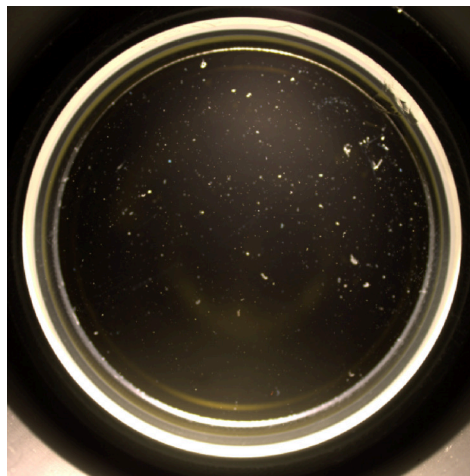


Optiken unter neuem Licht

Automatisierte Detektion, Messung und Klassifizierung von Oberflächenfehlern auf Hochleistungslaseroptiken



von Hannes Gehrke

Studiengang: Technische Informatik und Robotik

Erstprüfer: Prof. Dr. rer. nat. Thomas Linkugel

an der
Hochschule für angewandte Wissenschaft und Kunst
Hildesheim/Holzminde/Göttingen
Fakultät Ingenieurwissenschaften und Gesundheit in Göttingen

Von-Ossietzky-Straße 99
37085 Göttingen

Betreuer: Dr. Oliver Puncken
in Kooperation mit der Coherent LaserSystems GmbH & Co. KG

Zeitraum: 04.2026 - 07.2026

Inhaltsverzeichnis

1. Zusammenfassung	1
2. Einführung	2
2.1. Stand der Technik	3
2.1.1. DIOPTIC ARGOS	3
2.1.2. Keyence Mikroskop	3
2.1.3. Aktueller interner Prozess	4
2.2. Ziel der Arbeit	5
2.3. Anforderungen	6
2.4. Abgrenzung	7
3. Theoretische Grundlagen	8
3.1. Bildaufnahme	8
3.1.1. Beleuchtungskonzepte	8
3.1.2. Reflexion und Streulicht	9
3.2. Bildauswertung	10
3.2.1. Filter	10
3.2.2. Intensitätstransformation	12
3.3. Klassifizierung von Fehlern	12
3.3.1. Defektdefinition	13
3.3.2. Merkmalbasierte Klassifizierung	14
3.3.3. Lernbasierte Klassifizierung	14
4. Umsetzung	16
4.1. Aufbau	16
4.1.1. Kamera und Lichtquelle	17
4.1.2. Halterung und Abschirmung	18
4.1.3. Beleuchtungs- und Belichtungsparameter	19
4.1.4. Kamera- und Lichtsteuerung	22
4.2. Software	22
4.2.1. Defektpixelkalibrierung und Rauschreduzierung	25
4.2.2. ROI-Bestimmung	27
4.2.3. Skalierungsfaktor	29
4.2.4. Beleuchtungshomogenisierung	30
4.2.5. Fehlermaske	31
4.2.6. Fehlerextrahierung	33
4.2.7. Klassifizierung	34
4.2.8. Fokusfilter	35
4.2.9. Kratzergruppierung	36
4.2.10. Ausmessung der Fehler	38
4.2.11. Interne Kommunikation	39
4.3. Lernbasierte Ansätze in der Arbeit	40
5. Evaluation und Grenzen	42
5.1. Zeitliche Bewertung	42
5.2. Bewertung der Fehlererkennung	44
5.3. Bewertung der Defektmessung	47
5.4. Bewertung der Klassifizierung	48
5.5. Wiederholungsgenauigkeit	50
5.6. Grenzen	51
6. Fazit und Ausblick	53

Quellenverzeichnis	I
Abbildungsverzeichnis	III
Tabellenverzeichnis	V
Abkürzungsverzeichnis	VI
Formelzeichenverzeichnis	VII
A Anhang	VIII
A.1 Hardwaregrundlagen	IX
A.2 Auflösungsberechnung	IX
A.3 Untersuchung des Flood-Fill-Ansatzes zur ROI-Bestimmung	IX
A.4 Zeitmessungen	X
A.5 Defektgrößenmessungen	X
A.6 Wiederholbarkeitsmessungen	XII
A.7 Defektkarte	XV
Übersicht verwendeter Hilfsmittel	XVII
Selbstständigkeitserklärung	XVIII

1. Zusammenfassung

Diese Arbeit untersucht die Entwicklung eines prototypischen Systems zur automatisierten Erkennung, Vermessung und Klassifizierung von Oberflächenfehlern auf Optiken für Hochleistungslaser. Hintergrund ist, dass die bisherige manuelle Inspektion zeitaufwendig, subjektiv und nur eingeschränkt reproduzierbar ist. Ziel ist es deshalb, eine kamerabasierte Lösung zu evaluieren, die Defekte objektiv erfasst, nach ISO 10110-7 bewertet und nachvollziehbare Mess- und Dokumentationsdaten erzeugt.

Hierzu wurde ein abgeschirmter Dunkelfeld-Aufbau mit steuerbarer Kamera und Beleuchtung entwickelt. Die zugehörige Software übernimmt den gesamten Ablauf von der Bildaufnahme über die Vorverarbeitung bis zur Ergebnisdarstellung. Zu den implementierten Schritten gehören die Kalibrierung fehlerhafter Sensorpixel, die Mittelung mehrerer Aufnahmen zur Rauschreduzierung, die automatische Bestimmung des relevanten Optikbereichs, die metrische Skalierung sowie die Korrektur ungleichmäßiger Beleuchtung. Potenzielle Defekte werden über Helligkeitsabweichungen segmentiert, als zusammenhängende Bereiche extrahiert und anhand geometrischer sowie intensitätsbasierter Merkmale klassifiziert. Dabei werden insbesondere punktförmige Defekte, Kratzer und Randaussprünge unterschieden. Unterbrochene Kratzersegmente werden mithilfe eines angepassten RANSAC-Verfahrens gruppiert. Die Ergebnisse können als Defektliste, Defektkarte, CSV- oder PDF-Bericht ausgegeben werden. Ein KI-basierter Ansatz wurde vorbereitet, aufgrund der begrenzten und nicht ausreichend gelabelten Datenbasis jedoch nicht umfassend umgesetzt.

Die Evaluation bestätigt die grundsätzliche Funktionsfähigkeit des Ansatzes. Bei drei untersuchten Optiken wurden 90,8 % der manuell bestätigten Defekte erkannt; die Präzision, also der Anteil tatsächlicher Defekte an allen als Defekt ausgegebenen Strukturen (auch Positive Predictive Value) beträgt aufgrund zahlreicher Fehlalarme jedoch nur 68,3 %, der F1-Score liegt somit bei 77,9 %. Die Software arbeitet bei identischen Eingangsbildern vollständig deterministisch. Zwischen neu aufgenommenen Bildern derselben Optik treten dagegen Abweichungen von rund 5,3 % bei der Fehleranzahl und 10,9 % bei der Gesamtfehlerfläche auf. Hauptursachen sind die begrenzte Kameraauflösung, Bildrauschen, Erkennung der Fokusebene und die inhomogene Beleuchtung. Besonders die Flächenmessung überschätzt Defekte teilweise stark, da überwiegend deren Lichtstreuung statt der tatsächlichen Geometrie erfasst wird. Lineare Größen wie Kratzerlängen lassen sich deutlich zuverlässiger bestimmen. Die Gesamtprüfzeit liegt mit der verwendeten Hardware bei etwa 40 bis 60 Sekunden, sodass das System insbesondere bei beschädigten Optiken sinnvoll zur Unterstützung der manuellen Kontrolle eingesetzt werden kann.

Insgesamt weist die Arbeit die technische Machbarkeit einer automatisierten Optikprüfung nach. Für eine normgerechte Produktionslösung sind jedoch eine höher auflösende, rauschärmere Kamera, eine homogenere mehrdirektionale Beleuchtung, ein präziserer mechanischer Aufbau sowie Referenzoptiken mit bekannten Defekten erforderlich. Kurzfristig eignet sich das System vor allem als Assistenzwerkzeug zur Vorsortierung, Dokumentation und Unterstützung manueller Prüfungen.

2. Einführung

Bei Fertigung, Transport und Handhabung von Laseroptiken können feinste Beschädigungen entstehen, die Auswirkungen auf deren Verhalten haben. Die Grundlage zur Einordnung dieser Defekte ist in der ISO-Norm 10110-7 festgelegt. Die kleinste Klasse von Fehlern ist mit einer Dicke von 0,004 mm angegeben [1]. Für den Fall einer typischen Laseroptik mit einem Durchmesser von 80 mm, die mithilfe eines einzigen Kamerabildes geprüft werden soll, benötigt man eine Auflösungssicherheit von 3 Pixeln auf den kleinsten Fehler. Somit ergibt sich folgende Pixelanzahl:

$$N_{\text{pix}} = \left(n_{\text{min}} \cdot \frac{L}{d_{\text{min}}} \right)^2 = \left(3 \cdot \frac{80 \text{ mm}}{0.004 \text{ mm}} \right)^2 = 3,6 \text{ GP} \quad (1)$$

N_{pix}	erforderliche Gesamtzahl der Pixel
n_{min}	Mindestanzahl der Pixel zur Abbildung des kleinsten Fehlers
L	Kantenlänge der quadratischen Prüffläche in mm
d_{min}	Größe des kleinsten zu erfassenden Fehlers in mm

Die größte Digitalkamera der Welt, welche drei Tonnen wiegt, verfügt über eine Linse mit einem Durchmesser von 1,57 Metern. Sie nimmt Fotos mit 3,2 Gigapixeln auf, wurde 2024 fertiggestellt und soll dabei helfen, den Nachthimmel besser zu verstehen [2].

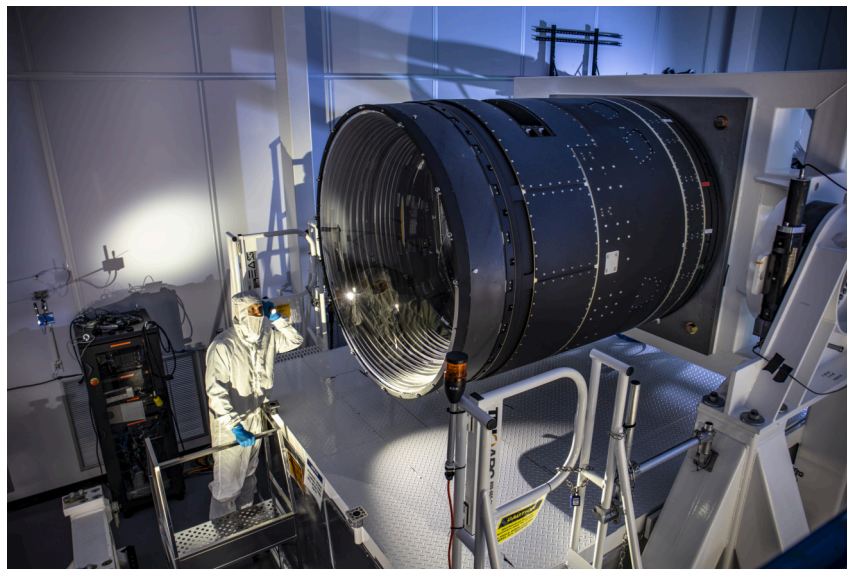


Abbildung 1: Größte Digitalkamera der Welt.

© Jacqueline Ramseyer Orrell/SLAC National Accelerator Laboratory [3].

Um ein Bild mit solch einer hohen Pixelanzahl umzusetzen, müssten die derzeit technisch erreichbaren Grenzen überschritten und grundlegend weiterentwickelt werden. Eine entsprechend nötige Kamera ist kommerziell nicht verfügbar; selbst die größte Digitalkamera der Welt, welche in Abbildung 1 zu sehen ist, wäre für diese Aufgabe nicht ausreichend.

Diese Arbeit beschäftigt sich mit Optiken, welche im Bereich der VHP (Very High Power)-Laser, also Hochleistungslasersysteme, eingesetzt werden. Kratzer, Einschlüsse, Unregelmäßigkeiten und auch Verschmutzungen führen zu ungewolltem Verhalten bis hin zur Zerstörung solch einer Komponente. Daher ist eine zuverlässige Erkennung dieser Fehler von zentraler

Bedeutung. Die Fehlererkennung basiert heute meist auf einer manuellen Inspektion durch Fachpersonal, welches eine Einschätzung über den Zustand gibt. Diese Art der Beurteilung ist jedoch zeitaufwendig und teils subjektiv. Zwei Personen können auf Basis der gleichen Optik im selben Zustand zwei unterschiedliche Bewertungen abgeben. Dadurch gibt es Einschränkungen mit einem allgemeinen Konsens, auf dem, auch intern, Optiken bewertet werden können. Mittlerweile bieten auch moderne Verfahren der Bildverarbeitung und des maschinellen Lernens die Möglichkeit einer objektiven Inspektion, welche schnell und reproduzierbar arbeitet. Einige dieser Verfahren werden in Abschnitt 2.1 dargestellt.

2.1. Stand der Technik

Die automatisierte Analyse optischer Komponenten ist kein neues Anwendungsfeld. Bereits verfügbare Vollsysteeme ermöglichen die gleichzeitige Prüfung mehrerer Optiken, während moderne Mikroskope ebenfalls Funktionen zur Oberflächenanalyse bereitstellen. Im Folgenden wird der bestehende Stand der Technik dargestellt. Darauf aufbauend wird herausgearbeitet, welche Zielsetzung das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte System verfolgt und in welchen Punkten es sich von bestehenden Lösungen unterscheidet.

2.1.1. DIOPTIC ARGOS

Die Firma Diophtik vertreibt ein Prüfsystem mit dem Namen ARGOS [4], welches eine Gesamtlösung in der Fehleranalyse auf Optiken darstellt. Technisch relevant ist vor allem, dass ein ARGOS-System nicht nur aus einer Kamera mit Auswertesoftware besteht. Das System kombiniert eine definierte Aufnahmeumgebung mit kontrollierter Beleuchtung und automatisierter Bildverarbeitung. Besonders wichtig ist dabei die Beleuchtung, da Fehler auf optischen Oberflächen häufig nicht direkt durch ihre Farbe, sondern durch Reflexion, Transmission oder Streuung sichtbar werden. DIOPTIC beschreibt hierfür unter anderem eine schaltbare Dunkelfeldbeleuchtung sowie die Kombination mehrerer Einzelaufnahmen mit verschiedenen Beleuchtungsrichtungen [4].

Der Preis ist Angebotsabhängig und nicht öffentlich bekannt, kann aber auf einen niedrigen sechsstelligen Betrag geschätzt werden.

2.1.2. Keyence Mikroskop

Zu Vergleichszwecken wird zusätzlich das Mikroskop „VHX-7100“ von Keyence betrachtet. Dabei handelt es sich um ein Digitalmikroskop mit integrierten Analyse- und Stitching-Funktionen. Mittels Stitching werden mehrere Einzelaufnahmen zu einem Gesamtbild zusammengesetzt. Dadurch bleibt die hohe Auflösung der Einzelaufnahmen erhalten, während gleichzeitig eine größere Fläche der Optik dargestellt und analysiert werden kann [5].

Das erzeugte Gesamtbild kann anschließend durch die Software des Mikroskops auf sichtbare Fehler untersucht werden. Eine normbasierte Klassifizierung oder Ausgabe, beispielsweise nach ISO 10110-7, ist damit jedoch nicht vorgesehen. Die erkannten Fehler können gezählt und visuell dargestellt werden, eine weiterführende automatische Einordnung der Fehlerarten erfolgt jedoch nicht.

Für den Vergleich wurden Testoptiken mit dem beschriebenen Verfahren des Digitalmikroskops untersucht. Die Ergebnisse dienen als Referenz, um die Leistungsfähigkeit und die Grenzen des im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Systems besser einordnen zu können, was in Abschnitt 5.3 durchgeführt wird.

2.1.3. Aktueller interner Prozess

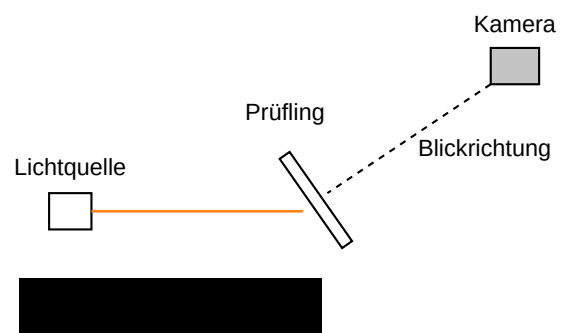


Abbildung 2: Eingesetzte Vergleichstafel.

Der aktuelle interne Prozess unterscheidet sich je nach Art der Optik. Wie bereits erwähnt, basiert er auf einer manuellen Untersuchung, welche eine ungefähre Schätzung des Zustands mit sich zieht. Dazu gibt es grundsätzlich drei Arten von Aufbauten. Bei händischer Beleuchtung hat die untersuchende Person eine gerichtete Kaltlichtquelle in der Hand, mit welcher die Optik rundherum begutachtet wird. Dabei kann die Lichtquelle frei bewegt und geschwenkt werden, wodurch Fehler vieler Arten entdeckt werden können. Sollten Fehlerkandidaten entdeckt werden, wird die Optik gereinigt und so sichergestellt, dass es sich nicht um Partikel oder Wischstreifen handelt. Anschließend wird die Größe des Fehlers mit einer in Abbildung 2 abgebildeten Vergleichstafel geschätzt. Dieser Prozess führt zwar zu einer genauen Untersuchung, jedoch ist das Ergebnis subjektiv und die Auswertung aufwendig.



Aufbau Beleuchtungsbox

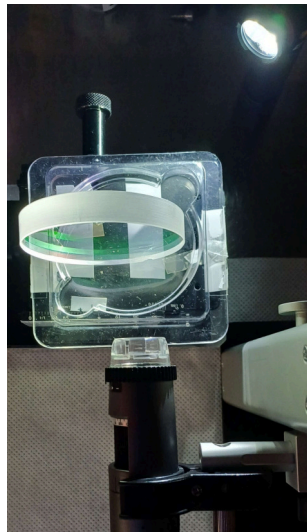


Skizze Funktion Beleuchtungsbox

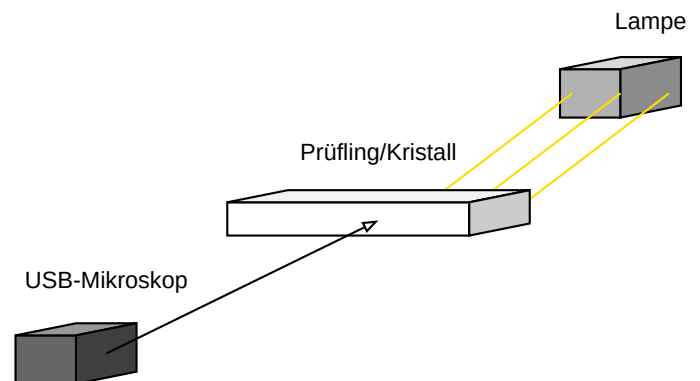
Abbildung 3: Eingesetzte Beleuchtungsbox.

Ein zweiter Ansatz ist eine Beleuchtungsbox, welche in Abbildung 3 zu erkennen ist. Hier kann eine Optik vorgelegt und vergleichbar beleuchtet werden. Dabei wird die Optik indirekt beleuchtet, es entsteht eine Art Dunkelfeld. Zusätzlich blickt man gegen einen schwarzen Hintergrund, wodurch die Defekte, welche als helle Bereiche hervorstechen, auffällig sind. Dieser Aufbau sichert eine gewisse Wiederholbarkeit, wird jedoch intern in Verbindung mit einer

Kamera nur selten verwendet. Eine händische Untersuchung wird mit diesem Aufbau jedoch häufig durchgeführt, da die Beleuchtung eine schnelle Einschätzung über den Zustand einer Optik zulässt.



Aufbau USB-Mikroskop



Skizze Funktion USB-Mikroskop

Abbildung 4: Aufbau Analyse mit USB-Mikroskop.

Die dritte Methode ist in Abbildung 4 gezeigt. Hier können mehrere Bilder mit einem USB-Mikroskop aufgenommen und zusammengefügt werden. Die Abstände, Beleuchtungsrichtung und Beleuchtungsintensität sind dabei nicht festgelegt und werden von der untersuchenden Person so gewählt, dass die betrachteten Fehler optimal dargestellt werden können. Durch diese Methode erhält man zwar ein Bild, auf dessen Basis man Defekte messen kann, jedoch verfügt auch diese Methode über keine große Wiederholungsgenauigkeit. Fehler sind häufig überbelichtet und Fehleinschätzungen entstehen durch Reflexionen. Dieses System findet intern Einsatz, wenn eine händische Inspektion durch äußere Gegebenheiten, wie zum Beispiel durch eine mechanische Fassung, nicht möglich ist.

Diese Methode zeigt ein subjektives und zeitintensives System mit geringer Wiederholungsgenauigkeit und wenig Messwerten. Klar ist jedoch auch, dass die Einschätzungsgenauigkeit geschulter Mitarbeiter nicht das eigentliche Problem darstellt. Vielmehr fehlen eine reproduzierbare Bewertung, objektive Kriterien und eine belastbare Argumentationsgrundlage gegenüber Zulieferern.

2.2. Ziel der Arbeit

Diese Arbeit versteht sich als eine prototypische Entwicklung eines Systems zur automatisierten Defekterkennung auf VHP-Laseroptiken. Das zentrale Ziel ist dabei die softwareseitige Analyse, Klassifizierung und Ausmessung von Defekten nach ISO-Norm 10110-7. Ebenfalls soll geprüft werden, inwieweit künstliche Intelligenz (kurz: KI) in der Klassifizierung eingesetzt werden kann bzw. Nutzen bringt. Aus dem übergeordneten Ziel ergeben sich mehrere Teilziele. Zum einen muss ein Aufbau entwickelt werden, welcher eine steuerbare Umgebung für geeig-

nete Fotos herstellt. Da der Vorgang weitestgehend automatisiert ablaufen soll, ist eine externe Kamerasteuerung vonnöten. Anschließend muss das Bild von der Kamera zu einem Rechner geschickt werden, wo es von dem Hauptprogramm eingelesen und verarbeitet werden kann. Abschließend sollen die erkannten Fehler mit dem Nutzer kommuniziert werden, wozu eine grundlegende Nutzeroberfläche entwickelt werden soll. In Abbildung 5 wird die beschriebene Zielpipeline dargestellt.

