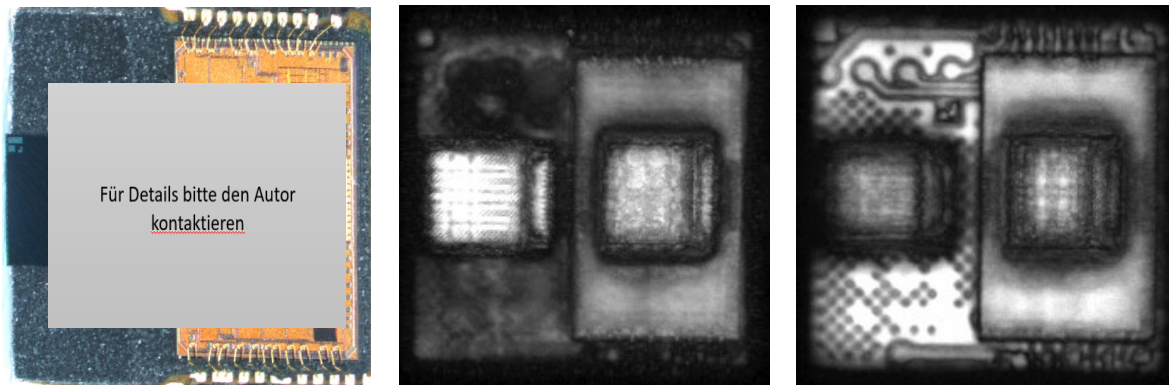


Abb. 4.1.11 Automotive-Sensor mit freigelegtem Chipstapel (links), C-Scan mit Fokus auf PCB (Mitte), C-Scan mit Fokus auf ASIC (rechts)

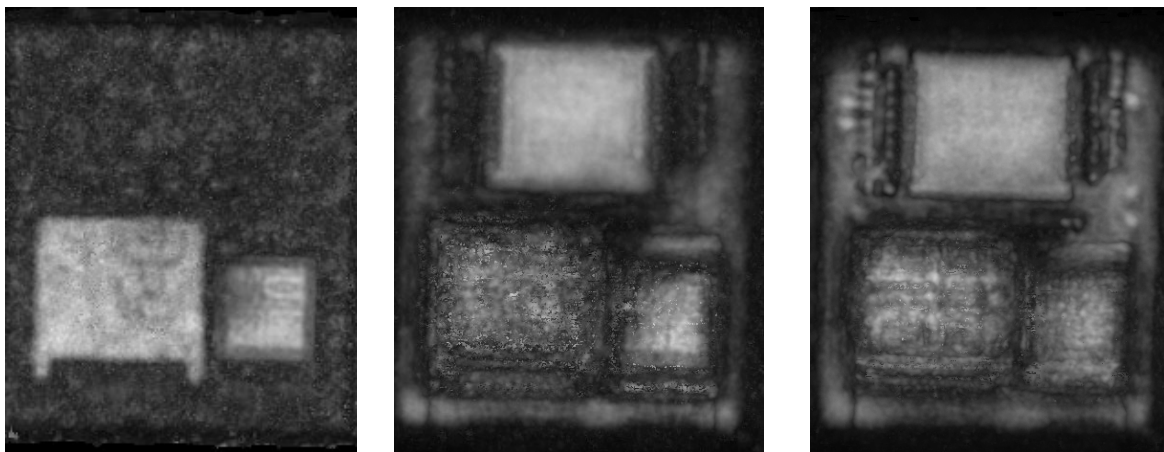


Abb. 4.1.12 C-Scans von Consumer-Sensor in drei Fokusebenen

Es zeigt sich, dass eine 3D-Rekonstruktion der Demonstrator-Bauelemente prinzipiell möglich ist und insbesondere Lunker gut dargestellt werden können (Abb. 4.1.13). Die laterale Auflösung der SAFT-Rekonstruktion erreicht jedoch momentan noch nicht das Level eines konventionellen C-Scans. Insbesondere feinere Strukturen wie Bonddrähte sind artefaktbehaftet. Dies erklärt sich aus dem Rekonstruktionsalgorithmus, welcher von punktförmigen Reflexionselementen ausgeht, also strenggenommen nur idealisierte Lunker korrekt abbildet. Eine weitere Einschränkung des momentanen Ansatzes besteht in der starken Abhängigkeit des Rekonstruktionsergebnisses von der angenommenen Schallgeschwindigkeit. Über Signallaufzeit und Schichtdickenmessungen im Querschliff kann zwar ein Wert für die Schallgeschwindigkeit der Moldmasse approximiert werden, allerdings bestehen noch keinerlei Erfahrungswerte, welche Varianz von Bauteil zu Bauteil besteht und wie sich lokale Moldmassen-Inhomogenitäten auswirken. Insbesondere bei den sehr kompakten Consumer-Inertialsensor-Packages kommt erschwerend hinzu, dass höher auflösende Transducer notwendig sind, um die notwendige laterale Auflösung zu erreichen. Diese Transducer haben aber grundsätzlich eine geringere akustische Eindringtiefe, welche u.U. nicht dazu ausreicht, das gesamte zu rekonstruierende Volumen abzubilden.

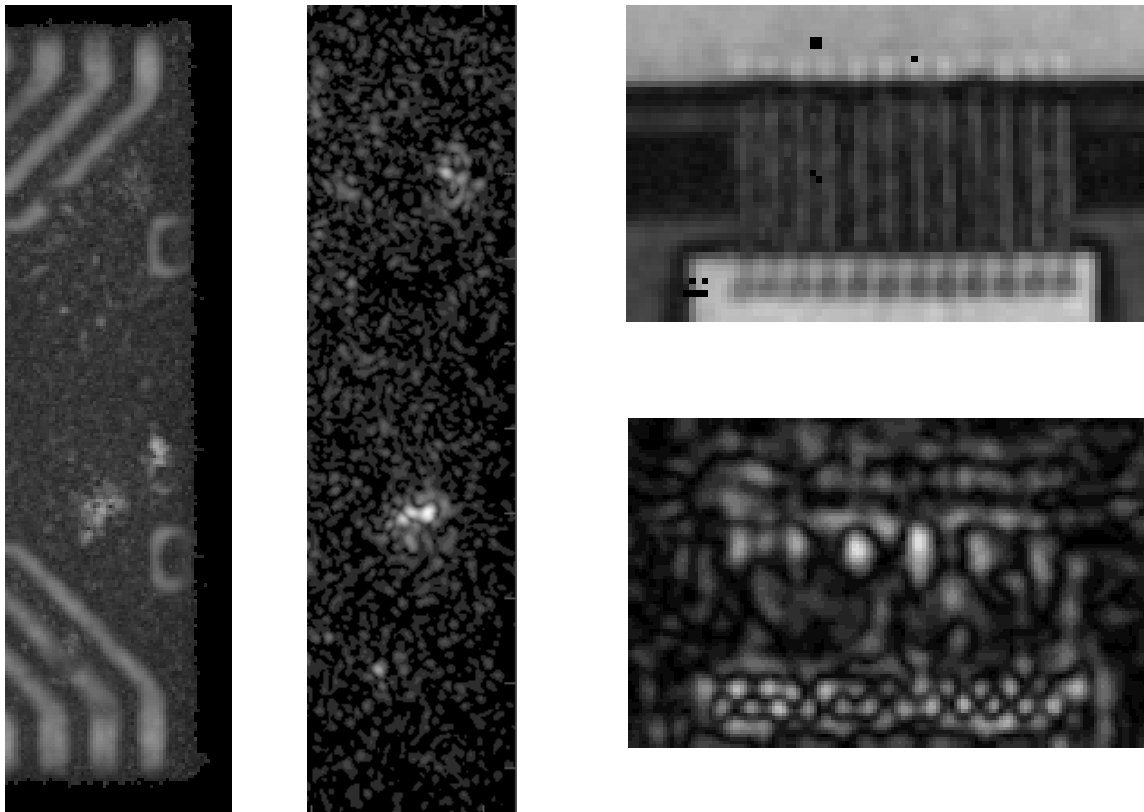


Abb. 4.1.13 C-Scan (links, oben rechts), TD-SAFT-Rekonstruktion (Mitte, unten rechts) eines Multichip-Moduls (Ausschnitte)

Durch kontinuierliche Anpassung der Software seitens PVA TePla konnten einige der genannten Probleme adressiert werden. So ist mittlerweile eine parametrische Variation der Schallgeschwindigkeit implementiert, welche es ermöglicht, die optimale Schallgeschwindigkeit anhand einer Serie von rekonstruierten Bildern zu identifizieren.

Mit Hilfe des Software-Tools FiJI / ImageJ besteht die Option, Bilderstacks als 3D-Rekonstruktion darzustellen, was in vielen Fällen die Übersichtlichkeit und Auswertbarkeit der rekonstruierten Daten verbessert (Abb. 4.1.16).

Die Algorithmen wurden zudem dergestalt angepasst, dass eine Rekonstruktion nun auch dann möglich ist, wenn der physikalische Fokus nicht auf der Probenoberfläche, sondern im Probeninneren liegt. Dies erlaubt den flexibleren Einsatz von Transducern, die eine geringere Eindringtiefe aufweisen, und führt zu einer deutlichen Verbesserung der Rekonstruktionsqualität (Abb. 4.1.14 und 4.1.15), welche dem Ergebnis des konventionellen Scans schon sehr nahekommt. Allerdings kann die Fokussierung in das Probeninnere dazu führen, dass Lunker nicht so deutlich dargestellt werden (Abb. 4.1.16). Hier müssen noch mehr Erfahrungen gesammelt werden, wie Fokustiefe, Transducerparameter und Rekonstruktionsalgorithmen zusammenspielen, um optimale Aufnahmebedingungen für spezifische Packages zu definieren.

Von besonderem Interesse ist der Nachweis von Lunkern an geometrisch schwierigen Positionen, also beispielsweise in direkter Nähe von Bonddrähten. Da solche Lunker

statistisch auftreten und auch mit anderen zerstörungsfreien Methoden wie CT nur schwer zu detektieren sind, konnten solche Lunker bislang ausschließlich mit zerstörenden Methoden wie Querschliffpräparationen nachgewiesen werden – unter hohem Zeitaufwand und mit geringer Trefferquote. Die SAFT-Methodik eröffnet hier erstmals die Möglichkeit eines systematischen Zugangs, wobei aller Voraussicht nach zunächst Demonstratoren mit künstlich eingebrachten Lunkern erstellt werden müssen, um die Leistungsfähigkeit der Methode zu evaluieren.

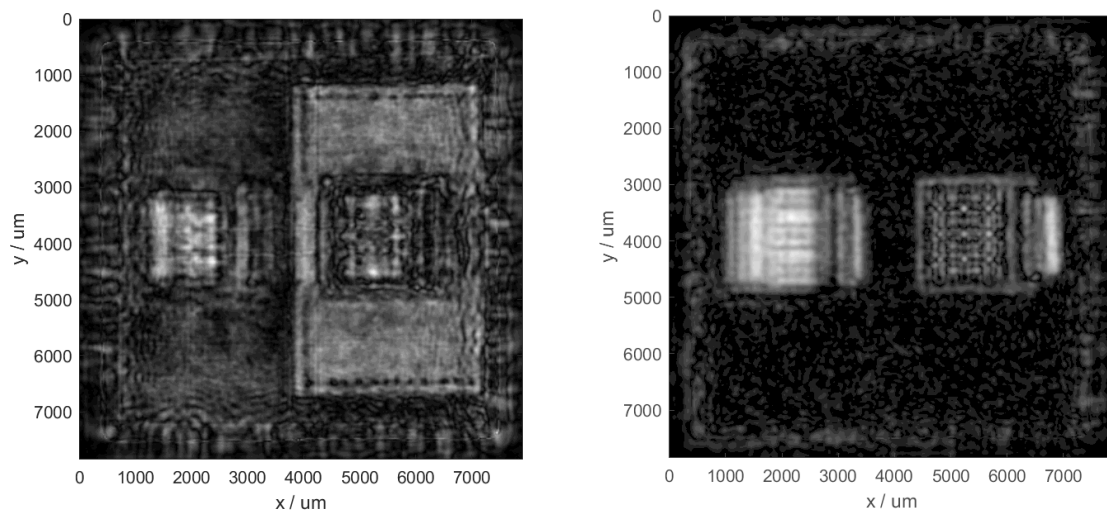


Abb. 4.1.14 FD-SAFT-Rekonstruktion des Automotive-Sensor, physikalischer Fokus auf Probenoberfläche. Ebene ASIC (links) und Ebene Sensor-Bondstufen (rechts).

