Schlussbericht gem. Nr. 8.2 der NKBF 98

Zuwendungsempfänger:	Schäfter+Kirchhoff GmbH Kieler Straße 212 22525 Hamburg
Förderkennzeichen:	**20Q1924A**
Vorhabenbezeichnung:	**SAMBA** „System zur Algorithmen-basierten Auswertung von Bruchflächen“
Teilvorhabensbezeichnung:	„Bruch-flächen Inspektion System“ – ƀ-FIS
Laufzeit des Vorhabens:	01.05.2021 – 30.04.2024
Ausgabedatum:	02.09.2024
Projektleiter:	Dipl.-Ing (FH) André Lamott
Stellv. Projektleiterin:	Dipl.-Phys. Anja Knigge

1 Kurzdarstellung

1.1 Aufgabenstellung

Die Klebetechnik ist in der Luftfahrt eine etablierte Fügetechnik. Als „spezieller Prozess“ werden besonders hohe Anforderungen an die Materialien, Prozesse und Qualitätssicherung gestellt, die umfangreiche Entwicklungs- und Qualifizierungsverfahren erfordern. Dabei werden viele zu prüfende Prozessbegleitproben erzeugt, die zurzeit durch Experten manuell ausgewertet werden. Neben dem hohen Zeitaufwand und der subjektiven Bewertung werden bei dieser Auswertung nicht alle nutzbaren Informationen berücksichtigt.

Ziel des Projektes war die Entwicklung und Validierung eines Labormessgerätes zur automatisierten Bewertung von Bruchflächen mechanisch geprüfter Prozess-begleitproben als Basis eines Demogerätes. Das System soll durch optimierte Bildaufnahmen in Kombination mit trainierbaren Algorithmen auf Expertenwissen objektiv und reproduzierbar zurückgreifen. Ein übergeordnetes Ziel ist eine objektive, vereinfachte und beschleunigte Auswertung von Bruchflächen mit der Möglichkeit der digitalen Datenspeicherung.

1.2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Die Klebetechnik ist in der Luftfahrtindustrie eine etablierte Fügetechnik, gerade für den Einsatz im Leichtbau. Kleben ist jedoch ein „spezieller Prozess“, der nicht 100% zerstörungsfrei geprüft werden kann, so dass bei diesem Fügeverfahren besonders hohe Anforderungen an die eingesetzten Materialien, die Prozesse und die Qualitätssicherung gestellt werden müssen. Dies erfordert umfangreiche Entwicklungs- und Qualifizierungsverfahren, in deren Zuge sehr viele mechanisch zu prüfende Prozessbegleitproben gefertigt werden. Diese werden zurzeit durch Experten manuell erstellt und ausgewertet. Je nach Anforderung gibt es dabei mehrere Vorgehensweisen.

- Schätzen:
  Die Flächenanteile werden durch qualifiziertes Personal geschätzt. Die beiden bruchbeteiligten Teile werden zusammen per Auge betrachtet und die Flächenanteile notiert. Im Anschluss wird eine Bildaufnahme mittels Mikroskops erstellt und die Werte manuell dokumentiert.

  Vorteil: Die Ermittlung der Werte ist schnell und die Bewertung erfolgt für beide Bruchflächen gemeinsam.

  Neutral: Die Probendokumentation ist moderat.

  Nachteil: Die Bewertung ist subjektiv und die Reproduzierbarkeit mittelmäßig. Zur Bewertung müssen die Proben physisch vorliegen.

- Objektivierte Schätzung:
  Über die Proben wird ein Raster gelegt und für jedes Raster der Flächenanteil geschätzt. Die Überlagerung kann auf dem Prüfling per Folie oder durch eine Bildaufnahme erfolgen.

Neutral: Der subjektive Faktor ist reduziert bei moderatem Zeitaufwand. Dadurch steigt die Reproduzierbarkeit. Die Dokumentation ist etwas aufwendiger im Vergleich zur reinen Schätzung.

- Bildauswertung:
  Die Proben werden digital mit einem Mikroskop erfasst. Über eine Bildanalyse werden die Flächen pixelweise markiert und klassifiziert.

  Vorteil: sehr genaue Analyse, bei den gleichen Rahmenbedingungen ist die Reproduzierbarkeit je Bild hoch.

  Nachteil: Sehr zeitintensiv. Da die Bruchpaare nicht gemeinsam bewertet werden, können Bruchflächen falsch zugordnet werden.

Im Projekt sollen die Vorteile der bisherigen Verfahren kombiniert werden. Um dieses Ziel zu erreichen, wurde das Kooperationsprojekt „**S**ystem zur **A**lgorith**m**en-**b**asierten **A**uswertung von Bruchflächen (SAMBA)“ im Rahmen der Luftfahrtforschung und –technologie LuFo VI-1 gestartet. Als Projektpartner arbeiteten hierbei das Fraunhofer-Institut für Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung (IFAM) und Schäfter+Kichhoff GmbH (S+K) eng zusammen und wurden von einem assoziierten Partner (Airbus) unterstützt.

1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Das Projekt ist in zwei Teilvorhaben gegliedert:

- Das IFAM übernahm die „Optimierung überwachter Klassifikation bei der Algorithmen-basierten Auswertung von Bruchflächen“,
- S+K entwickelte parallel dazu das „Bruch-Flächen Inspektion System ((b-FIS)“.

Um dieses Ziel zu erreichen wurde das Projekt SAMBA in fünf Hauptarbeitspakete (HAP) gegliedert.

In **HAP1** wurden die Kerneigenschaften des Messsystems, die relevanten Oberflächenzustände sowie Anwendungsszenarien definiert. Außerdem wurden Referenzproben gefertigt und charakterisiert.
In den ersten Monaten des Projekts wurden die Systemarchitektur und die Anforderungen an ein Bruch-Flächen Inspektions System erstellt. Das System ist grob gegliedert in ein Gerät zur Bildaufnahme und der Analysemethodik, also dem Ablauf vom Antrainieren bis zum Analyseergebnis.
Für die Analysemethodik wurden zusammen mit dem IFAM die Abläufe für das

- Einrichten und Schaffen einer Datenbasis,
- das Anlernen,
- und das Analysieren

erstellt und in Ablaufdiagrammen zusammengefasst.

Die Ergebnisse der Voruntersuchungen, die Spezifikationen an ein Inspektionssystem und die Softwareabläufe sind im Meilensteinbericht „Anforderungen Klebe-Bruch-Flächen Analyse“ dokumentiert. Als Referenzsystem wurde das bisherige Verfahren

der Bildauswertung vereinbart. Zu diesem Zweck wurden Anforderungen an Referenzproben erstellt, die das Spektrum der Variantenvielfalt widerspiegeln.

In **HAP 2** wurden geeignete Algorithmen untersucht und ausgewählt. Sie wurden überdies für die optimale Integration in das Messsystem angepasst.
Im Jahr 2022 wurden die wesentlichen Kriterien für die zu verwendenden Algorithmen vom IFAM erarbeitet und dokumentiert. Das IFAM hat überdies Methoden entwickelt, relevante Bildererkennungsmerkmale zu identifizieren und damit die Effektivität der Auswertung zu optimieren.
Des Weiteren wurde zusammen mit dem IFAM das Verfahren und der Ablauf geplant, wie die Güte des Analyseergebnisses bewertet werden kann.
Im zweiten Jahr des Projekts wurde der gewählte Algorithmus weiter untersucht und optimiert. Parallel hierzu wurde mit der Integration des Algorithmus in den Demonstrator begonnen (HAP 4). Durch die intensive und gute Zusammenarbeit mit dem IFAM wurden regelmäßige Anregungen und Optimierungspotentiale kommuniziert. Die daraus resultierenden Anpassungen des Algorithmus wurden zeitnah und zuverlässig vom IFAM bereitgestellt.

In **HAP 3** wurde ein Demonstrator entwickelt und konstruiert. Neben der Auswahl geeigneter Hardwarekomponenten wurde die Anforderungen an die Software definiert, mit einem Hauptaugenmerk auf die Usability.
Für die Voruntersuchungen konnte auf Laborgeräte zurückgegriffen werden, die für die Versuche nur angepasst werden mussten. Dadurch konnten die Untersuchungen ohne größere Materialbeschaffungen und Entwicklungsleistung durchgeführt werden. Mit Erreichen des ersten Meilensteins wurde mit der Konstruktion des Demonstrators begonnen. Durch den modularen Aufbau des geplanten Stereo Scanning Macroscopes (SSM) – siehe Abbildung 1 - konnten die Arbeiten und Zeiten der Entwicklung optimiert werden.

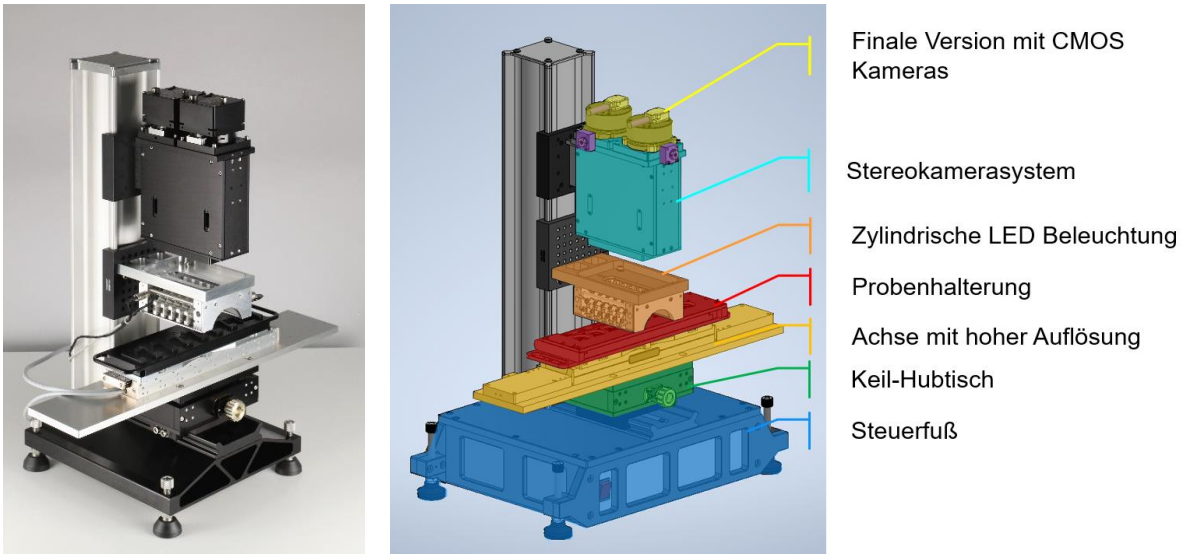

Abbildung 1: links Demonstrator, rechts: Hardwarearchitektur des Stereo Scanning Macroscopes (SSM)

Die Reihenfolge der Entwicklung folgte dem Schema der größten Notwendigkeit, weswegen im Jahr 2022 vordergründig die LED-Beleuchtung und die Probenhalterung

konstruiert und elektrisch weiterentwickelt wurden. Im Anschluss wurde das Stereokamerasystem grundlegend überarbeitet und mit der Entwicklung von Farb-CMOS Kameras begonnen. Parallel hierzu wurde ein Keil-Hubtisch entwickelt und erprobt. Im Jahr 2023 wurde der Steuerfuß konzipiert, Verbesserungen aus den Prototypen integriert und Schutzkonzepte zur Gerätesicherheit entwickelt.
Mit der Verfügbarkeit des Demonstrators wurde mit der Software-Entwicklung gestartet. Sie umschließt Aufgaben aus HAP3 und HAP4.

Im ersten Projektjahr wurden vornehmlich Funktionen der Vorverarbeitung (Zwischenebene der Softwarearchitektur) und das Back-End entwickelt. Aufgrund von internen Faktoren, die frühzeitig mit dem Projektträger kommuniziert wurden, verzögerte sich das Projekt um einige Monate, weswegen wir eine Laufzeit-verlängerung im Jahr 2023 um 6 Monate beantragten und genehmigt bekamen. Ende 2022 wurden Funktionen realisiert, die ein komfortables Annotieren der Proben erlaubten.

In 2023 wurden die Funktionen in das Front-End integriert und die Abläufe realisiert. Durch den Einblick in die Praxis konnte abgleitet werden, dass nur durch eine gemeinsame parallele Betrachtung der beiden Bruchflächenteile, eine aussagekräftige Bewertung möglich ist. Daher müssen die beiden Bruchflächen-Bilder zueinander ausgerichtet werden, gemeinsam gelabelt und antrainiert werden. Als großen Vorteil hat sich die Prediction-Funktion gezeigt, mit dessen Hilfe durch das Markieren von bekannten Flächen, eine Vorhersage der übrigen Flächen möglich ist. Es konnte dabei zusammen mit dem IFAM herausgearbeitet werden, dass diese Art des Annotierens bereits für den Praxisbetrieb in Laboren ausreicht, da hier eine große Varianz (Klebstoffart, Substratart, usw.) an Prüflingen auftritt und in vielen Fällen für das Anlernen eines Algorithmus keine Notwendigkeit besteht. Eine solche Vorgehensweise bei der Probenbewertung stellt einen anderen Anwendungsbereich dar als geplant, der aber als sehr wichtig und erfolgsversprechend eingestuft wurde. Bei der Umsetzung der Funktionen wurde daher ein stärkerer Fokus auf eine komfortable Bedienbarkeit gelegt. Auch hierbei profitierte S+K vom Erfahrungsschatz des IFAM. Die Software-Entwicklung des Front-Ends erfolgte parallel zu den Aufgaben aus HAP4, der Implementierung des Algorithmus zum Machine Learning in die Software des Demonstrators. Die bis dahin erzielten Ergebnisse wurden dem assoziierten Partner Ende Mai 2023 vorgestellt und weitere Details in der Bedienung und Darstellung identifiziert. Ab Mitte des Jahres wurde mit der Inbetriebnahme und Integration der Farb-CMOS Kamera begonnen. Die Schritte umfassten die Implementierung der Kamerafunktionalitäten und die veränderte Bildaufnahmestrategie aufgrund der Bayer Pattern Architektur des Sensors.

Im Jahr 2023 wurden überdies die Funktionen zur Analyse-Einrichtung, das Protokollieren und die Datenspeicherung sukzessive integriert. Außerdem wurde ein

3D-Visualisierung implementiert, um die Interpretation der Bild- und Höhen-informationen zu erleichtern.