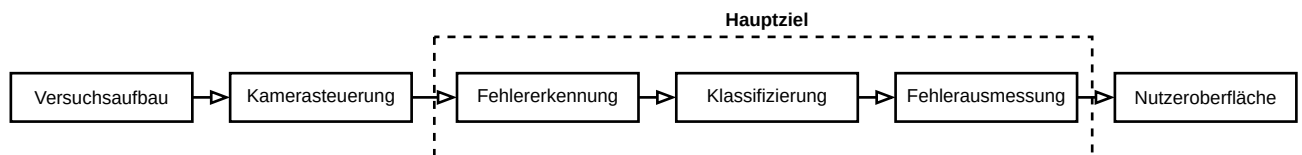


Abbildung 5: Zielpipeline.

2.3. Anforderungen

Ausgehend von dem Stand der Technik und den in Abschnitt 2.2 definierten Zielen ergeben sich folgende Anforderungen: Es soll eine Wiederholbarkeit der Optikinspektion gewährleistet werden, welche die Subjektivität aus der Kontrolle herausnimmt. Zusätzlich sollen begründbare Messungen der Defektgrößen ausgegeben werden, welche eine Optikbewertung ermöglichen. Ebenfalls müssen Kamera und Lichtquelle definiert werden.

Der Aufbau Wie in Abbildung 5 dargestellt, muss zuerst ein Aufbau zur Erfassung von Bildern definiert werden. Es wird eine geeignete und reproduzierbare Umgebung benötigt, in der optische Komponenten untersucht werden können. Sie muss einheitliche Lichtverhältnisse gewährleisten, Positionen von Kamera, Optik und Licht definieren und einfache Bedienung gewährleisten.

Kamera und Bildaufnahme Da die Prüfung automatisiert ablaufen soll, ist eine softwaregestützte Steuerung der Kamera elementar. Das System soll in der Lage sein, automatisiert Fotos aufzunehmen und die erzeugten Bilddaten zur weiteren Verarbeitung auszulesen. Produktspezifische Eigenschaften einzelner Kamerasysteme werden dabei nicht betrachtet, sodass eine möglichst allgemeine Anwendbarkeit gewährleistet bleibt.

Bildverarbeitung Die entstandenen Bilder müssen vor der eigentlichen Analyse vorverarbeitet werden. Dabei wird sichergestellt, dass eine aussagekräftige und konsistente Bildgrundlage entsteht. Das System soll den relevanten Bildbereich, also die zu untersuchenden optischen Komponenten, identifizieren und aus den Bildern extrahieren können. Zudem sollen geeignete Verfahren zur Bildaufbereitung eingesetzt werden, um Merkmale von Defekten hervorzuheben und deren Erkennung zu erleichtern.

Fehlererkennung, -ausmessung und -klassifizierung Auf Grundlage der verarbeiteten Bilder soll das System in der Lage sein, Defekte und Störeffekte auf optischen Komponenten zu erkennen und diese zu extrahieren. Diese Fehler sollen dann Kategorien zugeordnet werden. Ebenfalls sollen diese Defekte dann nach ISO-Norm 10110-7 ausgemessen und in

Messklassen eingeteilt werden. Um eine höhere Aussagekraft der Ergebnisse zu gewährleisten, sollen mehrere Auswertungsverfahren durchgeführt und verglichen werden. Dies soll eine zuverlässige Einordnung der Fehler sicherstellen.

Steuerung und Output Das System soll eine Möglichkeit zur Steuerung des Prozesses sowie zum Auslesen der Ergebnisse bereitstellen. Da der Schwerpunkt der Arbeit auf der Entwicklung und Evaluation der Bildverarbeitungs- und Klassifizierungsmethoden liegt, wird dies nur grundlegend bearbeitet.

Verarbeitungszeit Da es sich um einen Prototyp handelt, wird keine feste maximale Prüfzeit vorgegeben. Der vollständige Ablauf aus Bildaufnahme, Bildverarbeitung, Bildanalyse und Ergebnisausgabe soll jedoch in einem für den praktischen Einsatz angemessenen Zeitraum erfolgen und insbesondere bei stark beschädigten Optiken einen zeitlichen Vorteil gegenüber der manuellen Prüfung ermöglichen.

Skalierbarkeit Die Programmbasis und der Aufbau sollen so ausgelegt sein, dass es später noch möglich ist, diese auf die benötigte Anwendung zu skalieren. Diese Voraussetzung zieht eine gute Übersicht und Wartbarkeit mit sich. Auch Personen mit einem grundlegenden Programmierverständnis sollen das Programm problemlos verändern können.

2.4. Abgrenzung

Diese Arbeit beschränkt sich auf die Entwicklung und Bewertung eines Verfahrens zur automatisierten Fehlererkennung, Fehlerausmessung und Klassifizierung auf planen optischen Komponenten. Im Mittelpunkt steht dabei nicht die vollständige Umsetzung eines Prüfsystems für den produktiven Einsatz, sondern die Untersuchung der dafür notwendigen Verarbeitungsschritte von der definierten Bildaufnahme bis zur softwareseitigen Auswertung. Es soll verifiziert werden, ob der Ansatz einer Kameralösung sinnvoll ist.

Betrachtet werden also ausschließlich plane Optiken innerhalb einer festgelegten Aufnahmeumgebung. Andere Geometrien wie sphärische, asphärische oder frei geformte Optiken werden in der Arbeit nicht untersucht, da diese andere Anforderungen an Beleuchtung, Fokussierung, Bildauswertung und geometrische Vermessung stellen.

Ebenfalls kein Bestandteil dieser Arbeit sind die mechanische Zuführung oder automatische Positionierung von Optiken, die vollständige Einbindung in eine Produktionsumgebung, eine umfassende Prüfprotokollverwaltung sowie eine produktionsreife Benutzeroberfläche. Diese Aspekte sind für ein vollständiges Prüfsystem relevant, liegen jedoch außerhalb des hier betrachteten Schwerpunkts.

3. Theoretische Grundlagen

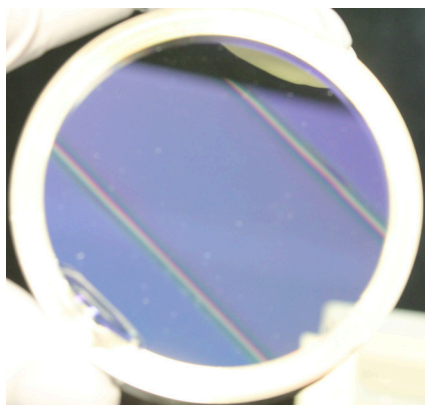
Im Folgenden werden Grundlagen für die in der Arbeit relevanten Methoden und die relevante Theorie dargestellt und erläutert. Im Fokus steht dabei die Bildverarbeitung, welche eine Fehlererkennung möglich macht. Ebenfalls werden die Besonderheiten der zu untersuchenden optischen Elemente erläutert, welche das Erstellen von analysefähigem Bildmaterial erschweren. Zuletzt werden bereits bestehende Möglichkeiten zur Klassifikation von Defekten erklärt.

3.1. Bildaufnahme

Eine geeignete Bildaufnahme ist im Kontext dieser Arbeit sehr wichtig. Um diese zu gewährleisten, muss zuerst verstanden werden, wie eine Optik am besten fotografiert werden kann und welche Standards bereits eingesetzt werden. Dafür muss beleuchtet werden, welche Effekte auftreten können, welche davon Störgrößen sind und welche man sich zunutze machen kann.

3.1.1. Beleuchtungskonzepte

Das Problem, reflektierende oder transparente Oberflächen zu fotografieren, ist nicht unbekannt. Es bestehen bereits Konzepte für eine passende Beleuchtung. Dabei lassen sich Hellfeld- und Dunkelfeldbeleuchtung unterscheiden. Diese Begriffe stammen aus der Mikroskopie, beschreiben allerdings grundsätzliche Beleuchtungsprinzipien, welche vor allem in der technischen Bildverarbeitung und Inspektion von optischen Elementen eingesetzt werden.



(a) Hellfeld



(b) Dunkelfeld

Abbildung 6: Hellfeld- und Dunkelfeldbeleuchtung im Vergleich.

Bei einem Hellfeld wird eine Beleuchtung so gewählt, dass direkt reflektiertes und transmittiertes Licht von der Kamera erfasst wird [6]. Dadurch entsteht eine gleichmäßige Aufnahme mit meist hellem Hintergrund, auf dem Defekte je nach Einfallswinkel und Oberfläche als Helligkeitsabweichung sichtbar werden. Bei spiegelnden Oberflächen führt diese Beleuchtungsmethode jedoch zu ungewollten Reflexionen des Optikrandes und von großen Defekten auf der Rückseite, wodurch Fehler überdeckt und somit nicht sichtbar gemacht werden können. Im Dunkelfeld wird ein optisches Element indirekt beleuchtet. Licht aus der Quelle gelangt nicht direkt oder durch Reflexionen in die Kamera. Sichtbar werden so vor allem die Lichtanteile, die

an Kratzern, Staubpartikeln und Einschlüssen gestreut werden. Defekte heben sich also hell vor einem dunklen Hintergrund ab [6].

In Abbildung 6 sind Hell- und Dunkelfeld derselben Optik vergleichend nebeneinander gestellt. Es ist zu erkennen, dass beide Beleuchtungsarten unterschiedliche Defektmerkmale sichtbar machen. Dabei eignet sich das Hellfeld besonders, um Schmierfilme auf einem Objektiv zu erkennen. Auch größere Oberflächenfehler sind sichtbar. Durch das Dunkelfeld erscheinen sehr kleine Defekte auf beiden Oberflächen der Optik. Schmierfilme sind dafür nur ansatzweise festzustellen.

3.1.2. Reflexion und Streulicht

Trifft Licht auf optische Komponenten, wird es je nach Material und Oberfläche reflektiert, transmittiert oder gestreut [7].

Reflexionen beispielsweise vom Optikrand können auf einem Kamerabild zu einer lokalen Intensitätsveränderung führen, wie in Abbildung 7 zu erkennen ist. Ebenfalls ist es möglich, dass durch einen Fremdreﬂex ein Defekt überdeckt wird und somit auf einem Bild nicht sichtbar ist. Eine Kreuzpolarisation könnte direkte, durch die Beleuchtung verursachte Oberflächenreflexionen reduzieren [8]. Bei dem hier auftretenden, durch die Optik selbst erzeugten Reflex des Optikrands ist jedoch keine zuverlässige Unterdrückung zu erwarten.

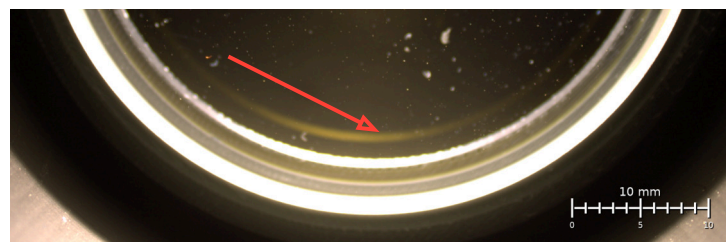


Abbildung 7: Reflexion auf Optik im Dunkelfeld.

Zusätzlich sind die untersuchten Laseroptiken in der Regel nur für bestimmte Wellenlängen und Winkel beschichtet, für den sichtbaren Bereich ist deren Verhalten nicht definiert. Somit können die Reflexionen schon durch einen anderen Hersteller voneinander abweichen, wodurch sie nicht als konstant angesehen werden können.

Streulicht entsteht, wenn Licht nicht geordnet reflektiert wird, sondern durch kleine Strukturen, Partikel oder Oberflächenfehler in unterschiedliche Richtungen abgelenkt wird. Kratzer, Staubpartikel, kleine Löcher (auch „Digs“) oder Einschlüsse können einfallendes Licht streuen. Dieser Effekt ist für die Fehlererkennung nützlich, da Defekte dadurch einen starken Kontrast zum Hintergrund erzeugen können. Dunkelfeldbeleuchtung nutzt dieses Prinzip. Abbildung 8 zeigt ein Beispiel für eine starke Streuung durch einen kleinen Punktdefekt.

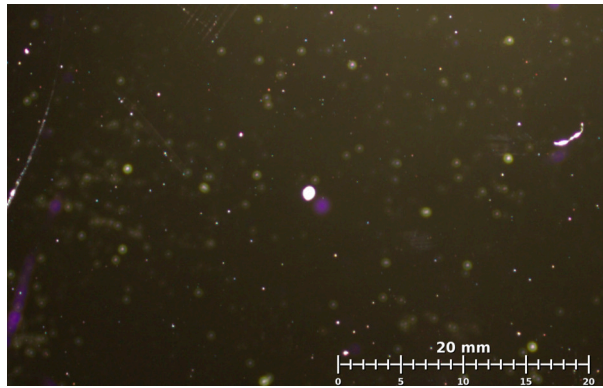


Abbildung 8: Starke Streuung durch Punktdefekt auf Optik.

3.2. Bildauswertung

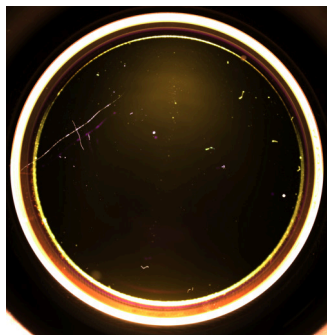
Die digitale Bildverarbeitung beschäftigt sich mit der Nutzung von Bilddaten durch Verarbeitung, Analyse und Interpretation. Das Ziel ist es dabei, die gesuchten Informationen automatisiert zu extrahieren und nutzbar zu machen [9]. Eine grundlegende Art der Bildmanipulation wird durch den Begriff *spatial processing* beschrieben, in welcher das Bild in der Ortsebene bewertet und verändert wird. Im Gegensatz dazu steht das *transform processing*, bei dem man das Bild in den Frequenzbereich transformiert, es dort bearbeitet und dann wieder zurückwandelt [9, S. 119]. Letzteres eignet sich besonders für periodisch auftretende Fehler oder Informationen, da diese als Peak im Frequenzbereich auftreten. Dieser Fehlertyp tritt im Verlauf dieser Arbeit nicht primär auf, weshalb im Folgenden hauptsächlich die *spatial domain*, also die Bearbeitung auf Pixelebene, thematisiert wird. In diesem Bereich wird wiederum in zwei Klassen unterschieden: *intensity transformations* und *spatial filtering*.

3.2.1. Filter

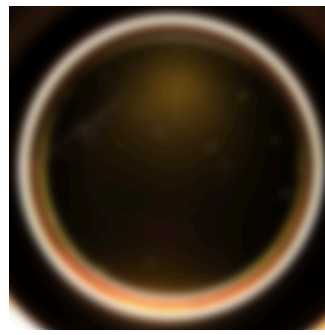
In der Bildverarbeitung sind Filter ein zentrales Werkzeug zur gezielten Veränderung von Bildstrukturen. *Spatial filtering* beschreibt den Vorgang, den Wert eines Pixels auf der Basis seiner Nachbarpixel zu bewerten und ggf. zu verändern [9, S. 153-164]. Dabei gibt es mehrere Filtertypen, welche unterschiedliche Funktionen erfüllen. Zum einen gibt es lineare Filter. Besonders wichtig sind diese Filter, da sie unter anderem die Grundlage für Kantenerkennungsverfahren bereitstellen. Diese entstehen durch lokale abrupte Intensitätsveränderungen und können durch Ableitungsfilter, wie den Sobeloperator hervorgehoben und herausgearbeitet werden [9, S. 711-722]. Lineare Filter wenden Operationen auf einen Kernel, also einer $m \times m$ -Pixelfläche an. Dieser bewegt sich über das gesamte Bild und berechnet so je nach Filter mit unterschiedlichen Operationen neue lokal abhängige Pixelwerte [9, S. 154-160]. Die Auswirkung ist in Abbildung 9 (b) zu erkennen.

Dem gegenüber stehen nichtlineare räumliche Filter. Auch sie arbeiten häufig mit einer lokalen Nachbarschaft um ein Pixel, berechnen den neuen Pixelwert jedoch nicht durch eine lineare Gewichtung und Summation der Nachbarwerte. Stattdessen kommen nichtlineare Operationen wie Sortier-, Minimum-, Maximum- oder Medianoperationen zum Einsatz. Ein typisches Beispiel ist der Medianfilter, bei dem der Wert eines Pixels durch den Median der Pixelwerte

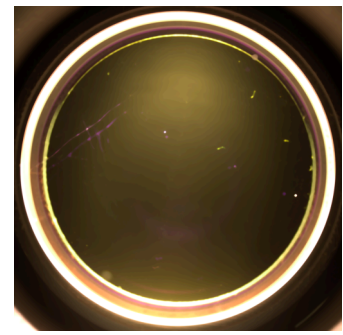
innerhalb eines definierten Filterfensters ersetzt wird [9, S. 330-332]. Dadurch eignet sich der Filter insbesondere zur Reduktion impulsartiger Störungen und kleiner isolierter Bilddetails, während Kanten im Vergleich zu linearen Glättungsfiltern erhalten bleiben, wie in Abbildung 9 (c) zu erkennen ist.



(a) Eingangsbild



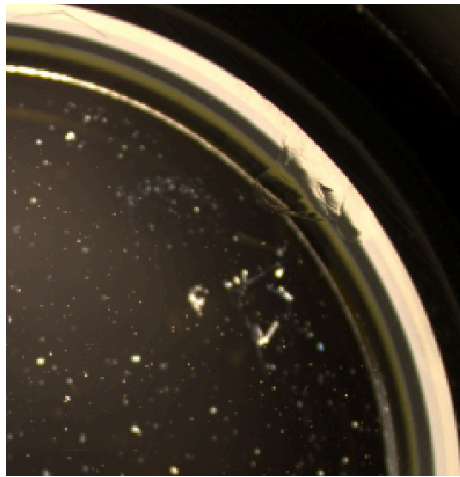
(b) Anwendung von
Gaussian-Blur-Filter (linear)



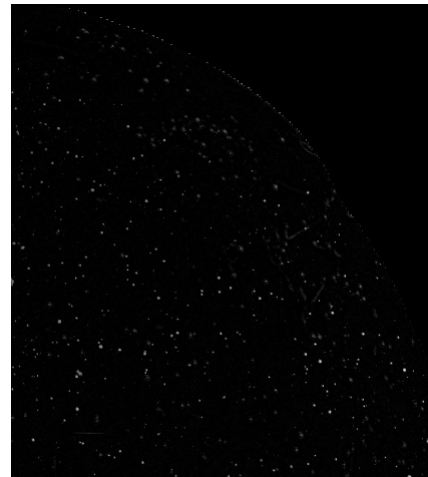
(c) Anwendung von
Median-Filter (nichtlinear)

Abbildung 9: Auswirkung linearer und nichtlinearer Filter.

Neben linearen und nichtlinearen Filtern werden zusätzlich auch morphologische Operationen eingesetzt, um relevante Bildkomponenten wie Objektgrenzen, zusammenhängende Regionen oder Formeigenschaften herauszuarbeiten. Gleichzeitig eignen sie sich zur Vor- und Nachverarbeitung, beispielsweise um binäre Fehlermasken zu bereinigen, kleine Störungen zu entfernen oder Lücken in segmentierten Bereichen zu schließen. Zu den grundlegenden morphologischen Operationen gehören Erosion und Dilatation. Vereinfacht werden durch Erosion Randpixel entfernt, sollten keine weißen Originalpixel um sie herum liegen. Helle Strukturen werden kleiner, kleine helle Störungen verschwinden. Durch Dilatation passiert genau das Gegenteil, es werden weiße Pixel hinzugefügt, sobald weiße Originalpixel um sie herum liegen. Weiße Strukturen werden größer, kleine Lücken können geschlossen werden [9, S. 635-644], [10]. Auf diesen bauen Opening- und Closing-Operationen auf. Beim Opening wird zunächst eine Erosion und anschließend eine Dilatation durchgeführt, wodurch kleine helle Störungen entfernt werden und Strukturen annähernd ihre originale Größe behalten. Beim Closing ist die Reihenfolge umgekehrt: Eine Dilatation mit anschließender Erosion kann kleine Lücken schließen oder unterbrochene Strukturen verbinden [9, S. 635-644]. Eine weitere relevante Operation ist die Top-Hat-Transformation. Dabei wird ein morphologisch geöffnetes Bild vom ursprünglichen Bild subtrahiert. Auf diese Weise können kleine helle Strukturen hervorgehoben werden, die kleiner als das verwendete Strukturelement sind. Dies eignet sich insbesondere zur Verstärkung dünner Kratzer oder kleiner heller Defektstellen gegenüber einem langsam veränderlichen Hintergrund [9, S. 635-644]. Ein Beispiel der Anwendung eines Top-Hat-Filters ist in Abbildung 10 gezeigt.



(a) Eingangsbild



(b) Anwendung von Top-Hat

Abbildung 10: Anwendung von einem Top-Hat-Filter.

3.2.2. Intensitätstransformation

Intensitätstransformationen (*intensity transformations*) gehören ebenfalls zu den grundlegenden Formen der Bildverarbeitung. In dieser Art der Transformation wird nicht die Nachbarschaft zu anderen Pixeln betrachtet, sondern der Wert eines einzelnen Pixels direkt verändert, beispielsweise aufgrund des Gesamtbildes. Solche Verfahrensarten eignen sich dafür, Kontraste eines Bildes anzupassen oder Schwellwertverfahren durchzuführen, wie in Abbildung 11 dargestellt. Für die Fehlererkennung ist dies relevant, da Defekte oft durch abrupte lokale Helligkeitsunterschiede sichtbar sind, die so herausgefiltert werden. Die Aussagekraft solcher Verfahren hängt jedoch stark von der Beleuchtungssituation und den Reflexionseigenschaften der Oberfläche ab [9, S. 119].