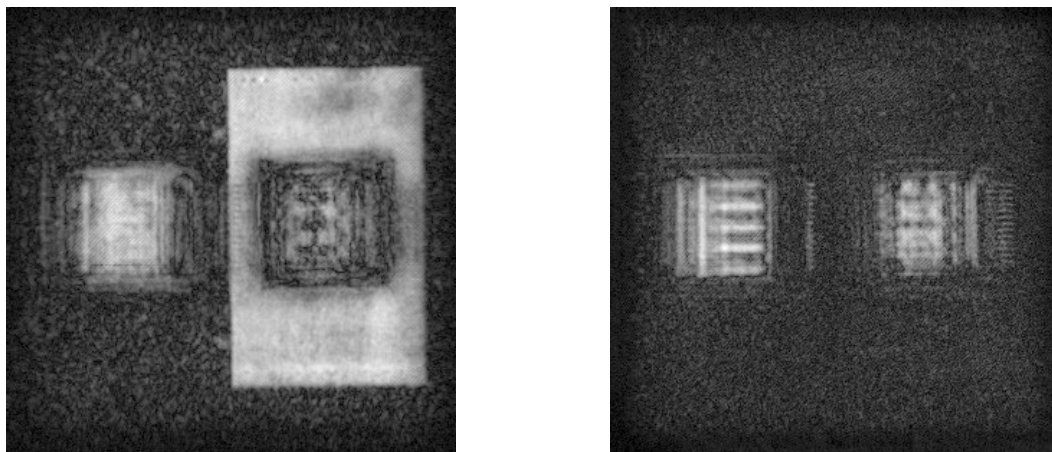


Abb. 4.1.15 FD-SAFT-Rekonstruktion des Automotive-Sensor, physikalischer Fokus auf PCB. Ebene ASIC (links) und Ebene Sensor-Bondstufen (rechts).

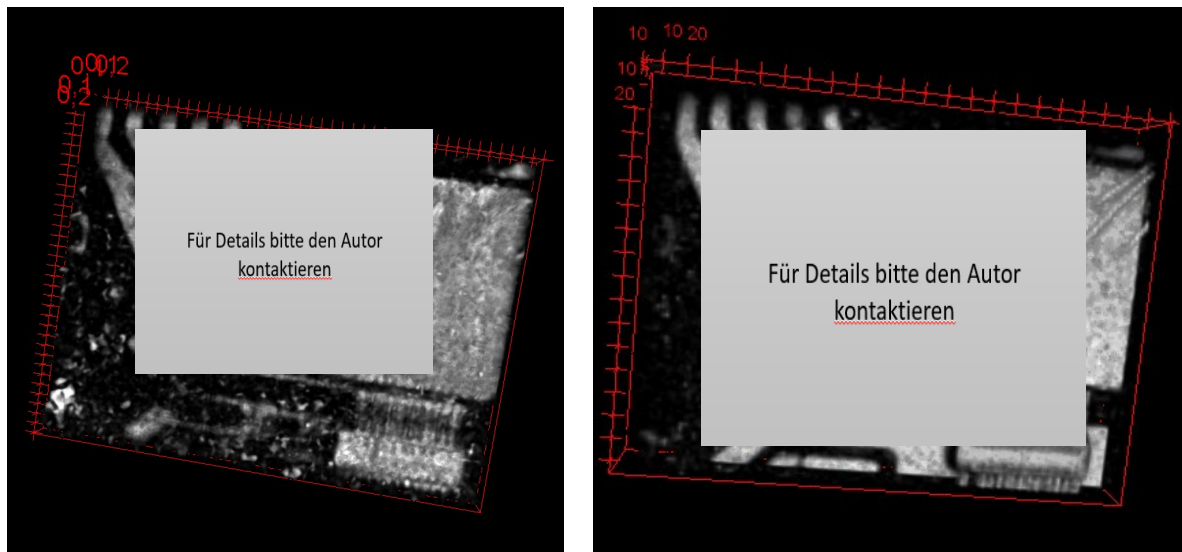


Abb. 4.1.16 FD-SAFT-Rekonstruktion eines Multichip-Moduls, physikalischer Fokus auf Probenoberfläche (links) und im Probeninneren (rechts), 3D-Rekonstruktion eines z-Stapels mit Fiji.

Da die Parameter für eine optimale Rekonstruktion zunächst noch bestimmt werden müssen, wurde die Software erweitert durch ein teilautomatisiertes Bestimmungsverfahren, was die Rekonstruktion effizienter und weniger zeitintensiv macht. Hierzu wird ein Optimierungsverfahren an definierten Strukturen durchgeführt, beispielsweise an Voids oder Bonddrähten. Die Optimierung erfolgt hierbei an den beiden für die Rekonstruktion wesentlichen Parametern c (Schallgeschwindigkeit) und ToF (Time of Flight).

Das Verfahren wurde am Beispiel des Multi Chip Bauteils durchgeführt. Die Variation des Parameters c lag hierbei zwischen 2000 m/s und 5000 m/s, die Variation von ToF zwischen 10000 ns und 10800 ns. Zur Parameterbestimmung wurden an einem beispielhaften Void die Methoden Maximal Amplitude, PBR (point to background ratio), FWHM (full width at half maximum) und Gaussfit verwendet, wobei die Maximal Amplitude und PBR Methoden die besten Ergebnisse lieferten. Die optimalen Parameter können dann an der Stelle mit maximaler Amplitude identifiziert werden, was als Ergebnis eine Kurve ergibt. Beispielhafte Ergebnisse für Maximal Amplitude und PBR sind in Abb. 4.1.17 links und rechts dargestellt. Um hieraus schließlich eindeutige Werte bestimmen zu können müssen mindestens zwei Strukturen in unterschiedlicher z Höhe rekonstruiert werden. Mit $\text{ToF} = f(1/c)$ lassen sich Ausgleichsgeraden für die jeweilige Struktur ermitteln, in deren Schnittpunkt ein optimaler Parametersatz bestimmt werden kann, der für mehrere z Höhen verwendet werden kann (Abb. 4.1.18).

Zwischenzeitlich wurde dieses teilautomatisierte Verfahren als Paper für die Konferenz ESREF eingereicht und soll anschließend veröffentlicht werden. Ein Vergleich der Rohdaten und der SAFT-Rekonstruktion der Bonddrähte zwischen den Chips im Gehäuse zeigt, dass einzelne Bonddrähte in der Rekonstruktion deutlich unterschieden werden können und keine Rekonstruktionsartefakte vorhanden sind (Abb. 4.1.19).

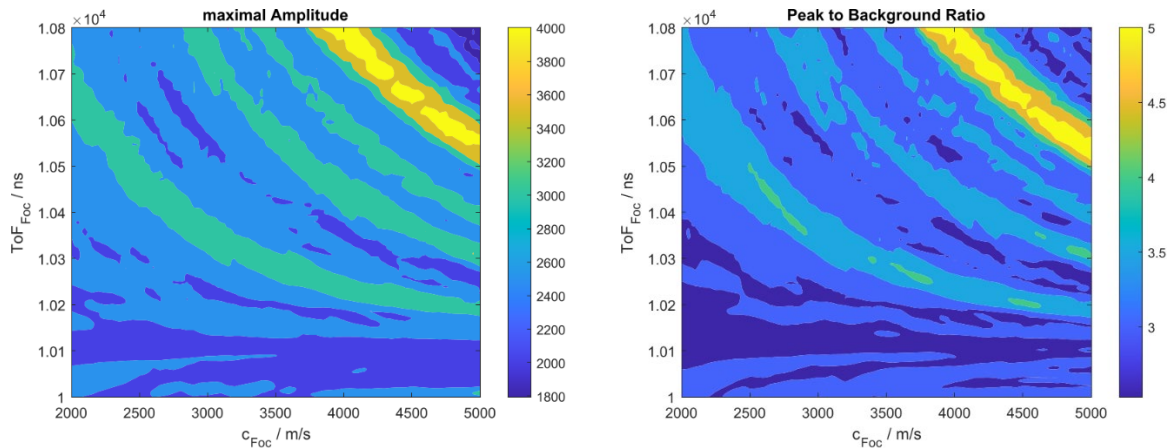


Abb. 4.1.17 Parametervariation für einen einzelnen Void und Auswertung für einen breiten Bereich von c und ToF_{Foc} mit der Maximal Amplitude Methode (links) und mit der PBR Methode (rechts).

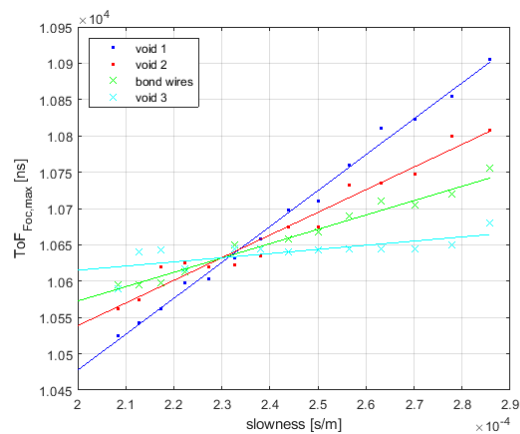


Abb. 4.1.18 Werte $\text{ToF}_{\text{Foc,max}}$ an vier Strukturen in Abhängigkeit von der jeweiligen Schallgeschwindigkeit.

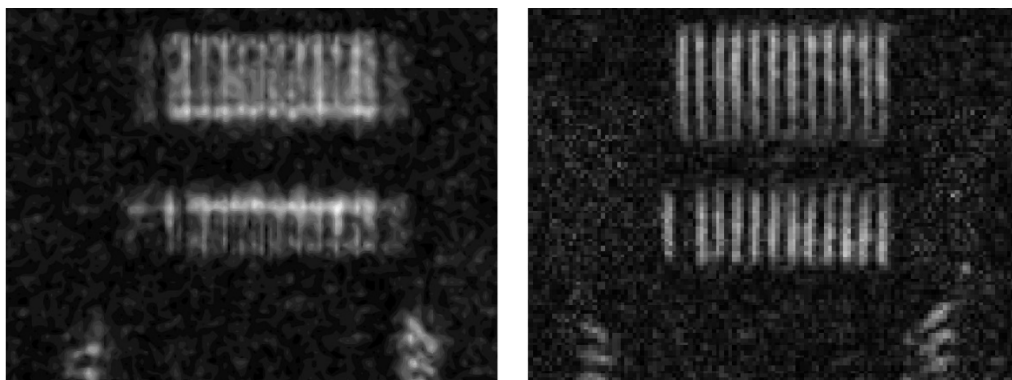


Abb. 4.1.19 Rohdaten C-Scan (linkes Bild) und SAFT-Rekonstruktion von Bonddrähten (rechtes Bild).

Aufgabe 4.2.: Lokales Fräswerkzeug für die Dekapsulation

BOSCH hat im dritten Projektjahr an eigenen Flip/Chip Bauteilen mit dem Inhouse/Tool Versuche angestellt und damit den Benchmark vorbereitet.

Die Abb. 4.2.1 zeigt unsern Fortschritt, den wir mit unserem Inhouse Equipment erzielt haben:

1. Zeile: Konventionelles 2D Fräsen mit der Folge der Zerstörung eines Chips
2. Zeile: Work around mit sog. stress-relief-depackaging
3. Zeile: Lokales Fräsen
4. Zeile: 3D-Fräsen

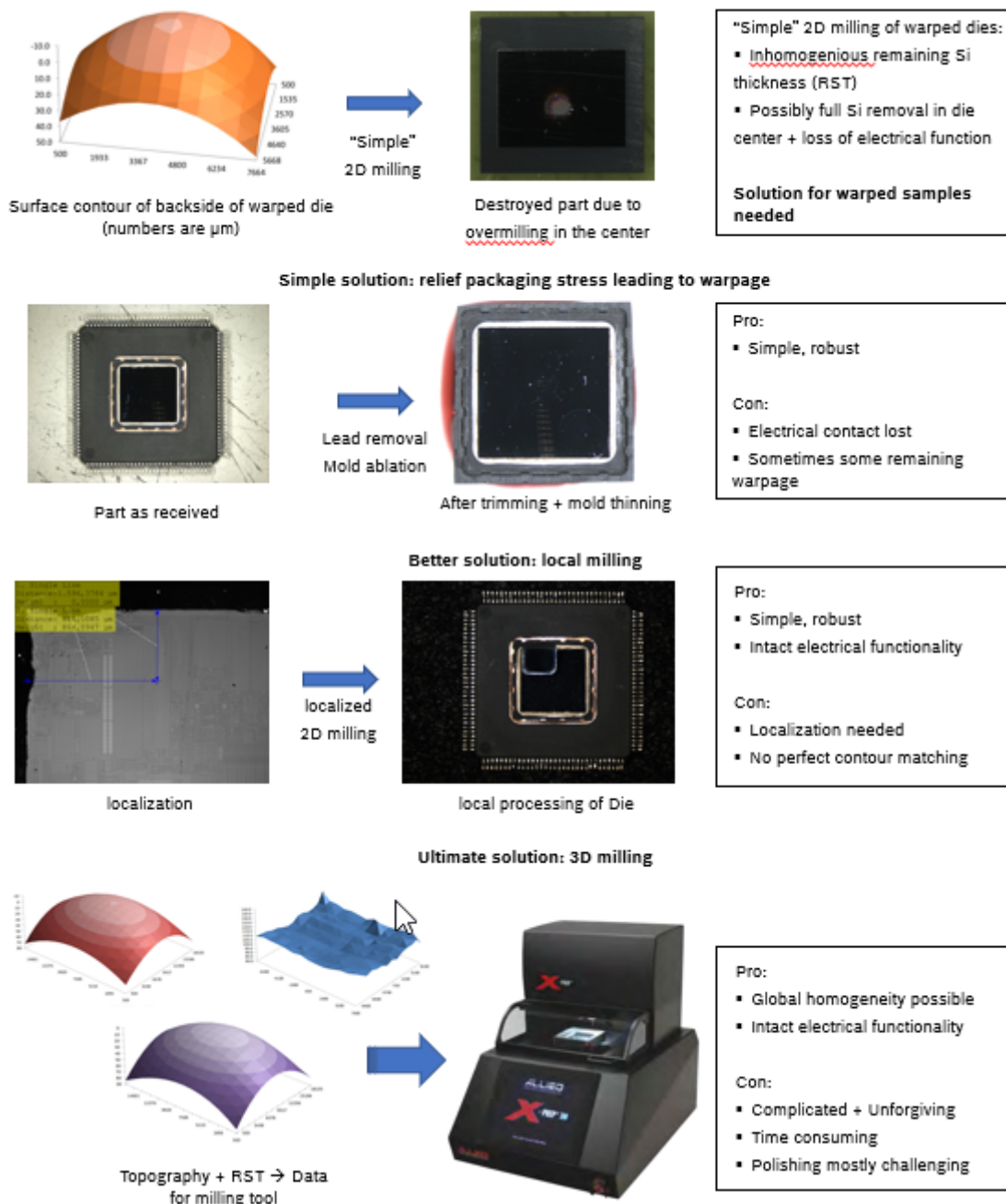


Abb. 4.2.1: Darstellung des im Projekt erzielten Fortschritts beim Fräsen von Si Chips

Aufgabe 4.3: Ein FIB/REM System für das KI-basierte Fehlersuche

Im dritten Projektjahr haben wir die von TESCAN vorgestellten Ergebnisse evaluiert

Die Einführung des Data Headers bei TESCAN Geräten ist für uns von Vorteil und wird künftig mit in die Entscheidungsmatrix beim Kauf eines FIB einfließen.