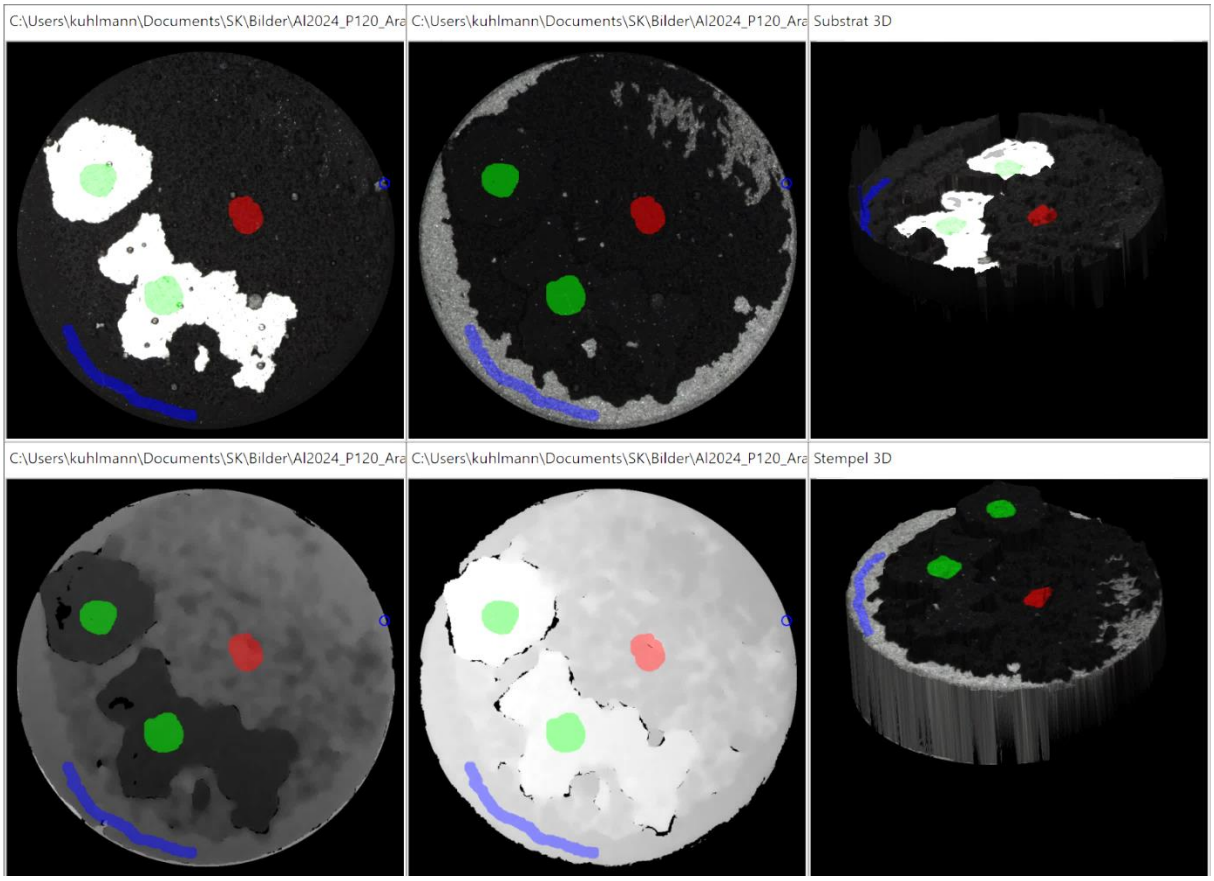

Abbildung 2: Ansicht einer Bruchprobe zum gemeinsamen Annotieren. In der oberen Reihe sind links die Bildinformationen von Seite A und B, und in der Reihe darunter die dazugehörenden Höheninformationen dargestellt. Rechts sind Stempel und Substrat als 3D-Bild mit Textur angezeigt. Die farblichen Markierungen dienen zum Annotieren der verschiedenen Brucharten. Das Bild ist aufgrund von angestrebten Schutzrechten vertraulich zu behandeln.

In **HAP 5** wurden Systemtest und Validierungen in Begleitung mit dem assoziierten Partner durchgeführt. Beginnend mit Q4/2022 wurden mehrere Test- und Messkampagnen durchgeführt. Das System wurde halbjährlich in gemeinsamen Projektmeetings zusammen mit AnwenderInnen getestet. Zur Verifizierung wurden Daten auf Basis einer ermittelten detaillierten Grundwahrheit bewertet. Zur Validierung wurde an einem eigens dafür hergestellten Referenzprobensatz die verschiedenen Auswerteverfahren bewertet. Hierbei wurden die Ergebnisse aus Schätzen, manueller Softwareauswertung und automatischer Algorithmus-Auswertung verglichen.

1.4 Technischer Stand, an den angeknüpft wurde

Eines der grundlegenden Ziele in diesem Vorhaben ist die objektive und automatisierte Bewertung der Prozessbegleitproben. Bisher ist ein gängiges Verfahren, die hervorgerufene Bruchfläche visuell von einem Experten mit einem Mikroskop oder einer Bildaufnahme auszuwerten. Diese Herangehensweise ist zum einen zeitaufwendig, und von der Erfahrung und Wissen des Mitarbeiters abhängig. Auf der

anderen Seite kann mit einem Mikroskop immer nur ein Ausschnitt der Probe erfasst werden, oder die Auflösung ist im Fall der Bildaufnahme nicht ausreichend.

Für ähnliche Problemstellungen sind bereits zeilenkamerabasierte Scanner-Systeme von Schäfter+Kirchhoff entwickelt worden. Zur Oberflächenprüfung und Fehleranalyse von Korrosionserscheinungen, insbesondere im Bereich der Filiformkorrosion (eine fadenförmige Unterwanderung im Übergangsbereich von organischen Beschichtungen auf Aluminium oder niedrig legierten Stählen), wird eine Kombination aus auf die Problemstellung optimierte Beleuchtungs- und Aufnahmetechnik sowie spezieller Algorithmen zur Bildverbesserung angewandt, um die gesuchten Merkmale hervorzuheben und der digitalen Bildanalyse die bestmöglichen Voraussetzungen zu geben. [1]

Eine weitere Systementwicklung, welche in einer nicht geförderten Zusammenarbeit mit Klimaforschungsinstituten erarbeitet wurde, befasst sich mit der Bildaufnahme von Eiskernen zur Mikrostrukturbestimmung. Mit dieser Methode wird die Mikrostruktur von Firn und Eis mikroskopisch untersucht und Lufteinschlüsse, Korn- und Subkorngrenzen sowie Korngröße und -gestalt sichtbar gemacht.

Um die manuelle und zeitaufwendige Bildaufnahme zu automatisieren, wurde das Large Area Scan Macroscope (LASM) entwickelt. [2], [3], [4]

Für die Bestimmung der Höheninformation wurde im Projekt auf Grundprinzipien der Photogrammetrie zurückgegriffen, die Mitte des 19. Jahrhunderts bereits beschrieben wurden. Bei der photogrammetrischen Auswertung von Bildern muss die Abbildungsgeometrie zum Zeitpunkt der Aufnahme wiederhergestellt werden. Diese Wiederherstellung erfolgt nach den Gesetzen der Zentralprojektion unter Einhaltung der Komplanaritätsbedingung. Bei der Stereophotogrammetrie werden 3D-Koordinaten bestimmt, indem die korrespondierenden Punkte von mehr als zwei Bildern desselben Objekts identifizieret werden (Disparität). Aus den 3D-Koordinaten lässt sich die gewünschte Höheninformation bestimmen. [5], [6]

Die Softwareentwicklung nutzt einige Funktionen, die als Open-Source-Software öffentlich zur Verfügung stehen. So wird z.B. zur Berechnung der Disparität, zur Spreizung der Histogrammplots, zur 3-D Visualisierung und zur Bildverarbeitung auf Open-Source-Quellen zurückgegriffen. Neben einer beschleunigten Entwicklung hat die Verwendung von Open-Source-Software noch weitere Vorteile. Durch die Offenlegung des Codes, wird durch die Prüfung vieler Nutzer, die Software robuster und sicherer. [7], [8]

[1] P. Gips, Dr. U. Oechsner, Dem Wurmfraß auf der Spur, Optik & Photonik Nr. 3 (2011).

[2] H. Oerter et al., Kohnen Station – the drilling camp for the EPICA Deep Ice Core in Dronning Maud Land, Polarforschung 78 (1-2), 1-23 (2008).

[3] S. Kipfstuhl et al., Microstructure mapping: a new method for imaging deformation-induced microstructural features of ice on the grain scale, Journal of Glaciology 52 (178), 398-406 (2006).

[4] A. Svensson et al., Visual stratigraphy of the North Greenland Ice Core Project (NorthGRIP) ice core during the last glacial period, Journal of Geophysical Research 110, D02108 (2005).

[5] Nubuo Kochi, Photogrammetry, Ch 22, in:Handbook of Optical Metrology, Toru Yoshizawa (Ed.), CRC Press: Boca Raton, 2009

[6] https://de.wikipedia.org/wiki/Photogrammetrie, Eintragung abgerufen am 24.04.2024

[7] OpenCV (Open Source Computer Vision Library) https://opencv.org/

[8] Khronos Groupe, Open GL for High Performance Graphics https://www.opengl.org/

1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Im Projekt wurde mit keiner weiteren Stelle zusammengearbeitet.

2 Eingehende Darstellung

2.1 Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele

Die Zuwendung wurde gemäß Projektplanung (siehe 1.3) und der Kostenaufstellung unter 2.1.3 verwendet, um die benannten Ergebnisse (siehe 2.1.1) zu erzielen. Dabei kam es zu Verschiebungen in der Zeitplanung sowie in der Verwendung der Zuwendung (siehe hierzu Kapitel 2.1.2 erster Absatz und Kapitel 2.1.3).

Im Folgenden werden die Projektergebnisse einschließlich der in der kostenneutralen Verlängerungsphase erreichten Ergebnisse dargestellt. Die Zuwendung wurde wirtschaftlich und sparsam verwendet. Es wurden nur Ausgaben getätigt, die für die Erreichung der Zielsetzung des Vorhabens notwendig waren.

2.1.1 Die im Teilvorhaben benannten Ziele waren:

- Der Demonstrator zur Bildaufnahme erzeugt auswertbare Bilder.
- Während des Scannens kann eine Höheninformation des Prüflings erfasst werden.
- Die Algorithmen und Ergebnisdatenbank liefern eine valide Auswertung der Klebe-Bruchflächen.
- Die Software und Benutzeroberflächen ermöglicht das Anlernen weiterer Daten und ist vom assoziierten Partner akzeptiert.
- Es besteht eine Wissensbasis für eine spätere Umsetzung in das Produkt.

Zusätzlich wurden drei SMARTe Ziele formuliert:

1. Erfassung einer Höheninformation des Prüflings während des Scannens

Spezifisch:	*Während der scannenden Bilderfassung wird eine Tiefeninformation der Oberfläche erfasst.*
Messbar:	*Die Tiefeninformation liegt mit einer Genauigkeit von ≤ 200 µm zur Verfügung. Die Ortsauflösung ist ≤ 0,5 mm.*
Attraktiv:	*Aufgrund der erwartenden großen Vielfalt an auftretenden Bruchflächen mit Tiefenvariationen > 1mm, ist die Tiefeninformation der Oberfläche von sehr großem Interesse.*
Realistisch:	*Aufgrund der Erfahrung des Unternehmens im Lichtschnittverfahren und Vergleich mit dem Stand der Technik, ist das Ziel als realistisch einzustufen.*
Terminiert:	*Die Erfassung der Höheninformation wird in einem Laboraufbau erprobt und die Erkenntnisse liegen zum Meilenstein 3 vor.*

2. Messgeschwindigkeit

Spezifisch:	*Es soll eine deutliche Erhöhung der Mess- und Auswertegeschwindigkeit der Proben gegenüber dem bestehenden Arbeitsablauf (separater Bildaufnahme, Bildverarbeitung und manueller Bildauswertung) erzielt werden.*
Messbar:	*Den größten Anteil am bestehenden Messablauf nimmt die manuelle Bildauswertung in Anspruch. Bis zu 10 Minuten pro Bild sind hier auch bei normalen Proben notwendig. Diese Zeit soll mit dem Messgerät auf unter 1 Minute reduziert werden.*
Attraktiv:	*Der hohe Zeitbedarf für die Auswertung verhindert häufig umfangreiche Testkampagnen zugunsten einzelner Messungen mit geringem Aussagewert. Durch die deutliche Steigerung des möglichen Probendurchsatzes kann der Umfang von Testkampagnen deutlich erhöht, bzw. bei kleineren Kampagnen der Ressourceneinsatz erheblich gesenkt werden.*
Realistisch:	*Aufgrund der großen Erfahrung bei den beiden Projektpartnern hinsichtlich Messgeräteentwicklung und entsprechend positiven Vorversuchen wird dieses Ziel als realistisch eingestuft.*
Terminiert:	*Die finale Messgeschwindigkeit wird mit dem Abschluss des Gesamtsystemtest und der Arbeiten in HAP4 in Projektmonat 24 ermittelt.*

3. Valide Auswertung der Klebe-Bruchflächen

Spezifisch:	*Um die Eignung der Bildauswertung sicherzustellen ist es notwendig, eine hinreichend gute Korrelation zwischen der im Labor bestimmten Referenzmessung und der Algorithmen-basierten Auswertung herzustellen.*
Messbar:	*Es wird eine Abweichung der ermittelten Flächenanteile zwischen der Referenzmessung und der Algorithmen-basierten Auswertung von kleiner 2% angestrebt. Die Reproduzierbarkeit der Messungen soll eine Abweichung kleiner 0,5% sein.*
Attraktiv:	*Mit einem entsprechend validem Ergebnis, kann auf die aufwendige Referenzcharakterisierung verzichtet werden.*
Realistisch:	*Aufgrund der langen Erfahrung der Projektpartner ist das Ziel realistisch.*
Terminiert:	*Das Ziel wird mit Abschluss des Projekts erreicht, im 30. Projektmonat zum Meilenstein 4.*

2.1.2 Gegenüberstellung mit den vorgegebenen Zielen

Da frühzeitig Komponenten für einen Laboraufbau zur Verfügung standen und diese Komponenten ungeplant ohne Anpassung Ergebnisse des angestrebten Ziels lieferten, war der opto-mechanische Entwicklungsaufwand geringer als geplant. Durch die Berücksichtigung eines weiteren Anwendungsfelds – die Anwendung in Forschungslaboren – und der damit einhergehenden benutzerfreundlichen Bedienung, war ein größerer Personaleinsatz in der Software-Entwicklung nötig. Diese Verschiebung ist jedoch kostenneutral im Gesamtprojekt.

Diese höheren Faktoren in der Software-Entwicklung und ein ungeplanter personeller Ausfall im Frühjahr 2022, führten zum einen zu einer zeitlichen Verschiebung der abgerufenen Personalkosten und zum anderen zu einer Aufstockung der Arbeitskraft im Projekt. Die Ziele konnten so aufgeholt und erreicht werden.

Zur Validierung der Ergebnisse wurden zwei Messkampagnen mit qualifiziertem Personal durchgeführt. Die Ergebnisse sind detailliert in den Berichten:

- Zwischenbericht für den Zeitraum 1.1.2022 – 31.12.2022 und
- Erfolgskontrollbericht zum Vorhaben SAMBA

aufgeführt. In den Berichten wird gezeigt, dass eine valide Auswertung erreicht wurde. Die Funktionalität zum Anlernen weiterer Daten ist in der Software und Benutzeroberfläche implementiert und wurde dem assoziierten Partner im Mai 2023 in einem Projekttreffen vorgestellt. Der assoziierte Partner wurde zur validierenden Messkampagne eingeladen, konnte jedoch aus zeitlichen Gründen nicht teilnehmen. Eine klare Abnahme des Ziels durch den Partner ist dadurch nicht erfolgt. Die Funktionalität ist jedoch für die geplante Vermarktung notwendig und ist im eigenen Interesse des Unternehmens.
Das Ziel, eine Wissensbasis für eine spätere Umsetzung in das Produkt zu schaffen wurde bereits Ende 2022 verworfen (siehe Zwischenbericht S.8 A.2). Das Ziel wurde ersetzt durch eine hohe Anforderung an die Benutzerfreundlichkeit.
Die SMART Ziele wurden alle erreicht und können im Detail im Erfolgskontrollbericht nachgelesen werden. Die Ergebnisse sind:

- Die Auflösung der Höheninformation liegt bei ca. 20 µm, signifikante Änderungen im Signal sind bei 60 µm erreicht. Das Ziel, eine Messgenauigkeit von < 200 µm zu erreichen, ist damit erfüllt. Die Ortsauflösung liegt typischerweise bei 57µm und maximal bei 350 µm und ist damit deutlich kleiner als die Zielgröße von 0,5 mm.