(a) Anwendung von Top-Hat



(b) Normalisierung (Kontrastspreizung)

Abbildung 11: Kontrastspreizung des Top-Hat-Bildes.

3.3. Klassifizierung von Fehlern

Die Klassifizierung von Fehlern ist eine Hauptaufgabe dieser Arbeit. Dazu muss jedoch geklärt werden, was Defekte sind, wie diese sich unterscheiden und in welche Gruppen sie eingeteilt

werden können. Die Fehlertypen werden in Abschnitt 3.3.1 kurz erklärt. Ebenfalls gibt es mehrere Ansätze, wie man diese Einteilung vornehmen kann. Diese werden in Abschnitt 3.3.2 und Abschnitt 3.3.3 beleuchtet.

3.3.1. Defektdefinition

In der ISO-Norm 10110-7 ist festgelegt, wie man Fehler in Größen einteilt und sie ausmisst. Diese Messungen und Größenklassen sind abhängig von der Art des Fehlers, wodurch in dieser Norm auch ein Großteil der Fehlerklassen definiert ist.

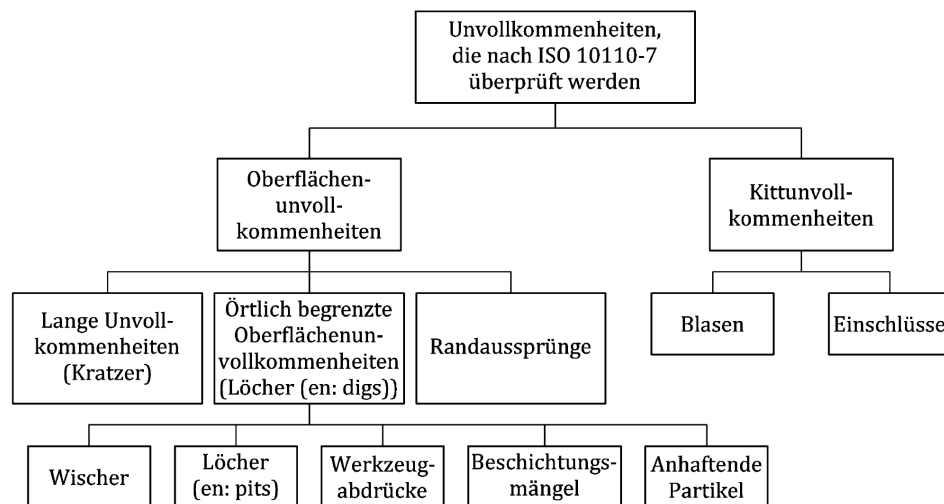


Abbildung 12: Darstellung der Oberflächenunvollkommenheiten, übernommen aus ISO 10110-7:2017 [1].

Wie in Abbildung 12 dargestellt, wird laut ISO-Norm in zwei unterschiedliche Oberklassen unterteilt. Man unterscheidet zwischen Kittunvollkommenheiten, dazu zählen Blasen und Einschlüsse und Oberflächenunvollkommenheiten, dazu zählen Kratzer, Randaussprünge und örtlich begrenzte Defekte.

Kratzer werden durch eine Länge von mindestens 2 mm und eine geringe Breite definiert, sie müssen also dünn und lang sein. Eine Fehlerklasse erhält ein Kratzer durch seine absolute Breite, wodurch festgelegt wird, dass ein Defekt dünn sein muss, um als Kratzer zu gelten. Die Klasse wird definiert, indem die Breite in die Renard-Serie R5 eingeteilt wird [1]. Ist ein Kratzer kürzer als 2 mm, zählt er als Wischer und wird nicht in die erwähnten Klassen abhängig von der Breite eingeteilt.

Fast alle örtlich begrenzten Defekte werden gleich definiert und gleich ausgemessen. Dadurch unterscheiden sie sich nicht in der Bewertung, der Art der Messung oder des Gewichts auf den Gesamtfehler. Sie haben also keine spezielle Definition, sondern sind als Oberflächenunvollkommenheit definiert. Ihre Größenklassifizierung erhalten sie durch die Quadratwurzel ihrer gesamten Fehlerfläche, welche auch in Millimetern angegeben und auch in die Renard-Serie R5 eingeteilt wird [1].

Unter den örtlich begrenzten Defekten erhalten nur Randaussprünge eine besondere Fehlerdefinition beziehungsweise eigene Fehlerklassen. Diese sind besonders, da sie Materialverlust

mit sich ziehen. Gemessen wird die am weitesten entfernte Stelle zur theoretisch vorhandenen Kontur der Optik. Diese Entfernung wird zur Klassifizierung in die Renard-Serie R5 in Millimetern eingetragen [1].

Auch die Gruppe der Kittunvollkommenheiten ist laut ISO-Norm nicht weiter spezifiziert, kann also auch behandelt werden wie örtlich begrenzte Oberflächenunvollkommenheiten.

Ebenfalls treten bei internen Prozessen Fehler auf, die so nicht in der ISO-Norm definiert sind, die Leistung von VHP-Lasern trotzdem beeinflussen. Dabei handelt es sich vor allem um großflächige Fehler, welche durch falsche Handhabung oder fehlerhaften Einsatz entstehen. Dazu zählt beispielsweise ein Fingerabdruck oder ein Einbrand auf einer Optik. Auch diese Fehler sollen erkannt werden und sollen als großflächig kategorisiert werden. Eingeordnet werden auch diese Fehler in die Renard-Serie R5 durch die Quadratwurzel ihrer Fläche. Hierbei handelt es sich jedoch nicht um eine offizielle ISO-Klasse.

3.3.2. Merkmalbasierte Klassifizierung

Ist die Position eines Fehlers durch die automatische Analyse gefunden, so wird er grafisch umschlossen oder eingerahmt. Je nach späterer Anwendung kann dies beispielsweise durch eine sogenannte *Bounding Box*, also ein Rechteck, das immer dieselbe Ausrichtung zum Bild hat, geschehen. In dieser eingerahmten Fläche können dann Merkmale gesammelt und extrahiert werden [11].

Neben geometrischen Merkmalen können auch intensitäts- und texturbasierte Merkmale zur Bewertung herangezogen werden. Dabei wird die Intensitätsverteilung innerhalb der Fehlerregion analysiert, um zusätzliche Informationen über die Struktur oder Erscheinungsform des Defekts zu gewinnen. Die Kombination dieser Merkmale ermöglicht eine effiziente und deterministische Beschreibung erkannter Fehler.

Die Aussagekraft solcher Verfahren hängt stark von der Qualität der vorherigen Detektion und Segmentierung ab. Werden Fehlerregionen ungenau abgegrenzt, können daraus berechnete Merkmale wie Fläche, Seitenverhältnis oder Winkel verfälscht werden. Zusätzlich stoßen rein regelbasierte Ansätze häufig an Grenzen, wenn Schwellwerte manuell festgelegt werden müssen oder sich Beleuchtung, Kontrast und Defektausprägung stark unterscheiden [11]. Diese Art der Klassifizierung ist also schnell und effizient, ist aber stark von der Qualität der Bildverarbeitung und den gewählten Schwellwerten abhängig.

3.3.3. Lernbasierte Klassifizierung

Die Klassifizierung über lernbasierte Verfahren stellt einen modernen Ansatz der automatisierten Fehlerbewertung dar. Durch den Fortschritt im Bereich des maschinellen Lernens können Defekte nicht nur anhand manuell definierter Merkmale, sondern direkt auf Basis von Bilddaten eingeordnet werden. Dabei lernt das Modell relevante Merkmale aus Trainingsdaten, anstatt dass diese vollständig durch feste Regeln oder Schwellwerte vorgegeben werden [12].

Grundsätzlich lassen sich dabei zwei unterschiedliche Einsatzarten unterscheiden. Zum einen kann eine reine Klassifikation durchgeführt werden. Dazu wird häufig ein Convolutional Neural Network (CNN) verwendet, das einen Bildausschnitt fester Größe einliest, in dem sich ein

Fehler befindet. Das Modell wird anschließend darauf trainiert, diese Stellen in Fehlergruppen einzuteilen. Diese Einteilung basiert auf der *Ground Truth*, also der vom Menschen festgelegten Referenz [12]. Das Modell beschäftigt sich somit damit, zuvor erkannte potenzielle Fehlerstellen einzuordnen.

Die zweite Einsatzart umfasst einen weitergehenden Einsatz lernbasierter Verfahren. Hierbei wird auch die Erkennung auffälliger Stellen durch ein Modell übernommen. Dadurch ändert sich das Problem grundlegend, da es nicht mehr nur um eine reine Klassifizierung, sondern auch um eine Lokalisierung der Defekte geht [13]. Dies kann zwar zu einer höheren Erkennungsgenauigkeit führen, allerdings sind die Entscheidungen des Modells aufgrund seiner komplexen internen Struktur häufig nur schwer nachvollziehbar. Darüber hinaus wird eine umfangreiche und möglichst einheitlich erstellte Datenbasis mit zuverlässig annotierten Trainingsdaten benötigt.

4. Umsetzung

In diesem Kapitel werden die Umsetzung der verschiedenen Anforderungen, welche für das implementierte System definiert wurden, dargestellt. Dabei wird der Aufbau zur Erzeugung von Bildern und die gesamte Softwarepipeline behandelt.

4.1. Aufbau

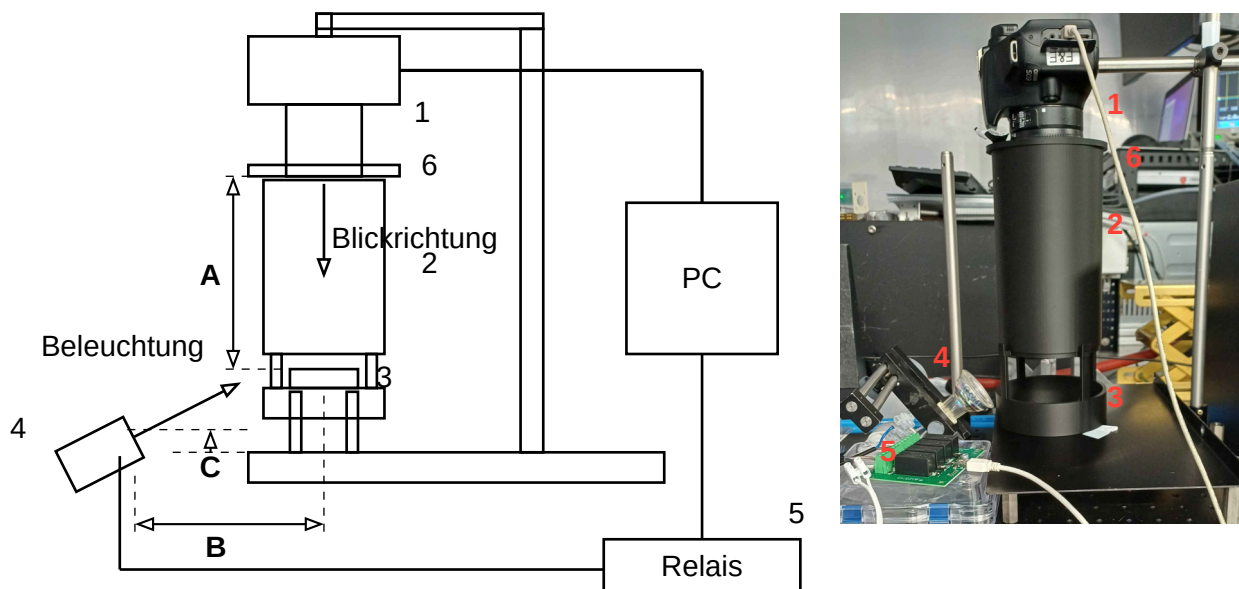


Abbildung 13: Schematische Darstellung und fotografische Aufnahme des Aufnahmearbeitsaufbaus, nicht maßstabsgetreu:

1 Kamera mit Objektiv, 2 zylindrische Abschirmung, 3 optische Komponente, 4 Lichtquelle, 5 Relais und 6 Abschirmscheibe.

$A = 15 \text{ cm}$, $B = 9 \text{ cm}$, $C = 3,6 \text{ cm}$

In Abbildung 13 ist eine Skizze und der realisierte Versuchsaufbau dargestellt. Dieser besteht aus einer Kamerahalterung, der Kamera, einem Zylinder, einer Halterung für den Prüfling, der Lichtquelle, einem steuerbaren Relais und einem PC. Der Aufbau wurde auf einem Breadboard realisiert. Mit zwei Stangen und einem 90°-Verbindungsstück wird die Kamera so befestigt, dass sie mit Abstand zur Halterung nach unten ausgerichtet ist. Direkt neben der Kamerahalterung sind mehrere Abstandshalter auf das Board geschraubt, auf denen eine mattschwarze Platte liegt. Die Höhe muss dabei so ausgelegt werden, dass der Abstand A eingehalten wird. Auf der Platte wird dann der Standfuß für die Halterung der Optik platziert. Auf diesen wird dann der Zylinder gestellt. Für die Lichtquelle wird eine Stange so auf dem Breadboard befestigt, dass Abstand B gewährleistet ist. An diese wird ein 90°-Verbindungsstück geschraubt, das passend zu Abstand C auf die richtige Höhe befestigt wird. Der Halter für die Lampe kann dort befestigt und dessen Winkel verstellt werden. Zusätzlich kann an der Stange noch ein Winkelmaß befestigt werden. Die Phase der Lampe wird mit dem Relais verbunden und anschließend mit einem Netzstecker. Der Nullleiter wird direkt mit dem Netzstecker verbunden. Relais und Kamera werden jeweils über ein USB-Kabel mit dem PC verbunden. Zusätzlich

sollte sichergestellt werden, dass die Beine des Standfußes so platziert sind, dass sie nicht vor der Lichtquelle stehen und keinen Schatten werfen.

Um eine Messung durchzuführen, muss der Aufbau eingerichtet werden. Dazu ist wichtig, dass das Programm auf dem Host-Computer noch nicht gestartet und die Kamera manuell bedienbar ist. Zuerst wird die Optik in die Halterung eingesetzt. Anschließend wird der Zoom des Objektivs auf ungefähr 28 mm gestellt. Eine sehr genaue Einstellung ist anhand der Skala auf dem Objektiv leider nicht möglich. Somit sollte der Zoom so eingestellt werden, dass die Optik vollständig im Bild zu sehen ist und an allen Bildgrenzen etwas Distanz zur Optik besteht. Anschließend muss die Optik manuell fokussiert werden, indem auf einen sichtbaren Defekt auf der Oberfläche oder den Rand der Optik scharf gestellt wird. Wichtig ist, dass die Kamera genau über dem Punkt platziert ist, auf den fokussiert wird. Anschließend wird der Zylinder mit der Abschirmscheibe auf die Halterung gesetzt. Nach dem Programmstart muss mithilfe des Live-Bildes die Kamera so ausgerichtet werden, dass sie möglichst gerade und mittig über der Optik platziert ist. Die Lichtquelle muss so eingestellt werden, wie in Abschnitt 4.1.3 definiert. Auf dem Livebild der Kamera wird ein aktueller Helligkeitswert angezeigt. Die ermittelte Neigung der Lichtquelle erreicht man ebenfalls, wenn der Helligkeitswert sein Maximum erreicht. Anschließend kann die Analyse gestartet werden.

4.1.1. Kamera und Lichtquelle

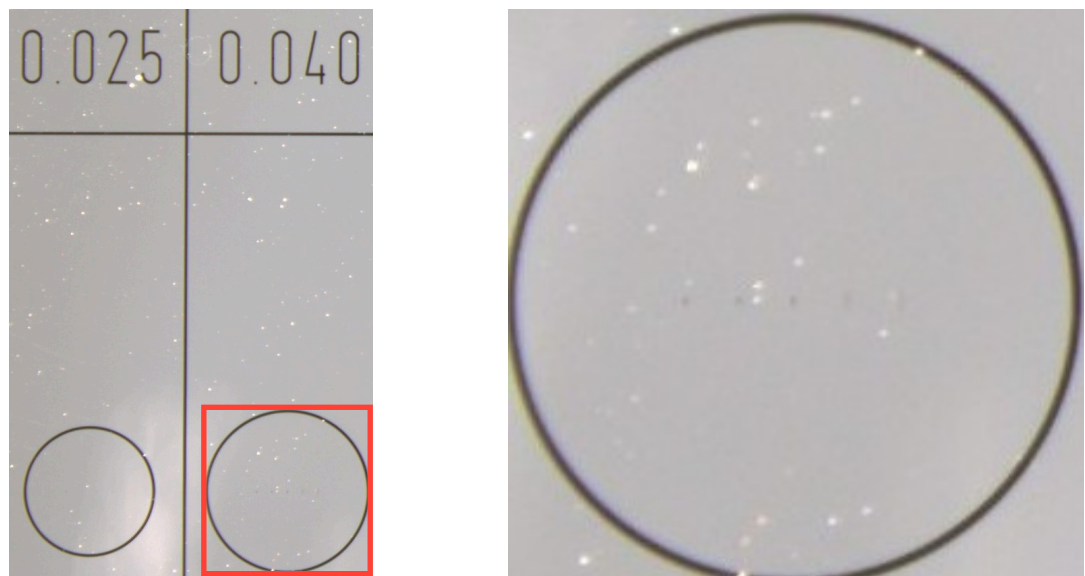


Abbildung 14: Darstellung des kleinsten durch die Kamera erfassbaren Fehlers. Das rechte Bild zeigt eine vergrößerte Ansicht des im linken Bild rechts dargestellten Kreises, der der ISO-Klasse 0,04 entspricht.

Als Kamera wird eine Canon EOS 1100D mit einem EF-S 18-55 III Zoom-Objektiv verwendet. Die im März 2011 erschienene digitale Spiegelreflexkamera besitzt einen APS-C-CMOS-Sensor mit effektiv 12,2 Megapixeln ($4272 \text{ px} \times 2848 \text{ px}$) und einem Pixelpitch von $5,3 \mu\text{m}$. Die Datenübertragung geschieht über eine USB 2.0 Schnittstelle [14]. Wird mit der Kamera also die in Abschnitt 2 erwähnte Optik mit einem Durchmesser von 80 mm fotografiert, ergibt sich eine

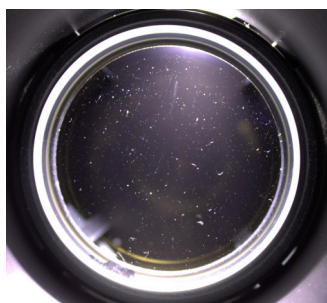
maximale Auflösung von $28,1 \frac{\mu\text{m}}{\text{px}}$ (Berechnung in Abschnitt A.2). Mit einem Sicherheitsfaktor von drei können also Fehler kleiner als $84,3 \mu\text{m}$ nicht aufgenommen und analysiert werden. Dies stellt eine Einschränkung dieser Arbeit dar. Wie in Abbildung 14 zu erkennen ist, sind die dunklen Defektpunkte mit einer Größe von $40 \mu\text{m}$ (nicht die weißen Partikel) im rechten Kreis noch zu erahnen, während $25 \mu\text{m}$ große Defekte nicht mehr aufgelöst werden. Hier ist also die Grenze der Kamera bestimmt.

Die Kamera wurde nicht aufgrund von technischen Eigenschaften gewählt, sondern durch ihre vorhandene Verfügbarkeit im Projektumfeld. Sie stellt damit eine pragmatische und kostengünstige Lösung für erste Versuche dar, da keine zusätzliche Anschaffung nötig ist. Canon hat für diese Kamera ein SDK (Software Development Kit) veröffentlicht, wodurch Verschlusszeit, ISO-Wert und die Blendenöffnung von einem PC-Programm gesteuert werden können. Der Zoom und Fokus müssen aufgrund eines Defekts des Objektivs manuell eingestellt werden. Wie in Abschnitt 2 bereits besprochen, kann keine Kamera die Anforderung einer „Ein-Foto-Lösung“ erfüllen. Im späteren Verlauf der Arbeit wird deshalb eine andere Kamera beschafft, in dieser Arbeit aber nicht mehr eingebunden. Diese weist ein deutlich geringeres Rauschen auf, verfügt über eine höhere Auflösung und ist voll steuerbar. Ausblickend können mit dieser Kamera bessere Ergebnisse erzielt werden.

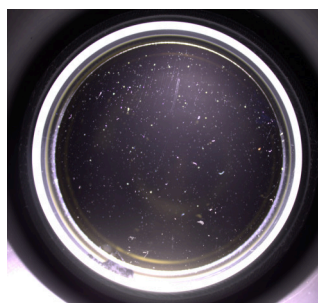
Bei der Lichtquelle handelt es sich um ein LED-Leuchtmittel von Osram, welches Licht mit einer Farbtemperatur von 4000 Kelvin und einer Helligkeit von 575 lm erzeugt. Der Ausstrahlwinkel der Lampe beträgt 36° [15]. Dieses wird von dem in Abschnitt 4.1 erwähnten Relais gesteuert. Somit kann der PC den Status der Lampe beeinflussen. Bei diesem handelt es sich um das USB-RLY04 von Robot Electronics, welches über vier Relais verfügt, die jeweils 16 Ampere schalten können [16].

4.1.2. Halterung und Abschirmung

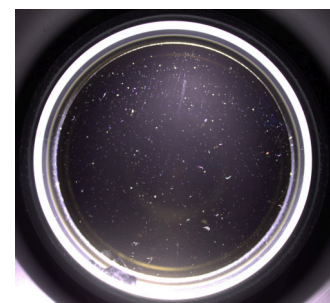
Der Zylinder, der Standfuß sowie die Halterung wurden selbst konstruiert und mit einem 3D-Drucker realisiert. Der Zylinder verhindert, dass das Licht der Lampe direkt in die Kamera fällt. Eine Analyse wäre so nicht möglich, da das Kamerabild von dem direkt in das Objektiv treffende Licht dominiert wird und die Defekte nicht zu erkennen sind.