Aufgabe 4.4: Messung von thermisch bedingten Verbiegungen

4.4.1 Stand der Technik

Das Zentrallabor für Ausfallanalyse bei BOSCH besitzt seit einigen Jahren ein Weißlichtinterferometer, das erfolgreich für metrologische Untersuchungen an mikromechanischen Komponenten eingesetzt wird. Das Gerät besitzt einen motorisierten Tisch; es wird vorwiegend bei Raumtemperatur betrieben.

4.4.2 Beschreibung der aktuellen Situation

Wir beobachten seit kurzem eine steigende Nachfrage an temperaturabhängigen Messungen am WLI. Die Bauteile werden zunehmend kleiner und empfindlicher gegenüber äußeren Einflüssen, bspw. durch Temperaturwechsel oder beim Auflöten, bei dem das Bauteil einen mechanischen Stress erfährt. Dies kann zu dauerhaften Offset-Driften des Bauteils führen. Gleichzeitig gibt es weiterführende Anforderungen aus der Simulation, die das Verhalten von Bauteilen bei unterschiedlichen Temperaturen verstehen und weiter optimieren möchten.

4.4.3 Vorgehensweise

Bosch ist als aktiver Beobachter in das Teilprojekt eingestiegen und wird Testproben zur Verfügung stellen. Wir sehen einen stark steigenden Bedarf in dieser Messtechnik für unsere Produkte und möchten bei der Anwendung einen aktiven Beitrag leisten. Mit unseren Anwendungsbeispielen können wir dazu beitragen, dass die zu entwickelnde Messtechnik unsere Anforderungen abdeckt. Wir sehen zukünftig große Chancen diese Technik bei Bosch einzusetzen.

4.4.4. Stand der eigenen Messtechnik

Parallel zu den Aktivitäten innerhalb des Projekts und bei Cybertechnologies, führen wir eigene WLI-Messungen bei verschiedenen Temperaturen durch. Für die Einstellung der Temperatur verwenden wir einen Heiz-Kühl Tisch inkl. Steuerung der Firma Dantec Dynamics / Instec (s. Abb. 4.4.1.), der einen breiten Temperaturbereich abdecken kann. Der Heiz-Kühl Tisch besitzt eine Abdeckplatte aus Glas (Abb. 4.4.2.), die wir aktuell am WLI noch nicht einsetzen können. Der dadurch zur Verfügung stehende Temperaturbereich mit geöffnetem Heiz-Kühl Tisch ist eingeschränkt und erstreckt sich von ca 10°C bis 65°C.

In der nächsten Ausbaustufe werden wir eine modifizierte Abdeckplatte aus Metall (Abb. 4.4.2.) mit einem Glasfilter verschließen, um den Temperaturbereich zu vergrößern. Damit das Messprinzip weiterhin funktioniert, muss der Referenzstrahlengang im Objektiv ebenfalls den gleichen Glasfilter enthalten. Dafür ist ein Glas kompensiertes Objektiv notwendig (Abb. 4.4.3.).

WLI-Untersuchungen an diversen Bauteilen mit dem Heiz-Kühl Tisch sind in Abb. 4.4.4. zu sehen. Hier wurden Messungen bei Raumtemperatur und bei 65°C durchgeführt. Die Auswertung der Messdaten sowie deren Vergleich erfolgt manuell und ist sehr aufwändig.



Abb. 4.4.1.: WLI newview 9000 der Firma Zygo (Bild links), Heiz-Kühl Tisch von Dantec Dynamics / Instec (Bild rechts)

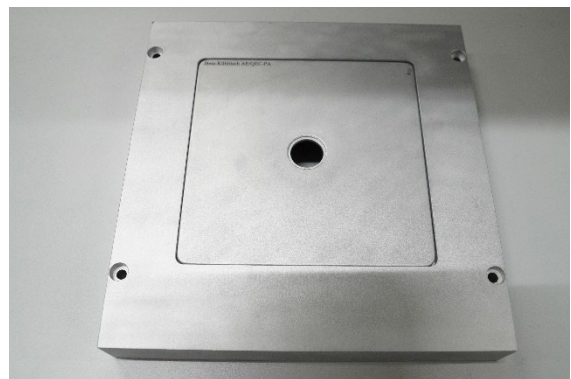
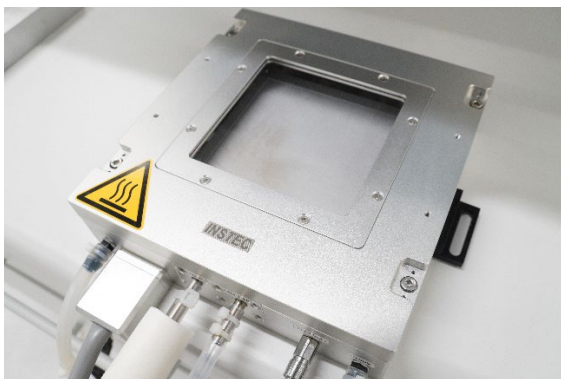


Abb. 4.4.2.: Heiz-Kühl Tisch mit Glasplatte zur thermischen Abschirmung der Probe (Bild links), modifizierte Abdeckplatte (Eigenbau) mit optischer Öffnung (Bild rechts)

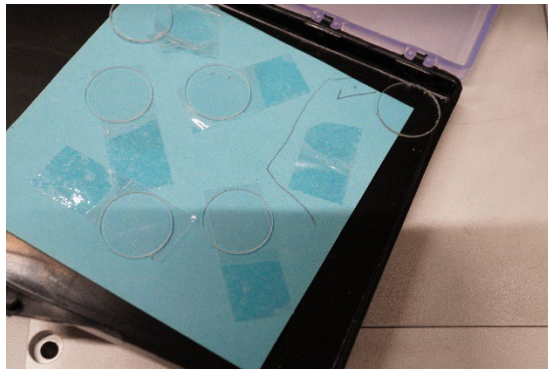


Abb. 4.4.3.: Glasfilter (Bild links), für das Glas kompensierte Objektiv und die modifizierte Abdeckplatte (Bild rechts)



Abb. 4.4.4.: WLI-Messungen im eigenen Labor an Testproben bei 25°C Raumtemperatur (Bild links) und bei 65°C mit dem Heiz-Kühl Tisch (Bild rechts).

4.4.5. Testmessungen bei Cybertechnologies

Eine Gerätevorstellung bei Cybertechnologies hat stattgefunden. Die Funktionsweise der Hard- und Software wurde anhand von Testproben erklärt. Das Ergebnis der ersten Messungen an der Testprobe ist im Folgenden dargestellt und wird noch weiter verfeinert. Hierfür wurden im ersten Schritt Messungen am Bauteil an zwei unterschiedlichen Temperaturen durchgeführt (Abb. 4.4.5):

Messung 1 bei Raumtemperatur

Messung 2 bei 200°C

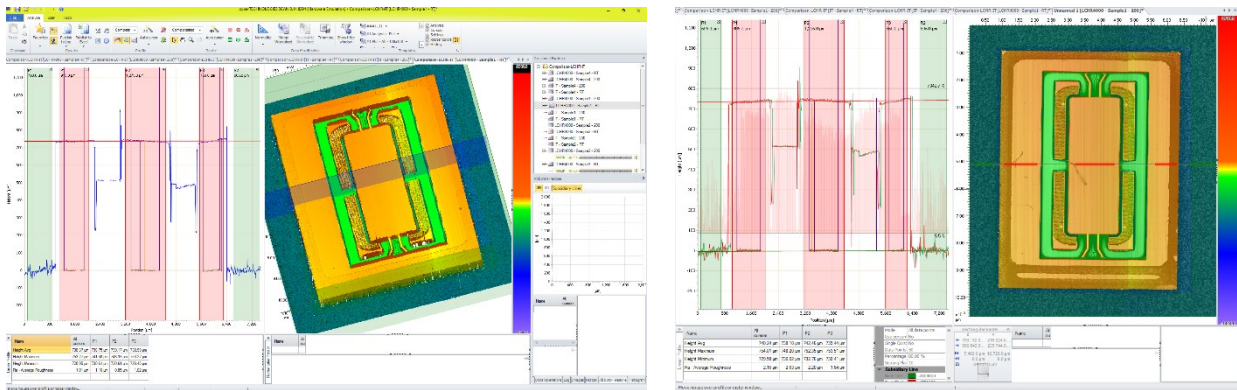
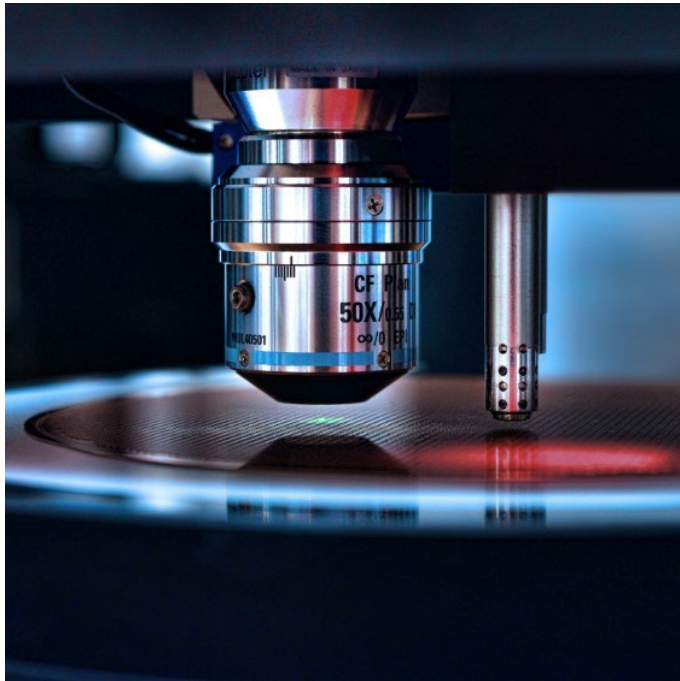


Abb. 4.4.5.: Messung bei Raumtemperatur RT (Bild links), Messung bei 200°C inkl Überlagerung am linescan (Bild rechts)

Interessant hierbei sind topografische Veränderungen in Abhängigkeit von der Temperatur an bestimmten Positionen auf dem Bauteil. Die Cybertech Software bietet hierfür zahlreiche Möglichkeiten für detaillierte Auswertungen und Darstellungen. Diese sollen im weiteren Verlauf des Projekts genauer untersucht und bei Bedarf weiter verbessert werden.