- Die Messgeschwindigkeit stand von Beginn an im Fokus. Sie teilt sich in vier Teilbereiche:

1. Bildaufnahme – diese ist abhängig von der Anzahl an Proben. Bei einer gemeinsamen Aufnahme von 8 Proben benötigen wir bei CCD-Kameras 45 s (5,6 s/Probe).) und bei CMOS-Kameras 5 s (0,6 s/Probe).).
2. Bildvorverarbeitung – die Berechnung der Höheninformation und Zuschneiden von ROI‘s benötigt 20 s (2,5 s/Probe).
3. Die Probenausrichtung – diese ist von den Anwendenden abhängig. Personen, die in der Software-Anwendung geübt sind, benötigen für das Ausrichten eines Probenpaars max. 30 s.
4. Die Analyse – durch die Optimierung des Algorithmus konnte die Auswertezeit pro Bild auf 4 s reduziert werden.
   In Summe wird für die Auswertung und Dokumentation einer Probe ca. 40 s benötigt und liegt damit unter der angestrebten Zeit von 1 Minute.

- Zur Bewertung des Ziels „valide Auswertung der Bruchflächen“ wird der Vergleich zwischen der Software-Annotierung durch eine qualifizierte Person und der Algorithmen basierten Auswertung herangezogen. Die Abweichung der identifizierten Flächenanteile liegt mit 1,63% deutlich unter der Zielgröße von < 2%. Für die Reproduzierbarkeit haben wir drei Methoden angewandt. In der ersten Methode wird das gleiche Bild mehrmals ausgewertet. Die

Reproduzierbarkeit beträgt hierbei 0,06%. In der zweiten Methode wird eine Probe mehrmals neu in das Gerät eingelegt und die Flächenanteile ausgewertet. Die Reproduzierbarkeit beträgt in diesem Fall 0,19%. In der dritten Methode wird das Messgerät verstellt, neujustiert, die Proben erneut aufgenommen und ausgewertet. In diesem Fall treten größere Abweichungen von >15% auf. Hier müssen zusätzliche Funktionen zur Verbesserung eingeführt werden. Als Schlussfolgerung kann gesagt werden, dass bei gleichen Einstellbedingungen bei der Bildaufnahme das Ziel von maximal 0,5% Abweichung erreicht wird.

2.1.3 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Der überwiegende Teil des Budgets, nämlich 90%, wurden für Personalkosten verwendet. Die Materialkosten machten nach Plan < 10% des Budgets aus. Durch effiziente Verwendung und Anpassung der optischen, mechanischen und elektrischen Komponenten, wurde nur 1/3 des Budgets abgerufen. Dafür entfielen höhere Personalkosten für die Softwareentwicklung. Insgesamt ist diese Verschiebung jedoch kostenneutral. Die folgende Tabelle zeigt einen Verglich der geplanten zu den abgerufenen Kosten während der Projektlaufzeit.

	Plan 2021	**IST 2021**	**Plan 2022**	**IST 2022**	**Plan 2023**	**IST 2023**	**IST 2024**	**Gesamt**
Kategorie	Kosten gerundet [€]	Kosten gerundet [€]	Kosten gerundet [€]	Kosten gerundet [€]	Kosten gerundet [€]	Kosten gerundet [€]	Kosten gerundet [€]	Plan - IST [€ / %]
Personal-kosten	81573	21219	245370	106135	80922	232968	66880	19337 / 5%
Material	20655	8364	16875	3901				-25265 / -67%
Reise	424		424	149	848			-1547 / -91%
Summe (gerundet)	102652	29583	262669	110184	81770	232968	66880	-7475 / -2 %

2.1.4 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Nur durch die Zusammenarbeit mit dem IFAM war im Rahmen dieser Förderung eine Projektdurchführung und Entwicklung möglich. Der Wissensaustausch, der Zugang auf relevantes Probenmaterial sowie die Expertise bei der Bruchbildbewertung und Machine Learning-Algorithmik ermöglichten die Umsetzung des Themas. Das Projekt, die durchgeführten Arbeiten, sowie die dafür aufgewandten Ressourcen waren notwendig und angemessen, da sie der im Projektantrag dargelegten Planung entsprachen und die im Arbeitsplan formulierten Aufgaben erfolgreich bearbeitet wurden.

2.1.5 Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere der Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans

Durch das Vorhaben wird im Markt erstmalig ein Analysesystem vorgestellt, dass Experten ein System für eine objektive und zeitsparende Bruchflächenanalyse von Klebstoffverbindungen an die Hand gibt. Basierend auf dem in Rahmen des Projektes aufgebauten Demonstrators kann zeitnah nach Projektende ein kommerziell erhältliches Gerät entwickelt werden. Neben einer Vermarktung im Inland ist auch eine europaweite Verbreitung der neuen Messmethode ab dem Jahr 2024 geplant. Aufgrund der Rückmeldung der Projektbeteiligten ist zu erwarten, dass sich die verkauften Stückzahlen des Gerätes schnell auf zweistellige Werte pro Jahr steigern werden. Bei einem geschätzten Systempreis von 50 T€, würden 10 Systeme im Jahr ca. 5% des gesamten Umsatzes ausmachen.
Neben der Erweiterung des Produktportfolios erhofft sich SuK die mittelbare Erschließung eines neuen Kundenkreises, der einen Bedarf an scannenden Bildgebungssystemen und Auswerteverfahren hat.
Zusätzlich konnten durch die Zusammenarbeit mit dem IFAM notwendiges Wissen zur Prüfung von Klebeverbindung und der visuellen Auswertung erlangt werden, wodurch die Prozess- und Systementwicklung erst möglich wurde. Durch die erstmalige Einbindung eines Stereo-Kamerasystems und eines Machine Learning-Algorithmus, konnte neues Grundlagenwissen erarbeitet werden, um diese Technologie zukünftig effektiv in Neuentwicklungen zu nutzen. Die Entwicklung der CMOS-Kamera erweitert überdies das Produktportfolio bei Schäfter+Kirchhoff und sichert die Zukunftsfähigkeit der Zeilenkamerasystemsparte.

Das neu entwickelte Gerät und das Verfahren der Bruchflächenanalyse ist Bestandteil einer Patentanmeldung, die voraussichtlich im Mai 2024 erfolgen wird.

2.1.6 Während der Durchführung des Vorhabens bekannt gewordene Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens an anderer Stelle.

Während des Vorhabens wurden wir aufmerksam auf das IGF-Vorhaben Nr. 19714 BG „Entwicklung und Qualifizierung einer rechnergestützten Auswertemethode zur Differenzierung der Versagensanteile klebtechnisch gefügter Proben“, Laboratorium für Werkstoff- und Fügetechnik, Universität Paderborn 2017-2019. Diese Arbeit beschäftigt sich mit einem ähnlichen Verfahren jedoch ohne die Einbindung von Machine Learning Algorithmen. Überdies stand das Verfahren und nicht die Entwicklung eines Geräts im Vordergrund. Wir sehen keine Ideen-Konflikte zwischen den beiden Projekten.

2.1.7 Geplante Veröffentlichungen der Ergebnisse

Zur Präsentation der Ergebnisse und zur Produktvorstellung sind folgende Schritte geplant:

1. Patente: Auf Grundlage des entwickelten Demonstrators und Verfahren wird eine Patentanmeldung im Mai 2024 angestrebt.
2. Fachzeitschriften: Für 2024 ist ein ausführlicher Beitrag in der Fachzeitschrift „adhäsion KLEBEN+DICHTEN“ des Springer Verlags geplant. Kleinere

Beiträge oder Anzeigen sind in den Magazinen „inspect “ (Wiley Verlag) und „InVISION“ (TeDo Verlag) geplant.

3. Messen: Wir planen das fertig entwickelte Produkt auf der Messe Vision in Stuttgart im Oktober 2024 vorzustellen. Geplant ist überdies das Gerät auf der Bondexpo in Stuttgart zu präsentieren.
4. Fachtagungen: Anfang 2025 soll die Fachtagung „DECHEMA Kolloquium: Gemeinsame Forschung in der Klebetechnik“ besucht werden. Darüber hinaus wollen wir dort als Aussteller auftreten.

   Außerdem besteht die Idee, an den „Bremer Klebtagen“ die Ergebnisse zusammen mit dem IFAM den Projektpartnern des IFAM vorzustellen.
5. Kooperationen: Es wird angestrebt, eine Kooperation mit einem Geräte-hersteller zur Bestimmung der Festigkeit von Klebstoffverbindungen einzugehen.

Erfolgskontrollbericht gem. Nr. 8.2 der NKBF 98

Zuwendungsempfänger:	Schäfter+Kirchhoff GmbH Kieler Straße 212 22525 Hamburg
Förderkennzeichen: **20Q1924A**	
Vorhabenbezeichnung:	**SAMBA** „System zur Algorithmen-basierten Auswertung von Bruchflächen“
Teilvorhabensbezeichnung:	„Bruch-flächen Inspektion Systems“ – ♭-FIS
Laufzeit des Vorhabens:	01.05.2021 – 30.04.2024
Ausgabedatum:	02.09.2024

Projektleiter:	Dipl.-Ing (FH) André Lamott
Stellv. Projektleiter:	Dipl.-Phys. Anja Knigge
Weitere Autoren:	M.Sc. Luca Kuhlmann

1 Aufgabenstellung

Die Klebtechnik ist in der Luftfahrt eine etablierte Fügetechnik. Als „spezieller Prozess“ werden besonders hohe Anforderungen an die Materialien, Prozesse und Qualitätssicherung gestellt, die umfangreiche Entwicklungs-, Qualifizierungsverfahren erfordern. Dabei werden viele zu prüfende Prozessbegleitproben erzeugt, die zurzeit durch Experten manuell ausgewertet werden. Neben dem hohen Zeitaufwand und der subjektiven Bewertung werden bei dieser Auswertung nicht alle nutzbaren Informationen berücksichtigt.

Ziel des Projektes war die Entwicklung und Validierung eines Labormessgerätes zur automatisierten Bewertung von Bruchflächen mechanisch geprüfter Prozessbegleitproben als Basis eines Demogerätes. Das System soll durch optimierte Bildaufnahmen in Kombination mit trainierbaren Algorithmen auf Expertenwissen objektiv und reproduzierbar zurückgreifen. Ein übergeordnetes Ziel ist eine objektive, vereinfachte und beschleunigte Auswertung von Bruchflächen mit der Möglichkeit der digitalen Datenspeicherung.

2 Hardwareentwicklung

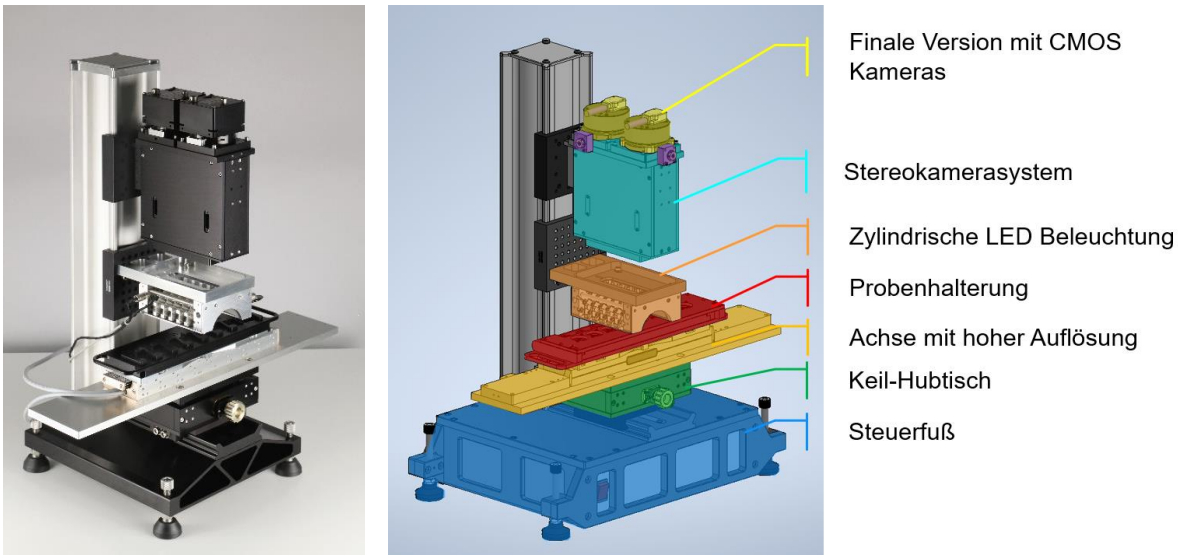

Abbildung 1: links Demonstrator, rechts: Hardwarearchitektur des Stereo Scanning Macroscopes (SSM)

2.1 Kameras

Für das Scanner System wurden neue Kameras entwickelt, welche statt CCD-Sensoren auf CMOS-Sensoren basieren. Die eingesetzten Sensoren basieren auf zwei Zeilen mit einem Bayer-Pattern. Bisher wurden Sensoren mit drei Zeilen, R, B und G, verwendet. Bei dem Bayer-Pattern besteht eine Zeile aus alternierenden G-B Pixeln und die andere aus alternierenden R-G Pixeln. Der Vorteil des Bayer-Patterns liegt hier in der Scangeschwindigkeit. Bei der RGB-Zeile, muss an jeder Position jede Zeile ein Bild aufnehmen, damit die RBG-Informationen vorhanden sind. Bei dem Bayer-Pattern kann aus den beiden Zeilen die RGB-Information an jedem Pixel interpoliert werden. Somit kann deutlich schneller ein Bild aufgenommen werden, da der Scanner bei jedem

Schritt zwei Zeilen, statt nur einer weitergehen kann. Zudem kann mit der CMOS-Technologie eine höhere Verstärkung als bei der CCD-Technologie verwendet werden, was niedrigere Belichtungszeiten ermöglicht und somit eine schnellere Scangeschwindigkeit. Der Nachteil des Bayer-Patterns wiederum ist, dass eine Interpolation nötig ist. Dies führt Artefakte und Farbfehler in das Bild ein.
Für erste Tests mit den Kameras wurde eine sehr einfache Interpolation implementiert, welche aus einem BGGR-Quad zwei RGB macht. Mit dieser Interpolation wurde die Kamera getestet und Hardwarefehler behoben, wie Timing und Synchronisationsprobleme. Nachdem diese Probleme behoben waren, wurden zwei Interpolationen implementiert. Die Erste, nach „Demosaicing With Directional Filtering and a posteriori Decision; Daniele Menon, Stefano Andriani, Student Member, IEEE, and Giancarlo Calvagno, Member, IEEE”, führte zu Bildern mit sichtbaren Artefakten an Kanten und Farbfehlern (Abbildung 2).

Abbildung 2: Ergebnis der ersten Interpolation. Strukturen an den Rändern und Farbsäume, blau linke Kante, rot rechte Kante.

Da der Algorithmus zur Auswertung der Klebeproben Strukturen und Farben als Informationen zur Entscheidung benutzt, können sich solche Fehler negativ auf das Ergebnis auswirken. Daher wurde ein zweiter Algorithmus, nach „Adaptive Homogeneity-Directed Demosaicing Algorithm; Keigo Hirakawa, Student Member, IEEE and Thomas W. Parks, Fellow, IEEE“, implementiert. Dieser Algorithmus liefert

bessere Ergebnisse an Kanten und verringert die Farbfehler durch einen Medianfilter über die Farbdifferenzen (siehe Abbildung 3).