(a) Version 1
Enge Beine, komplett
beleuchtet



(b) Version 2
Weite Beine,
Ringabschirmung



(c) Version 3
Zusätzliche Abschirmscheibe

Abbildung 15: Vergleich der Versionen des Aufbaus.

Im Verlauf der Arbeit wurde der Standfuß verändert. Die daraus resultierende Wirkung auf das Foto ist in Abbildung 15 dargestellt. In der ersten Version sind die Standfüße zu sehen, sie sind zu weit mittig platziert. Ebenfalls ist der Hintergrund sehr hell beleuchtet, da keine eigene Abschirmung vorlag. Zusätzlich war der Zylinder zu groß, wodurch Fremdlicht zwischen Zylinder und Halterung hindurch direkt in die Kamera gelangen konnte, was in Abbildung 15 (a) zu erkennen ist. Dadurch nimmt der Kontrast zwischen Hintergrund und den hellen Reflexen der Defekte ab, was die Qualität der späteren Analyse negativ beeinflusst. In der zweiten Version, in Abbildung 15 (b) dargestellt, wurden die Standbeine nach außen gerückt, sodass diese nicht auf den Bildern zu sehen sind. Der Zylinder wurde verkleinert, wodurch kein Fremdlicht mehr direkt in die Kamera gelangt. Ebenfalls wurde eine Abschirmung gegen Licht in Form eines durchgehenden Rings um den unteren Teil der Standbeine umgesetzt, der auch in Abbildung 13 zu erkennen ist. Die dritte Version fügt eine Abdeckungsscheibe hinzu. Bei suboptimalen Bedingungen sorgt sie für so wenig Fremdlicht wie möglich. Reflexionen der Kameralinse können jedoch trotzdem vorkommen. Farbe und Größe der Reflexion sind abhängig vom Prüfling. Dies wurde bereits in Abschnitt 3.1.2 geklärt. Ebenso ist der Rand der Optik zu sehen, auch dieses Problem konnte durch den Aufbau gelöst werden. Durch den Aufbau können Optiken unter denselben Bedingungen fotografiert und abgelichtet werden. Somit kann das Programm auf die Eigenheiten dieses Aufbaus zugeschnitten werden, worauf in Abschnitt 4.2 eingegangen wird.

4.1.3. Beleuchtungs- und Belichtungsparameter

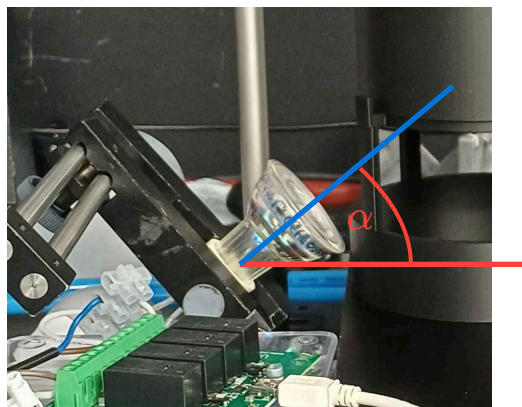
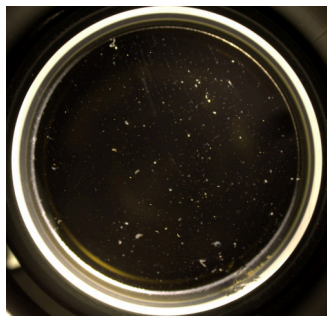
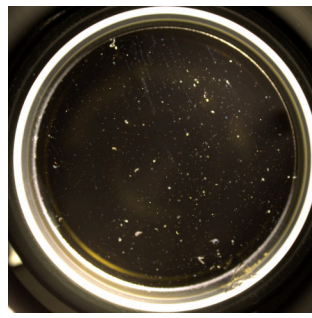


Abbildung 16: Gemessener Winkel zwischen Lichtquelle und horizontaler Ebene.

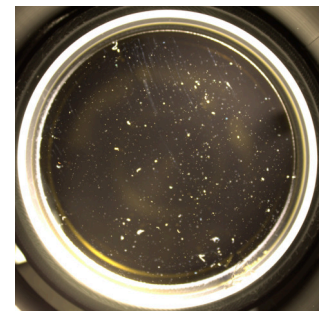
Die Belichtung der Optik ist eine essenzielle Grundlage, um ein geeignetes Kamerabild für eine Analyse zu erhalten. Es wurden mehrere Bildreihen mit unterschiedlichen Winkeln aufgenommen, um einen geeigneten Winkelbereich für die Lichtquelle zu bestimmen. Gemessen wurde, dargestellt in Abbildung 16, der Winkel vom Mittelpunkt der Lichtquelle zur horizontalen Ebene, also die Neigung dieser. Bei diesen Versuchen stellt sich ein optimaler Neigungswinkel von 30° bis 35° heraus. Das verwendete Leuchtmittel besitzt einen Ausstrahlwinkel von 36° . Für einen Neigungswinkel der Lichtquelle von $\alpha = 30^\circ$ ergibt sich auf der Optik eine beleuchtete Ausdehnung von etwa 7,2 cm. Bei $\alpha = 35^\circ$ beträgt diese ungefähr 8,2 cm. Für die zu untersuchenden Optiken also theoretisch ausreichend.



Durchschn. Helligkeit 11%
Belichtungszeit: 1/10 s



Durchschn. Helligkeit 30%
Belichtungszeit: 1/6 s



Durchschn. Helligkeit 60%
Belichtungszeit: 1/2 s

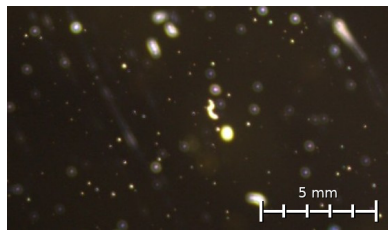
Abbildung 17: Bildreihe zum Test der Belichtungszeit.

Helligkeitsangabe ist der Wert der durchschnittlichen Helligkeit im Bild der Kamera.

ISO = 100

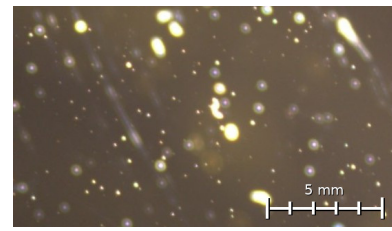
Blende = f/4

Damit das Bild die Fehler so optimal wie möglich hervorhebt, ist nicht nur die richtige Beleuchtung wichtig, sondern auch die richtige Kameraeinstellung. Hier lassen sich drei Parameter der Kamera verändern: die Belichtungszeit, der ISO-Wert und der Blendenwert. Der ISO-Wert wird dabei so niedrig wie möglich eingestellt. Er gibt an, wie stark die Kamera die Sensorsignale verstärkt. Somit führt ein höherer ISO-Wert zu verstärktem Signalrauschen, was unbedingt vermieden werden soll [17]. Die Blendenzahl sollte so klein gewählt werden, dass ausschließlich die zu prüfende Oberfläche der Optik scharf abgebildet wird. Gleichzeitig muss die Schärfentiefe groß genug bleiben, um geringe Unebenheiten der planen Oberfläche weiterhin scharf darzustellen. Da derzeit nur plane Oberflächen geprüft werden, ist eine möglichst geringe, aber noch ausreichend tolerante Schärfentiefe anzustreben. Die Parameter „ISO“ und „Blende“ sind also fest und gegeben, sodass lediglich die Belichtungszeit verändert wird. Durch den statischen Aufbau ist eine lange Belichtungszeit grundsätzlich kein Problem, diese kann also frei eingestellt werden. Um den optimalen Belichtungswert zu ermitteln, wird eine Belichtungsreihe angefertigt, welche in Abbildung 17 abgebildet ist. Bei einem konstanten ISO-Wert von 100 und einer festen Blende von f/4 wurde die Belichtungszeit variiert. Die Bildhelligkeit wurde in der Mitte des Kamerabildes anhand des durchschnittlichen Grauwerts der dortigen Pixel bestimmt. Dabei entspricht ein Wert von 0 % einer vollständig schwarzen und somit dunklen Darstellung, während ein Wert von 100 % eine vollständig weiße und somit helle Darstellung beschreibt. Die Versuche zeigen, dass die erkannte Fehlerfläche mit zunehmender gemessener Helligkeit, also längerer Belichtungszeit, größer wird. Grundsätzlich besteht dabei ein naheliegender Zusammenhang: Mit steigender Helligkeit werden mehr Defekte sichtbar. Diese Annahme ist zwar im Kern richtig, jedoch treten durch die stärkere Beleuchtung zusätzlich zwei Störeffekte auf, die wesentlich zur Vergrößerung der erkannten Fehlerfläche beitragen.



Durchschn. Helligkeit 11%

Belichtungszeit: 1/10 s



Durchschn. Helligkeit 60%

Belichtungszeit: 1/2 s

Abbildung 18: Ausschnitte aus Belichtungsreihe: Überbewertung durch längere Belichtungszeit.

Ein Effekt ist die Überbewertung. Wie in Abbildung 18 zu erkennen ist, ändert sich die Reflexionsgröße der Defekte durch eine längere Belichtungszeit und damit höhere Bildhelligkeit. Die Defekte werden also durch eine längere Belichtungszeit größer dargestellt, als sie eigentlich sind, was eine spätere Messung ungenau werden lässt. Somit ergibt sich, dass die Belichtungszeit so kurz wie möglich gehalten wird, um die Überbewertung der Fehler so gering wie möglich zu halten. Jedoch darf die Belichtungszeit nicht zu kurz gewählt werden, da sonst die Anzahl der erkannten Fehler abnimmt. Es muss also ein Mittelmaß gefunden werden.



Durchschn. Helligkeit 11%

Belichtungszeit: 1/10 s



Durchschn. Helligkeit 60%

Belichtungszeit: 1/2 s

Abbildung 19: Ausschnitte aus Belichtungsreihe: Mehr Rauschen durch längere Belichtungszeit.

Der zweite Effekt wird in Abbildung 19 deutlich. Eine längere Belichtungszeit führt zu einem höheren Rauschanteil im Bild, da mit zunehmender Belichtungsdauer auch thermisch bedingte Störsignale zunehmen. Da also nicht nur Rauschen, sondern auch die Defektgrößen bei längerer Belichtungszeit zunehmen, sollte dieser Wert nur so hoch wie nötig eingestellt werden. Unter Berücksichtigung der zuvor beschriebenen Einflüsse und der Ergebnisse der durchgeführten Versuchsreihen wurde eine Bildhelligkeit von 37,25 % als geeignete Standardeinstellung festgelegt. Die Genauigkeit der Umsetzung dieses Wertes ist jedoch von der Kamera und der Belichtungszeit abhängig. Die Software ermittelt die Belichtungszeit, die am nächsten an den Wert von 37,25 % kommt. Eine Abweichung von absoluten ± 4 % ist softwareseitig zulässig.

Zur Ermittlung dieses Wertes wurden Aufnahmen mit unterschiedlichen Beleuchtungsstärken erstellt und hinsichtlich der erkannten Fehlerfläche, der Sichtbarkeit realer Defekte sowie des Auftretens störender Effekte miteinander verglichen. Dieser Wert stellt einen Kompromiss zwischen einer ausreichenden Sichtbarkeit der Defekte und einer möglichst geringen Beeinflussung durch beleuchtungsbedingte Störeffekte dar.

Für die Festlegung der Standardeinstellung wurden daher Bildhelligkeitswerte betrachtet, bei denen reale Fehler ausreichend deutlich erkennbar waren und die störenden Einflüsse gleichzeitig möglichst gering blieben.

Dadurch werden möglichst einheitliche und vergleichbare Aufnahmebedingungen sichergestellt. Durch den Nutzer ist dieser Wert jedoch vor jedem Analyselauf anpassbar.

4.1.4. Kamera- und Lichtsteuerung

Damit die Kamera zwischen den Aufnahmen nicht durch Berührungen verwackelt und die Bilder sofort auf dem PC gespeichert werden, wird eine externe Kamerasteuerung benötigt. Diese ist von Hersteller zu Hersteller und sogar zwischen den Modellen unterschiedlich. Zur Steuerung wird die offizielle Canon-EDSDK mit der Version 13.20.10.6402 verwendet. Die implementierte Kamerasteuerung ist auf Canon-Modelle beschränkt, die vom Canon EOS Digital SDK unterstützt werden [18]. Zusätzlich können nur von Canon freigegebene Funktionen angesprochen werden. Eine Erweiterung wäre zwar möglich, ist für diese Arbeit jedoch nicht notwendig.

Die Kontrolle der installierten Lampe läuft über steuerbare Relais. Dafür wird ein USB-RLY04 verwendet, welches über eine serielle UART-Schnittstelle über USB mit einem Host-Computer kommuniziert. Die einzelnen Relais sind für 16 A bei 250 V spezifiziert [16]. Diese wurden früh im Projektverlauf ausgewählt und so dimensioniert, dass sie keinen limitierenden Faktor bilden. Die LED hat dabei einen Stromfluss von 26,5 mA bei 230 V. Somit könnten problemlos vier Lampen gleichzeitig gesteuert werden. Für eine finale Projektumsetzung wäre hier jedoch eine passendere Dimensionierung angemessen.

4.2. Software

Windows 11 in der Version 24H2 ist für diese Arbeit das verwendete Betriebssystem. Es dient als Bedienungs- und Optimierungsgrundlage und wird im Verlauf dieser Arbeit nicht verändert. Das entwickelte Programm kann jedoch größtenteils betriebssystemunabhängig betrieben werden, was unter anderem durch die Wahl der Programmiersprache gewährleistet werden kann. Nur die Kamerasteuerung ist ausschließlich mit Windows möglich. Im Wesentlichen werden die Implementierungen in Python 3.14 umgesetzt. Die große Verfügbarkeit an Bibliotheken, die Möglichkeiten der Bildverarbeitung und die einfache Einarbeitung sind Argumente dafür. Ebenfalls lässt sich ein Prototyp in Python schnell umsetzen. Durch die gute Lesbarkeit von Python ist dieser auch nach Fertigstellung dieser Arbeit gut erweiterbar. Sollte beispielsweise eine Kameraschnittstelle nur in einer anderen Programmiersprache implementiert sein, wird diese nicht in Python umgesetzt.

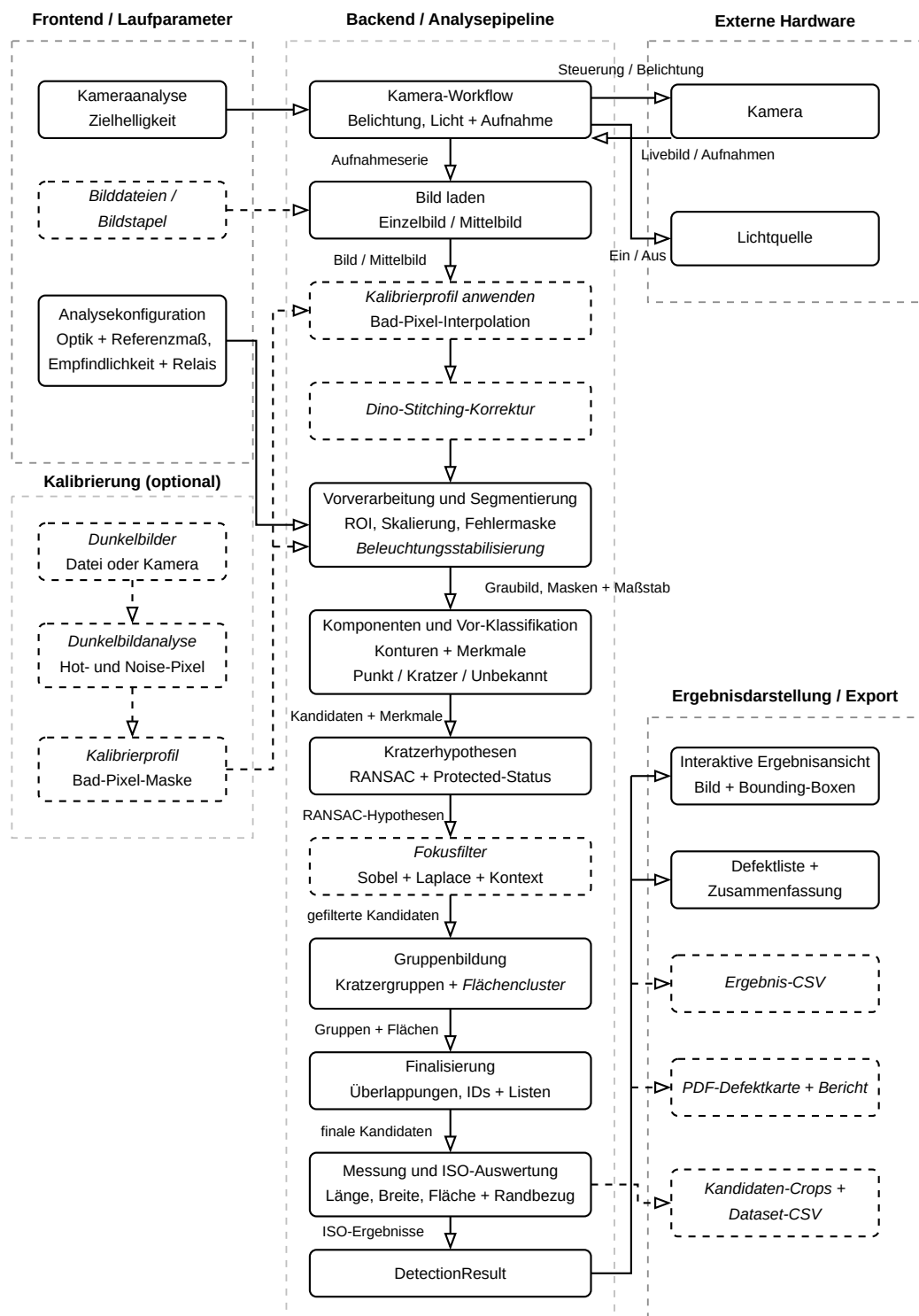


Abbildung 20: Stark vereinfachte Softwarearchitektur mit dem tatsächlichen Datenfluss der entwickelten Defekterkennung.

Gestrichelte Knoten und Verbindungen kennzeichnen optionale Schritte oder benutzergesteuerte Exporte.

Die in Abbildung 20 dargestellte Softwarearchitektur wird in Frontend, optionale Kalibrierung, Backend, die anzusteuern Hardware sowie die Ergebniserstellung und den Export gegliedert. Gestrichelte Bereiche und kursive Namen kennzeichnen dabei optionale Punkte, Schritte des Programms oder nutzbare Exportfunktionen, welche vom Nutzer bestimmt werden können.

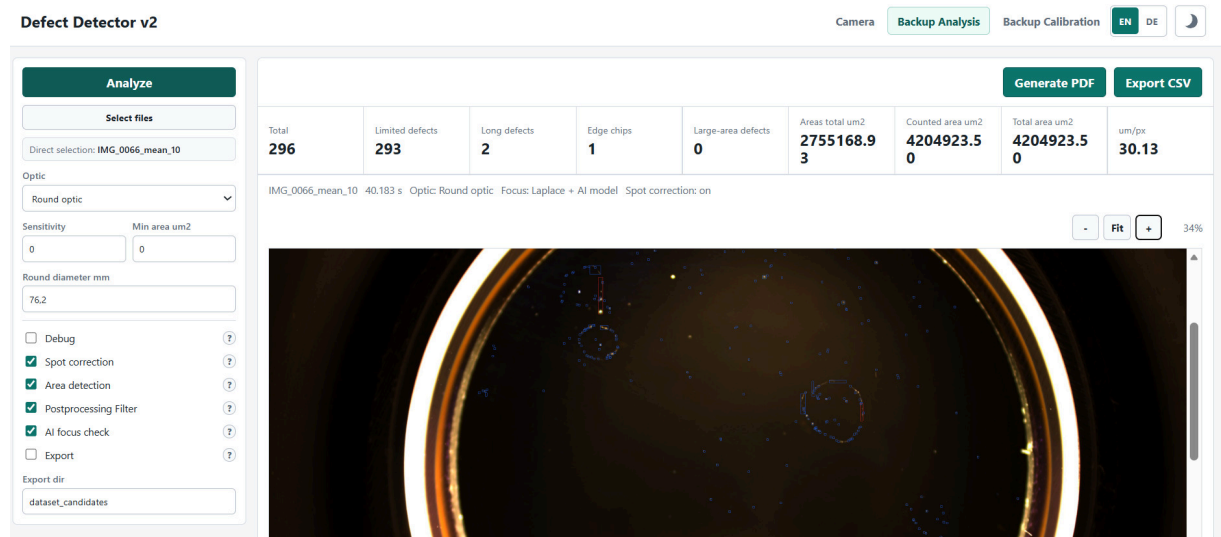


Abbildung 21: Darstellung des Frontends nach einer Analyse mit Analyseergebnis.

Das Frontend, welches in Abbildung 21 dargestellt wird, ist das Bedienungselement für den Nutzer und bildet die Schnittstelle zwischen diesem und dem Analyseprogramm. Über die Benutzeroberfläche kann entweder eine kamerabasierte Analyse gestartet oder manuell Bilder geladen und analysiert werden. Darüber hinaus können die für die Ausführung erforderlichen Analyseparameter wie die Zielhelligkeit gesetzt werden. Zusätzlich können Angaben zur zu untersuchenden Optik gemacht werden, also der Typ der Optik und die Dimensionen dieser. Auch die gewünschte Empfindlichkeit sowie verschiedene Schalter zur Aktivierung optionaler Verarbeitungsschritte können eingestellt werden. Ebenfalls stellt das Frontend das Livebild der Kamera und die Analyseergebnisse in einem interaktiven Bild dar.