Cyber Technologies hat im Verlauf des Projekts die Messsysteme und Auswertesoftware kontinuierlich weiterentwickelt. Die Möglichkeiten, die sich aus der Anwendung dieser Messtechnik ergeben, sollen nun zusammenfassend, im Detail, im folgenden Abschnitt aufgezeigt werden. Simon Cannonier von Cyber hat hierfür freundlicherweise den Messablauf und die Auswertemöglichkeiten an unseren Testproben beschrieben. Eine abschließende Bewertung aus Bosch Sicht folgt am Ende:



cyber
TECHNOLOGIES

NON-CONTACT 3D SURFACE METROLOGY

FA4.0 – BOSCH MEASUREMENT

SETUP



- **CT platform**
 - CT 350 (X&Y stage with 350 x 350 mm travel)
 - CT 600S (gantry system with 600 x 600mm travel) > used for this test
- **Multi Sensor configuration**
 - Chromatic confocal white light line sensor
L-CHR-3900 / 80nm resolution / Aperture: +20° / up to 1.15 million datapoints/s
 - IR interferometer with internal reference for distance measurement
P-IT-400 / 1 nm resolution / Aperture: +β° / up to 70000 datapoints/s
> used for the following measurements
- **Heating Type: Conduction heating stage**
 - Sample size: up to 150 mm
 - Temperature range: up to 250 °C
 - Additional heating setups available: convection / die heater



Sensor unit on top of heating stage with glass cover to protect sensor from heat

FA4.0 – BOSCH MEASUREMENT

WORKFLOW - Measurement



Manual Measurement (automated measurement also available):

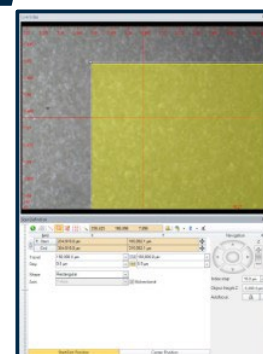
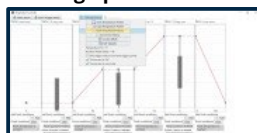
1. Scan definition:

- Set measurement area with camera > 7000 x 10000 µm² for this test
- Select step size > 50 µm for this test (0.5µm smallest possible step size)
- Use autofocus button to focus on sample

2. Measure at room temperature (24 °C)



3. Heating up to 200 °C manually or define (complex) heating cycles and remeasure



Definingscanand area

Rechteckiges Raster	
X	Y
746.588.0...	260.526.0...
763.588.0...	270.526.0...
7.000.0 µm	10.000.0 µm
50.0 µm	50.0 µm
Zi	137.512.0 µm

Scandefinitionsof actualscanfor test

FA4.0 – BOSCH MEASUREMENT

WORKFLOW - Analysis

cyber
TECHNOLOGIES

Manual Analysis (semiautomated + fully automated also available)

1. Normalization on area of heating plate surrounding sample

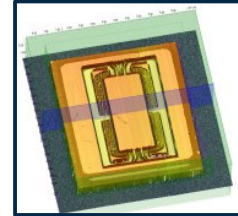
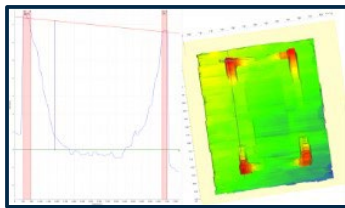
Since the heating plate can also expand during operation, it's necessary to normalize the scan on the heating plate to make have both scans on the same level.

2. (Lateral) alignment of scans

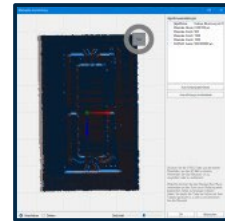
Heating up the system can lead to movement of the sample. Alignment can be done manually or also automatized.

3. Dataoperation: Measurement at 200 °C – Measurement at RT (24 °C)

Subtraction of measurement at different temperatures + possible median to remove artifacts
Result will show height difference due to expansion and tilt of sample at different temperatures.



Normalization reference area (green cursor) on heatingplate



Lateral alignment of scans

FA4.0 – BOSCH MEASUREMENT

SAMPLES

cyber
TECHNOLOGIES



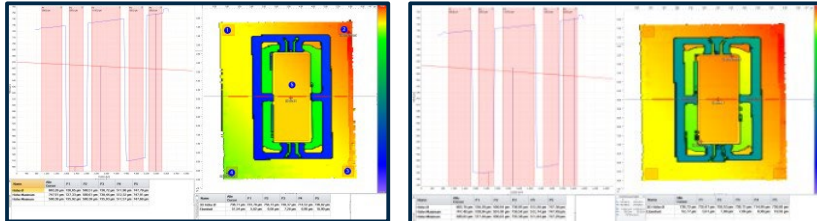
FA4.0 – BOSCH MEASUREMENT

SAMPLE 1- Analysis



Manual Analysis (semiautomated + fully automated also available)

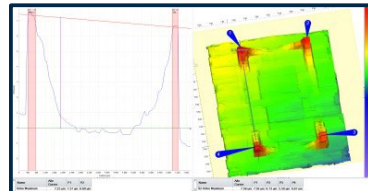
1. Measurement at room temperature & 200 °C



Red cursors= measurement areas

2. 200 °C – RT

Subtraction of the both scans shows the expansion of material as well as different tilt of sample



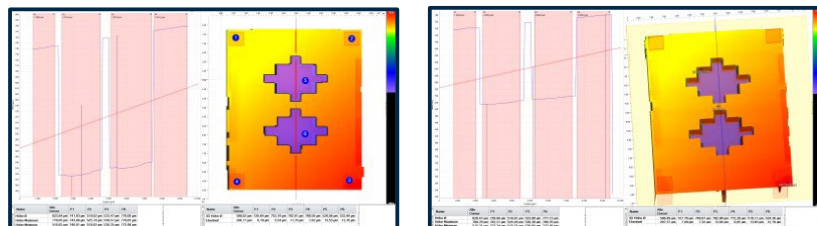
FA4.0 – BOSCH MEASUREMENT

SAMPLE 1- Analysis



Manual Analysis (semiautomated + fully automated also available)

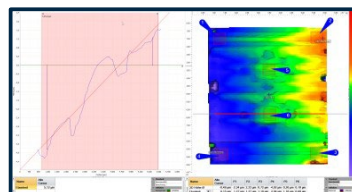
1. Measurement at room temperature & 200 °C



Red cursors= measurement areas

2. 200 °C – RT

Subtraction of the both scans shows mainly different tilt of sample



Fazit:

Die Messsysteme von Cyber erschließen uns Untersuchungsmöglichkeiten, die wir heute noch nicht haben bzw. die wir nur sehr aufwändig durch manuelle Durchführung erreichen können. Die entwickelten Systeme können individuell an die jeweilige Messaufgabe angepasst werden und bieten einen hohen Grad an Automatisierung. Die für uns besonders herauszustellenden Merkmale sind:

- Nutzung des universellen Probenträgers im System integriert
- Temperaturverlauf individuell konfigurierbar
- Konvektionsheizung integrierbar
- Temperaturgeführte Messung automatisierbar
- Messdatenerfassung mit json Konzept verfügbar

Für die Auswertung der Messdaten bietet die Cyber Software in Verbindung mit dem json Konzept weitere Fortschritte und Möglichkeiten:

- Alignment der gemessenen Bilder nach Temperaturdrift oder zum Vergleich von Bildern. Kompensation von x,y Shift und Rotation (durch sog. Overscan)
- Separation von Einzelbauteilen in Übersichtsscans ermöglicht Detailauswertungen
- Auswertemplates konfigurierbar für automatisiertes Ausrichten mit weiteren Datenverarbeitungsschritten für wiederkehrende Untersuchungen
- Individuelle und reichhaltige Darstellungsmöglichkeiten der meist sehr großen 3D-Datensätze mithilfe:
 - Individueller linescans
 - Differenzbildung von 2 Topografiedatensätzen
 - Abweichungen gegenüber einer Referenzprobe (sog. Heatmap)
 - Filter- und Fitfunktionen
 - Verschiedene Import- und Exportdatenformate
 - Konfigurierbare Berichtserstellung
 - Erzeugung von maschinenlesbaren Daten für die Struktur- und Anomalieerkennung unter Zuhilfenahme von KI

Darüber hinaus kann das System in Fertigungslinien integriert werden, was die Implementierung von Messprogrammen aus dem Entwicklungsumfeld, dem wir als Zentrallabor angehören, in das Fertigungsumfeld zukünftig verbessern kann.

Aufgabe 4.5: Ultrahohe Auflösung in Röntgenaufnahmen

Dieser Task startete etwas später als die übrigen Tasks. Die Aufgabe der Robert Bosch GmbH bestand hauptsächlich darin, geeignete Proben von Relevanz zur Verfügung zu stellen, um die geplanten Aufbauten und Auswertungen einem Praxistest zu unterziehen. Zudem sollten diese Ergebnisse mit den Aufnahmen verglichen werden, die wir mit unseren im Labor vorhandenen Röntgenanlagen erzielen können. Der Aufbau der Testsetups bei den Partnern des Projekts sollte wie in Abbildung 2-1 aufgelistet fertiggestellt sein. Leider kam es vor allem bei dem Aufbau des nano-Setups (Setup 2B) aufgrund von Lieferschwierigkeiten und technischen Problemen zu nicht unerheblichen Verzögerungen, so dass dieses Setup bis zum Abschluss des Projekts nicht wie geplant zur Verfügung gestellt werden konnte. Daher wurde hier ein alternatives Setup genutzt, bei dem statt dem geplanten direktwandelnden Detektor ein CMOS-Detektor mit Szintillator genutzt wurde.

FA4.0 / WP4.5 project update		X-RAY Test-Setups & Tasks	
<ul style="list-style-type: none"> ➤ Setup 1A: TDS Scanning for Dual Energy & Hi-Res. Reconstruction (5μ) <ul style="list-style-type: none"> > SMT Comp/Boards > μ Focus Tube (130kV/20μ) > TDI-500 / 100μ photon-counting detector ➤ Setup 1B: TDS Scanning for Dual Energy & Hi-Res. Reconstruction (1μ) <ul style="list-style-type: none"> > SMT & Semi-BE / Wire-Bonds > μ Focus Tube (130kV/20μ) > DRACO-TDI / 65μ photon-counting detector ➤ Setup 2A: CT-Setup 2 for Hi-Res/Hi-Power CT Reco (10-20μ) <ul style="list-style-type: none"> > High-Power Components! > Excillum Metall-Jet Tube (160kV/20μ) up to 700W > THOR FX20 / 100μ photon-counting detector ➤ Setup 2B: CT-Setup 3 for Super-Res CT Reco (< 500nano) <ul style="list-style-type: none"> > Semi-Be / Wire-Bonds > Excillum NanoTube (100kV/ < 0,5μ) > THOR and/or Thor SR Setup: 100μ photon-counting detector 		<div>Feb/Mar 21</div> <div>July/Aug 21</div> <div>Feb/Mar 21</div> <div>Sep/Oct 21</div>	

ABBILDUNG 2-1: URSPRÜNGLICHER ZEITPLAN FÜR DIE VERFÜGBARKEIT DER VERSCHIEDENEN SETUPS.

4.5.1 Aufgabenstellung 1 und Testproben von BOSCH

Hochauflösende Röntgenbilder und CT-Scans sollten mithilfe der in Abbildung 2-1 vorgestellten Setups, v.a Setup 2B, möglich gemacht werden. Auch die „Dual-Energy“-Option sollte genutzt werden, um z.B. den Kontrast für bestimmte Materialien zu erhöhen. Durch die oben beschriebenen, unvorhersehbaren Schwierigkeiten konnten nicht alle geplanten Tests durchgeführt und kein direktwandelnder Detektor genutzt werden.

Zum Vergleich der Ergebnisse von den neuen Setups und von unserem bestehenden Röntgengerät, werden sowohl Schnittbilder als auch Geräteparameter gegenübergestellt. Diese werden dann im Anschluss bewertet.

Folgende Testproben von Bosch wurden zur Verfügung gestellt:

A.) BMA355, s. Abbildung 2-2:

Folgende Aufgaben sollten bearbeitet werden:

- Visualisierung von Cu TSVs: Poren, Risse, Delamination (Grenzschicht ASIC-Metallisierung zu TSV)
- Verbiegung des ASICs (Metallisierung und/oder UBM) und, hauptsächlich, des MEMS (→ besserer Kontrast und weniger Rauschen notwendig)

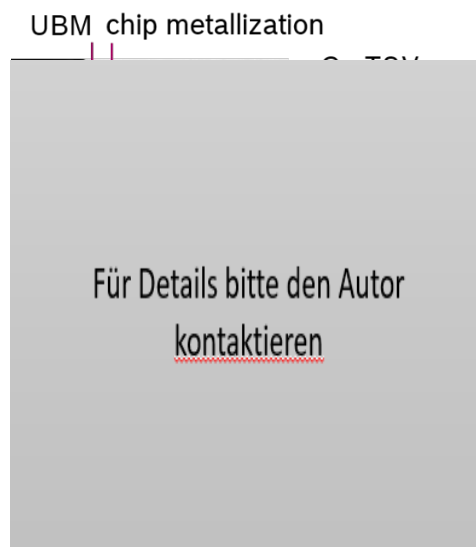
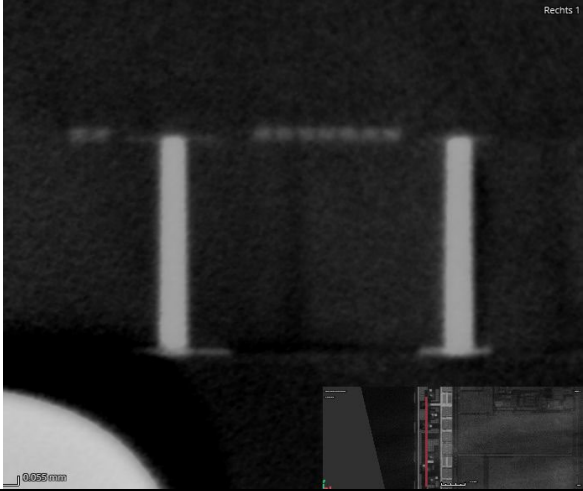
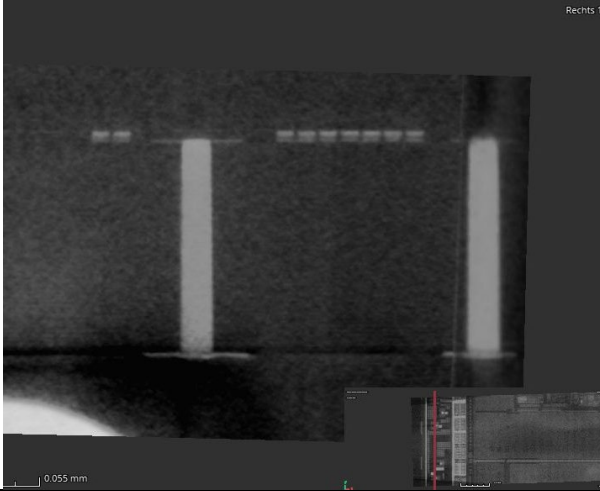