Abbildung 3: Ergebnis der zweiten Interpolation. Schärfere Kanten und reduzierte Farbfehler.

Die Rechenzeit des Algorithmus ist dafür sehr hoch, da wir mit sehr großen Bildern arbeiten. Um dies zu lösen, wurde mit der Optimierung des Codes begonnen, was sich als sehr zeitaufwendig erwiesen hat. Daher wurde entschieden, dass die fertige CMOS-Entwicklung bis zum Projektende nicht möglich ist und somit für den finalen Test wieder die CCD-Kameras benutzt werden. Zudem muss nach der fertigen Optimierung noch ein Test durchgefügt werden, der darüber Auskunft geben soll, zu welchem Teil die übrigen Fehler durch die Interpolation die Analyse mit dem Algorithmus beeinflussen. Es ist auch eine Neuentwicklung der CMOS-Kameras mit einer RGB-Zeile angedacht. Für diese Kamera können aber nur wenige Teile der jetzigen Version übernommen werden, da die Datenübertragung und Frequenz der RGB-Zeile anders wären. Daher würde die serienreife Entwicklung den Projektzeitraum überschreiten.
Für den Demonstrator wurden daher zwei Zeilenkameras des Typs SK12240GKOC-4XL eingesetzt. Dies sind CCD-Farbkameras mit 10 µm Pixelgröße. Die Datenübertragung zum PC geschieht über Gigabyte Ethernet (GigE).

2.2 Stereokamerasystem

Das Gesamtkonzept aus Bildaufnahme und Messung der Tiefeninformation sieht vor, ein photogrammetrisches Verfahren zu verwenden. Mittels Stereoaufnahme eines Objekts wird die Disparität von Bildelementen festgestellt und damit eine Höheninformation berechnet. Eine Kamera des Stereokamerasystems wird verwendet, die Oberfläche für die Bruchflächenanalyse aufzunehmen. Die Pixelgröße und das Objektivsystem sind so ausgelegt, dass eine Abbildung von 11 µm pro Pixel ermöglicht wird.

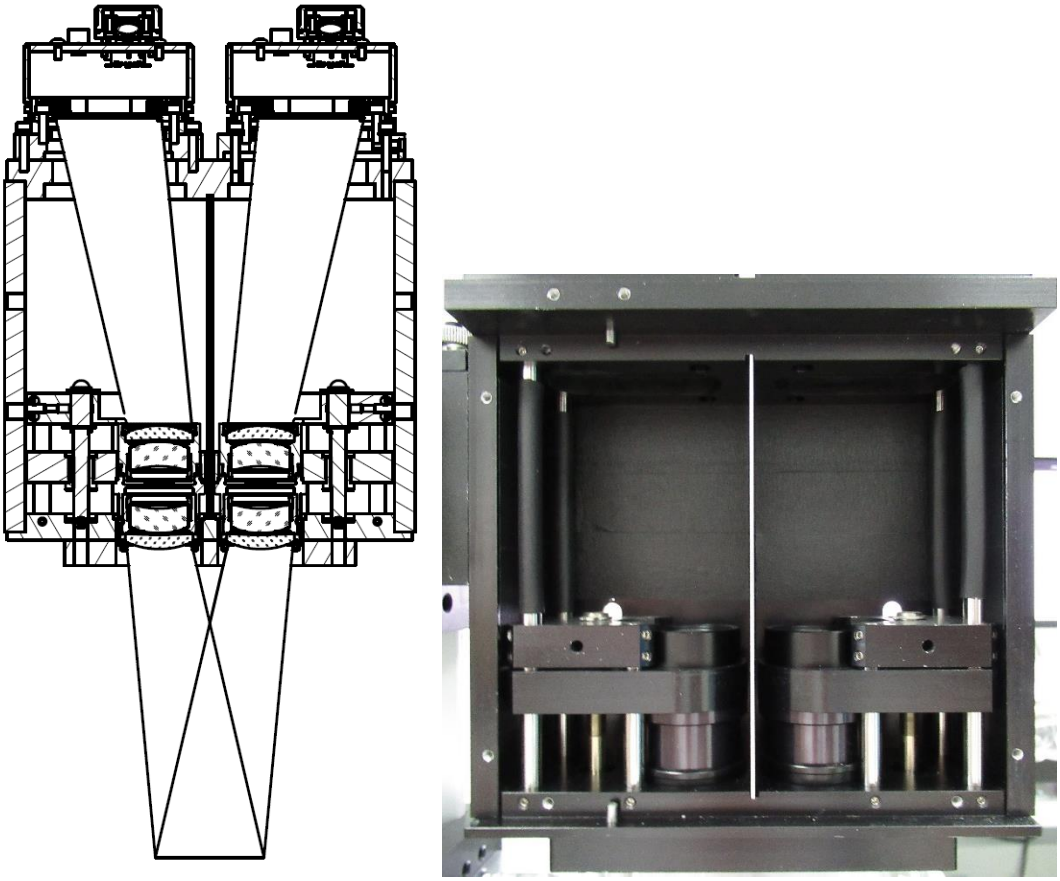

Abbildung 4: links ist die optische Auslegung des Stereokamerasystems zu sehen, rechts ist die Umsetzung im Demonstrator dargestellt.

Die Auflösung der Höheninformationen war eines der formulierten SMART Ziele. Zur Bestimmung der Messgenauigkeit wurde ein Teststück gefertigt, welches bestimmte Abstufungen hatte. Diese Abstufungen sind: 100 µm, 60 µm, 40 µm, 20 µm. Dieses Teststück wurde mit dem Scanner aufgenommen und die Höheninformationen generiert (Abbildung 5). Es ist zu sehen, dass selbst die niedrigste Stufe aufgelöst wird, also 20 µm. Die Höheninformationen werden mithilfe des StereoBM Algorithmus der Open Source Bibliothek „OpenCV“ generiert. Dieser sucht nach Disparitäten in Pixelblöcken, um daraus Höheninformationen zu generieren. Um ein durchgehendes Höhenbild ohne Lücken zu erzeugen, lassen wir mehrere Höhenbilder mit verschiedenen Blockgrößen erstellen und mitteln über diese. Die Blockgrößen reichen von 5-31 Pixeln. Damit erreichen wir, bei einer Pixelgröße von 11.36 µm, eine Ortsauflösung zwischen 56.8 µm und 352.16 µm. Nachdem das Höhenbild mit dem Algorithmus generiert wurde, wird das Histogramm mit dem „CLAHE“ Algorithmus von „OpenCV“ gespreizt, um die Höhenunterschiede klarer darzustellen. Aus den Höheninformationen wird beim Annotieren zudem ein 3D-Model der Probe erstellt, als Annotierungshilfe. Hierfür wird das Höhenbild noch mit einem Gaußfilter weichgezeichnet, um eine stufenlosere Darstellung zu erreichen. Die 3D-Ansicht des

Teststückes kann in Abbildung 5 gesehen werden. Die verschiedenen Abstufungen sind deutlich unterscheidbar.

Abbildung 5: 3D-Ansicht des Höhen-Teststücks.

2.3 Zylindrische LED-Beleuchtung

Die LED-Beleuchtung erzeugt die erhoffte Ausleuchtung mit verminderten Reflexen und Schatten. Die Strahlungsleistung wurde in einem zweiten Schritt weiter erhöht, um die Scan-Geschwindigkeit zu steigern. Durch die separate Ansteuerung der linken und rechten Seite des Lichtdoms, wird eine weitere Möglichkeit gegeben die Beleuchtungsstrategie flexibel anzupassen. Zusätzlich soll in der Software ein HDR (high dynamic range) Bild erzeugt werden können, um den Anwendenden eine Möglichkeit zu geben, komfortabel die optimale Strahlungsleistung zu finden.

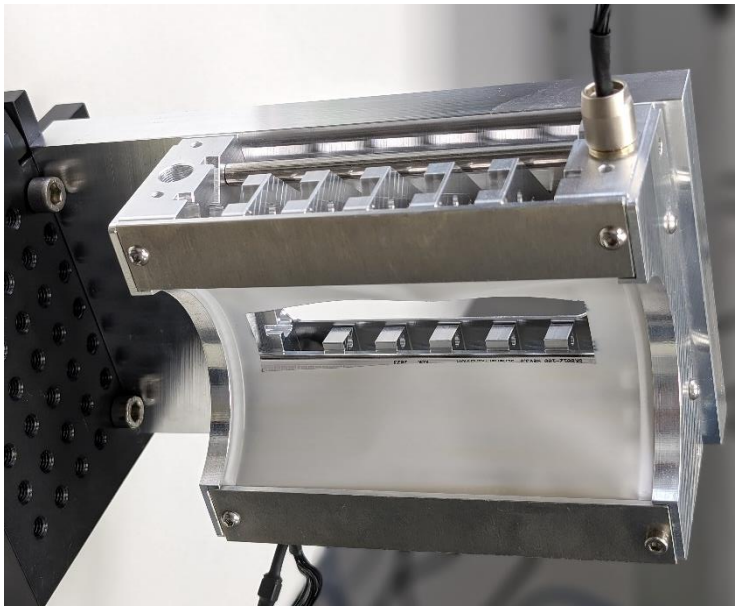

Abbildung 6: Umsetzung der zylindrischen LED-Beleuchtung

2.4 Probenhalter

Der Halter für ein 8er Set mit 10 mm Proben erlaubt die parallele Aufnahme aller Proben ohne Nachstellen der Schärfe. Die Fixierung an der Linearachse ist über Magnete realisiert. Idee ist, dass der Kunde eigene Halter für das System erstellen und

in der Software einrichten kann. Hierzu sollen Anwendungen in der Software bereitgestellt werden, um den Anwendenden das Einrichten zu erleichtern (Raster, A-B Seiten Annotierung, Konturfindung zur automatischen Region-of-Interest Findung). Während der Projektlaufzeit wurden zwei unterschiedliche Prototypen gefertigt, um das Handling zu erproben. Aus diesen Prototypen wird das finale Konzept abgeleitet.

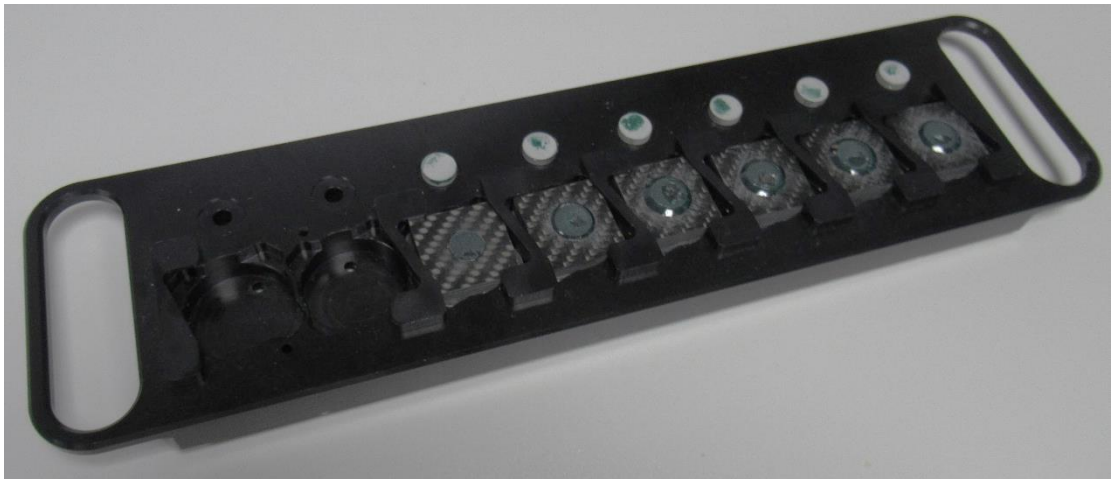

Abbildung 7: Probenhalter für Teststücke.

2.5 Achse mit hoher Auflösung

Damit der Scan ohne Verzerrung aufgenommen werden kann, wurde erstmalig eine Achse mit 0,1 µm optischer Auflösung eingesetzt.

2.6 Keil-Hubtisch

Zur reproduzierbaren feinfühligen Einstellung der Nullebene ist ein Keil-Hubtisch entwickelt werden. Nach Optimierung eines ersten Prototyps, konnte eine Verstellung über 1 cm mit einer Parallelität von < 40 µm realisiert werden. Dies entspricht nicht der Zielgröße und bedarf weiterer Optimierung für das Endgerät.

Abbildung 8: Keil-Hubtisch, Bild des optimierten Aufbaus.

2.7 Steuerfuß

Der Steuerfuß ist baugleich zum Corrosion Inspector, um Skalierungseffekte bei der Teilebeschaffung nutzen zu können.

2.8 Messgeschwindigkeit

Ein weiteres SMART Ziel war die Optimierung der Messgeschwindigkeit. Zur Bestimmung wurde ein Probenhalter verwendet, der 8 Proben umfasst. Der Scanner scannt diesen Probenhalter in ca. 45 Sekunden ein und berechnet die Höheninformationen in ca. 20 Sekunden. Die Software schneidet das Gesamtbild dann automatisch auf die einzelnen Stempel-Substrat-Paare zu. Hierfür muss einmal ein Probenhalter mit den Positionen der Paare in der Software eingerichtet werden, welcher dann fortführend geladen werden kann. Somit kommen wir auf eine Messgeschwindigkeit von gut 8 Sekunden pro Probe. Bei helleren Proben, als die in diesem Set benutzten, kann auch eine höhere Scangeschwindigkeit erreicht werden, da die Belichtungszeit verringert werden kann. Mit den CMOS-Kameras kann auch eine signifikante Steigerung der Scangeschwindigkeit erreicht werden, da diese eine höhere Verstärkung benutzten können und somit eine niedrigere Belichtungszeit benötigen. Vor der Auswertung der Proben müssen die Stempel und Substratseiten zueinander ausgerichtet werden. Dies wird über einen Dialog gemacht, in dem der User die Bilder unterstützt zueinander ausrichten kann. Je nachdem wie gut die Merkmale der beiden Seiten zueinander zu sehen sind, kann dieses Ausrichten zwischen 30 Sekunden und 2 Minuten dauern. Nach dem Ausrichten können die Proben ausgewertet werden. Dies geschieht entweder per Hand mithilfe der Annotierungshilfe, oder mit einem antrainierten Algorithmus im Prozessbetrieb. Bei der Auswertung von Hand kann die Zeit von User zu User variieren, aber auch die gewünschte Genauigkeit, sowie die Anzahl und Identifizierbarkeit der Bruchbilder spielen eine Rolle. Grundlegend kann man sagen, dass die Auswertung hiermit zwischen einer und fünf Minuten dauern kann. Im Prozessbetrieb hingegen übernimmt der antrainierte Algorithmus die Auswertung der ausgerichteten Bilder. Bei einer Bildgröße von 900x900 Pixeln braucht der Algorithmus ca. 4 Sekunden zur Auswertung der Probe. Dies ist aber sowohl von der Bildgröße, als auch von der Prozessorleistung abhängig.

3 Software

Für die Software wurde eine Bestandssoftware für den Corrosion Inspector als Basis genommen und für den Betrieb mit mehreren Kameras erweitert. Dies ist nötig für die Nutzung des Stereo Systems. Die Software bietet eine Oberfläche zur Steuerung des Scanner Systems. Für die Auswertung der Klebeproben wurde eine DLL entwickelt, welche beim Programmstart geladen wird und die Funktionen zur Weiterverarbeitung der Bilder liefert.