Bei einer kamerabasierten Analyse übernimmt das Backend die Steuerung der externen Hardware. Hierzu gehören die Einstellung der Belichtungszeit, die Regelung der Lichtquelle sowie die Aufnahme und Speicherung der Bilder. Die Kamera überträgt dafür das Livebild und die aufgenommenen Bilddaten an das Backend, während die Lichtquelle abhängig vom aktuellen Aufnahmeprozess ein- oder ausgeschaltet wird. Aus einer Aufnahmeserie aus standardmäßig 10 Bildern wird anschließend ein Mittelbild erzeugt, um zufällige Bildstörungen zu reduzieren. Alternativ kann ein bereits vorhandenes Einzelbild oder ein Bildstapel über das Frontend eingelesen werden.

Vor jeder Analyse kann eine Kalibrierung der Kamera durchgeführt werden. Hierfür werden Dunkelbilder entweder aus vom Nutzer hochgeladenen Dateien geladen oder direkt mit der Kamera aufgenommen. Anhand dieser werden defekte Pixel identifiziert und in einem Kalibrierprofil gespeichert, welches in der Analyse genutzt werden kann, um den Einfluss von defekten Pixeln zu verringern und damit das Ergebnis nicht zu verzerren. Bei gestitchten Bildern kann außerdem eine optionale Korrektur von Stitching-Artefakten, also deutlichen Übergängen im Bild, erfolgen.

Die eigentliche Analyse beginnt mit der Vorverarbeitung und Segmentierung des Eingabebildes. Dabei wird das Bild in ein Grauwertbild überführt, die relevante Prüfregion beziehungsweise Optikmaske bestimmt und der Skalierungsfaktor aus dem angegebenen Referenzmaß

berechnet. Optional kann eine Beleuchtungskorrektur durchgeführt werden. Anschließend wird mithilfe mehrerer Schwellwertverfahren ein Binärbild erzeugt, in dem potenzielle Defekte hervorgehoben sind.

Aus diesem Binärbild werden zusammenhängende Komponenten extrahiert und deren Merkmale, also Kontur, Intensität und Verlauf gespeichert. Auf Basis dieser Daten wird nun eine vorläufige Klassifikation als Punktdefekt, Kratzer oder „Unbekannt“ getätigt. Für mögliche Kratzer werden anschließend mithilfe eines RANSAC-Verfahrens einzelne Kratzerteile, die durch die Bildverarbeitung getrennt wurden, hypothetisch in Gruppen verteilt. Ein optionaler Fokusfilter bewertet die Schärfe jedes Defekts und entfernt jene, die sich wahrscheinlich nicht auf der betrachteten Prüfseite befinden.

Im nächsten Schritt werden zusammengehörige Kandidaten gruppiert. Dadurch können insbesondere fälschlicherweise getrennte Kratzerabschnitte zu gemeinsamen Kratzergruppen zusammengeführt werden. Optional lassen sich darüber hinaus räumlich zusammenhängende Flächendefekte zu Clustern kombinieren. Bei der anschließenden Finalisierung werden überlappende oder zusammengehörige Gruppen verschmolzen, eindeutige Identifikationsnummern vergeben und die internen Ergebnislisten erzeugt.

Die finalisierten Defekte werden anschließend nach den in der ISO 10110-7 festgelegten Vorgaben ausgemessen und in die jeweiligen Größenklassen eingeteilt. Bei jedem Defekt wird die Defektfläche ausgemessen, Kratzer erhalten zusätzlich die Werte für Länge und Breite, Randaussprünge die Entfernung zum Rand der Optik. Mithilfe des bestimmten Skalierungsfaktors können aus den pixelbasierten Messwerten physikalische Größen berechnet werden. Sämtliche gesammelten Informationen werden abschließend in einem gemeinsamen Analyseergebnis zusammengeführt.

Die Ergebnisse werden dem Nutzer in einer interaktiven Ansicht zur Verfügung gestellt. Diese enthält das analysierte Bild mit eingezeichneten Begrenzungsrahmen sowie eine Defektliste und eine zusammenfassende Bewertung. Zusätzlich können die Resultate optional als CSV-Datei oder als PDF-Defektkarte mit zugehörigem Bericht exportiert werden. Für eine spätere Erweiterung oder das Training datenbasierter Klassifikationsverfahren können außerdem die einzelnen Defektkandidaten als Bildausschnitte zusammen mit einer zugehörigen Dataset-CSV gespeichert werden.

4.2.1. Defektpixelkalibrierung und Rauschreduzierung

Da die verwendete Kamera ein im Vergleich zu Industriekameras hohes Rauschen erzeugt, ist eine Kalibrierung und eine Rauschreduzierung notwendig. Der Einsatz von Rauschfiltern gilt jedoch als problematisch, da nicht gewährleistet werden kann, dass Defekte durch diese nicht verändert oder ganz unterdrückt werden.

In Abbildung 22 ist die Auswirkung eines Medianfilters auf einen kleinen Defekt auf Pixelebene dargestellt. Der vorher auf einer 3×3 -Fläche zu erkennende Defekt, auf dem linken Bild, wird durch den Medianfilter unterdrückt, zu sehen auf dem rechten Bild, wodurch er nicht mehr zu sehen ist. Bei größeren Fehlern verschwindet der Fehler nicht, er wird jedoch kleiner. Es

gäbe zwar, wie in Abschnitt 3.2.1 erklärt, morphologische Operationen, um einer Verkleinerung entgegenzuwirken. Jedoch kann nicht sichergestellt werden, dass damit der originale Stand des Defekts wiederhergestellt wird. Somit muss ein anderer Weg gefunden werden, um die Kamera zu kalibrieren und Rauschen zu unterdrücken, ohne klassische Filter zu nutzen. Dies wird im Folgenden beschrieben.

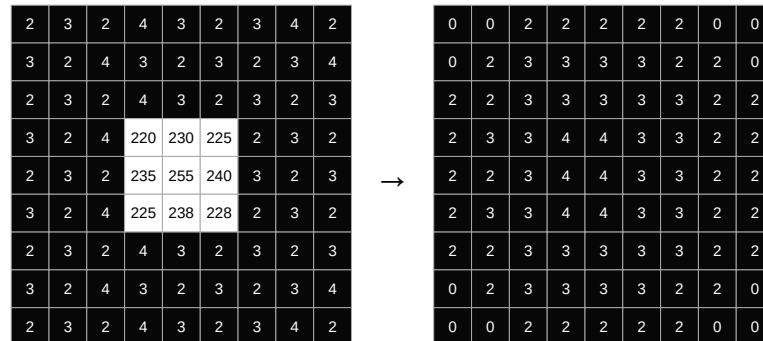


Abbildung 22: Pixelbasierte Darstellung eines 5x5-Medianfilters.

Hotpixel sind einzelne Sensorpixel, die auch ohne passende Belichtung einen zu hohen Signalwert liefern. Sie neigen also dazu, selbst bei einem komplett dunklen Zustand eine Farbe anzunehmen [19]. *Stuckpixel* ändern hingegen ihren Zustand nicht mehr, unabhängig des eintreffenden Lichtes [19]. Diese beiden Effekte lassen sich visuell kaum voneinander unterscheiden. Eine eindeutige Unterscheidung ist jedoch nicht erforderlich, da ihre Erkennung nach demselben Prinzip erfolgt. Für die Bildanalyse ist ihre Identifikation dennoch wichtig, da die betroffenen Pixel keine verwertbaren Informationen enthalten und das Analyseergebnis sogar negativ verzerren können.

Daher sollten *Hotpixel* und *Stuckpixel* vor der eigentlichen Analyse identifiziert und von der Auswertung ausgeschlossen werden. Zur Erkennung wird ein Bild mit einem möglichst gleichmäßigen schwarzen Hintergrund aufgenommen. Da *Hotpixel* und *Stuckpixel* grundsätzlich jede Farbe des RGB-Farbraums annehmen können, sind insbesondere jene Pixel relevant, die von Schwarz abweichen und dadurch fehlerhafte Bildinformationen erzeugen. Das Kalibrierungsbild muss dazu mit den gleichen Umgebungsvariablen, also Temperatur und Kameraparametern, aufgenommen werden, da sich *Hotpixel* durch einen beispielsweise höheren ISO-Wert verändern können. Die Beleuchtung wird also ausgeschaltet und es wird sichergestellt, dass die durchschnittliche Helligkeit des Kamerabildes bei 0 % liegt. Da *Hotpixel* vor allem in einem Farbkanal ausschlagen, wird nun in jedem Kanal über das gesamte Bild ein Mittelwert gebildet. Liegt der Wert eines Farbkanals außerhalb des Intervalls $\mu \pm 8\sigma$ und weicht um mindestens einen Graustufenwert vom Mittelwert ab, wird das Pixel als auffällig eingestuft. Wird dieses Verfahren jedoch auf ein einzelnes Bild angewendet, führt das Bildrauschen dazu, dass zahlreiche Pixel fälschlicherweise als Defekt markiert werden.

Ein Weg, das Rauschen im Bild zu reduzieren, ist eine gemittelte Mehrbildaufnahme. Es werden also mehrere Bilder hintereinander mit exakt gleicher Positionierung und gleichen Umgebungsvariablen aufgenommen und die Werte gemittelt. So bleibt bei zufälligem Rauschen noch ein Restrauschen von $\frac{1}{\sqrt{N}}$ übrig, wobei N die Anzahl der Bilder ist. Dies führt zu längerer

Aufnahme- und Verarbeitungszeit, stellt dies jedoch einen effektiven Weg dar, Rauschen zu minimieren, ohne Defektstrukturen zu verlieren. Zusätzlich werden Pixel erkannt, deren Werte über die Dunkelbildserie ungewöhnlich stark schwanken. Hierzu wird die zeitliche Standardabweichung jeder Pixelposition ausgewertet. Räumliche Ausreißer und zeitlich stark rauschende Pixel werden anschließend zu einer gemeinsamen Bad-Pixel-Maske kombiniert.

Bei der späteren Analyse werden die markierten Pixel durch Werte eines lokalen 3×3 -Medianbildes ersetzt. Gleichzeitig werden ihre Positionen aus der Defektsegmentierung ausgeschlossen. Das gemittelte Dunkelbild wird dabei nicht vom Analysebild subtrahiert, es dient ausschließlich zur Erkennung der unzuverlässigen Sensorpixel. Das aktive Kalibrierprofil wird zur Laufzeit im Arbeitsspeicher gehalten und kann nur auf Bilder mit denselben Abmessungen angewandt werden.

4.2.2. ROI-Bestimmung

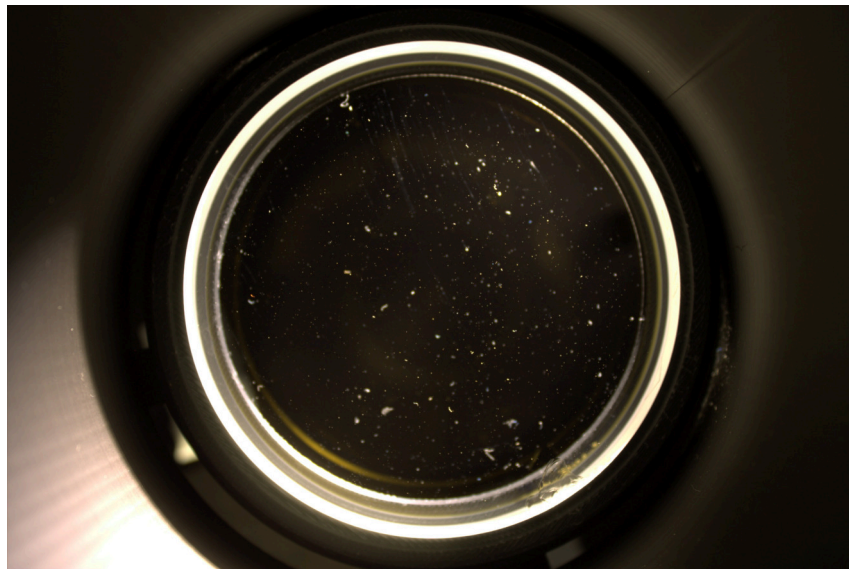
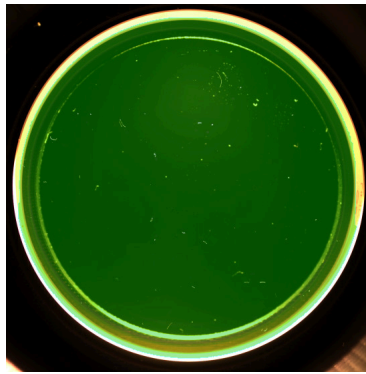
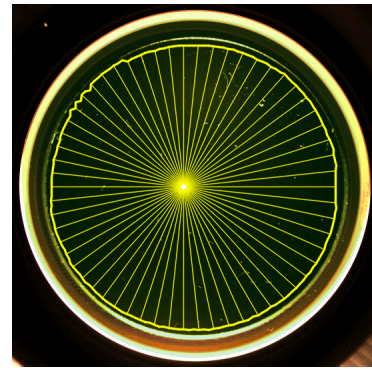
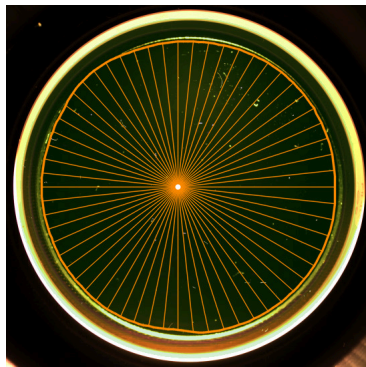


Abbildung 23: Bildausgabe der Kamera.

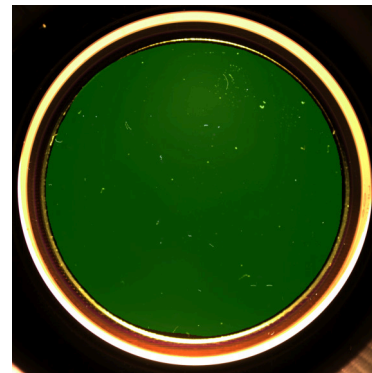
Wie in Abbildung 23 zu erkennen ist, besteht das aufgenommene Bild nicht nur aus der Fläche, die analysiert werden soll, sondern auch aus ungewollten Bereichen, die die Analyse verfälschen können. Somit sollte das zu analysierende Bild nur aus der Innenfläche der Optik bestehen. Es muss die *Region of Interest* (ROI) erkannt und ausgeschnitten werden. Als erster Ansatz wurde hierfür ein *flood-fill*-Algorithmus untersucht. Aufgrund seiner starken Abhängigkeit von lokalen Helligkeitsunterschieden erwies sich dieses Verfahren unter den vorliegenden Beleuchtungsbedingungen jedoch als nicht ausreichend robust. Die Funktionsweise, die untersuchten Schwellwerte und die daraus resultierenden Fehlsegmentierungen sind im Anhang in Abschnitt A.3 dokumentiert. Für die eigentliche ROI-Bestimmung wird daher das nachfolgend beschriebene mehrstufige Verfahren eingesetzt.

(a) *watershed* -Algorithmus

(b) Radialsearch durch Farbe und Helligkeit



(c) Radialsearch mit Maximalglättung



(d) Berechnete Innenmaske

Abbildung 24: Vergleich der Verarbeitungsschritte.

Aufgrund der komplexen Beleuchtungsverhältnisse wird hier ein umfangreicherer, aus mehreren Teilprozessen bestehender Algorithmus implementiert. Zuerst wird das Bild herunterskaliert, um Rechenleistung einzusparen. Dadurch führen größere Defekte nicht zu falschen Bereichserkennungen und die ROI-Erkennung läuft schneller. Statt des *flood-fill*-Algorithmus wird ein *watershed*-Algorithmus verwendet. Dieser sucht nicht nach Übergangsdifferenz, sondern bestimmt Flächen durch geschlossene Kanten. Dadurch wirkt dieser Algorithmus deutlich robuster gegen Helligkeitsunterschiede im Hintergrund oder auf der Optik als der *flood-fill*-Algorithmus, stößt aber auf ähnliche Probleme an den Rändern, wie in Abbildung 24 (a) zu erkennen ist. Somit wird der *watershed*-Algorithmus als Grundlage verwendet, benötigt aber noch weitere Verarbeitungsschritte. Um das in Abbildung 24 (a) gezeigte Problem zu lösen, wird von der Bildmitte aus ein Radialsearch-Algorithmus implementiert. Die Mitte kann als Startpunkt verwendet werden, da durch den Aufbau garantiert ist, dass der Bildmittelpunkt im Inneren der Optik liegt. Das Verfahren führt einmal im Kreis eine Anzahl von 180 Zweigen nach außen. Pro Zweig wird geprüft, ob dieser nur im Bereich des Randes von der *watershed*-Maske auf Helligkeits- oder Farbunterschiede trifft. Der Algorithmus wird also als Vorfilter genutzt, um den genaueren Suchbereich einzuschränken. Helligkeits- oder Farbunterschiede werden im Vergleich zum Umfeld gewertet und müssen Unterstützung um sich haben. Dabei wird ein Punkt erst als Treffer akzeptiert, wenn 50 % der anliegenden Pixel über einem adaptiv bestimmten Schwellwert liegen, welcher sich aus Helligkeitsgradienten, Farbdifferenz und Kantenalgorithmen zusammensetzt. Trifft der Zweig im Endbereich der Maske auf einen

Bereich, der ein Randstück sein könnte, fügt er die Koordinaten in eine Liste hinzu. Ist diese leer, wird ein Interpolationswert angenommen. Enthält die Liste Werte, wird anhand von festen Werten eine Schätzung der Position abgegeben. Die Koordinaten der Treffpunkte, die den Schätzungen am nächsten sind, werden als Randpunkte aufgenommen. Als Ergebnis erhält man eine kreisähnliche Form, wie in Abbildung 24 (b) zu erkennen. Um den Verlauf abzurunden, wird dann in einem Window von 15 Werten in jede Richtung um jeden Zweig der Median gebildet, wodurch man Abbildung 24 (c) erhält. Das Bild (d) zeigt die daraus entstehende Maske, die den ROI, also den Innenbereich der Optik, abbildet.

4.2.3. Skalierungsfaktor

Da der Aufbau auf andere Kameras umrüstbar sein soll, sollten nicht alle Schwellwerte pixelabhängig sein, sondern von einer metrischen Maßeinheit; es wird also eine Skalierung benötigt. Der gängige Weg ist, einen bekannten Abstand zweier Punkte in Pixeln auszumessen und daraus eine Auflösung zu bestimmen. Es wird davon abgesehen, diese Punkte fest in den Aufbau zu integrieren, um den Einsatz möglichst universell zu gestalten. Stattdessen werden die bekannten Dimensionen jeder Optik genutzt, um eine Skalierung zu berechnen. Wie in Abbildung 24 zu erkennen ist, umfasst die Maske näherungsweise den Innenradius bis zur Auflagefläche der Optik. Die äußere Kante der Optik eignet sich als robuster Messbereich. Aus diesem Grund wird eine zweite Maske um die äußere Optikkante als sinnvoller und robuster angesehen als eine Einschätzung auf Basis der aktuellen Maske aus Abschnitt 4.2.2. Diese Maske kann jedoch noch weiter verwendet werden, um den Rechenaufwand und die Verarbeitungszeit zu reduzieren. Der zuvor eingesetzte Algorithmus wurde bewusst nicht ebenfalls hier verwendet, da er für die Erkennung des Außenrings zu langsam und zu fehleranfällig ist. Da der Außenring stets eine deutlich erkennbare Kante aufweist, kann hierfür ein einfacherer und robusterer Ansatz verwendet werden.

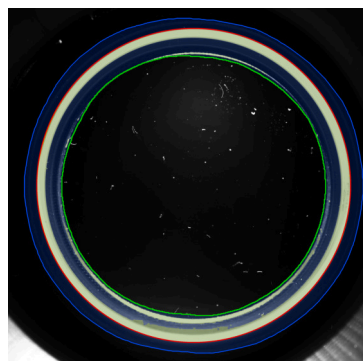


Abbildung 25: Algorithmus, um den Außenring zu finden:

Grün: ROI-Maske,

Blau: Suchband,

Rot: Kreisbildung der hellsten Punkte.

Der folgende Vorgang ist in Abbildung 25 dargestellt. Um die Innenmaske wird ein Ring mit einem größeren Radius gezogen, der je nach Auflösung skaliert wird. In diesem Bereich wird dann durch ein Thresholdverfahren der dynamisch hellste Anteil erkannt und herausgefiltert.

Diese Anteile werden dann durch morphologisches Öffnen und Schließen geglättet. Nun wird aus diesen Punkten der größtmögliche Kreis gebildet. Dabei wird darauf geachtet, dass einzelne Ausreißer diesen nicht stark vergrößern.

Nun kann der Durchmesser dieser Maske in Pixeln gemessen und mit dem vom Benutzer eingegebenen Wert zu einem Skalierungsfaktor der Einheit $\frac{\mu\text{m}}{\text{px}}$ umgerechnet werden (Formel Abschnitt A.2).

4.2.4. Beleuchtungshomogenisierung

Durch den in Abschnitt 4.1 dargestellten Aufbau kann nicht sichergestellt werden, dass eine homogene Beleuchtung der Optik vorliegt. Somit wird eine Korrektur in Form eines Beleuchtungsprofils des Hintergrundes benötigt, welches als Offset abgezogen werden kann.