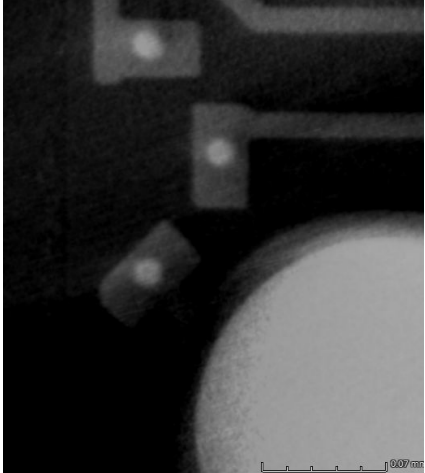
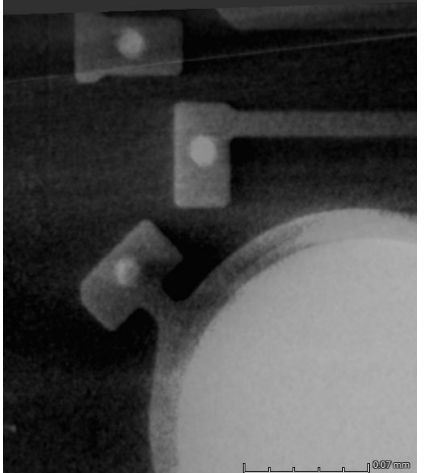


ABBILDUNG 2-2: RÖNTGENBILD (BOSCH) EINES BMA355.

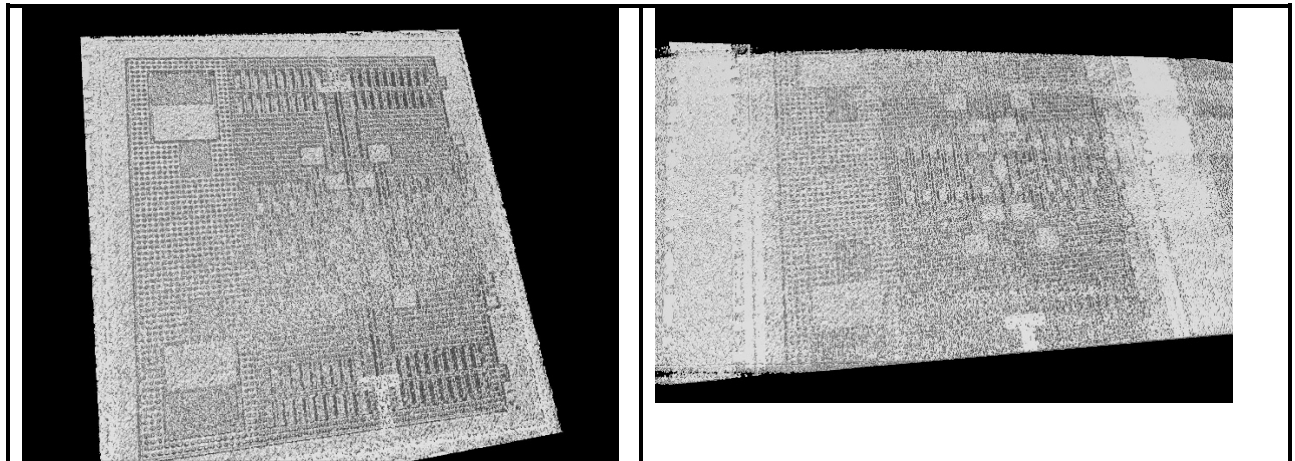
TABELLE 1: ÜBERSICHT DER VERWENDETEN PARAMETER FÜR PROBE BMA355

	Bosch	Excillum
Röntgenanlage	Für Details bitte den Autor kontaktieren	
Röhrentyp		
Detektortyp		
Beschleunigungsspannung (kV)		
Leistung (W)		
Filter		
Voxelgröße (µm)		
Integrationszeit		
Projektionen		
Messzeit (min)		

TABELLE 2: VERGLEICH DER ERGEBNISSE FÜR PROBE BMA355

Bosch	Excillum
	
	
	





Die TSVs (Tabelle 2, Zeile 1, 2 und 3) können im Scan von Excillum deutlich besser beurteilt werden als im Scan von Bosch: Der Scan ist schärfer und kann somit eventuell vorhandene Poren, Risse und Delaminationen eher sichtbar machen. Die ASIC-Metallisierung (Tabelle 2, Zeile 4 und 5) wird im Excillum-Scan schärfer abgebildet; kleinere Strukturen sind noch gut zu beurteilen. Die Oberflächenbestimmung der ASIC-Metallisierung (Tabelle 2, Zeile 6) funktioniert für den kontrastreicheren Excillum-Scan etwas besser; die Bestimmung einer eventuell vorhandenen Verbiegung ist dennoch schwierig, da nur die größeren Metallflächen einen ausreichenden Kontrast aufweisen. Auch die MEMS-Struktur (Tabelle 2, Zeile 7) wird im Excillum-Scan schärfer abgebildet: Hier können auch noch schmalere Silizium-Stege beurteilt werden, die im Scan von Bosch nicht voneinander trennbar sind. Dementsprechend funktioniert die Oberflächenbestimmung an der MEMS-Struktur (Tabelle 2, Zeile 8) zwar besser, für eine sinnvolle Beurteilung einer eventuellen Verbiegung ist diese dennoch nur mäßig geeignet.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass der Scan von Excillum eine deutlich bessere Detailerkennbarkeit aufweist als der Scan von Bosch. Eindrücklich ist dabei außerdem, dass der Scan von Excillum nur halb so lange dauerte als der von Bosch, d.h. es kann mit dem neuen Setup in kürzerer Zeit eine bessere Qualität erreicht werden. Dennoch konnten bei diesem Scan nicht alle Fragestellungen zur vollsten Zufriedenheit gelöst werden. Eventuell sind weitere Optimierungen möglich.

B.) SMA6xx in LGA, s. Abbildung 2-3:

Folgende Aufgaben sollten bearbeitet werden:

- Visualisierung der Delamination unter und über dem Keramikkondensator (#3)
- Verbiegung der ASIC-Metallisierung und der PCB (obere und untere Schicht) (→ besserer Kontrast und weniger Rauschen notwendig)


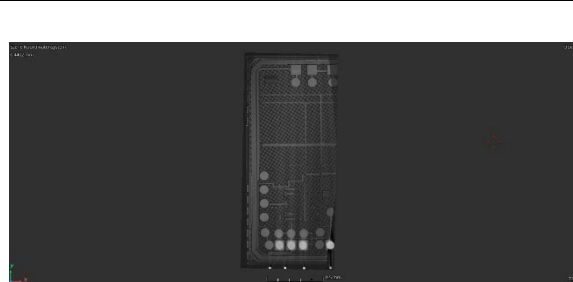


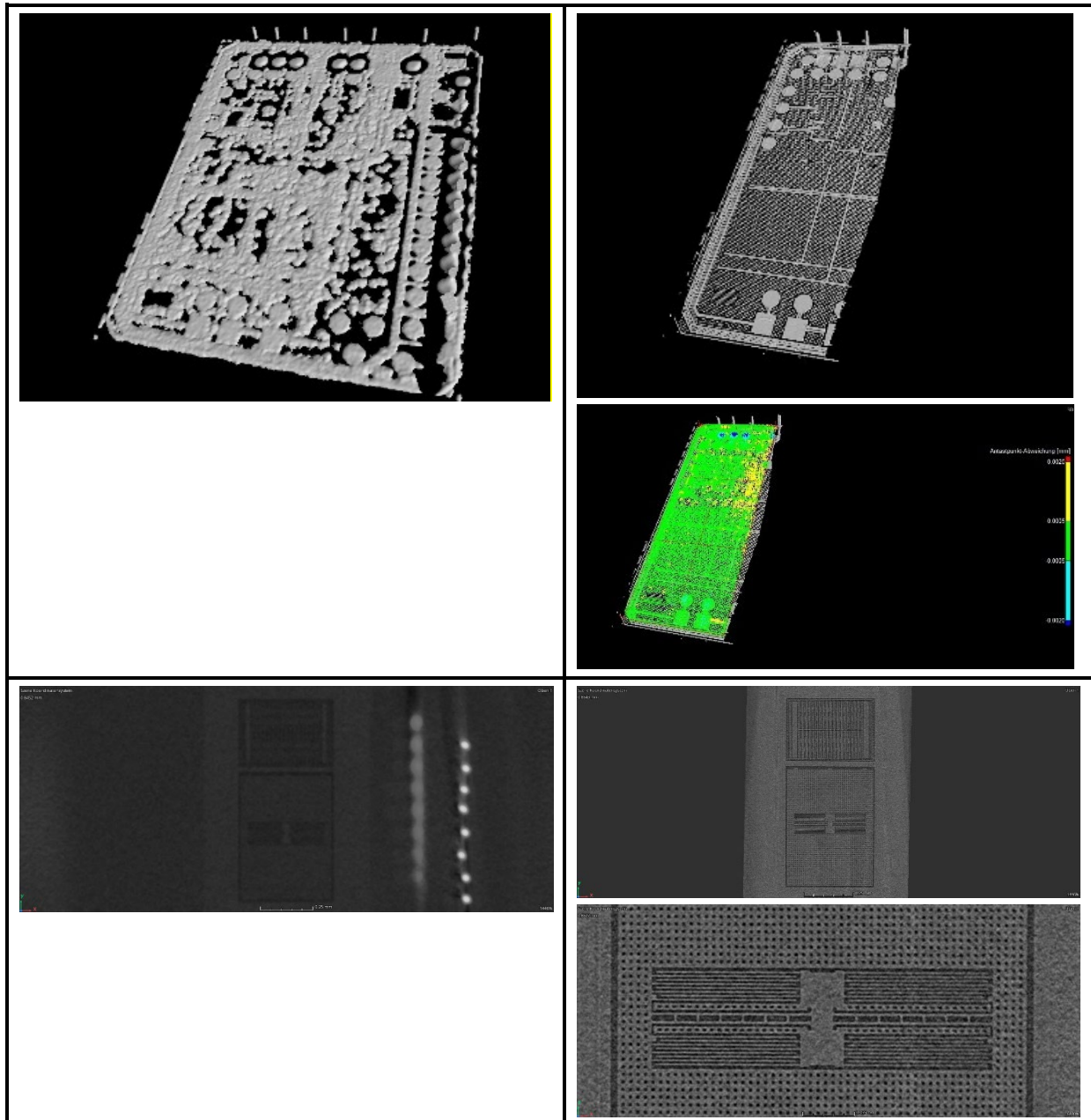
ABBILDUNG 2-3: CT-3D-BILD (BOSCH) EINES SMA6XX (NUR HÖHER ABSORBIERENDE MATERIALIEN SIND DARGESTELLT).

TABELLE 3: ÜBERSICHT DER VERWENDETEN PARAMETER FÜR PROBE SMA6XX IN LGA

	Bosch	Excillum
Röntgenanlage	Für Details bitte den Autor kontaktieren	
Röhrentyp		
Detektortyp		
Beschleunigungsspannung (kV)		
Leistung (W)		
Filter		
Voxelgröße (µm)		
Integrationszeit		
Projektionen		
Messzeit (min)		

TABELLE 4: VERGLEICH DER ERGEBNISSE FÜR PROBE SMA6XX IN LGA

Bosch	Excillum
	<p>Kein Vergleichsbild vom Keramik Kondensator #3 vorhanden, da nur ein Teil der Probe gescannt wurde.</p>
	
	



Für die Bewertung der Ergebnisse ist es wichtig anzumerken, dass der Scan von Excillum nur an einem Teilausschnitt der Probe durchgeführt wurde, der keinen der Kondensatoren enthält und somit mit weniger Artefakten behaftet ist und eine Filterung nicht unbedingt notwendig ist. Dadurch konnten zwar qualitativ hochwertigere Ergebnisse erzielt werden, jedoch nur ein Teil der Aufgabenstellung bearbeitet werden. Zudem ist hier keine direkte Vergleichbarkeit der Scans gegeben.

Die Verbiegung der PCB kann in beiden Scans beurteilt werden (Tabelle 4, Zeile 2). Die ASIC-Metallisierung (Tabelle 4, Zeile 3) wird beim Scan von Excillum sehr gut abgebildet; eine Oberflächenbestimmung ist hier möglich (Tabelle 4, Zeile 4). Die MEMS-Struktur (Tabelle 4, Zeile 6) kann im Scan von Excillum gut beurteilt werden.