Die Funktionen wurden auf Basis der im HAP1 definierten Abläufen in den drei Betriebsmodi für die Anwendenden entwickelt.

Der normale Ablauf zur Auswertung eines Probensets sieht wie folgt aus:

1. Einlegen der ersten Probe in den aktuellen Probehalter im Scanner System.

2. Ersten Scan starten und aufgenommene Bild auf Helligkeit und Schärfe überprüfen und ggf. Helligkeit und Schärfe über die Kamera- und LED-Parametern anpassen und durch weitere Scans überprüfen.
3. Im Vorfeld definiertes ROI-Set laden. Hiermit werden die Probenhalterinformation und Anordnung der Probenpaare für die weitere Bearbeitung geladen.
4. Im Anschluss werden die Metainformationen der Probe eingegeben, also Informationen zum verwendeten Klebstoff, zu den Substratmaterialien usw.
5. Es folgt die eigentliche Aufnahme bei der die Proben eingescannt werden. Hierbei wird die Probe mit den eingestellten Kamera- und LED-Parametern aufgenommen. Für die Bilder wird automatisch ein Ordner mit eingangs definierten Namen erstellt und dort gespeichert. Zudem wird aus den aufgenommenen Bildern ein Bild mit den Höheninformationen errechnet und abgespeichert.
6. Die Bilder werden gemäß der definierten ROIs ausgeschnitten und in einer 2x2 Ansicht dargestellt. Die 2x2 Ansicht sind die beiden Bilder der beiden Bruchhälfte sowie die jeweilige Darstellung der Höheninformationen.

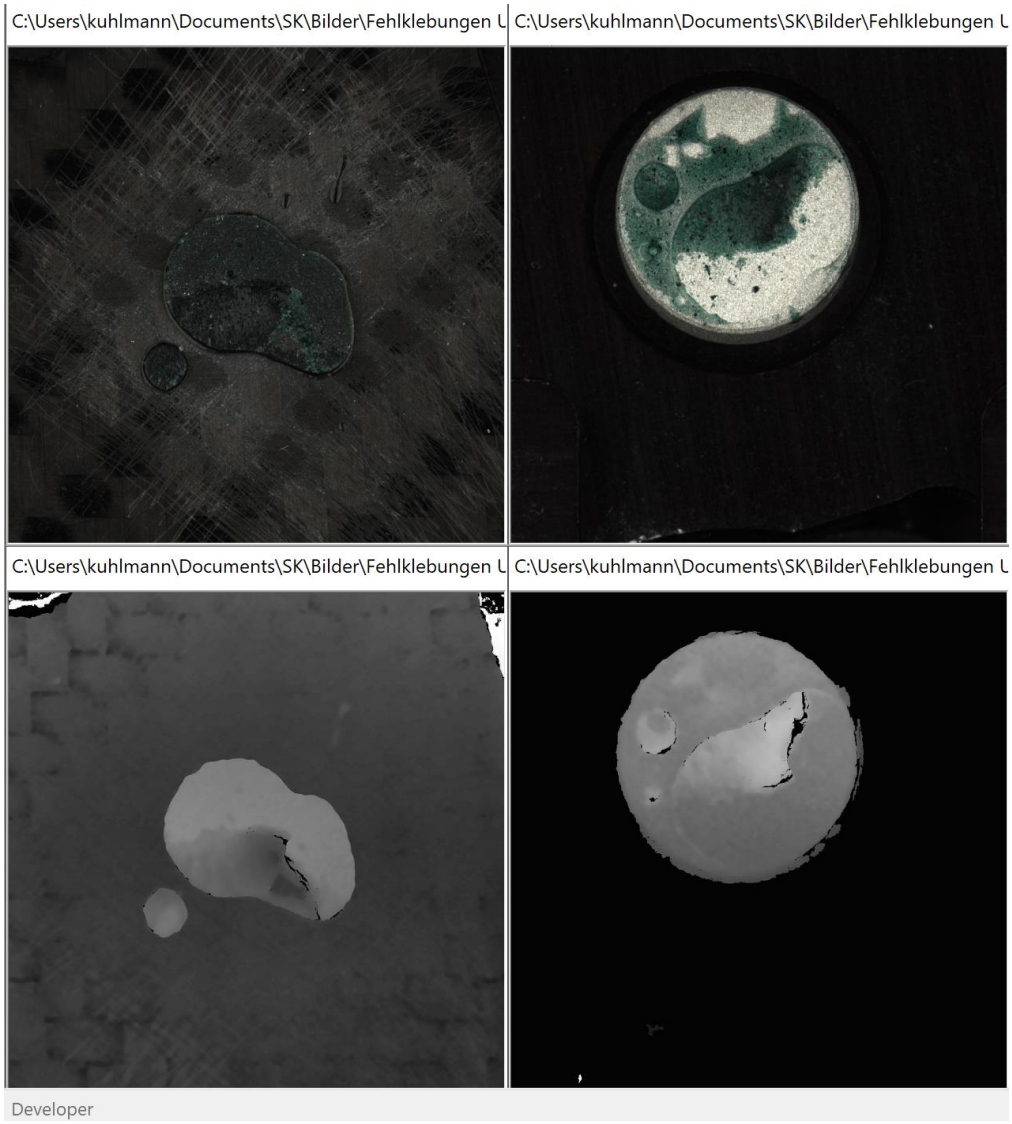

Abbildung 9: 2x2 Ansicht mit den ROIs der aufgenommenen Bilder für Substrat und Stempel in der oberen und die ROIs der Höhenbilder in der unteren Reihe.

7. Als nächster Schritt muss das Substrat und den Stempel zueinander ausgerichtet werden.

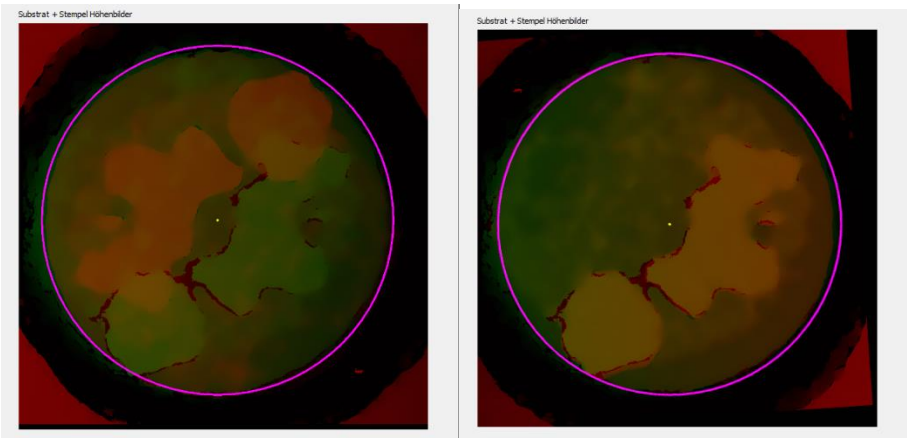

Abbildung 10: Funktionsweise der Ausrichtung: Die beiden Bilder des Bruchflächenpaars werden transparent und Farbcodiert überlagert, so dass eine visuelle Optimierung der Überlagerung möglich ist.

8. Nach dem Ausrichten öffnet sich die 2x2 Ansicht mit den ausgerichteten Bildern (Siehe Abbildung 11). Diese ist nun bereit für den Label Betrieb.

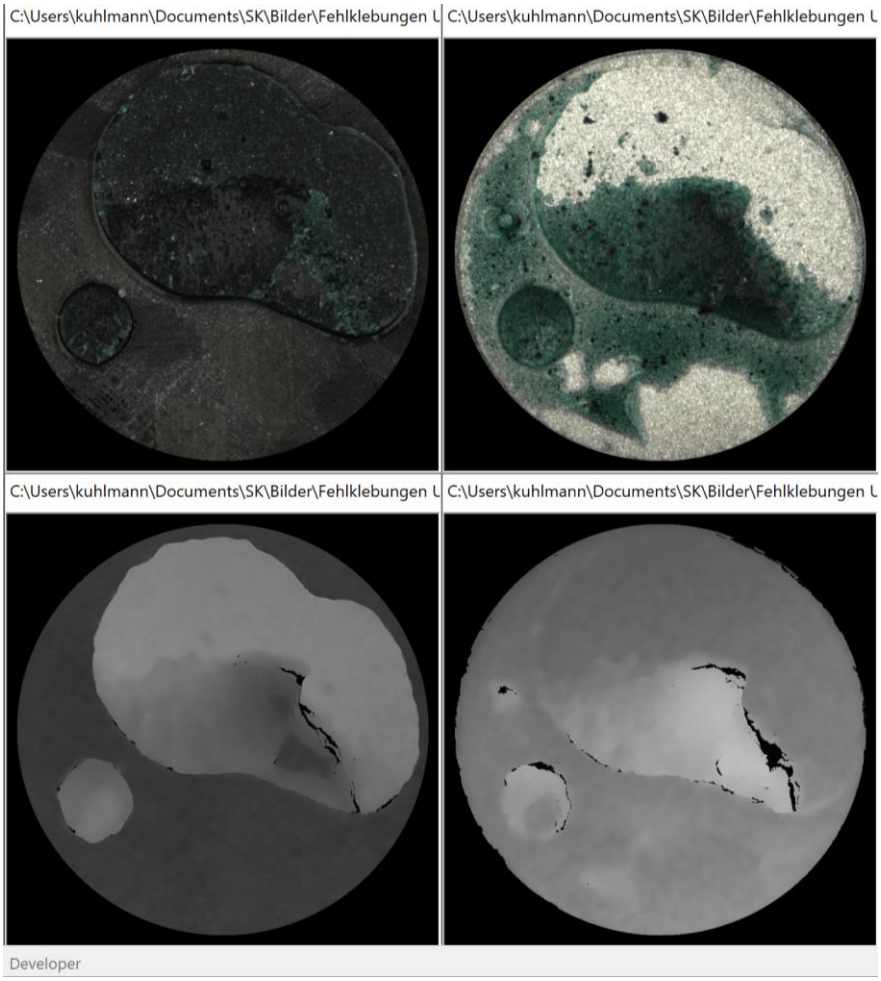

Abbildung 11: 2x2 Ansicht mit fertig ausgerichteten Bildern.

9. Die zugeschnittene und ausgerichtete Probe kann nun markiert werden. Dazu können entweder bestehende Sets an Labeln geladen werden, oder neue Label für die zu erwartenden Bruchflächen-Klassen ((Adhäsionsbruch AF, Kohäsionsbruch CF…) erstellt werden.
10. Mit den definierten Labelsets können nun die Bruchbereiche zum Annotieren markiert werden. Hierzu erscheinen zur 2x2 Ansicht zwei weitere 3D-Ansichten des Bruchflächenpaars (Siehe Abbildung 12).

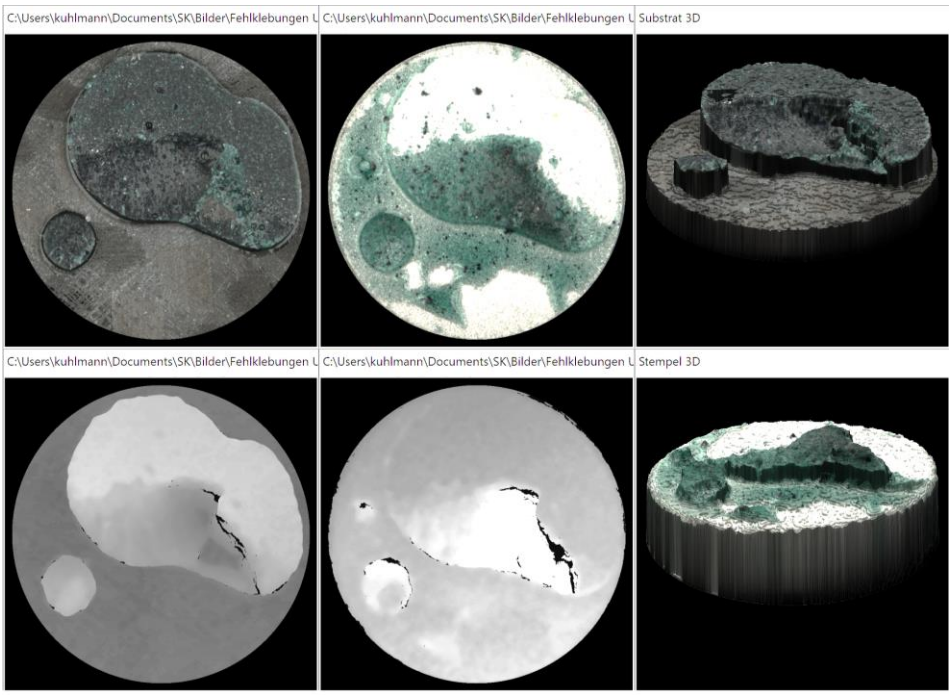

Abbildung 12: 2x3 Ansicht zum Annotieren. 2 Fenster mit der 3D-Ansicht der Probe zur Hilfe.

11. Das Markieren erfolgt in allen der 4 Anzeigebilder parallel (Siehe Abbildung 16).

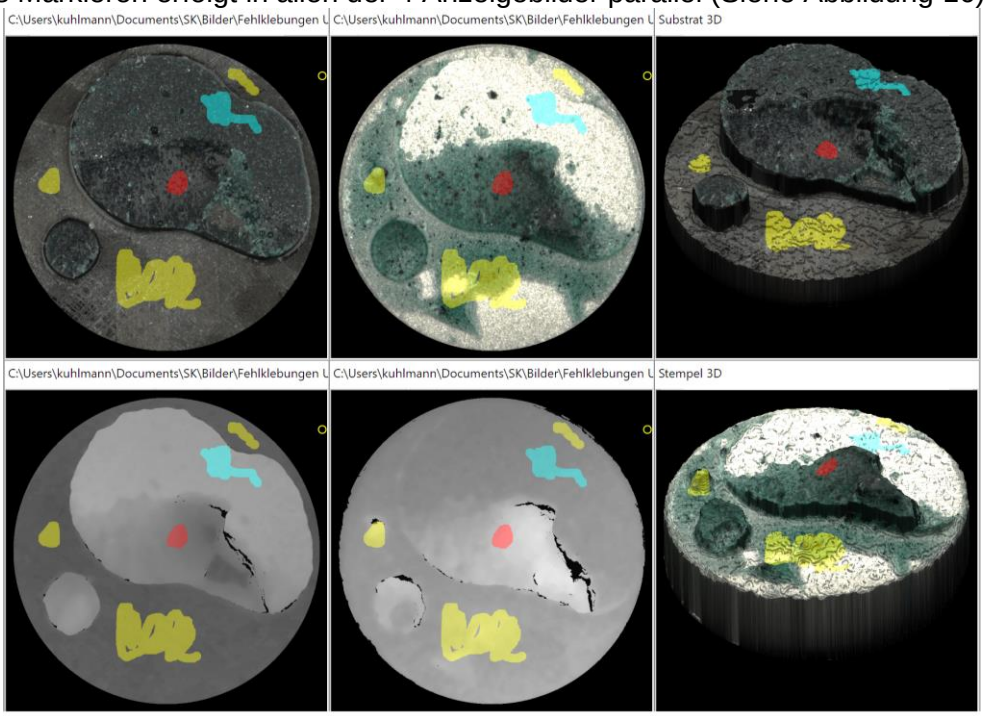

Abbildung 13: Beispiel für das parallele Markieren der Bruchflächen in der 2x3 Ansicht.