Dazu muss das Bild geblurt werden, nur die generellen Helligkeitsinformationen sind im Folgenden wichtig. Dafür müssen die kleinen hier nicht relevanten Informationen, wie Defekte oder Rauschen, unterdrückt werden. Übrig bleibt also ein geglättetes Helligkeitsprofil des Hintergrundes. Für diese Anwendung wird ein Gaußfilter auf die innere Defektmaske angewendet, welcher in Abschnitt 3.2.1 erklärt wird. Dessen Blurgröße wird in einem Kernel festgelegt. Je größer der Kernel, desto weicher wird das Bild. Es ist also wichtig, die passende Größe zu wählen, damit Fehler auf der Optik verschwinden, die Grenzen der Helligkeit aber so klar wie möglich bleiben. Dieser wird, um unabhängig von der Bildauflösung zu agieren, in einer relativen Größe angegeben und sollte größer als der größte Fehler und deutlich kleiner als die gesamte Optik sein. In diesem Programm beträgt die Kernelgröße pro Kantenseite 4,5 % des Optikdurchmessers, wie in Gleichung 2 und Gleichung 3 berechnet wird. Dabei ist K die Kernelgröße, m sind die Kantenlängen des Kernels und d der Durchmesser in px der Optik.

$$m = \text{round}_{\text{ungerade}}(0,045d_{\text{px}}) \quad (2)$$

$$K = m \times m \quad (3)$$

Da der Filter nicht auf das gesamte Bild angewendet wird, sondern auf die ausgeschnittene Maske, werden die Bereiche außerhalb der Maske mit dem Wert 0 bewertet. Durch die Größe des Kernels verfälscht diese 0 die Werte am Rand, sie werden kleiner als sie eigentlich sein sollten. Um diesen Effekt zu verringern, wird auch von der binären Maske ein weiches Float-Bild erzeugt. Dieses Bild enthält Werte zwischen 0 und 1, welche sich am Rand durch den gerade beschriebenen Effekt der 0 annähern. Somit berechnet sich die Schätzung des Hintergrundprofils folgendermaßen:

$$B = \frac{G_{\sigma}(I \odot M)}{G_{\sigma}(M) + \varepsilon} \quad (4)$$

Dabei bezeichnet ε eine sehr kleine Zahl gegen die Division durch 0, I das Grauwertbild, M die binäre Prüfmaske, G_{σ} die Gauß-Glättung, B das geschätzte Hintergrundprofil und $\odot$ beschreibt eine elementarweise Multiplikation.

So erhält man das geschätzte Hintergrundprofil, mit welchem man das Bild korrigieren kann. Zieht man diese Hintergrundwerte nun von dem normalen Bild ab, erhält man grundsätzlich Werte um 0 herum. Da hierbei Pixelwerte kleiner als null entstehen können, gehen potenziell Informationen verloren. Eine grundlegende Helligkeit muss also addiert werden. Nun kann die Schätzung B vom ursprünglichen Bild I abgezogen werden, wie Gleichung 5 zeigt.

$$I_{\text{korrigiert}} = I - B + \text{median}(I[M]) \quad (5)$$

Dabei wird das geschätzte Hintergrundprofil B vom Grauwertbild I abgezogen. Der Median der durch M ausgewählten Bildwerte wird anschließend addiert, um das globale Helligkeitsniveau zu erhalten.

Somit erhält man ein Bild mit korrigierten Helligkeitswerten in der Analysefläche, wodurch falsche Beleuchtungswinkel nicht zu einer fehlerhaften Erkennung von Defekten führen, wie in Abbildung 26 zu sehen ist.

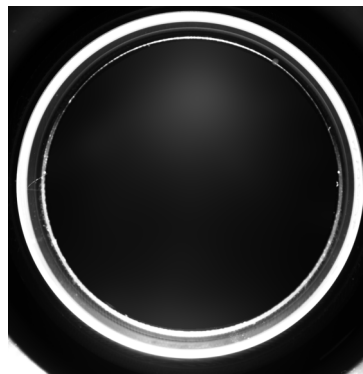


Abbildung 26: Ergebnis der Blurfunktion nach Korrektur.

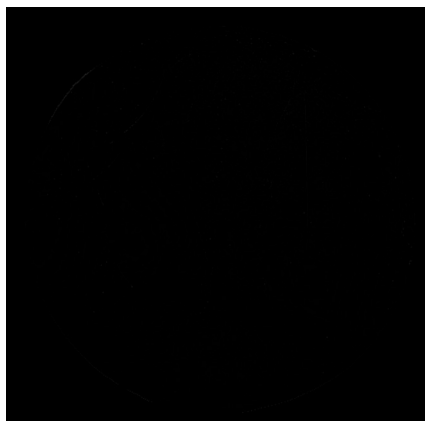
4.2.5. Fehlermaske

Das gemittelte und korrigierte Fehlerbild, aus dem die Defekte extrahiert werden sollen, sowie die ROI-Maske liegen nun vor. Da die Fehler als Helligkeitsabweichung auf dem Bild deutlich sind, wird es in ein Graustufenbild umgewandelt, um Verarbeitungszeit einzusparen. Zusätzlich wird dieses Bild außerhalb der ROI-Maske ausgeschnitten, nur der Innenbereich der Optik wird also analysiert. Dazu werden mittels eines Threshold-Verfahrens die hellsten Defekte herausgefiltert und als Fehler erkannt. Die Helligkeit dieser Fehler variiert dabei stark infolge unterschiedlicher Form und Größe. Ein dünner Kratzer hat meist eine deutlich kleinere Streuung als ein Punktdefekt. Behandelt man sehr helle und leicht erhellte Pixel gleich, so werden nur die sehr hellen Punkte mit einbegriffen. Aus diesem Grund erfolgt die Auswertung in zwei Helligkeitsstufen, einer für stark ausgeprägte und einer für schwächer ausgeprägte Defekte.



Abbildung 27: Darstellung der Maske von sehr hellen Pixeln.

Zuerst werden die sehr hellen Strukturen erkannt und herausgefiltert, dargestellt in Abbildung 27. Dafür wird ein Threshold bestimmt, welcher die hellsten 2 % bis 3 % abdeckt. Aus diesen Teilen wird dann eine neue Binärmaske gebaut. Diese erkannten hellen Pixel werden komprimiert, damit sie nicht den zweiten Kanal, mit leicht erhellten Bereichen, dominieren. Dafür wird ein $m \times m$ -Pixelfeld um jeden hellen Pixel und der helle Pixel selbst gelöscht. Dies ist nötig, da sonst ein leuchtender Bereich um den Fehler übrig bleibt und das Ergebnis des zweiten Kanals verfälschen würde.



Ausgeschnittene Pixel



Kontrastspreizung bzw. normalisiertes Bild

Abbildung 28: Darstellung der Maske von erhellten Pixeln.

Anschließend wird auf dieses komprimierte Bild eine Top-Hat-Transformation angewendet. Wie bereits in Abschnitt 3.2.1 erklärt, filtert diese kleine erhellte Strukturen heraus. Da diese Strukturen jedoch keine hohe absolute Helligkeit aufweisen, wirkt das erzeugte Bild fast komplett schwarz. Eine Kontrastspreizung oder Normalisierung ist nötig. Entzerrt man allerdings nur die Graustufen, übernimmt Rauschen die Dominanz. Somit muss noch eine Untergrenze hinzugefügt werden, unter welcher Werte nicht normalisiert, sondern ignoriert werden. Man erhält eine *Scoremap* mit Werten zwischen 0 und 255. Nun kann diese Maske in eine Binärmaske umgewandelt werden, alle übrigen Pixel mit einem Wert über 0 werden auf 1 maximiert. Das Ergebnis ist in Abbildung 28 links dargestellt. Anschließend werden beide Binärmasken zu einer kombiniert, in der die sehr hellen und erhellten Flächen gleichwertig behandelt werden, das Ergebnis ist in Abbildung 29 zu sehen. Durch die Trennung kann gewährleistet werden,

dass die erhellten Strukturen nicht vernachlässigt werden und die sehr hellen Strukturen das Bild übernehmen.

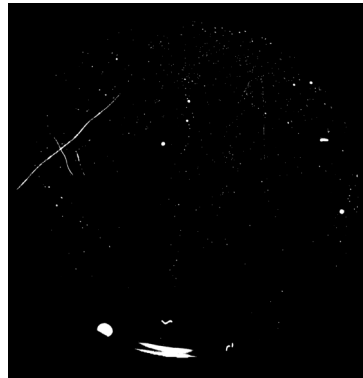
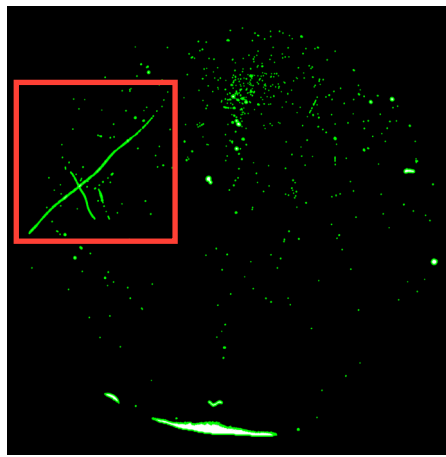


Abbildung 29: Darstellung der Kombination der Masken.

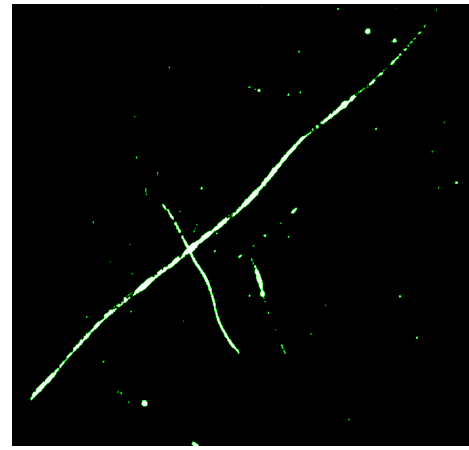
4.2.6. Fehlerextrahierung

Nun liegt eine Maske vor, in der interessante Stellen mit dem Wert „1“ und der Hintergrund mit dem Wert „0“ markiert sind. Daraus müssen nun zusammenhängende Punkte herausgezogen und als mögliche Fehlerstelle eingeordnet werden. Dazu wird die Funktion *findContours* der Pythonbibliothek *cv2* verwendet. Der Konturenalgorithmus bestimmt die äußeren Begrenzungen der zusammenhängenden Bereiche, wie in Abbildung 30 links zu erkennen ist. Dadurch können einzelne Fehlerregionen voneinander getrennt und anschließend geometrisch ausgewertet werden. Der große Nachteil ist, dass eine Fläche zusammenhängend sein muss, damit diese auch als solche erkannt wird. Hat ein Kratzer also eine ungleiche Ausprägung und ist dadurch kurz unterbrochen, so wird dieser nicht als eine Kontur, sondern als mehrere erkannt. Wie in Abschnitt 3.2.1 erwähnt, können morphologische Operationen kleine Lücken schließen, jedoch kann nicht gewährleistet werden, dass nicht ungewollt nah beieinander liegende Strukturen als eine gezählt werden. Deswegen wurde darauf verzichtet und versucht, im späteren Verlauf Ausreißer zu erkennen und zusammenzufügen, wie in Abschnitt 4.2.9 beschrieben.

Um jede zusammenhängende Kontur wird eine achsenparallele Bounding-Box gelegt. Sie umschließt den gesamten Defekt und liefert Merkmale wie Breite, Höhe, Fläche und Position. Diese Informationen können beispielsweise zur Klassifizierung des Defekts genutzt werden.



Konturenalgorithmus auf ganzem Bild



Ausschnitt einer Kontur eines Kratzers

Abbildung 30: Darstellung des Kontur-Algorithmus

4.2.7. Klassifizierung

Der Ansatz, KI einzusetzen, um Defekte zu klassifizieren, wurde im Verlauf der Arbeit geprüft. Jedoch zeigte sich, dass das Labeln der Daten zu zeitintensiv ist und für diesen kurzen Zeitraum nicht zielorientiert skaliert werden kann. Daher wurde diese Arbeit nicht primär auf den Einsatz von KI ausgerichtet, sondern der Fokus auf merkmalsbasierte Algorithmen gesetzt, welche in Abschnitt 3.3.2 näher beleuchtet wurden. Dabei wird sich eng an die Klassifikation der Defekte nach ISO-Norm 10110-7 orientiert (Abschnitt 3.3.1). Es wurde eine Gruppe der großflächigen Fehler hinzugefügt, welche nicht in der ISO-Norm definiert wird, um Laufzeit zu optimieren und Defekte, welche in der ISO-Norm nicht definiert sind, wie beispielsweise Fingerabdrücke, zu erkennen. Ebenfalls wird diese Gruppe genutzt, um Randaussprünge zu erkennen. Es sind also örtlich begrenzte Defekte, Kratzer und Randaussprünge als grundsätzliche Eingruppierungen relevant.

Aus den *Bounding-Boxen* lassen sich Werte wie Fläche, Position, Seitenverhältnis, Rundheit, mittlere Intensität und Ausfüllung bewerten. Aus der Maske lassen sich mit der Funktion *skeletonize* [20] Skelette extrahieren. Sie dünnt die Formen in der Maske aus, bis nur noch eine Struktur übrig bleibt, welche genau einen Pixel breit ist. Dadurch können Länge, Endpunkte, Verzweigungen und Geradheit bestimmt werden. Durch die so gewonnenen Informationen kann man nun eine Klasseneinteilung nach ISO-Norm 10110-7 vornehmen. Zur Einteilung in die drei Gruppen werden die bereits genannten Geometriemerkmale herangezogen und ein heuristischer Score berechnet. Er gibt eine geschätzte Sicherheit für die jeweilige Gruppe an und kann für eine Einteilung herangezogen werden. Zuerst wird jeder Kratzer unabhängig von der Länge als solcher eingeteilt. Nach der in Abschnitt 4.2.9 beschriebenen Gruppierung und der in Abschnitt 4.2.10 dargestellten Ausmessung wird anhand der gesamten Länge entschieden, ob es sich auch nach ISO-Norm 10110-7 um einen Kratzer handelt. Sollte der Kratzer unter 2 mm sein, wird der Defekt der Gruppe der örtlich begrenzten Oberflächendefekte zugeordnet. Liegt die Länge mindestens bei 2 mm, wird der Defekt der finalen Gruppe der Kratzer zugeteilt.

Nun sollen noch Randaussprünge klassifiziert werden. Dies ist eine kompliziertere Aufgabe, da diese sich meistens aus sehr vielen Defekten zusammensetzen. Durch die Helligkeitsuntersuchung ist meist ein Umriss des Defektes zu erkennen, in welchen zusätzlich viele kleine Risse und Punktdefekte liegen. Somit müssen viele Fehler auf kleiner Fläche zu einem Fehler zusammengezählt werden. Dabei wird ein großflächiger Fehler durch eine Abstandsregel bestimmt. Sind mehrere Defekte sehr nah beieinander, so wird dieser Fehler zu einem großflächigen Fehler. Zusätzlich wird ein einzelner sehr großer Fehler auch als großflächiger Fehler erkannt und eingeordnet. Befindet sich dieser großflächige Fehler sehr nah am Rand der Inspektionsmaske und hat eine große Verbindung mit dieser, so wird der erkannte Defekt als Randaussprung eingeordnet. Dies ist wichtig, da sich die Messung der Fehlerfläche für Randaussprünge maßgeblich unterscheidet. Liegt der großflächige Defekt vom Rand entfernt, bleibt er in der Gruppe der großflächigen Defekte.

4.2.8. Fokusfilter

Aus der Fehlerextrahierung (siehe Abschnitt 4.2.6) erhält man alle Stellen, welche sich von der Helligkeit des Hintergrunds abheben. Die Kamera, die Art der Beleuchtung und die Art der Optiken führen jedoch dazu, dass größere Fehler auf der Rückseite der Optik ebenfalls als Fehler erkannt werden können. Da bei der Inspektion die Fehler je Seite von großer Bedeutung sind, müssen insbesondere Defekte auf der Rückseite zuverlässig erkannt und aussortiert werden. Gleichzeitig erhöht dieser Schritt die Verarbeitungsgeschwindigkeit, da sich die Anzahl der anschließend zu analysierenden Punkte deutlich reduziert.

Dünne Kratzer gelten als *protected* und können vom Fokusalgorithmus nicht entfernt werden, da ihre Zuteilung meist fehlerhaft ist. Diese haben durch ihre Entstehung meist glatte Übergänge und haben eine unregelmäßige Helligkeit. Diese Punkte würden zu einem Ausschluss führen. Da diese Kratzer aber sehr dünn sind, ist davon auszugehen, dass sie auf einem Bild nicht zu erkennen sind, welches die andere Oberflächenseite beleuchtet.



Abbildung 31: Darstellung eines Defekts auf der Rückseite.
Umkreist ist ein Defekt mit Halo auf der Rückseite.

Ein Mittel, um die Punkte auf der Rückseite von jenen auf der Vorderseite zu unterscheiden, ist die Schärfentiefe. Wie in Abschnitt 4.1.3 erklärt, ist eine möglichst offene Blende wichtig, da diese den Effekt der Schärfentiefe maßgeblich beeinflusst. Die Blende sollte also so offen

wie möglich sein. Wie in Abbildung 31 zu erkennen ist, haben unscharfe Punkte auf der Rückseite eine langsame Übergangskante zum Hintergrund. Ebenfalls weisen viele Punkte auf der Rückseite der Optik einen *Halo* auf, also einen erhellten Kreis, welcher sich um den eigentlichen Punkt herum begibt.

Ein Fokuswert jedes Defekts lässt sich aus der Anwendung des Sobel- und des Laplace-Operators ermitteln. Grundsätzlich lässt sich die Annahme treffen, dass ein Punkt, der sich im Fokus befindet, wegen scharfer Kanten viele Änderungen und wenig weiche Übergänge beinhaltet. Der Sobel-Operator approximiert die erste Ableitung der Bildintensität und liefert ein Maß für lokale Kantenstärke. Der Laplace-Operator approximiert hingegen die zweite Ableitung und reagiert somit besonders auf feine Änderungen im Bildbereich.

In unscharfen Bildbereichen werden lokale Intensitätsänderungen typischerweise abgeschwächt, wodurch die Antworten des Sobel- und des Laplace-Operators in der Regel geringer ausfallen. Der Sobel-Operator wird dabei zur Bewertung ausgeprägter Intensitätsübergänge am Rand des Defekts verwendet, während der Laplace-Operator schnelle lokale Intensitätsänderungen innerhalb des Defekts und in dessen Randbereich erfasst. Aus den gewichteten Kennwerten beider Operatoren wird ein gemeinsamer Fokuswert gebildet. Wie in Abbildung 31 dargestellt, können durch Halos starke Intensitätsübergänge entstehen, die von beiden Operatoren als scharfe Bildstrukturen erfasst werden. Eine hohe Operatorantwort allein stellt daher keinen eindeutigen Nachweis für einen fokussierten Defekt dar. Aus diesem Grund wird der Fokuswert zusätzlich ins Verhältnis zur Bildstruktur der unmittelbaren Umgebung und zum Kontrast zwischen Defekt und Hintergrund gesetzt. Auf Grundlage des absoluten und des relativen Fokuswerts wird anschließend bewertet, ob der Defekt als unscharf einzustufen ist.

4.2.9. Kratzergruppierung

Kratzer müssen gesondert behandelt werden. Über ihre Länge können sich die Hintergrundverhältnisse und auch der Defekt selbst verändern. Dies führt zu variablen Reflexionen. Wie bereits in Abschnitt 4.2.6 beschrieben, wird ein Fehler dadurch nicht immer als einzelner Defekt erkannt. Einzelne Teilstücke können sogar vollständig im Bild verschwinden. Wie in Abschnitt 4.2.8 erklärt, besteht auch das Problem, dass dünne Kratzer oft fehlerhaft in den falschen Fokusbereich eingeteilt werden. Dadurch benötigt es eine Einschätzung für eine Zusammenführung von Kratzern vor dem Fokusalgorithmus.

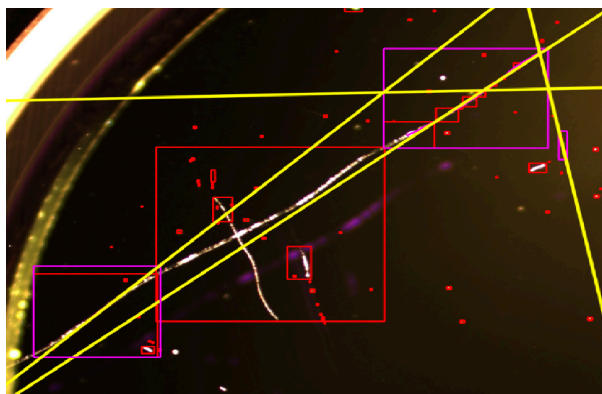


Abbildung 32: Beispiel des RANSAC-Verfahrens.

Im ersten Schritt werden mögliche Linienkandidaten für Kratzer mithilfe eines angepassten RANSAC-Verfahrens identifiziert, wie in Abbildung 32 dargestellt. RANSAC steht für *random sample consensus*, also für die Übereinstimmung mit einer zufälligen Stichprobe. Beim klassischen RANSAC-Verfahren werden wiederholt zwei zufällige Punkte, auch Anker genannt, aus einer Datenmenge ausgewählt und zur Bildung eines Modells verwendet, in diesem Fall einer Geraden. Anschließend wird geprüft, wie viele weitere Punkte innerhalb eines festgelegten Abstands zu diesem Modell liegen. Diese Punkte werden als *Inlier* bezeichnet. Die Modelle werden anhand der Anzahl ihrer *Inlier* bewertet [21].

Für die Kratzergruppierung wird dieses Vorgehen angepasst. Für jeden Anker wird aus dem Defektmittelpunkt und einem Richtungsvektor eine Geradenhypothese gebildet. Ist ein Defekt annähernd punktförmig und besitzt daher keine zuverlässig messbare Richtung, wird die Winkelabweichung bei der Bewertung nicht berücksichtigt, der Punkt kann somit zusätzlich nicht als Anker gelten. Anschließend werden alle Defekte ermittelt, deren Abstand zur Geraden unterhalb eines definierten Abstandes liegt. Sofern eine zuverlässige Defektorientierung vorliegt, muss zusätzlich die Winkelabweichung zur Modellrichtung ausreichend klein sein.