Die Bildqualität des Scans, der mit dem neuen Setup bei Excillum durchgeführt wurde, weist eine überraschend gute Qualität. Eine direkte Vergleichbarkeit mit dem Scan von Bosch ist hier nicht gegeben.

C.) CS510, s. Abbildung 2-4:

Folgende Aufgaben sollten bearbeitet werden:

- Visualisierung der künstlich produzierten Aufschmelzungen in der ASIC-Metallisierung in Anwesenheit von hochabsorbierendem Material

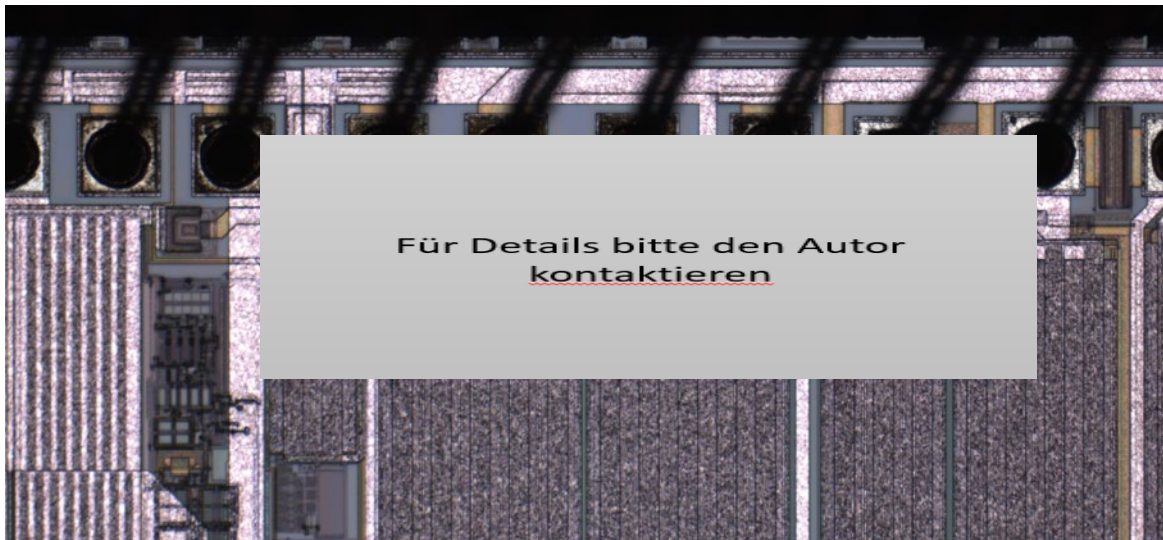


ABBILDUNG 2-4: LICHTMIKROSKOPIEBILD (BOSCH) DER AUFSCHELMZUNGEN IN DER ASIC-METALLISIERUNG EINES CS510.

Nach Aussage von Excillum ist bei dieser Probe aufgrund der Probengröße und der Präsenz von hochabsorbierendem Material keine Verbesserung der Bildqualität zu erreichen.

4.5.2 Aufgabenstellung 2 und Testproben von BOSCH

Hochabsorbierende Materialien sollten mithilfe einer Metal-Jet-Tube durchstrahlt werden, welche deutlich höhere Leistungen erzielen kann als die herkömmlichen Röntgenröhren. Zudem sollten mithilfe eines intelligenten Algorithmus im 2D-Modus Poren aus verschiedenen Lotschichten voneinander unterschieden und quantifiziert werden. Zum Trainieren des Algorithmus wurden den Projektpartnern eine Anzahl von etwa 50 Proben zur Verfügung gestellt.

Folgende Testproben wurden von Bosch zur Verfügung gestellt: SLFPAK88, s. Abbildung 2-5 und Abbildung 2-6.



ABBILDUNG 2-5: RÖNTGENBILD (BOSCH) EINES SLFPAK88.



ABBILDUNG 2-6: SKIZZE DES QUERSCHNITTS DER PROBE SLFPAK88.

Die Proben wurden bei Direct Conversion mittels TDI-Scan (time delay integration) untersucht. Es wurde ein direktwandelnder Detektor („Photon-counting“) genutzt, der schnelle Messzeiten möglich macht. Die verwendeten Parameter sind in Tabelle 5 zusammengestellt.

TABELLE 5: ÜBERSICHT DER VERWENDETEN PARAMETER FÜR PROBE SLFPAK88

Röntgenanlage	S...	
Röhrentyp		
Detektortyp	P Co F	
Beschleunigungsspannung (kV)		
Leistung (W)		
Fokusgröße (µm)		
Objektauflösung (µm)		
Scan-Geschwindigkeit (mm/sec)		
Messzeit pro Bauteil(sec)		

Der Partner Gimic stellte einen passenden Algorithmus bereit und trainierte diesen mit den von Direct Conversion bereitgestellten Daten inkl. Labeling der Poren.

Für das in Abbildung 2-5 abgebildete Bauteil wurden Ergebnisse zur Verfügung gestellt, s. Abbildung 2-7.

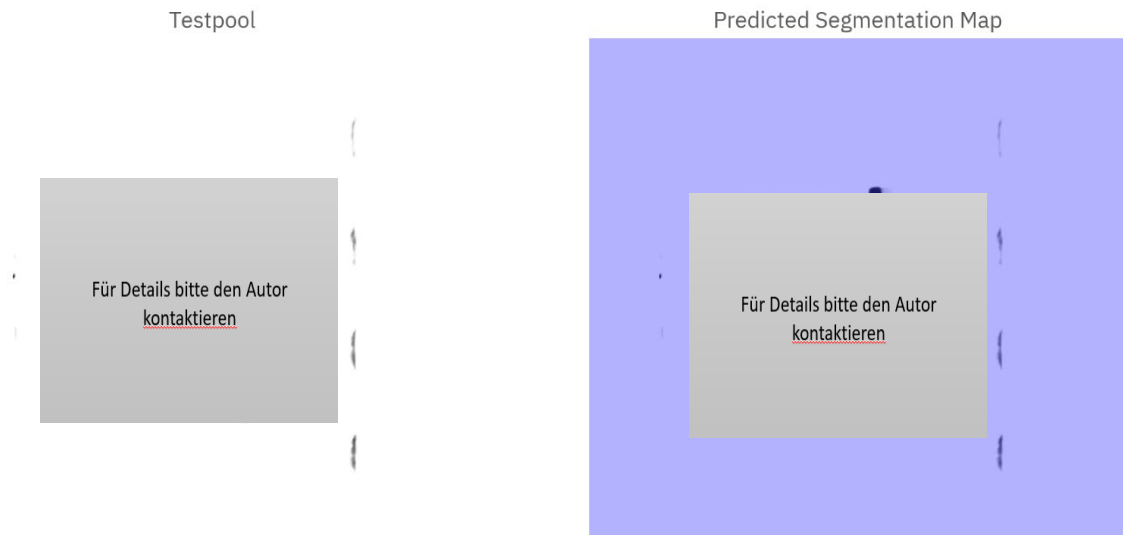


ABBILDUNG 2-7: TRENNUNG DER BEIDEN LOTSCHICHTEN (ROT UND GRÜN) MITHILFE MACHINE LEARNING.

Die Ergebnisse zeigen, dass eine Analyse von Poren und damit die Beurteilung derer nach ASTM-Standard mit kurzen Scanzeiten und einer automatischen Auswertung prinzipiell möglich ist. Dies könnte sogar Inline implementiert werden. Leider waren nicht alle Zuordnungen der Poren zur Lotschicht korrekt und uns wurden die Ergebnisse der Auswertung, wie z.B. die Volumina der verschiedenen Poren, nicht zur Verfügung gestellt.

Leider wurden keine CT-Scans mit der MetalJet-Röhre zur Verfügung gestellt.

2.5 ARBEITSPAKET 5: VERKÜPFUNG DER ANALYSEGERÄTE MIT DER KORRELATIVEN DATENAUSWERTUNG

Aufgabe 5.2: Korrelative Datenanalyse mittels „Digital Twins“ und Fehlerkatalogen

5.2.1 Fehlerkatalog

Gemeinsam mit der Universität Stuttgart arbeiteten wir an einem Vorschlag für einen Fehlerkatalog, der es ermöglichen soll mittels intelligenter Algorithmen bereits vorhandene Ergebnisse im Analyseablauf zu berücksichtigen.

Die Universität Stuttgart stellte den prinzipielle Aufbau des Fehlerkatalogs zur Verfügung und die Systematik (s. Abb. 5.2.1) wird bei uns in einer Datenbankerweiterung einfließen.

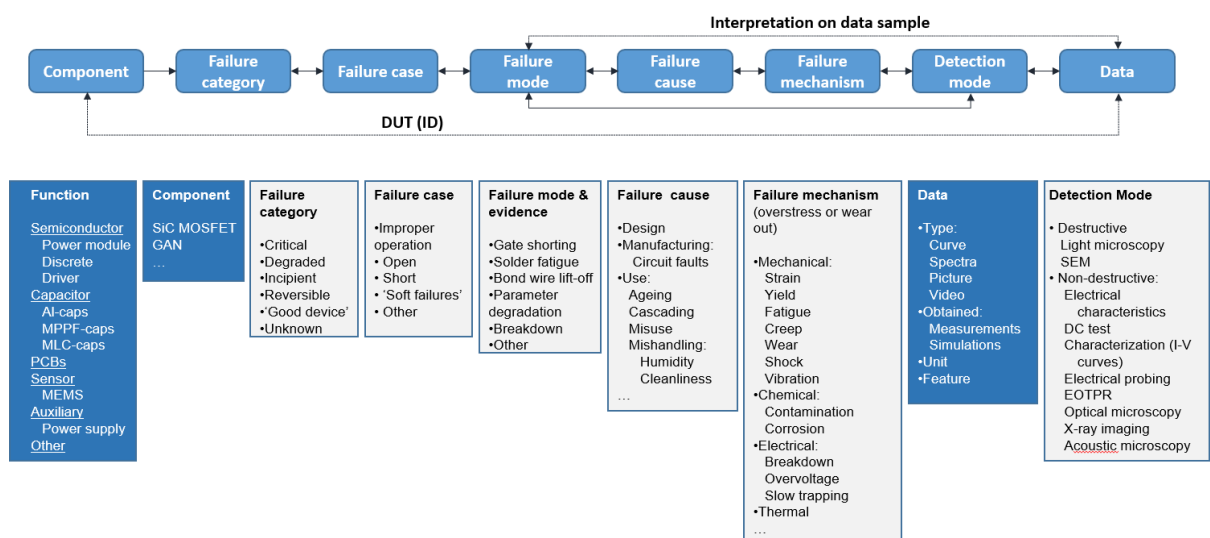


Abb. 5.2.1: Grafische Übersicht über die Struktur des von der Universität Stuttgart vorgeschlagenen Fehlerkatalogs.

5.2.2 Digital Twin

Die Erstellung von sog. Digital Twins ist bereits sehr weit fortgeschritten. Im 3. Projektjahr wurde in zahlreichen Telekons im Arbeitspaket 2.2 und 2.3 das Header-File im JSON-Format erarbeitet und auf dem letzten Projekttreffen in Grenoble vorgestellt.

Dieser sog. JSON-Header ermöglicht es, einen digitalen Zwilling über den kompletten Analyseablauf zu erstellen. Jedes Messgerät und jede Methode liefern Daten und die passenden Metadaten. Sollten bei nachfolgenden Analyseschritten diese Daten oder Metadaten benötigt werden, können diese schnell und unkompliziert in dem definierten und standardisierten Datenformat abgerufen werden.

Die Details des JSON-Headers sind im Arbeitspaket 2.2/2.3 beschrieben.

In Abbildung 5.2.2 ist dargestellt, wie bei Bosch der Digitale Zwilling nach Projektabschluss implementiert wird. Die Analysedatenbank schreibt dabei für jeden Analysevorgang einen Master Data Header in das Vorgangsverzeichnis. Das im Workflow als nächstes kommende Equipment liest diesen Master Data Header und führt die Messung – soweit möglich – automatisiert durch. Das Ergebnis wird in Form eines Bildes und einer Data Headers

abgespeichert. Beides wird von einem sog. Crawler in die Datenbank aufgenommen. Sobald dies geschehen ist, wird der Master Data Header erneuert (Update).

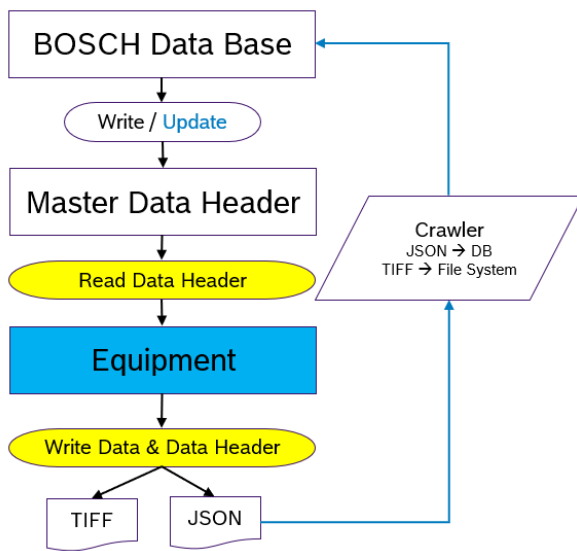


ABBILDUNG 5.2.2: SCHEMATISCHE DARSTELLUNG DES DATENFLUSSES

Aufgabe 5.3: Kombinierte Defektlokalisierung: Workflows für mechanische-, laser- und FIB-Querschnitte

Nach einigen Vorarbeiten im ersten Projektjahr startete diese Aufgabe planmäßig mit Beginn des 2. Projektjahres. Aufgrund der Rahmenbedingungen haben wir uns ausschließlich in Video-Konferenzen abgestimmt.