Es ist somit möglich, in allen 4 Bildern Flächen zu markieren, je nach dem wo die Fläche am einfachsten zu identifizieren ist. Übliche Funktionen wie radieren, rückgäng machen und zoomen stehen zur Verfügung.

12. Mit einem Wahrscheinlichkeitsregler kein ein Sicherheitsschwellwert für die Merkmalanalyse eingestellt werden. Darunter ist Folgendes zu verstehen: zur Auswertung wird das Bild in eine Vielzahl von Bildelementen unterteilt (z.B. 8x8 Pixel). Jedem Bildelement wird eine Zusammensetzung der wahrscheinlichen Bruchflächen-Klasse zugeordnet, z.B. 70% kohäsives Versagen, 20% adhäsives Versagen, 10% unklar/Sonstiges. Mit dem Wahrscheinlichkeits-Regler wird der Schwellwert definiert, den eine identifizierte Bruchart in ihrem Bildelement aufweisen muss, damit sie als solche für die Auswertung herangezogen wird. Alle Bildelemente, die unter diesem Schwellwert liegen, werden als undefinierte Bildelemente behandelt und werden nicht markiert.

    Bereits mit wenigen Markierungen (vergleiche Abbildung 13) kann über den implemtierten Algorithmus eine Vohersage für die Gesamtheit getroffen werden. Durch den Wahrscheinlchkeitsregler können die angezeigten Bildelemente gefiltert werden. Den Anwendenden ist überdies die Möglichkeit gegeben, den Vorschlag zur Annotierung zu korrigieren und/oder zu ergänzen. Die Vorhersage stellt damit eine Annotierungshilfe dar. Iterativ kann die bewertende Person sich damit einer vollständigen Klassifizierung des Bild nähern.

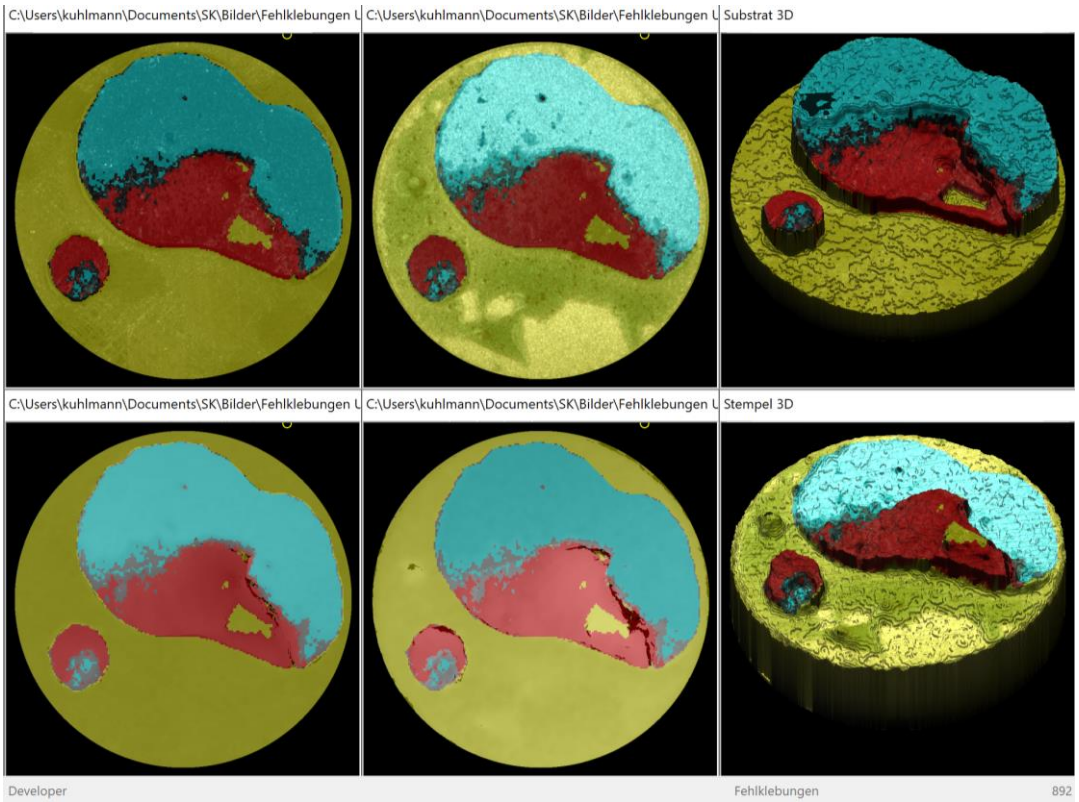

Abbildung 14: Markierte Bruchflächen, generiert durch Merkmalanalyse auf Basis der in Abbildung 13 markierten Stellen

13. Zur Bewertung des Analyseergebnisses werden eine Reihe von Verteilungsfunktionen zur Verfügung gestellt.

Summen Verteilungsfunktion:

Auf der x-Achse ist die Ergebnis-Wahrscheinlichkeit in Prozent aufgetragen, während auf der y-Achse der Anteil der Fläche an der Gesamtfläche der Probe in Prozent dargestellt ist. Nach dem Durchführen einer Merkmalanalyse werden die Flächenanteile pro Wahrscheinlichkeit aufsummiert. Die Wahrscheinlichkeit ist dabei wie der vorher beschriebene Schwellwert zu verstehen. Bei einem Wahrscheinlichkeit-Schwellwert von 0% sind dementsprechend alle Bildelemente gleichzeit alle definierten Bruchflächenklassen. Die Gesamtfläche wäre bei 4 definierten Bruchflächen-Klassen entsprechend 400%. Der Plot macht also erst ab höhren Wahrschenlichkeiten Sinn. Ab einem Schwellwert von 50% ist eine eindeutige Zuordnung möglich und die Summe der Flächenanteile dementsprchend 100%. Bei höheren Schwellwerten ist hingegen die Wahrschenlich wieder ehöht, dass einem Bildelement keine Bruchflächen-Klasse eindeutig zugeordnet werden kann. Die Summe der Fläche fällt entsprechen ab und ist unter 100% der Gesamtfläche. In Abbildung 15 wäre dies ab einem Wahrscheinlichkeits-Schwellwert von 70% der Fall. Die optimale Kurve ist daher L-Förmig.

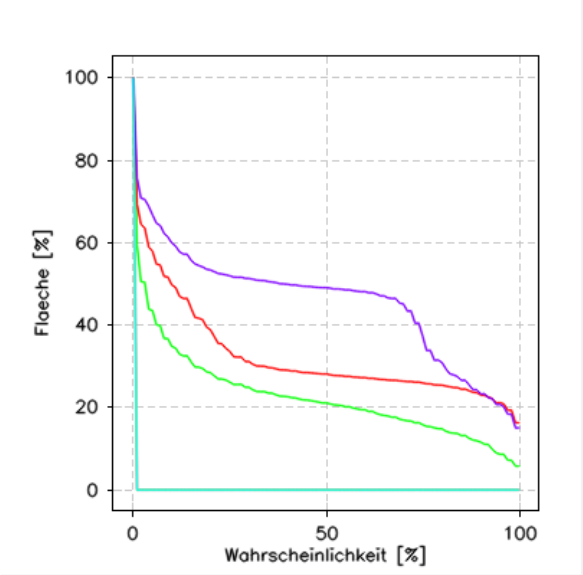

Abbildung 15: Plot der Summen Verteilungsfunktion.

Histogrammverteilungsfunktion

Die Histogrammverteilungsfunktion stellt die gleichen Informationen wie die Summenverteilungsfunktion dar, mit dem Unterschied, dass die Flächenanteile pro Wahrscheinlichkeits-schwellwert nicht aufsummiert werden. In dieser Darstellung ist die Summe der Flächenanteilte pro Bruchflächenklasse 100%. Ansonsten zeigt die Verteilung die gleichen Werte an, wie die Summenverteilungsfunktion. Das bedeutet z.B. für die Bruchflächenklasse „Kohäsives Versagen“ (violette Kurve in Abbildung 16), dass die 100% dieser Klasse zu 38% bei 0% liegen, 20% sind eindeutig mit 100% definiert und weitere 25% Verteilt zwischen 50 und 95%. In Summe haben damit ca. 45% der Bildelemente eine Wahrscheinlichkeit von >50%, dass sie die Klasse

„Kohäsives Versagen“ anzeigen. Diese ≈45% ensprechen wiederum dem Wert in Abbildung 14. Die ideale Form in diesem Plot ist eine U-Form.

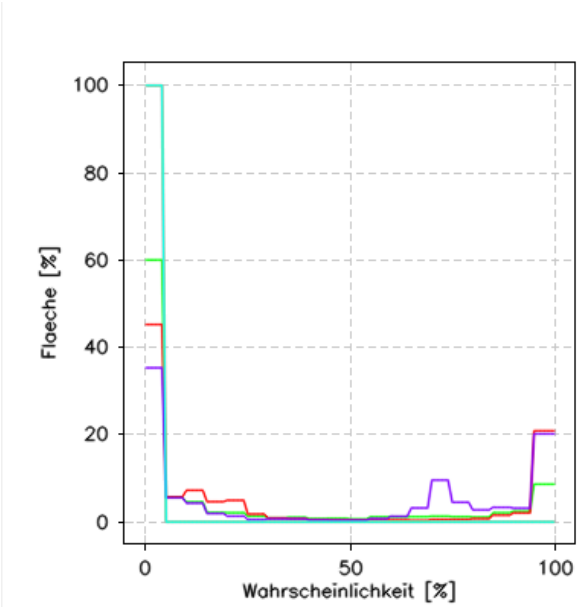

Abbildung 16: Plot der Histogramme der Wahrscheinlichkeiten.

<u>Heatmapdarstellung</u>

Mittels Heatmap wird die Wahrscheinlichkeit für eine Bruchflächenklasse (Label) dargestellt (siehe Abbildung 17). In der Heatmap wird die Wahrscheinlichkeit eines Bildelements als Farbe codiert. Je höher die Wahrscheinlichkeit, umso roter wird das Bildelement dargestellt. Anhand der Farbverteilung können die Regionen großer Unsicherheit identifiziert werden, die ggf. im Detail bewertet werden müssen.

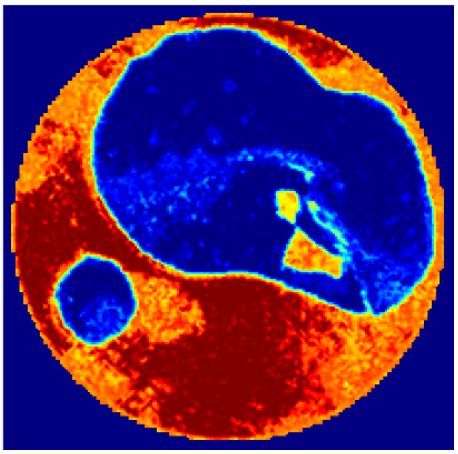

Abbildung 17: Heatmap der Wahrscheinlichkeiten für ein Label.

14. Die so annotierten Bilder können als ein Satz an Proben ausgewählt werden, mittels dem der Algorithmus trainiert werden soll (siehe Abbildung 18). Die gewünschten Proben

können durch angezeigte Vorschaubilder ausgewählt werden.

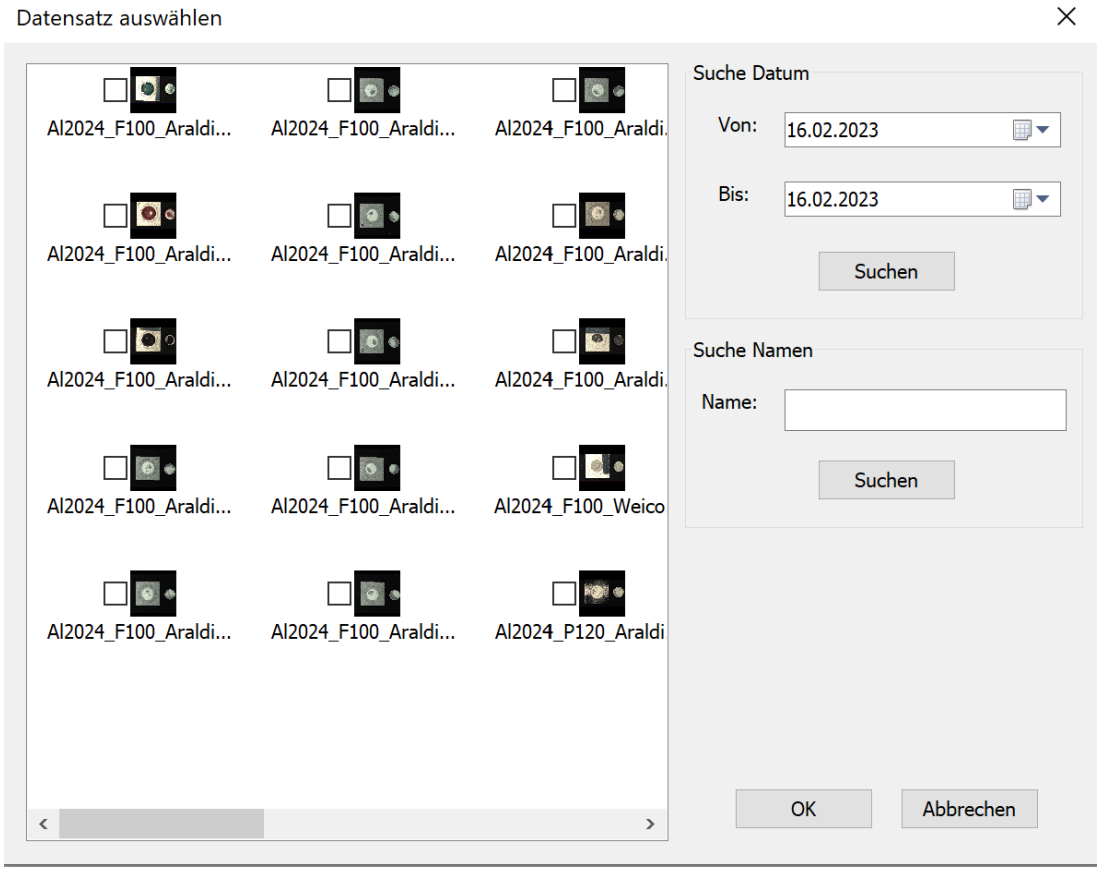

Abbildung 18: „Datensatz auswählen“-Fenster zur Auswahl eines Datensatzes an Proben zum Antrainieren eines Algorithmus.

15. Nachdem der Datensatz ausgewählt wurde, kann der Algorithmus antrainiert werden. Zur Verifikation wird ein Teil des Trainingssets mit dem antrainierten Algorithmus ausgewertet und den von Hand ausgewerteten Ergebnissen gegenübergestellt (siehe Abbildung 19). Wenn das Ergebnis als gut befunden wurde, kann das Training des Algorithmus mittels einer Freigabe abgeschlossen werden.