Da eine Gerade auch weit voneinander entfernte Defekte erfassen kann, werden die zugehörigen Punkte anschließend räumlich geclustert. Für jeden Cluster wird überprüft, ob er ausreichend nah an der Geraden liegt und genügend Unterstützungspunkte enthält. Da ein Cluster mehrere Geradenhypothesen unterstützen kann, erhält jeder Cluster eine eindeutige ID. Werden mehrere Modelle durch denselben Cluster gestützt, wird nur das am besten bewertete Modell beibehalten.

Die verbleibenden Modelle erhalten abhängig von der Anzahl ihrer Unterstützungspunkte einen *Protected*-Status. Dadurch werden die zugehörigen Defekte nicht durch den Fokusfilter entfernt. Nachdem alle außerhalb des Fokus liegenden und nicht geschützten Defekte aussortiert wurden, wird die Kratzergruppierung erneut auf die verbleibenden Defekte angewendet. Auf diese Weise bleiben sowohl Kratzersegmente im korrekten Fokusbereich als auch ausreichend stark unterstützte Segmente erhalten.

Abschließend werden alle Kratzerkandidaten nach der Anzahl ihrer Unterstützungspunkte sortiert. Doppelte oder überlappende Kandidaten werden identifiziert und anschließend entfernt oder zu einem gemeinsamen Kratzermodell zusammengeführt.

4.2.10. Ausmessung der Fehler

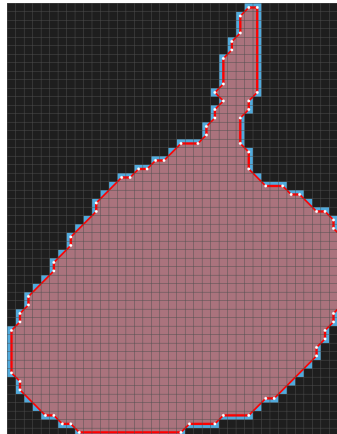


Abbildung 33: Messung von Pixeln einer Kontur.

Rot: cv2-Funktion `contourArea(cnt)`

Blau: Manuelle Pixelzählung.

Die Ausmessung der Fehler differenziert zwischen Kratzern, räumlich begrenzten Defekten und Randaussprüngen. Die Vermessung ist dabei ein zentraler Punkt, der entscheidet, ob eine Optik als fehlerhaft gilt oder nicht. Natürlich ist diese stark von der Auflösung des Fotos abhängig und trifft somit auf die Grenzen der Kamera und des Fotos.

Die Messung für räumlich begrenzte Defekte erfolgt über eine Zählung von Pixeln. Abschnitt 4.2.6 beschreibt bereits die Extrahierung der einzelnen Kontur eines Fehlers, welche genutzt werden kann, um die Fläche zu bestimmen. Die Bibliothek OpenCV stellt zur Flächenbestimmung einer Kontur die Funktion `contourArea(cnt)` bereit. Die in Abbildung 33 rot dargestellte Umrandung wird zuvor aus den erkannten Konturpunkten erzeugt, `contourArea(cnt)` berechnet anschließend die von dieser Kontur eingeschlossene Fläche. Dabei entspricht das Ergebnis nicht zwangsläufig der Anzahl der eingeschlossenen Bildpixel. Stattdessen werden die Konturpunkte als Eckpunkte eines Polygons interpretiert und dessen kontinuierliche Fläche mathematisch bestimmt. Aufgrund der diskreten Auflösung des Rasterbildes kann sich dieser Wert geringfügig von der durch Zählen der zugehörigen Pixel bestimmten Fläche unterscheiden [22]. Abbildung 33 zeigt in blau die gezählte Fläche, welche durch die Zählung von weißen Pixeln gemessen wird. Die Größe eines Fehlers wird also etwas zu groß eingeschätzt, sodass die Bewertung als eher konservativ anzusehen ist. Da eine Überschätzung der Defektfläche weniger kritisch ist als eine Unterschätzung, wird die Fläche durch das Zählen der zugehörigen Pixel bestimmt.

Zählt man allerdings nur die Pixel, führt der in Abschnitt 4.1.3 beschriebene Punkt des *Glowings* zu einer gravierenden Überbewertung. Dem wird entgegengewirkt, indem aus jedem Fehler der hellste Punkt als *Center* gewählt und um diesen herum eine Intensitätskarte gebaut wird, welche aus den Grauwerten der Pixel besteht. Aus dieser wird ein Schwellwert bestimmt, welche Punkte noch zum *Core* gehören. „Glüht“ ein Fehler, so zeigt die Intensitätskarte einen langsamen Verlauf nach außen. Der festgelegte Schwellwert wird also ab einem bestimmten Punkt unterschritten und die Fläche eingeschränkt. Diese Methode wirkt sich positiv auf den

Einfluss von *Halos* und dem beschriebenen *Glow* aus, kann aber nicht vollständig einer Überbewertung entgegenwirken. Sollten in der *Bounding-Box* eines Defekts noch andere helle Pixel vorhanden sein, werden diese ignoriert, solange sie nicht direkt mit der Defektstruktur verbunden sind. So wird eine Doppelmessung oder ungewollte Vergrößerung vermieden. Die ISO-Klasse erhält man durch das Ziehen der Quadratwurzel von der Fläche, welche man durch den Prozess erhält.

Die Breitenmessung von Kratzern ist grundsätzlich anders aufgebaut. Der Ansatz, die Fläche auf gleiche Art zu bestimmen und durch die Länge zu teilen, ist zwar möglich, aber fehleranfällig. Zuerst wird, ähnlich wie bei den räumlich begrenzten Defekten, die größte Kontur in einer *Bounding-Box* gewählt, um keine Fremdpixel in die Messung mit einwirken zu lassen. Auch hier wird wieder auf den Kratzer die bereits erwähnte Skelett-Funktion angewendet, um die Mittellinie des Kratzers zu erhalten. Da Fremdpixel an der Kontur des Kratzers anhaften können oder ein Kratzer kleine Abzweigungen haben kann, wird vor der Messung der längste Weg entlang des Skeletts gesucht. Dies verhindert, dass der Algorithmus fremde Randabsprünge eines Kratzers einbezieht und gibt ebenfalls einen Wert für die Länge des Kratzers zurück. Einen Entfernungswert pro Pixel liefert dabei die CV2-Funktion *distanceTransform*, welche auf der Kontur angewendet wird. Nun wird für jeden Pixel eine Normale zum Skelett gebildet und die Distanzfunktion darübergelegt. Die am weitesten entfernten Punkte auf der Normale, die ebenfalls einen Distanzwert besitzen, werden als Breite angenommen. Diese Messung muss auf beiden Seiten des Pixels durchgeführt werden. Somit erhält man die Breite des Kratzers, wodurch eine ISO-Klasse zugewiesen werden kann. Zusätzlich, zur Berechnung der Gesamtdefektfläche der Optik, wird wie bei einem räumlich begrenzten Defekt die Defektfläche des Kratzers ermittelt. Die Länge wird genutzt, um eine Einteilung in die ISO-Gruppe, also ob Kratzer oder nicht, vorzunehmen.

Bei den Randaussprüngen ist laut ISO-Norm 10110-7 der Abstand vom Rand der Optik zum Punkt des Sprungs, der am weitesten entfernt ist, relevant. Durch die erstellten ROI-Masken in Abschnitt 4.2.2 ist dieser Rand genau bekannt. Nun kann wieder auf die Funktion *distanceTransform* zurückgegriffen werden, welche für jeden Pixel in der *Bounding-Box* einen Distanzwert liefert. Damit kann dann der Punkt gesucht werden, welcher noch in der Defektkontur liegt und am weitesten vom Rand der Optik entfernt ist. Diese Distanz wird dann genutzt, um dem Defekt eine ISO-Klasse zuzuteilen.

4.2.11. Interne Kommunikation

Da die Benutzeroberfläche kein zentrales Ziel dieser Arbeit ist, sondern nur dazu dient, die Kommunikation mit dem Benutzer sicherzustellen, wurde diese KI-unterstützt aufgebaut. Dafür wurde ChatGPT 5.5 verwendet. Vorgegeben wurde dabei die Kommunikationslogik sowie die Implementierungen im Backend. Lediglich die Benutzeroberfläche und deren Funktionsweise wurden mit KI-Unterstützung erzeugt.

Die Anwendung wird dabei als lokal ausgeführte Client-Server-Lösung umgesetzt. Dabei stellt das Backend einen lokalen HTTP-Server mit geeigneten Schnittstellen für die jeweilige Funktion zur Verfügung. Wählt der Nutzer Aktionen aus, wie zum Beispiel die Durchführung

einer Analyse, so sendet das Frontend eine HTTP-Anfrage an das Python-Backend. Dieses verarbeitet die Anfrage und sendet währenddessen Statusmeldungen über den Fortschritt des Ablaufs. Ist die zugeteilte Aufgabe bearbeitet, liefert das Backend ein Ergebnis in Form von Bildern, JSON-Dateien oder direktem HTML-Code. Die gesamte Kommunikation läuft dabei pollingbasiert ab, damit keine blockierenden Zustände entstehen können und zeitintensive Prozesse, wie die Bildaufnahme, parallel abgearbeitet werden können. Abbildung 34 stellt den Kommunikationsablauf zwischen dem Frontend und dem Backend dar.

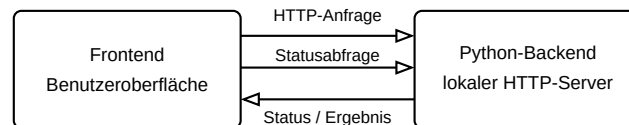


Abbildung 34: Vereinfachte Kommunikation zwischen Frontend und Backend.

4.3. Lernbasierte Ansätze in der Arbeit

Im Rahmen dieser Arbeit soll ebenfalls untersucht werden, ob ein lernbasiertes Verfahren zur Klassifikation von Defekten eine sinnvolle Möglichkeit bietet. Aus zeitlichen Gründen und einer nicht hinreichenden Qualität der Bilder wird die Anwendung von künstlicher Intelligenz in diesem Bereich zwar getestet, aber so nicht implementiert.

Bei der Ausführung des in Abschnitt 4.2.7 beschriebenen Algorithmus wird deutlich, dass sehr kleine *Bounding-Boxen* teilweise zu unzureichenden Ergebnissen führen, da die Fläche nur wenige Pixel groß ist. Kleine Helligkeitsveränderungen in diesen Bereichen führen zu einem falschen Ergebnis. Dies führt zu einer Akzeptanz gegenüber Bildrauschen in sehr hellen Bereichen. Der lernbasierte Klassifikator überprüft solche Grenzfälle anhand zusätzlicher visueller Merkmale und des unmittelbaren Bildkontexts.

Dazu wird die bereits beschriebene „Export“-Funktion genutzt, welche die *Bounding Box* jedes Fehlers zu einem eigenen Bild formatiert, die Fläche auf das anderthalbfache erweitert und dann exportiert. Der Export legt jede Klasse als *unreviewed* fest, denn diese Klassen müssen händisch von einem Menschen eingetragen werden. Da es sich hierbei um ein binäres Problem handelt und ein Punkt entweder valide oder nicht valide ist, werden zwei Klassen benötigt. Defekte der Klasse *Good* werden als valide gezählt und beibehalten. Hintergrundrauschen, Defekte außerhalb des Fokus oder Reflexionen erhalten die Klasse *ignore*.

Durch den Export der bereits lokalisierten Defektkandidaten als einzelne *Crops* wird die Aufgabe der KI auf die reine Klassifikation reduziert. Das Modell muss die Defekte somit nicht selbst im Gesamtbild lokalisieren, sondern lediglich entscheiden, ob der jeweilige Bildausschnitt der Klasse *good* oder *ignore* zugeordnet werden soll. Dadurch kann sich das Modell gezielt auf die für die Klassifikation relevanten Bildmerkmale konzentrieren.

Als zugrundeliegendes Modell wird ein vortrainiertes ResNet-18 eingesetzt, welches auf das beschriebene Problem umtrainiert wird. Die ursprüngliche Ausgabeschicht des ResNet-18 wird durch eine neue Ausgabeschicht für die beiden Klassen *Good* und *Ignore* ersetzt. Für das Training werden ausschließlich manuell überprüfte Crops verwendet und in Trainings- und Validierungsdaten aufgeteilt.

Vor der Übergabe in das neuronale Netz werden die *Crops* auf 224×224 Pixel skaliert. Während des Trainings werden die Bilder durch Datenaugmentation leicht verändert, um die Abhängigkeit des Modells von einzelnen Aufnahmesituationen zu reduzieren und die Robustheit gegenüber unterschiedlichen Orientierungen und Beleuchtungssituationen zu erhöhen. Dazu werden die Trainingsbilder gedreht, gespiegelt und hinsichtlich Helligkeit und Kontrast variiert.

Die Bewertung des Modells erfolgt anhand des F1-Werts, der sich aus Präzision und Recall zusammensetzt. Die Präzision gibt an, wie viele der einer Klasse zugeordneten Bilder tatsächlich zu dieser Klasse gehören. Der Recall beschreibt hingegen, wie viele der tatsächlich vorhandenen *Crops* einer Klasse korrekt erkannt werden. Das trainierte Modell dient anschließend als zusätzliche Validierungsstufe, die vom regelbasierten Verfahren erkannte Kandidaten bestätigt oder verwirft. Werden also kleine Defekte, mit einer Pixelfläche unter 15 Pixeln, von dem in Abschnitt 4.2.8 beschriebenen Fokusfilter herausortiert, überprüft das trainierte Modell diese erneut und entscheidet, ob sie tatsächlich verworfen werden.

Aufgrund der begrenzten Anzahl und Qualität der verfügbaren Bilder sind die Ergebnisse ausschließlich als prototypischer Machbarkeitsnachweis zu verstehen. Eine belastbare Aussage über die Klassifikationsgenauigkeit oder die Verbesserung des Gesamtsystems ist auf dieser Grundlage nicht möglich. Der lernbasierte Klassifikator ist nicht Bestandteil der finalen Analysepipeline und wird nicht in die weitere Arbeit einbezogen. Für einen praktischen Einsatz wären insbesondere ein größerer fachlich gelabelter Datensatz, ein unabhängiger Testdatensatz und eine systematische Optimierung des Modells erforderlich. Diese Anwendung zeigt jedoch auch, dass lernbasierte Verfahren einen unterstützenden Nutzen in der dargestellten Pipeline haben können.

5. Evaluation und Grenzen

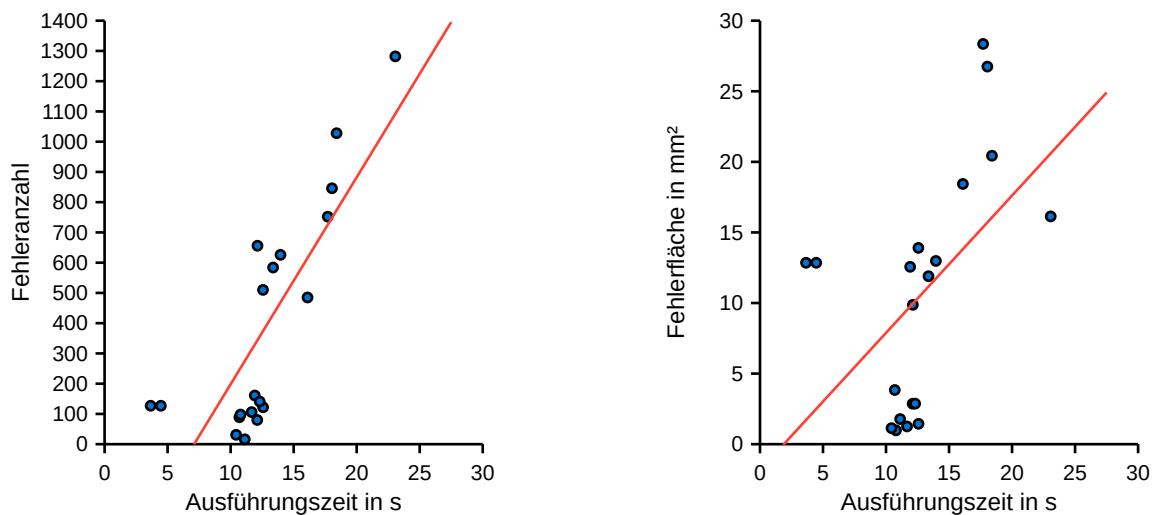
In diesem Kapitel werden der entwickelte Aufbau und die Software anhand mehrerer Aspekte bewertet. Zunächst werden die Verarbeitungszeit und die Gesamtprüfzeit des Systems ermittelt und mit der Dauer einer manuellen Untersuchung verglichen. Anschließend wird die Erkennungsleistung anhand manuell verifizierter Bilddaten bewertet. Die dabei gewonnenen Daten werden außerdem zur Beurteilung der Messgenauigkeit herangezogen. Da keine geeignete Referenz für die Klassifikation vorliegt, erfolgt deren Bewertung qualitativ. Abschließend werden die Wiederholbarkeit der Softwareauswertung und die Wiederholungsgenauigkeit der Bildaufnahme untersucht und daraus die praktische Einsatzfähigkeit des Systems abgeschätzt. Ziel der Evaluation ist es, eine Einschätzung darüber abzugeben, ob das System einen sinnvollen Einsatzbereich bietet.

Wenn nicht anders angegeben, beziehen sich alle Daten auf eine runde Optik mit einem Durchmesser von 80 mm, die als fehlerhaft eingestuft wurde. Die verwendete Optik enthält keine definierten Referenzdefekte. Daher konnte der Aufbau nicht anhand bekannter Fehlerstellen abgestimmt werden. Aus Kostengründen wurde darauf verzichtet, eine Referenzoptik, also eine ansonsten fehlerfreie Optik, mit definierten Fehlerstellen zu versehen. Dadurch ist die Aussagekraft der Evaluation eingeschränkt. Für eine umfassende Bewertung wären mehrere Vergleichsoptiken erforderlich gewesen, deren Herstellung den wirtschaftlichen Rahmen dieser Arbeit überschritten hätte. Die Optik wurde ausschließlich in einem Reinraum oder einer Flowbox ausgepackt, um den zusätzlichen Eintrag von Partikeln möglichst gering zu halten. Zudem wurden die im Verlauf der Arbeit ermittelten und als geeignet bewerteten Parameter verwendet, die in der Anwendung als Standardeinstellungen hinterlegt sind.

5.1. Zeitliche Bewertung

Alle zeitlichen Messungen wurden mit der in Abschnitt A.1 beschriebenen Hardware aufgenommen.

In Abschnitt 4.2.1 wurde bereits erläutert, dass mehrere Bilder nacheinander aufgenommen werden, um das Rauschen des Analysebildes zu reduzieren. Zusätzlich werden Dunkelbilder aufgenommen, die im Folgenden zur Kalibrierung dienen. Die Prüfzeit ist zwar keine Hauptanforderung des Systems, bei einem hohen Produktdurchsatz jedoch ein relevanter Faktor. Die Dauer der manuellen Untersuchung einer Optik mit einem Durchmesser von 80 mm einschließlich des gegebenenfalls erforderlichen Ausfüllens einer Defektkarte hängt vom Zustand der Optik ab. Nach Einschätzung der prüfenden Personen kann die Bewertung einer fehlerfreien Optik innerhalb weniger Sekunden erfolgen. Bei einer beschädigten Optik steigt der Aufwand, die geschätzte Prüfzeit liegt dann bei etwa 5 bis 10 Minuten.



(a) Fehleranzahl in Abhängigkeit von der Ausführungszeit

(b) Fehlerfläche in Abhängigkeit von der Ausführungszeit

Abbildung 35: Streudiagramme zur Abhängigkeit der Ausführungszeit von der Fehleranzahl sowie der gesamten Fehlerfläche. Die roten Linien zeigen jeweils die aus den Messpunkten berechneten linearen Trendlinien.

Die End-to-End-Prüfzeit beginnt mit dem Laden der Bilder in der Benutzeroberfläche und endet mit der vollständigen Anzeige und Speicherung der Ergebnisse.

Messreihe dargestellt in Abschnitt A.4.

Abbildung 35 zeigt die gemessenen Ausführungszeiten der durchgeführten Analysen. Wie bei der manuellen Kontrolle nimmt auch die Laufzeit des erstellten Analyseprogramms mit der Fehleranzahl zu. Sowohl eine höhere Fehleranzahl als auch eine größere Gesamtfehlerfläche führen zu längeren Verarbeitungszeiten. In den Testläufen liegt die Laufzeit zwischen 5 und 25 Sekunden. Für die Einordnung dieser Werte ist jedoch die Aufteilung der Laufzeit relevant, da die eigentliche Analyse nicht den größten Zeitanteil einnimmt.

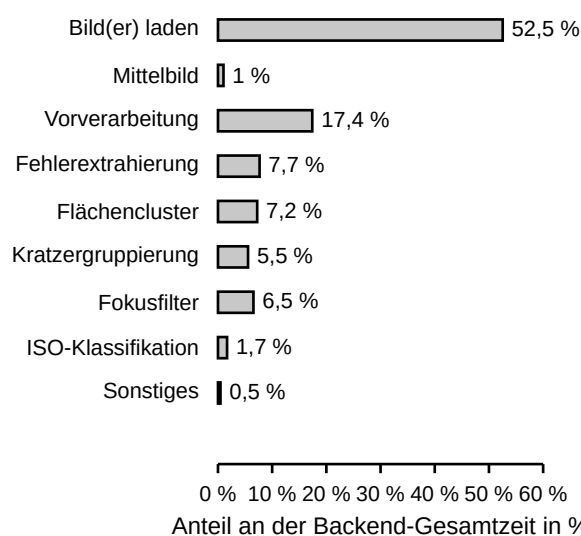


Abbildung 36: Prozentuale Laufzeitverteilung des Programms.