Im Fokus stand die Abstimmung mit allen Projektpartnern über bereits vorhandene oder neue Workflows. Gemeinsam mit Infineon haben wir das Projekttreffen vom 27.9.2021 – 01.10.2021 vorbereitet.

Im dritten Projektjahr wurde auf dem Projekttreffen in Grenoble im März 2023 ein Review des bereits erreichten und eine entsprechende Gap-Analyse durchgeführt.

Im April 2023 wurde ein Treffen bei Infineon durchgeführt auf dem erstmals im Labor ein Workflow vom akustischen Mikroskop bis zum FIB-Schnitt live vorgestellt wurde.

Für das Final Review haben wir gemeinsam mit Infineon einen Film erstellt, der den Workflow sehr genau zeigt. Der Film ist über den Abschlussbericht von Infineon zu sehen.

5.3.1 Definition von Workflows

Auf dem o.g. Projekttreffen haben wir die im ersten Projektjahr abgestimmten Workflows vorgestellt und mit allen Projektpartnern diskutiert. Zusätzlich dazu haben wir weitere Inputs für Workflows gesammelt und zusammengestellt.

Bosch hat gemeinsam mit Infineon, STM und Ericsson fünf Workflows definiert, die in den den Arbeitspaketen WP2, WP3 und WP4 ganz oder teilweise verwendet werden.

Die Workflows sind in Abb. 5.3.1 tabellarisch dargestellt.

Die gelb markierten Schritte gehören zum Data-Handling, bei dem u.a. auch KI-Algorithmen eingesetzt werden

Abb. 5.3.2 zeigt exemplarisch Workflow 1 mit den Spalten Input, Output und Degree of Automatization.

Bei Bosch fokussieren wir uns im ersten Schritt auf die Umsetzung einzelner Arbeitsschritte und deren Vernetzung. Ab Mitte 2022 stand der Universal Sample Holder zur Verfügung und Anfang 2023 die finale Definition des JSON-Headers. Damit konnten wir bei Bosch erste Versuche bzgl. korrelativer Mikroskopie durchführen. So ist es uns gelungen, automatisiert unter Verwendung des Universal Sample Holders die im Lichtmikroskop markierte Probenstelle im Rasterelektronenmikroskop wiederzufinden.

Im April 2023 hatten wir die erste ausführbare Version des Header-Makers zur Verfügung. Damit können aktuell Daten des digitalen Zwillings nachträglich bearbeitet werden und somit der nächsten Methode, die noch nicht automatisiert ansteuerbar ist, übergeben werden.

Workflow 1 Si Chip Backside Preparation, Fault Localization, Fault Preparation Prerequisite: Si backside is already exposed WLI Warpage measurement of Si chip backside using WLI CT100 Data Handling Micro-Milling Levelling of Si die WLI Warpage measurement of Si chip backside using WLI CT100 Data Handling SAM Defect localization Data Handling 3D Micromac Laser X-Sectioning with the laser tool at the fault location FIB Smoothering of the laser pre-cut	Workflow 2 Si Chip Backside Preparation, Fault Localization, Fault Preparation Prerequisite: Si backside is already exposed WLI Warpage measurement of Si chip backside using WLI CT100 Data Handling Micro-Milling Levelling of Si die WLI Warpage measurement of Si chip backside using WLI CT100 Data Handling LIT Defect localization Data Handling 3D Micromac Laser X-Sectioning with the laser tool at the fault location FIB Smoothering of the laser pre-cut	Workflow 3 SAM Defect localization and subsequent x-sectioning Prerequisite: Packaged electronic device SAM Defect localization Data Handling 3D Micromac Laser X-Sectioning with the laser tool at the fault location FIB Smoothering of the laser pre-cut	Workflow 4 Sample inspection using LOM and/or x-ray inspection Fault Localization using LOM, x-ray inspection, CT x-ray and/or SAM Data Handling Sample preparation to fault site, e.g. by cross-sectioning Data Handling Fault site imaging using LOM, SEM, and/or EDX Data Handling Failure analysis	Workflow 5 Cratering Test Prerequisite: Chip top side is visible Initial Light Microscopy Detection of bond pads on Chip, bonded or not bonded Light Microscopy after delayering step on bond pad, e.g. after pad metal removal Data Handling Crack Recognition SEM Investigation of crack location
---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Abb. 5.3.1: Übersicht über die in Task 5.3 entstandenen Workflows

	Workflow 1	Input	Output	Degree of Automatization
Step No.	Si Chip Backside Preparation, Fault Localization, Fault Preparation			
	Prerequisite: Si backside is already exposed			
1	WLI Warpage measurement of Si chip backside using WLI CT100	xy coordinates given by operator	3D height profile	Automated measurement
2	Data Handling	3D height profile	3D milling information	Data conversion for Micromilling system
3	Micro-Milling Levelling of Si die	3D milling information	None	
4	WLI Warpage measurement of Si chip backside using WLI CT100	xy coordinates from step 1	3D height profile	Automated measurement
5	Data Handling	3D height profile	3D SAM information	Data conversion for SAM
6	SAM Defect localization	3D SAM information, xyz coordinates	Pixel wise a-scans in one data set including xy coordinates	Automated measurement according data input from Micro-milling system or WLI
7	Data Handling	Pixel wise a-scans in one data set including xy coordinates	Defect classification Defect xy coordinates	AI usage to localize a defect in the SAM data set.
8	3D Micromac Laser X-Sectioning with the laser tool at the fault location	Defect xy coordinates	xy-coordinates for the FIB	Automated process
9	FIB Smoothing of the laser pre-cut	xy-coordinates for the FIB	Final images by slice&view	Automated process

Abb. 5.3.2: Exemplarische Darstellung eines im Projekt abgestimmten Workflows.

Aufgabe 5.4: Machbarkeitsstudie für ein Gerät zum Rückdünnen von Halbleitermaterialien mit integrierter Restdickenmessung

Im Rahmen der Machbarkeitsstudie hat man sich gegen ein Kombi-Gerät entschieden, da es zu Auflösungsproblemen und damit Fehlern in der Genauigkeit gekommen ist.

3 ARBEITS-, ZEIT – UND KOSTENPLANUNG

Das Projekt wurde kostenneutral um 6 Monate verlängert.

Im Folgenden sind zunächst die aktualisierten FA4.0 Meilensteine und der zeitliche Ablauf ihrer Erarbeitung zusammengestellt. Dazu sind die geplanten Ergebnisse („Deliverable“) aufgeführt. Diese sind analog dem europäischen FA4.0 Projekt gegliedert und die Zeiten wurden analog angepasst

Tabelle: Übersicht der Meilensteine und geplante Entscheidung für Projektlaufzeit 42 Monate (M42). Die Meilensteine ändern sich nicht, nur die rot markierten Laufzeiten.

AP und # des Meilensteins	Name des Meilensteins	Monat	Geplante Entscheidung
Arbeitspaket AP1			
Analyse der Anforderungen, Spezifikationen, Benchmarking			
MS1.1.1	Entscheidung über nächste Schritte auf Basis des Stands der Technik	<u>M6</u>	Anpassung der APs
MS1.1.2	Entscheidung zu abschließenden Arbeiten	M24	Anpassung der APs
MS1.2.1-5	Auf Basis des Vergleich zum Rest der Welt eventuelle korrigierende Schritte ableiten.	M6, <u>M12</u> , M18, <u>M24</u>	Anpasung der APs
Arbeitspaket AP2			
Standardisierte Schnittstellen für den Arbeitsablauf innerhalb der Fehleranalyse			
MS2.1.1	Definition von standardisierten Hardware-Schnittstellen.	M12	Status der Arbeiten für die Entwicklung des standardisierten Probentransfersystems, ggf. Nachjustieren der Anforderungen.
MS2.1.2	Standardisiertes Probentransfersystem	M24	Abschluss: Probentransfersystem liegt vor
MS2.2.1	Parameterdefinition für KI-fähige Schnittstellen zwischen Analysegeräten	M12	Status der Arbeiten, ggf. Nachjustieren der Anforderungen
MS2.2.2	Datenbanken zum Datenaustausch	M24	Abschluss der Arbeiten
MS2.3.1	Digitale Zwillinge und Messdaten	M12	Status der Arbeiten, ggf. Nachjustieren der Anforderungen
MS2.3.2	Abschluss Digitale Zwillinge	M24	Abschluss der Arbeiten

Arbeitspaket AP3

Entwicklung von Algorithmen auf dem Ansatz der künstlichen Intelligenz und des maschinellen Lernens für die erweiterte Signalverarbeitung zur Defektidentifikation in der Fehleranalyse

MS3.3.1	Eine ML-basierte Erkennung von Objekten in den Bildern liegt vor	M18	Status der Arbeiten, ggf. Nachjustieren der Anforderungen
MS3.3.2	Die Normalform, sowie maligne und benigne Abweichungen werden von der KI-baiserten Bildererkennung erkannt	M30	Abschluss der Arbeiten
MS3.4.1	Mittels ML basierter Algorithmen lässt sich der Signal-Rausch-Abstand vergrößern	M24	Status der Arbeiten, ggf. Nachjustieren der Anforderungen
MS3.4.2	Ein auf einem Neuronalen Netz basierender Algorithmus wurde erstellt, der Defekte an Flip-Chip Bumps erkennen und segmentieren kann	M36	Abschluss der Arbeiten

Arbeitspaket AP4

Weiterentwicklung von Geräten der Fehleranalyse

MS4.1.1	Das SAM-Tool konnte erfolgreich erweitert werden	M18	Status der Arbeiten, ggf. Nachjustieren der Anforderungen
MS4.1.2	Ein Prototyp setht für Evaluierungszwecke zur Verfügung	M36	Abschluss der Arbeiten
MS4.2.1	Hardware- und Datenschnittstellen stehen zur Verfügung	M18	Status der Arbeiten, ggf. Nachjustieren der Anforderungen
MS4.2.2	Der Prototyp des erweiterten Fräsgerätes steht für Evaluierungszwecke zur Verfügung	M36	Abschluss der Arbeiten
MS4.3.1	Ein Auto-Stopp Algorithmus und die Bildererkennung stehen zur Verfügung	M18	Status der Arbeiten, ggf. Nachjustieren der Anforderungen
MS4.3.2	Der Prototyp steht für Evaluierungszwecke zur Verfügung	M36	Abschluss der Arbeiten

	Verfügung		
MS4.4.1	Die thermische Verwölbungsmessung wurde erfolgreich durchgeführt	M18	Status der Arbeiten, ggf. Nachjustieren der Anforderungen
MS4.4.2	Der Prototyp steht für Evaluierungszwecke zur Verfügung	M36	Abschluss der Arbeiten
Arbeitspaket AP5 Verknüpfung der Analysegeräte mit der korrelativen Datenauswertung			
MS5.2.1	KI-geeigneter Fehlerkatalog für FA-Methoden	M24	Erste Version eines KI-geeigneten FA-Kataloges ist erstellt
MS5.2.2	Korrelative Datenanalyse	M 41	Forschungsergebnis zur korrelativen Datenanalyse mittels Digital Twins
MS5.3.1	Status Kombi-Workflow Querschnitte	M24	Ergebnisse aus dem Arbeitsgebiet Kombi-Workflows
MS5.3.2	Validierte Arbeitsabläufe	M 41	Ergebnisbericht zu validierten Kombi-Workflows
MS5.4.1	Status Hochautomatisiertes Chipdünnen	M24	Forschungsbericht zum Thema hochautomatisiertes Chipdünnen
MS5.4.2	Prototyp	M 41	Prototyp liegt vor
Arbeitspaket AP6 Abschließende Bewertung der KI-unterstützten Analysegeräte und Arbeitsabläufe			
MS6.1.1	Bewertungsmatrix	M 39	Abschließende Bewertung der Ergebnisse
MS6.2.1	FA Leitfaden	M 42	Leitfaden liegt vor

Liste der „Deliverables“

Tabelle: Liste der „Deliverables“ und geplantes Ergebnis bei 42 Monate Laufzeit. Die Deliverables ändern sich nicht, nur die rot markierten Laufzeiten. Die Deliverables sind an das europäische Penta/Euripides angepasst.