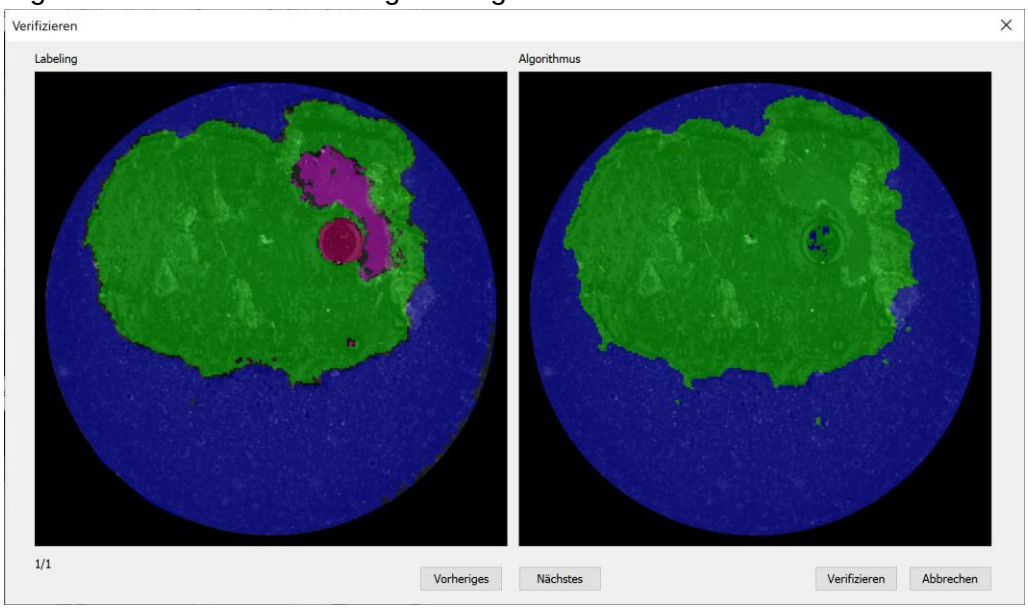

Abbildung 19: Verifizieren-Fenster.

16. Dieser trainierte Algorithmus kann nun bei Programmstart ausgewählt werden. Mit diesem werden alle zusätzlichen Informationen geladen, wie Probengeometrie und ROIs, Scan-Parameter, Label-Set und Auswertebasis.

4 Ergebnisse Klebetest mit Fehlklebungen

Um einen Vergleich zwischen der bisherigen Auswertung mit dem Auge, zu der Auswertung mit Hilfe der Software zu erstellen, wurde ein spezielles Probenset, welches 32 Proben umfasst, erstellt. Dieses Set umfasst mehrere Proben bestehend aus einem CFK-Substrat auf welches ein grüner Kleber aufgetragen wurde. Die Proben wurden so präpariert, dass besondere Fehlerklebungen entstehen. Diese Fehlklebungen umfassen Fremdkörper, z.B. Reste von anderen Klebern, Haare, Fremdpartikel, etc., Proben, bei denen der Klebstoff nur punktweise und nicht auf dem ganzen Stempel aufgetragen wurde, und Proben, bei denen zusätzlich zu der punktweisen Auftragung der Kleber noch leicht die Oberfläche benetzt. Solche Proben sind Extremfälle und sollten im normalen Betrieb nicht auftreten, sind aber ein guter Test für die Perfomance der Software in Grenzfällen.

Die Proben wurden von zwei Klebeexpertinnen des IFAMs wie bisher üblich visuell ausgewertet, wobei die Flächenanteile anhand des visuellen Eindrucks geschätzt werden. In einem zweiten Schritt wurde für den Vergleich die Software bereitgestellt und die Klebeexpertinnen eingewiesen. Mit den Proben wurden mit der Software zudem zwei Auswertealgorithmen trainiert; einmal mit einem nicht repräsentativen Set an Proben, welches nicht alle Bruchbildklassen umfasst (Proben 1-4), und einmal mit einem repräsentativen Set, welches alle Brucharten umfasst (Proben 1, 3, 4, 14, 19, 20, 25, 26).

Die Ergebnisse wurden mit Sicht auf folgenden Punkten ausgewertet:

- absolute Abweichung zwischen den Auswertungen mit dem Auge,
- absolute Abweichung zwischen den Auswertungen mit der Software,
- absolute Abweichung zwischen der Auswertung mit dem Auge zu der Auswertung mit der Software,
- absolute Abweichung zwischen der Auswertung mit dem Auge zu der Auswertung mit dem nicht repräsentativen Algorithmus,
- absolute Abweichung zwischen der Auswertung mit dem Auge zu der Auswertung mit dem repräsentativen Algorithmus,
- absolute Abweichung zwischen der Auswertung mit der Software zu der Auswertung mit dem repräsentativen Algorithmus.

Die Ergebnisse sind mit Mittelwert, mittlerer Abweichung und maximaler Abweichung in Tabelle 1 aufgetragen. Alle Werte sind in der Einheit [%]. Bei allen Ergebnissen wurden die drei größten Ausreißer entfernt. Bei dem Vergleich zwischen Auge/Software wurden die Softwarewerte so korrigiert, dass die „Undefined“-Klasse der Software anteilweise auf die anderen Klassen aufgeteilt wurde, da diese Klasse in der Auswertung mit dem Auge nicht existiert. Diese Korrektur ist sinnvoll, da die „Undefined“-Klasse zum größten Teil aus den Grenzbereich zwischen zwei Bruchbildklassen besteht. Dort ist der Algorithmus sich meist zu 50/50 sicher zu welcher Klasse das Bildelement gehört, da beide Klassen in dem Bildelement vorhanden sind.

Tabelle 1: Abweichungen zwischen verschiedene Auswerteverfahren. Alle Werte sind in Prozent.

	Auge/ Auge	**Software/ Software**	**Auge/ Software**	**Auge/ nicht repräsentativ**	**Auge/ repräsentativ**	**Software/ repräsentativ**
Mittelwert	3,49	1,44	2,01	3,25	2,14	1,63
Mittlere Abweichung	4,58	1,73	2,65	3,64	2,38	1,84
Maximale Abweichung	40,00	10,66	19,51	31,93	14,49	17,87

Die Daten sind am Ende des Kapitels in Abbildungen 22-27 als Histogramme dargestellt.

In den Ergebnissen ist zu sehen, dass der Unterschied in der Auswertung zwischen den Klebeexperten mit der Software weniger als halb so groß wie bei der Auswertung mit Auge ist. Dies zeigt, dass die Auswertung mit der Software konsistentere Ergebnisse liefert. Da die Auswertung mit der Software mithilfe der Voranalyse des Algorithmus durchgeführt wird, ist das Ergebnis weniger abhängig von menschlichen Faktoren wie Person, aber auch Faktoren wie Tagesform oder Licht in dem die Probe betrachtet wird. Der Faktor der Person wird aber nicht komplett eliminiert, da die für die Voranalyse auch Bruchflächen von Hand markiert werden müssen und dabei die Auswahl dieser immer noch anwenderabhängig ist.

Das Ergebnis des Vergleiches der Auswertung mit dem Auge zu der Auswertung mit der Software von derselben Person zeigt, dass die Auswertung mit der Software konsistent mit der bisherigen Auswertungsmethode ist. Die 2% mittlere Abweichung lassen sich dadurch erklären, dass die Software die Klebebruchflächen feiner auswerten kann, als es durch Schätzung per Auge möglich ist. Somit verschiebt sich z.B. ein 25/75% Split zwischen zwei Klassen zu einem 23/78% Split durch genaueres Auswerten der Flächen. Die maximalen Abweichungen kommen hier zu einem Teil auch dadurch, dass durch die 2x2 Ansicht plus der 3D-Ansicht neue Bruchbilder sichtbar werden, die durch die einzelne Betrachtung der beiden Seiten mit dem Auge oder dem Mikroskop nicht sichtbar sind.

Der Vergleich der Ergebnisse des nicht repräsentativen mit dem repräsentativen Algorithmus zeigt, dass der nicht repräsentative Algorithmus deutlich höhere Abweichung aufweist, als der repräsentative Algorithmus. Dieses Ergebnis ist zu erwarten, da der nicht repräsentative Algorithmus versucht die unbekannten Klassen auf die bekannten aufzuteilen. Dies führt zu größeren Abweichungen. Der repräsentative Algorithmus hingegen ist nah an den Abweichungen von der manuellen Markierung per Software zu der Auswertung mit Auge. Dies ist auch zu erwarten, da der Algorithmus an den von Hand markierten Proben antrainiert wurde. Somit lernt der Algorithmus auch die Abweichungen von der Markierung von Hand. Daher sollten die Proben, die zum Antrainieren benutzt werden, möglichst ausführlich markiert werden, um die Abweichungen, die der Algorithmus später produziert, zu minimieren.

Der Unterschied zwischen der mit der Software ausgewerteten Proben und des daran repräsentativ antrainierten Algorithmus liegen unter den in den SMART-Kriterien erwünschten 2%. Um die Reproduzierbarkeit des antrainierten Algorithmus zu testen, wurde dieselbe ausgerichtete Probe fünf Mal in Folge ausgewertet. Hierbei gab es keine Abweichung zwischen den Proben. Dies liegt daran, dass der antrainierte Algorithmus deterministisch ist. Wenn dieselbe Aufnahme der Probe nun fünf Mal in Folge mit Hilfe des Ausrichtedialogs ausgerichtet wird, liegt der Mittelwert der absoluten Abweichung bei 0,06% und die mittlere

Abweichung ebenso bei 0,06%. Somit ist die Ausrichtung mithilfe des Ausrichtedialogs gut reproduzierbar. Wenn nun die Proben in vier verschiedenen Ausrichtungen in den Probehalter eingelegt und mit denselben Scanparametern eingescannt werden, liegt der Mittelwert der absoluten Abweichung zwischen den vier Proben bei 0,19% und die mittlere Abweichung ebenso bei 0,19%. Somit ist die Auswertung auch bei verschiedenen Ausrichtungen beim Einlegen in den Probenhalter reproduzierbar. Die Proben zum Test der Ausrichtung im Probenhalter wurden nach den anderen Proben aufgenommen, und in der Zwischenzeit wurden Proben mit einer anderen Höhe eingescannt. Daher musste die Höhe neu eingestellt werden und war auf einem anderen Niveau im Vergleich zu den alten Proben. Bei einem Vergleich der alten Proben zu den neuen Proben liegt eine maximale Abweichung von 16,35% vor, da bei dem neuen Scan ein größerer Teil der Probe zu der Bruchbildklasse „Beidseitig“ zugeordnet wurde, der bei den alten Proben nur mit <1% vorhanden ist. Das lässt darauf schließen, dass für eine gute Reproduzierbarkeit die Höhe des Hubtisches bei allen Aufnahmen gleich sein muss. Dies war in diesem Test nicht der Fall. Ein weiteres Ergebnis ist, dass der repräsentative Algorithmus Probleme mit Klassen hat, die im Trainingsset unterrepräsentiert sind.

Tabelle 2 Vergleich der identifizierten Flächenanteile zwischen den Auswerteverfahren.

Probe 19	Software	repräsentativer Algorithmus
CF	22,74	23,79
AF-A	24,29	24,49
AF-B	19,51	19,17
SFC	0,00	0,17
Beids. (Klebefehler, etc.)	0,00	21,78
CSF-A	32,95	10,58

In Tabelle 2 sind die Ergebnisse der Annotierung mit der Software und des repräsentativen Algorithmus für die Probe 19 dargestellt(AbbildungAbbildung ***20***Abbildung 21).

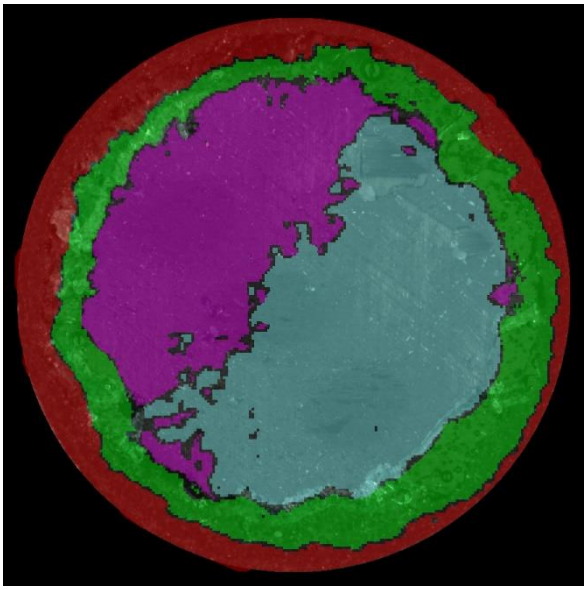

Abbildung 20: Probe 19 ausgewertet von Hand mit der Software.

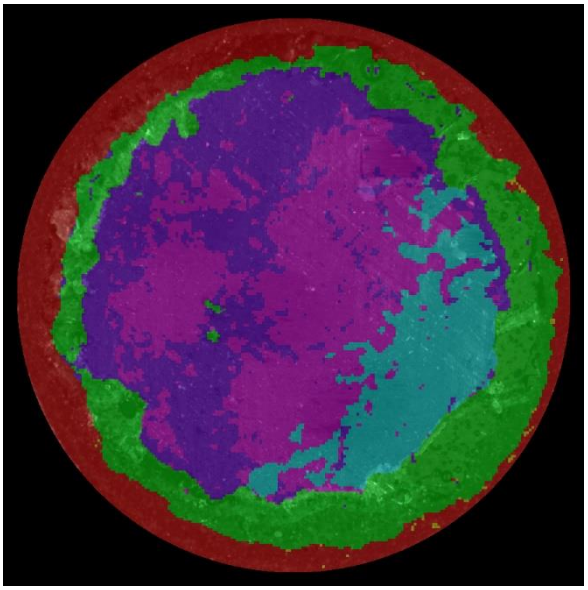

Abbildung 21: Probe 19 ausgewertet mit dem repräsentativ antrainierten Algorithmus.

Die Klassen sind konsistent, bis auf „Beidseitig“ (violett) und „CSF-A“ (türkis). Hierbei steht „Beidseitig“ für einen Klebefehler bei dem auf beiden Seiten der Klebstoff fehlt, oder nur in einem dünnen Film vorhanden ist und „CSF-A“ für einen Faserausriss auf der Substrat-Seite. Hier findet der Algorithmus 21,78% mehr von der Klasse „Beidseitig“, die bei der Annotierung von Hand mit der Software nicht gefunden wurde. Dies lässt sich dadurch erklären, dass die Klasse „CSF-A“ im Trainingsset (nur Probe 3 mit 3,41%) unterrepräsentiert war.

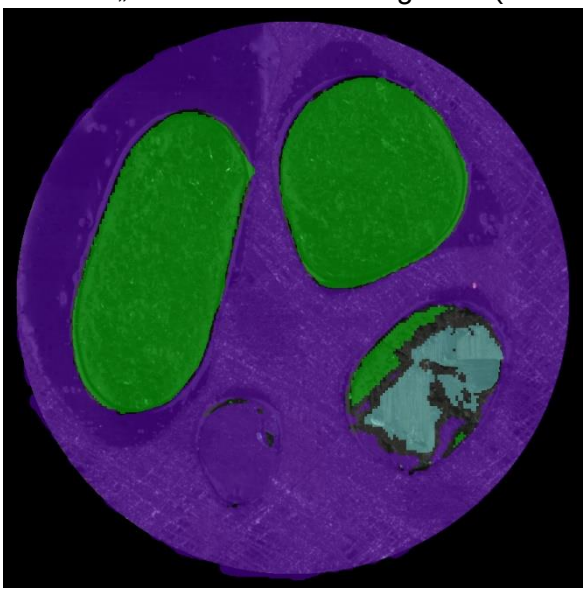

Abbildung 22: Probe 3 annotiert mithilfe der Software von Hand.