AP und # des Deliverables	Name des Deliverables und Verantwortlicher	Monat	Geplantes Ergebnis
Arbeitspaket AP1			
Analyse der Anforderungen, Spezifikationen, Benchmarking			
D1.1.1.	Bericht über Stand der Technik und identifizierte Aufgabenfelder zur Verbesserung der KI in der Fehleranalyse (INFINEON)	M6	Entscheidungshilfe weiteres Projektvorgehen
D1.1.2.	Bericht zum aktuellen Stand der Technik und Analyse der erreichten Ergebnisse (verbesserte Analyse-Methoden, Verknüpfung von Methoden, Automatisierung von Abläufen) (INFINEON)	M24	Darstellung erreichter Ergebnisse
D1.2.1-5	halbjährlicher zusammenfassender Bericht zu Projektstatus und Vergleich zum Wettbewerb im Rest der Welt (INFINEON)	M6, M12 , M18, M24 , M30	Entscheidungshilfe weiteres Projektvorgehen
Arbeitspaket AP2			
Standardisierte Schnittstellen für den Arbeitsablauf innerhalb der Fehleranalyse			
D2.1.1	Definition von standardisierten Hardware-Schnittstellen. (STMicroelectronics)	M12	Anforderungsprofil erstellt
D2.1.2	Standardisiertes Probentransfersystem (STMicroelectronics)	M24	Prototyp
D2.2.1	Bericht über Definition von Parametern für KI-fähige Schnittstellen zwischen Analysegeräten (Bosch)	M12	Anforderungsprofil erstellt
D2.2.2	Bericht über eingeführte Datenbanken zum Datenaustausch (Bosch)	M24	Datenbank zu Datenaustausch
D2.3.1	Bericht über zentrale Sammlung von Messdaten und Digitale Zwillinge	M12	Definitionen und erste Schritte zu digital twins

	(INFINEON)		
D2.3.2	Bericht über zentrale Sammlung von Messdaten und Digitale Zwillinge (INFINEON)	M24	Fertige Definition und Beispiele digitaler Zwillinge
Arbeitspaket AP3			
Entwicklung von Algorithmen auf dem Ansatz der künstlichen Intelligenz und des maschinellen Lernens für die erweiterte Signalverarbeitung zur Defektidentifikation in der Fehleranalyse			
D3.3.1	Bericht über die ML-basierte Bilderkennung, sowie über den Ansatz zur Erkennung von Normalform und Abweichung unter Verwendung Daten aus der FIB-REM Messungen (CYBERTECHNOLOGIES)	M18	Evaluiertes Ansatz zur Entwicklung der KI/ ML basierten Objekterkennung, welcher Fähigkeit sein kann zwischen Normalform und Defekt zu unterscheiden.
D3.3.2	Bericht über die Erkennung von Normalform und Abweichung unter Verwendung von Daten anderer Messmethoden (optische Mikroskopie, Röntgenmikroskopie) und Test der Methode an Bilddatensätzen nach Anwendung der Rauschreduktion. (CYBERTECHNOLOGIES)	M30	Eine Methode und die zugehörigen Algorithmen für KI/ ML basierte Erfassung und Analyse von Objekten und Objektformen. Die Methode soll die Fähigkeit haben zwischen Normal- und Defektform unterscheiden zu können. Die Methode ist anhand von Daten aus der optischen und Röntgenmikroskopie getestet.
D3.4.1	Bericht über die ML-unterstützte Signalverarbeitung zur Rauschunterdrückung und Quellenseparation von SAM und LIT Daten. (Fraunhofer IMWS)	M18	Im Ergebnis existiert eine Methode inklusive der Algorithmen zur Quellenseparation und Rauschunterdrückung praxisüblicher Zeitsignale aus der akustischen Mikroskopie und der Lock-In Thermographie
D3.4.2.	Bericht über die evaluierten ML-Modelle für die Defektklassifikation von SAM Datensätzen. (Fraunhofer IMWS)	M 41	Algorithmen und Modelle zur Klassifizierung von Zeitsignalen und in Kombination mit Objekten in SAM Datensätzen.
Arbeitspaket AP4			
Weiterentwicklung von Geräten der Fehleranalyse			
D4.1.1	Bericht über die Erweiterungen am SAM Tool (PVA TePla)	M18	Die in AP3.4 entwickelte KI-basierte Algorithmik ist in das akustische Mikroskop implementiert.

D4.1.2	Prototyp des SAM der nächsten Generation mit erweiterten Fähigkeiten der Signalanalytik (PVA TePla)	M30	Der prototyp ist fertiggestellt und getestet. Er steht zur weiteren Evaluierung zur Verfügung
D4.2.1	Bericht über die Hardware und die Datenschnittstellen (KERN)	M18	Hardware und Schnittstellen zu den entsprechenden Messgeräten.
D4.2.2	Prototyp des erweiterten Fräsgerätes. (KERN)	M30	Der prototyp ist fertiggestellt und getestet. Er steht zur weiteren Evaluierung zur Verfügung
D4.3.1	Bericht über die Entwicklung des Auto-Stopp-Algorithmus mittels Bilderkennung zur Identifikation eines definierten Bereiches (Infineon)	M18	Ein e bilderkennungsbasierter Auto-Stop Algorithmus.
D4.3.2	FIB-REM Prototyp mit Modul für die automatisierte Bearbeitung und Defektdarstellung (Bosch)	M30	Der prototyp ist fertiggestellt und getestet. Er steht zur weiteren Evaluierung zur Verfügung
D4.4.1	Bericht über das Gerätekonzept zur thermischen Verwölbungsmessungen (CYBERTECHNOLOGIES)	M18	Ein experimentell evaluiertes Gerätekonzept zur Vermessung von thermisch induzierten Verwölbungen.
D4.4.2	Prototyp des Messplatzes zur Ermittlung thermischen Verwölbungen (CYBERTECHNOLOGIES)	M30	Der prototyp ist fertiggestellt und getestet. Er steht zur weiteren Evaluierung zur Verfügung
Arbeitspaket AP5 Verknüpfung der Analysegeräte mit der korrelativen Datenauswertung			
D5.2.1	Bericht über einen KI-geeigneten Fehlerkatalog (Universität Stuttgart)	M24	Geeigene Darstellung eines solchen Fehlerkatalogs, der im weiteren Verlauf noch erweitert werden kann.
D5.2.2	Bericht über die korrelative Datenanalyse mithilfe Digital Twins (BOSCH)	M 41	Darstellung der Vor- und Nachteile bei der Verwendung von Digital Twins im Rahmen von Ausfallanalysen.
D5.3.1	Status zu den kombinierten Präparations- und Lokalisierungs- Arbeitsabläufen (Quality Analysis)	M24	Darstellung der bislang erzielten Ergebnisse.

D5.3.2	Bericht zu experimentell validierten Arbeitsabläufen mit kombinierter Fehlerlokalisierung (BOSCH)	M 41	Abshließender Bericht über die Validierung der Arbeitsabläufe.
D5.4.1	Status Hochautomatisiertes Chip-Dünnen (KERN)	M24	Darstellung der bislang erzielten Ergebnisse.
D5.4.2	Bericht zum Prototyp Hochautomatisiertes Chip-Dünnen (INFINEON)	M 41	Abshließender Bericht über den Prototypen
Arbeitspaket AP6			
Abschließende Bewertung der KI-unterstützten Analysegeräte und Arbeitsabläufe			
D6.1.1	Bewertungsmatrix für aller im Projekt entwickelten Methoden und Geräte (BOSCH)	M 39	Bericht in Tabellenformat
D6.2.1	Leitfaden für FA Analyseabläufe (INFINEON)	M 42	Bericht

3.1 ARBEITSPLANUNG

Die Arbeitspakete sind in Tasks (Aufgaben) unterteilt und jede Aufgabe wird von einem benannten BOSCH-Mitarbeiter oder einer BOSCH Mitarbeiterin intern geleitet. Einige Arbeiten verzögerten sich, weshalb der Arbeitsplan angepasst wurde, siehe dazu weiter oben die Milestones und Deliverables

3.2 EINSATZ DER FÖRDERMITTEL

Die Details zu den Finanzen sind in den regelmäßigen Abrechnungen an den Fördermittelgeber aufgeführt.

4 Erreichung der Ziele

Die Zielerreichung ist ausführlich dargestellt in der sog. Extended Innovation List (Deliverable).

Für jede Unteraufgabe wurde in jeden Task keine Bewertung durchgeführt hinsichtlich

- Achieved Improvement
- Industrialization
- Gap description
- Future development beyond the project
- Benchmarking

Die Ziele wurden dabei wie folgt erreicht:

Im Arbeitspaket 2:

Task	Sub-Tasks	Rating 8-10	Rating 5-7	Rating 1-4	Open
2.1	2	2	-	-	-
2.2	1	1	-	-	-
2.3	1	1	-	-	-
2.4	1	1	-	-	-
Overall	5	5	0	0	0

Success rate:	100% (5 out of 5) / GREEN-Rating: 100%
Open:	0%

Im Arbeitspaket 3:

Task	Sub-Tasks	Rating 8-10	Rating 5-7	Rating 1-4	Open
3.1	2	2	-	-	-
3.3	13	7	-	1	5
3.4	4	2	-	-	2
Overall	19	11	0	1	7

Early stopped or even not started:	7
Success rate:	92% (11 out of 12) / GREEN-Rating: 92%
Open:	0%

Im Arbeitspaket 4:

Task	Sub-Tasks	Rating 8-10	Rating 5-7	Rating 1-4	Open
4.1	3	2	1	-	-
4.2	2	-	2	-	-
4.3	4	3	1	-	-
4.4	1	1	-	-	-
4.5	2	1	1	-	-
Overall	12	7	5	0	0

Success rate: 100% (12 out of 12) / GREEN-Rating: 58%
Open: 0%

Im Arbeitspaket 5:

Task	Sub-Tasks	Rating 8-10	Rating 5-7	Rating 1-4	Open
5.1	1	1	-	-	-
5.2	1	1	-	-	-
5.3	1	1	-	-	-
5.4	1	-	1	-	-
Overall	4	3	1	0	0

Success rate: 100% (4 out of 4) / GREEN-Rating: 75%
Open: 0%

Ingesamt ergibt sich daraus die folgende Zusammenfassung:

- 33 sub-tasks in den 4 work packages (AP2, AP3, AP4, AP5)
- Alle sub-tasks wurden beendet
- 26 sub-tasks GRÜN (79%) → Industrialized / Expectations fulfilled / Demonstrator exists
- 6 sub-tasks GELB (18%) → Functional on lab level
- 1 sub-task ROT (3%) → no benefit / no or small improvement

5 Aktuelle Informationsrecherchen und F&E-Ergebnisse Dritter

Bosch informiert sich über zahlreiche Kanäle über den aktuellen Stand der Technik bezüglich der Themen in den o.g. Arbeitspaketen. Hierzu zählten insbesondere:

5.1 LITERATURRECHERCHE ZU ALLEN ARBEITSPAKETEN UND AUFGABEN AN DENEN BOSCH BETEILIGT IST.

5.2 BESUCH VON FACHKONFERENZEN

- ESREF 2021: 32rd European Symposium on Reliability of Electron Devices, Failure Physics and Analysis
- ESREF 2022: 33rd European Symposium on Reliability of Electron Devices, Failure Physics and Analysis
- CAM-Workshop in Halle am IMWS Institut der FhG

5.3 DIREKTER KONTAKT ZU GERÄTEHERSTELLERN AUßERHALB DES PROJEKTES

6 Fortschreibung des Verwertungsplanes

6.1 ERFINDUNGEN/SCHUTZRECHTSANMELDUNGEN

Keine.

6.2 TECHNISCHE VERWERTUNG

In der Ausfallanalyse verwenden wir bereits die entwickelten Methoden oder sind nach Projektende dabei diese zu industrialisieren. Dabei sind besonders hervorzuheben:

- Der digitale Zwilling und der Probenhalter werden zur Zeit industrialisiert, um für ausgezeichnete Workflows eingesetzt zu werden
- Die Datenauswertung wird zur Zeit und im Projekt FA2IR so appliziert, dass jeder Analyseingenieur diese Methode Easy-To-Use über ein Portal im Intranet anwenden kann.
- Bosch profitiert davon, dass einzelne Gerätehersteller den digitalen Zwilling mittlerweile unterstützen.

6.3 WIRTSCHAFTLICHE VERWERTUNG

An der ursprünglich in der TVB hervorgehobenen geplanten Verwertung hat sich keine wesentliche Änderung ergeben. Bosch hat aufgrund des Projekts eine neue Stelle für einen Informatiker geschaffen und seit Mitte 2023 erfolgreich besetzt. Dies wird wesentlich zu einer Beschleunigung der Industrialisierung der Projektergebnisse beitragen.

7 Abkürzungen

API	=	Application Programming Interface
APx	=	Arbeitspaket x (in SAM3 geht x von 0 bis 4)
BGA	=	Ball Grid Array
CAM	=	Center of Applied Materials des Fraunhofer Institutes in Halle
CT	=	Computer Tomografie
ESREF	=	European Symposium on Reliability of Electronic Devices, Failure Physics And Analysis (jährlich stattfindende, sehr wichtige Konferenz bzgl. Ausfallanalytik
FIB	=	Focused Ion Beam
IMC	=	Intermetallic Coverage
ISTFA	=	International Symposium for Testing and Failure Analysis
REM	=	Rasterelektronenmikroskopie
SAFT	=	Synthetic Apperture Focussing Technique
TSV	=	Through Silicon Via, spezielle Anschlusstechnik von einem Chip zum anderen
TVB	=	Teilvorhabensbeschreibung
WLI	=	White Light Interferometry