Die Klasse „Beidseitig“ hingegen war in Probe 3 mit 64,09% und in Probe 10 mit 8,08% vertreten. Da nun die antrainierten Bereiche der Klasse „Beidseitig“ eine hohe Ähnlichkeit mit

denen der Klasse „CSF-A“ in der Probe 19 haben, entscheidet sich der Algorithmus für die Klasse „Beidseitig“, da diese eine höhere Gewichtung hat. Dieses Beispiel zeigt, dass im Trainingsset idealerweise alle Klassen ähnlich gewichtet vertreten sein sollte. Es muss dazu gesagt werden, dass die Klasse „Beidseitig“ im normalen Betrieb nicht vorkommen sollte, da sie extreme Klebefehler beinhaltet, die normalerweise vermieden werden. Diese Fehler wurden speziell für diesen Test erzeugt, um die Grenzen der Software zu testen.

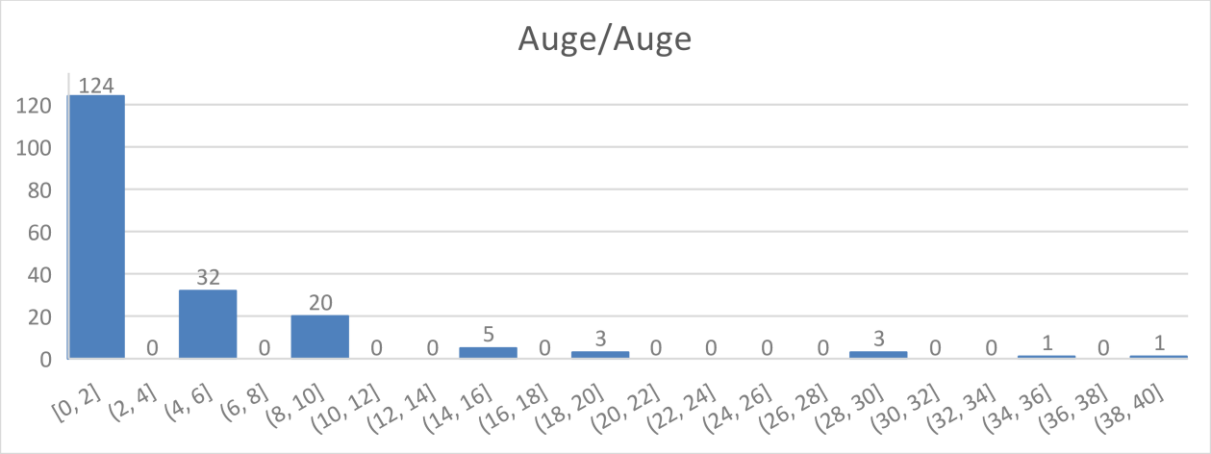

Abbildung 23: Histogramm der absoluten Abweichung zwischen den Auswertungen mit dem Auge von zwei verschiedenen Personen.

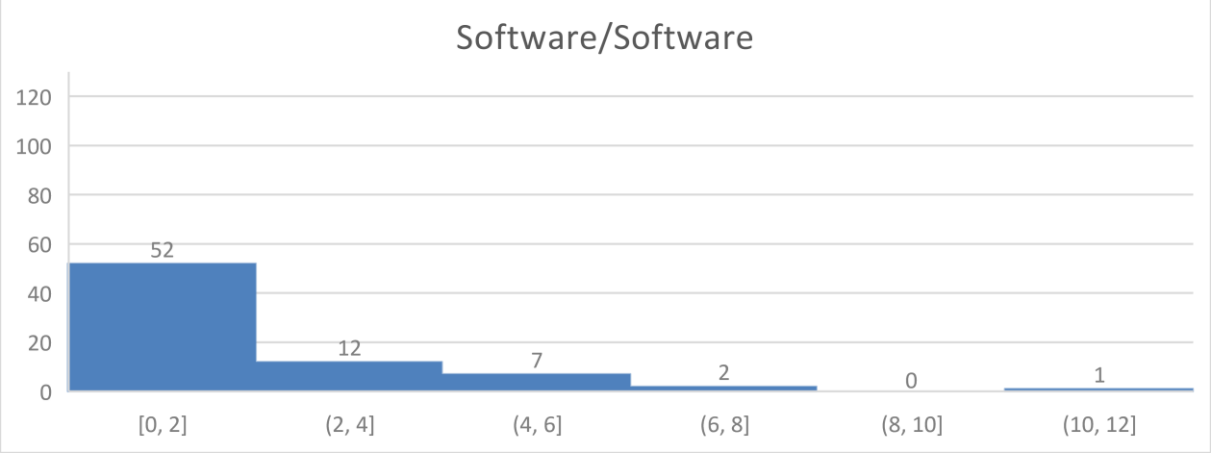

Abbildung 24: Histogramm der absoluten Abweichung zwischen den Auswertungen mit der Software von zwei verschiedenen Personen.

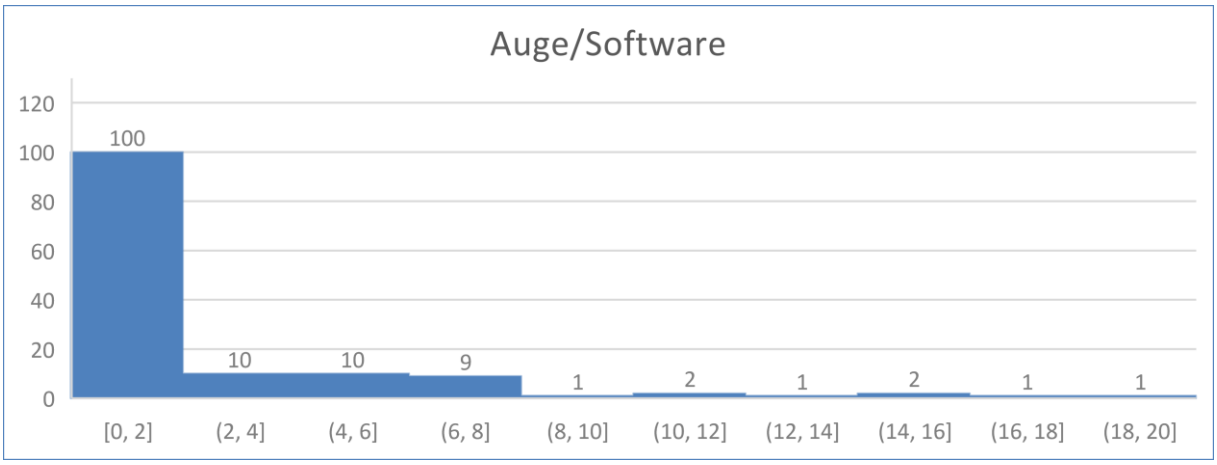

Abbildung 25: Histogramm der absoluten Abweichung zwischen der Auswertung mit dem Auge zu der Auswertung mit der Software.

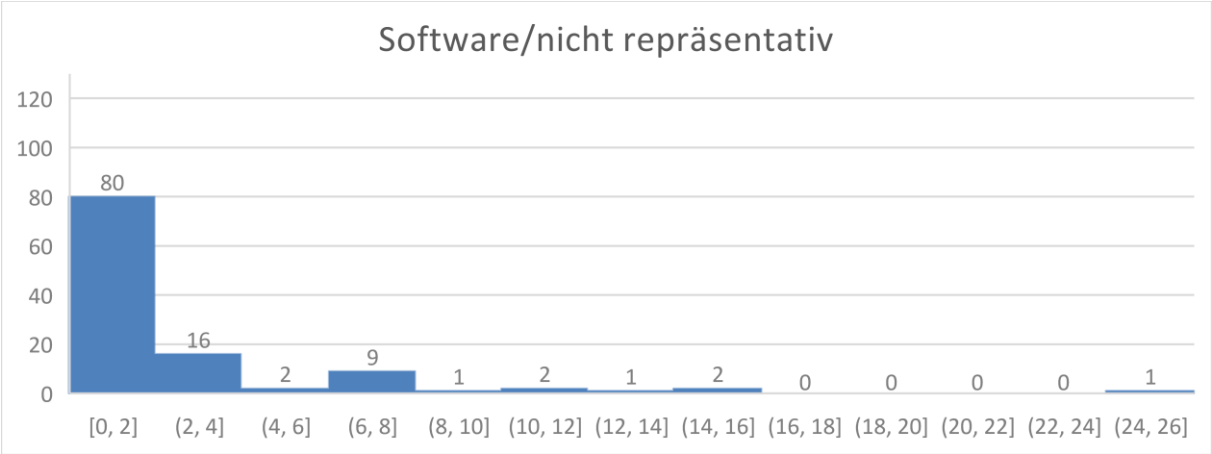

Abbildung 26: Histogramm der absoluten Abweichung zwischen der Auswertung mittels Software zu der Auswertung mit dem nicht repräsentativen Algorithmus.

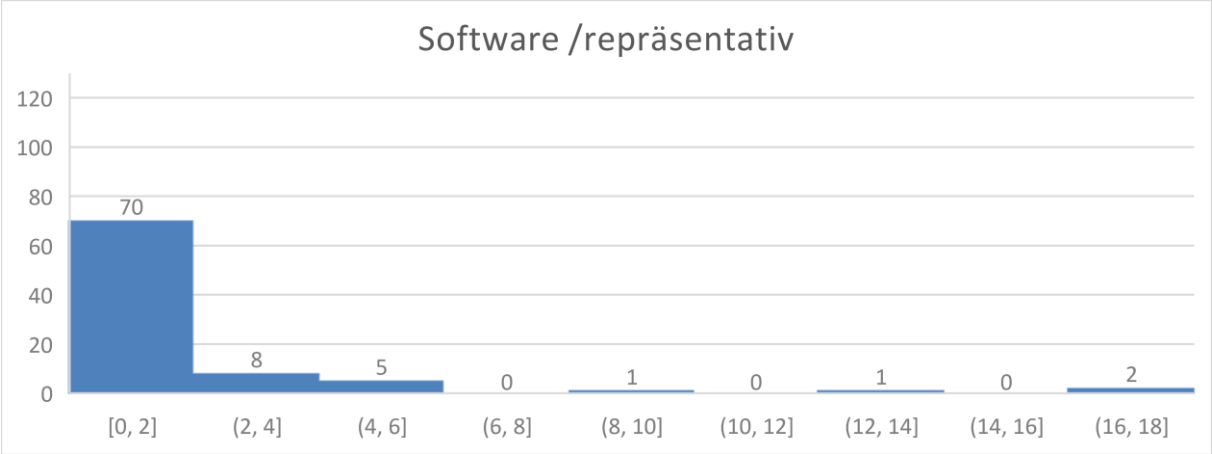

Abbildung 27: Histogramm der absoluten Abweichung zwischen der Auswertung mittels Software zu der Auswertung mit dem repräsentativen Algorithmus.

5 Verweise zum Schlussbericht

5.1 Verwertungsplanung und Präsentation der Ergebnisse

Im Abschnitt 2.1.5 des Schlussberichts werden die verwertbaren Entwicklungen im Rahmen des Projekts aufgeführt. Außerdem wird dort die Erwartungen zum wirtschaftlichen Erfolg geschildert.
In 2.1.7 des Schlussberichts werden die Schritte zur Veröffentlichung der Ergebnisse sowie die geplante Patentanmeldung aufgelistet.

5.2 Einhaltung der Kosten- und Zeitplanung

Der zeitliche Projektablauf ist ausführlich in Abschnitt 1.3 des Schlussberichts geschildert. Die Projektlaufzeit wurde aus schwerwiegenden ungeplanten personellen Ausfällen um 6 Monate verlängert. Die benannte Risikobegegnung, wie im Antrag unter R3 geschildert, hat gegriffen, jedoch zu den geschilderten Verzögerungen geführt.

Die Kosten während des Projekts sind im Detail in Abschnitt 2.1.3 aufgeführt. Es gab leichte Verschiebungen des Gesamtbudgets von Material zu Personal, da der mechanische Kostenaufwand geringer als geplant ausfiel, dafür mehr personelle Kapazitäten in der Softwareentwicklung nötig waren.

Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN geplant	**2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung)** Schlussbericht
3. Titel Kooperationsprojekt: System zur Algorithmen-basierten Auswertung von Bruchflächen (SAMBA) Teilvorhabensbeschreibung: Bruch-Flächen Inspektion System (¿-FIS)	
4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)] Lamott, André Knigge, Anja Kuhlmann, Luca	**5. Abschlussdatum des Vorhabens** 30.04.2024 **6. Veröffentlichungsdatum** 02.09.2024 **7. Form der Publikation** Document Control Sheet
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse) Schäfter + Kirchhoff GmbH	**9. Ber.-Nr. Durchführende Institution** - **10. Förderkennzeichen** 20Q1924A **11. Seitenzahl** 14
12. Fördernde Institution (Name, Adresse) BMWK	**13. Literaturangaben** 8 **14. Tabellen** 4 **15. Abbildungen** 2
16. DOI (Digital Object Identifier) -	
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum) 02.05.2024	
18. Kurzfassung Die Klebetechnik ist in der Luftfahrt als Fügetechnik etabliert, jedoch erfordert sie aufgrund ihrer besonderen Natur hohe Anforderungen an Materialien, Prozesse und Qualitätssicherung. Die manuelle Auswertung von Bruchflächen mechanisch geprüfter Prozessbegleitproben ist zeitaufwendig und subjektiv. Es werden verschiedene Verfahren angewandt, darunter Schätzung, objektivierte Schätzung und Bildauswertung. Das Projekt "System zur Algorithmen-basierten Auswertung von Bruchflächen (SAMBA)" strebt die Entwicklung eines Labormessgerätes an, das eine automatisierte und objektive Bewertung dieser Bruchflächen ermöglicht. Das Ziel des Projektes ist die Entwicklung eines Labormessgerätes zur automatisierten Bewertung von Bruchflächen mechanisch geprüfter Prozessbegleitproben. Dabei soll durch optimierte Bildaufnahmen und trainierbare Algorithmen auf Expertenwissen objektiv und reproduzierbar zurückgegriffen werden. Ziel ist eine beschleunigte Auswertung mit digitaler Datenspeicherung. Das Projekt gliedert sich in zwei Teilvorhaben: Die Optimierung überwachter Klassifikation bei der Algorithmen-basierten Auswertung von Bruchflächen und die Entwicklung des Bruch-Flächen Inspektions Systems. In fünf Hauptarbeitspaketen wurden die Kerneigenschaften des Messsystems definiert, Algorithmen untersucht und ausgewählt sowie ein Demonstrator entwickelt und konstruiert. Dabei wurden Hardwarekomponenten ausgewählt und eine benutzerfreundliche Software entwickelt. Der entwickelte Demonstrator ermöglicht eine automatisierte Bewertung von Bruchflächen mit hoher Genauigkeit und Reproduzierbarkeit. Die Messgeschwindigkeit wurde deutlich gesteigert, die Validierung zeigte eine gute Korrelation zwischen manueller und automatisierter Auswertung. Das entwickelte System hat das Potenzial, in Laboren und Produktionsumgebungen eingesetzt zu werden, um die Qualitätssicherung zu verbessern und die Produktionsprozesse zu optimieren.	
19. Schlagwörter Klebetechnik, Automatisierte Bildauswertung, Fügetechnik, Bruchflächenanalyse, Algorithmen-basierte Auswertung, Prozessbegleitproben, Automatisierte Qualitätssicherung, Bildverarbeitung, Klebe-Bruchflächen-Analyse, Maschinelles Lernen	
20. Verlag „PhotonicsViews“ Wiley-Verlag	**21. Preis** tbd

Nicht änderbare Endfassung mit der Kennung 2421789-4