Wie Abbildung 36 zeigt, entfällt über die Hälfte der gesamten Laufzeit auf das Laden der Bild-daten. Das Optimierungspotenzial ist an dieser Stelle begrenzt, da bereits ein parallelisierter

Ablauf zum Laden der Bilder über mehrere Prozessorkerne integriert wurde. Da es sich um Rohbilder mit Dateigrößen zwischen 12 MB und 15 MB handelt, ist die gemessene Ladezeit nachvollziehbar und stellt einen nur eingeschränkt vermeidbaren Anteil der Gesamtlaufzeit dar. Die übrigen Prozessschritte liegen jeweils im Sekundenbereich, wobei die Vorverarbeitung etwas mehr Zeit beansprucht. In diesem Schritt werden die Masken und Filter erzeugt, was vergleichsweise rechenintensiv ist. Die übrigen implementierten Algorithmen weisen deutlich geringere Laufzeitanteile auf. Sämtliche Messdaten sind zusätzlich in Tabelle 9 aufgeführt.

Tabelle 1: Zeitliche Bewertung der Kameravorbereitung sowie der Bildaufnahme inklusive Kalibrierung.

Prozessschritt	n	Mittelwert	Min.	Max.
Kamera vorbereiten	15	2,69 s	2,34 s	4,14 s
Bildaufnahmen + Kalibrierung	15	31,87 s	30,90 s	32,60 s
Gesamtzeit	15	34,56 s	33,65 s	35,82 s

Für den Vergleich mit der manuellen Untersuchung müssen zusätzlich die Zeiten für die Bildaufnahme und Kalibrierung berücksichtigt werden. Mit den Standardeinstellungen beträgt diese Dauer im Mittel 34,56 Sekunden, wie in Tabelle 1 dargestellt. Dieser zusätzliche Zeitanteil hängt stark von der Übertragungsgeschwindigkeit der Kamera ab, die bereits in Abschnitt 4.1.1 erläutert wurde. Das verbleibende Optimierungspotenzial ist daher gering.

Der Vergleich zeigt, dass das Kamerasystem gegenüber der manuellen Untersuchung mit zunehmender Defektanzahl einen größeren Zeitvorteil bietet. Bei einer beschädigten Optik beträgt die Gesamtdauer einschließlich Aufnahme und Kalibrierung ungefähr 60 Sekunden und liegt damit deutlich unter der geschätzten Dauer einer manuellen Untersuchung. Bei Optiken mit wenigen Defekten beträgt die Gesamtdauer etwa 40 Sekunden und liegt damit über den für eine manuelle Untersuchung geschätzten fünf Sekunden. Es zeigt sich, dass die automatische Erstellung einer Defektkarte eine Zeitersparnis bringt.

Die Dauer beider Untersuchungsarten steigt mit der Fehleranzahl, beim Kamerasystem jedoch deutlich langsamer. Daher bietet das Kamerasystem insbesondere bei Optiken mit vielen Defekten einen zeitlichen Vorteil. Zu beachten ist, dass seine Prüfzeit stark von der Pixelanzahl abhängt. Das Ergebnis gilt somit nur für die derzeit verwendete Kamera und die gewählten Aufnahmeparameter.

5.2. Bewertung der Fehlererkennung

Eine quantitative Vergleichsanalyse mit dem in Abschnitt 2.1.2 beschriebenen Mikroskop konnte nicht als Referenz herangezogen werden. Bei der manuellen Kontrolle der Mikroskopauswertung zeigte sich, dass ein erheblicher Teil der erkannten Strukturen fälschlicherweise als Defekt klassifiziert worden war. Die Mikroskopmessung weist damit eine hohe Anzahl von Fehlklassifikationen auf und ist als Referenz für eine verlässliche Bewertung der Programmausgabe ungeeignet.

Zur Bewertung der Fehlererkennung wurde daher eine manuelle Verifizierung der Mikroskopbilder durchgeführt. Neben der Prüfoptik wurden zwei weitere Optiken desselben Typs einbe-

zogen, um die Datenbasis zu vergrößern. Alle vom Programm erkannten Strukturen wurden visuell geprüft und als tatsächlicher Defekt oder Fehlklassifikation eingeordnet. Um nicht erkannte Defekte zu erfassen, wurden die Bilder zusätzlich vollständig händisch kontrolliert.

Der beschriebene Aufbau und die eingesetzte Kamera ergeben einen ungefähren Skalierungsfaktor von $30 \frac{\mu\text{m}}{\text{px}}$. Dieser Wert stellt eine grundlegende Einschränkung aller Messungen dar (siehe Abschnitt 2). Ein Bildpixel entspricht etwa $30 \mu\text{m}$, sodass sehr kleine Defekte nicht zuverlässig erfasst werden können.

Tabelle 2: Ergebnisse der manuellen Verifizierung der Programmausgabe.

Klassifikation	Bedeutung	Anzahl
True Positive (TP)	Tatsächlicher Defekt wurde vom Programm erkannt	463
False Positive (FP)	Vom Programm erkannte Struktur ist kein Defekt	215
False Negative (FN)	Tatsächlicher Defekt wurde vom Programm nicht erkannt	47

Tabelle 2 zeigt die Ergebnisse der manuellen Analyse von drei Optiken. Dabei stellt sich heraus, dass die Bildqualität der Kamera und das in Abschnitt 4.2.8 beschriebene Fokusproblem wesentliche Einschränkungen darstellen. Anhand der Bilddaten ist es sowohl für das Programm als auch für die prüfende Person teilweise schwierig zu beurteilen, ob tatsächlich ein Defekt vorliegt oder lediglich eine Reflexion beziehungsweise ein Partikel auf der Rückseite sichtbar ist. Die durch Kamera und Beleuchtung bedingte Bildqualität begrenzt somit die Verlässlichkeit der Bewertung.

Tabelle 3: Aus der manuellen Verifizierung berechnete Kennwerte der Fehlererkennung.

Kennwert	Berechnung	Ergebnis
Präzision	$\frac{TP}{TP + FP} = \frac{463}{463 + 215} \quad (6)$	68,3 %
Erkennungsrate (Recall)	$\frac{TP}{TP + FN} = \frac{463}{463 + 47} \quad (7)$	90,8 %
F1-Score	$\frac{2 \cdot \text{Precision} \cdot \text{Recall}}{\text{Precision} + \text{Recall}} \quad (8)$	77,9 %

Tabelle 3 zeigt die Auswertung der in Tabelle 2 dargestellten Ergebnisse. Die Erkennungsrate beträgt 90,8 %, das heißt, 90,8 % der manuell bestätigten Defekte wurden vom Programm erkannt. Bei der Einordnung dieses Wertes ist der Zustand der geprüften Optiken zu berücksichtigen: Sie weisen deutliche Defekte und eine große Gesamtfehlerfläche auf. Helle und stark ausgeprägte Defekte dominieren die Bilddaten, während kleinere, schwächer ausgeprägte Fehler häufiger unerkannt bleiben. Da die untersuchten Optiken bereits aufgrund der deutlich sichtbaren Defekte als fehlerhaft einzustufen sind, beeinflussen diese nicht erkannten kleinen Defekte die Gesamtbewertung in den betrachteten Fällen nicht. Der ermittelte Wert ist daher nur eingeschränkt auf Optiken mit geringer Defektdichte übertragbar.

Die Präzision verdeutlicht jedoch die Grenzen des verwendeten Versuchsaufbaus. Nach der manuellen Überprüfung konnten lediglich 68,3 % der vom Programm erkannten Strukturen tatsächlich als Defekte auf der Optik bestätigt werden. Die vergleichsweise hohe Anzahl

falsch positiver Erkennungen ist vermutlich auf die Qualität der aufgenommenen Bilder zurückzuführen. Als wesentliche Einflussfaktoren gelten insbesondere die begrenzte Auflösung der Kamera, das Bildrauschen und die gewählte Beleuchtungsart. Diese Faktoren erschweren die eindeutige Abgrenzung tatsächlicher Defekte von Bildartefakten und anderen optischen Strukturen. Die manuelle Untersuchung zeigte außerdem, dass der Fokusfilter zu wenig restriktiv arbeitet, sodass zu viele unscharfe Strukturen in die finale Programmausgabe eingehen. Eine manuelle Zuordnung ist jedoch ebenfalls schwierig, da aus den Bilddaten teilweise nicht eindeutig hervorgeht, ob sich ein Defekt auf der Prüf- oder Rückseite befindet.

Zusammen betrachtet zeigen die Kennwerte eine eher empfindliche als selektive Fehlererkennung. Von insgesamt 510 manuell bestätigten Defekten wurden 47 und damit 9,2 % nicht erkannt. Gleichzeitig konnten 215 der 678 vom Programm ausgegebenen Strukturen, entsprechend 31,7 %, nicht als tatsächliche Defekte bestätigt werden. Der F1-Score von 77,9 % bildet diesen Unterschied zwischen hoher Erkennungsrate und geringerer Präzision zusammenfassend ab. Für eine unterstützende Vorprüfung ist dieses Verhältnis sinnvoll, wenn das Vermeiden übersehener Defekte höher gewichtet wird als der zusätzliche Aufwand zur Kontrolle falsch positiver Ausgaben. Für eine abschließende automatische Prüfentscheidung müsste dagegen insbesondere die Anzahl falsch positiver Erkennungen weiter reduziert werden. Da die Kennwerte anhand von drei bereits deutlich beschädigten Optiken bestimmt wurden, belegen sie die Funktionsfähigkeit unter den untersuchten Bedingungen, erlauben aber noch keine allgemeine Aussage für Optiken mit wenigen oder schwach ausgeprägten Defekten.

5.3. Bewertung der Defektmessung

Tabelle 4: Vergleich der manuell und programmbasiert bestimmten Defektflächen. Der Faktor entspricht dem Quotienten aus Programmwert und manuellem Messwert. Darstellungen in Abschnitt A.5.

P = Punktdefekt, S = Kratzer, GS = Kratzer aus mehreren Einzelstücken.

Fehler	Manuell bestimmte Fläche in μm^2	Programmfläche in μm^2	Faktor Programm/manuell
P116	35 731,79	91 109,46	2,55
P79	10 934,32	91 109,46	8,33
P71	1 620,79	7 216,59	4,45
S1	37 230,06	69 459,69	1,87
GS5	71 782,34	60 926,09	0,85
P27	7 220,15	9 077,99	1,26
P49	3 410,58	3 631,19	1,06
P51	5 697,89	5 446,79	0,96
P53	4 066,23	2 724,04	0,67
P54	3 151,48	3 631,19	1,15
P68	635,70	5 446,70	8,57
P110	512,93	5 446,79	10,62
P112	591,16	4 538,99	7,68
P164	981,17	9 985,79	10,18
P208	5 121,20	30 865,15	6,03

Tabelle 5: Vergleich der manuell und programmbasiert bestimmten Fehlerbreiten. Der Faktor entspricht dem Quotienten aus Programmwert und manuellem Messwert.

Fehler	Manuell bestimmte Breite in μm	Programmbreite in μm	Faktor Programm/manuell
GS2	54,46	82,01	1,51
GS3	37,03	37,72	1,02
GS4	61,72	32,27	0,52
GS7	38,47	42,68	1,11

Tabelle 4 verdeutlicht eine wesentliche Einschränkung des untersuchten Messverfahrens. Bei 12 der 15 betrachteten Defekte wird die Fläche überschätzt. Der Median des Verhältnisses zwischen Programmwert und manuellem Messwert beträgt 2,55; die einzelnen Faktoren reichen von 0,67 bis 10,62. Besonders deutlich ist die Abweichung bei den vier kleinsten, manuell mit weniger als $1000 \mu m^2$ bestimmten Defekten, deren Flächen durch das Programm um Faktoren zwischen 7,68 und 10,62 überschätzt werden. Es handelt sich somit nicht ausschließlich um vereinzelte Ausreißer, sondern um eine Tendenz zur stärkeren Überschätzung kleiner Defekte. Die berechnete Defektfläche ist daher derzeit nicht als kalibrierte geometrische Fläche, sondern eher als bildbasierte Kenngröße der sichtbaren Reflexions- und Streuenausprägung zu interpretieren.

Wie bereits in Abschnitt 4.1.3 beschrieben, hängt die sichtbare Ausprägung eines Defekts maßgeblich von den Aufnahmebedingungen ab. Hierzu zählen insbesondere die Beleuchtungsstärke, der Beleuchtungswinkel, die Belichtungszeit sowie die Fokusslage. Dadurch kann die im Bild erkannte Defektgröße erheblich von der tatsächlichen geometrischen Größe abweichen. Dieser Effekt verstärkt sich, wenn sich ein Defekt nicht exakt in der Fokusebene befindet. Dies betrifft beispielsweise Staubpartikel auf der Oberfläche. Durch die entstehende Unschärfe wird das reflektierte beziehungsweise gestreute Licht über einen größeren Bildbereich verteilt, wodurch die berechnete Defektfläche deutlich überschätzt werden kann. Ein entsprechendes Beispiel stellt die Messung P79 dar, die auch in Abschnitt A.5 Tabelle 10 dargestellt ist.

Wie in Abschnitt 4.2.10 erläutert, wurden bereits Algorithmen implementiert, die den Einfluss dieser Effekte reduzieren sollen. Die in den Bilddaten enthaltenen geometrischen Informationen weichen in einzelnen Fällen jedoch zu stark von der tatsächlichen Defektgeometrie ab, sodass eine zuverlässige Flächenbestimmung nicht möglich ist. Zur Verbesserung der Messergebnisse müssten daher sowohl der Aufbau als auch die verwendete Kamera- und Objektivkonfiguration angepasst werden.

Gleichzeitig zeigen die Ergebnisse, dass einzelne Abmessungen grundsätzlich genauer bestimmt werden können. In Abschnitt A.5 ist beispielsweise an der Messung des Defekts S1 zu erkennen, dass die Messung der Länge und Breite von Kratzern vergleichsweise gut funktioniert. Die Länge wird dabei um 7,3 % überschätzt, während die Breitenmessung eine mittlere absolute Abweichung von 27,8 % aufweist, wie in Tabelle 5 dargestellt ist. Damit lassen sich einzelne Defektmerkmale näherungsweise erfassen, während die Bestimmung der gesamten Defektfläche wesentlich stärker durch die Aufnahmebedingungen beeinflusst wird.

Zusammenfassend zeigt das untersuchte Verfahren, dass optische Defekte grundsätzlich automatisiert erkannt und einzelne Merkmale, insbesondere die Abmessungen von Kratzern, näherungsweise bestimmt werden können. Die zuverlässige Ermittlung der tatsächlichen Defektfläche ist mit dem derzeitigen Aufbau jedoch noch eingeschränkt, da die Messergebnisse wesentlich vom Reflexions- und Streuverhalten der Fehlstellen sowie von den Beleuchtungs-, Fokus- und Aufnahmebedingungen beeinflusst werden. Eine normgerechte Bewertung gemäß ISO 10110-7 ist daher aktuell noch nicht durchgängig gewährleistet und erfordert eine weitere Optimierung des optischen Aufbaus und der Aufnahmebedingungen.

5.4. Bewertung der Klassifizierung

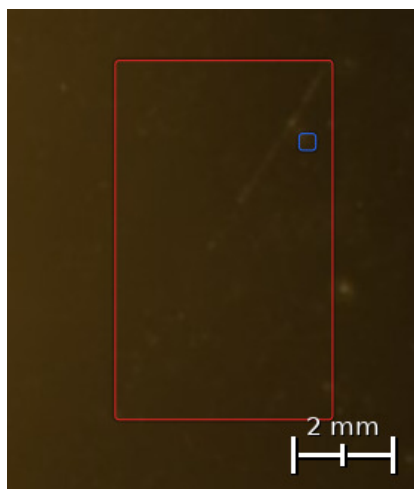
Ein quantitativer Vergleich der Klassifikation ist ohne ein geeignetes Mess- und Bewertungssystem wie das in Abschnitt 2.1.1 beschriebene ARGOS-System nicht möglich. Die Bewertung erfolgt daher qualitativ.

Im implementierten Verfahren werden die erkannten Defekte entsprechend ihrer geometrischen und intensitätsbasierten Merkmale unter anderem als örtlich begrenzte Defekte, Kratzer oder Randaussprünge klassifiziert. Bei der visuellen Überprüfung der untersuchten Beispiele wurden insbesondere kleine punktförmige Defekte und Kratzer überwiegend plausibel zugeordnet. Kratzer konnten dabei trotz teilweise ungleichmäßiger oder unterbrochener Darstellung

häufig als lineare Defektstrukturen erkannt und zusammengeführt werden. Aufgrund der fehlenden quantitativen Referenzdaten lässt sich daraus jedoch keine allgemeine Aussage über die Klassifikationsgenauigkeit ableiten.

Bei der Erkennung von Randaussprüngen treten Einschränkungen auf, die teilweise zu fehlerhaften Zuordnungen führen. Wie in Abschnitt 4.2.7 beschrieben, wird ein großflächiger Defekt als Randaussprung eingestuft, wenn er den Rand über eine ausreichend große Länge berührt. Dadurch können auch großflächige Defekte am Rand als Randaussprung klassifiziert werden, obwohl kein Materialausbruch vorliegt, da die Position von Randberührungen das wesentliche Klassifikationsmerkmal darstellt. Zur Verringerung dieses Fehlers wäre eine genauere Merkmalsanalyse der *Bounding Box* und der Defektkontur erforderlich; eine Zuordnung allein anhand der Position ist nicht ausreichend.

Wischstreifen, die beispielsweise bei der Reinigung einer Optik entstehen können, stellen ebenfalls eine Herausforderung dar. In den aufgenommenen Bildern weisen sie häufig eine ähnliche Struktur und einen ähnlichen Verlauf wie Kratzer auf, wie Abbildung 37 zeigt. Eine zuverlässige Unterscheidung zwischen beiden Klassen ist anhand der derzeit erzeugten Einzelaufnahmen und der verwendeten Merkmale daher nicht möglich. Hierfür wären zusätzliche Bildinformationen, beispielsweise Aufnahmen mit unterschiedlichen Beleuchtungsrichtungen, oder weitere textur- und intensitätsbasierte Merkmale erforderlich.



Darstellung eines Reinigungsrückstands



Darstellung eines Kratzers

Abbildung 37: Vergleich von Reinigungsrückstand und Kratzer.

Für diese Bilder wurde nicht die Testoptik verwendet.

Auch hier stellt die Kamera eine mögliche Fehlerquelle dar. Aufgrund der unzureichenden Auflösung werden Defektkonturen unscharf dargestellt; sehr kleine Strukturen können vollständig verschwinden. Dadurch wird die Klassifizierung der Defekte erschwert. Der nachfolgenden Verarbeitung stehen somit möglicherweise nicht alle relevanten Bildmerkmale zur Verfügung. Die qualitative Auswertung liefert damit einen Funktionsnachweis für die grundlegende Klassifizierung, jedoch noch keinen quantitativen Genauigkeitsnachweis. Für deutlich ausgeprägte punktförmige und lineare Strukturen erscheint das Verfahren als grobe Vorklassifizierung

geeignet. Der praktische Nutzen der Klassifizierung liegt derzeit somit vor allem in der Strukturierung der Programmausgabe und der gezielten Unterstützung der nachfolgenden visuellen Bewertung.

5.5. Wiederholungsgenauigkeit

Zur Untersuchung der Wiederholungsgenauigkeit werden zwei Aspekte betrachtet. Zunächst wird überprüft, ob die wiederholte Analyse identischer Bilddaten bei unveränderten Parametern stets zum gleichen Ergebnis führt. Anschließend wird untersucht, wie stark sich unmittelbar nacheinander aufgenommene Kamerabilder bei unverändertem Versuchsaufbau unterscheiden.

Zur Überprüfung der Reproduzierbarkeit der Bildauswertung wird dieselbe Bilddatei mehrfach mit identischen Parametern analysiert. In allen Durchläufen ergeben sich übereinstimmende Klassifikationsergebnisse, Merkmale und Defektpositionen. Die Auswertung arbeitet unter diesen Bedingungen somit deterministisch und reproduzierbar. Die zugehörigen Ergebnisse sind in Tabelle 6 dargestellt.

Anschließend wurden mit derselben Optik mehrere Bilder unmittelbar nacheinander aufgenommen. Der Versuchsaufbau wurde zwischen den Aufnahmen weder verändert noch bewegt. Bei der verwendeten Optik handelt es sich nicht um die für die Größenmessung eingesetzte Optik.

Tabelle 6: Abweichungswerte der Analyse derselben Bilddaten. Messwerte in Abschnitt A.6 Tabelle 11.

Kennwert	Mittelwert	Varianz	Standardabweichung (relativ)
Erkannte Fehler	127,00	0,00	0,00 (0,00 %)
Gesamte Fehlerfläche in μm^2	5807895,32	0,00	0,00 (0,00 %)

Tabelle 7: Abweichungswerte der Analyse derselben Optik in selber Position in unterschiedlichen Bildern. Messwerte in Abschnitt A.6 Tabelle 12.

Kennwert	Mittelwert	Varianz	Standardabweichung (relativ)
Erkannte Fehler	1404,17	5430,57	73,69 (5,25 %)
Gesamte Fehlerfläche in μm^2	26581452,73	8437331491604,44	2904708,50 (10,93 %)

Tabelle 7 zeigt, dass trotz unverändertem Aufbau Abweichungen zwischen unmittelbar aufeinanderfolgenden Aufnahmen auftreten. Die relative Standardabweichung beträgt 5,25 % für die Anzahl der erkannten Defekte und 10,93 % für die ermittelte Gesamtfläche. Da keine vorab festgelegten Akzeptanzgrenzen für die Wiederholungsgenauigkeit definiert wurden, können diese Werte nicht formal als ausreichend oder unzureichend eingestuft werden. Für die wiederholte Lokalisierung und überschlägige Erfassung von Defekten erscheint die geringere Streuung der Defektanzahl unter konstanten Aufnahmebedingungen grundsätzlich nutzbar. Die höhere Streuung der Gesamtfläche bedeutet dagegen, dass Flächenunterschiede in einer Größenordnung von etwa 11 % allein durch die Aufnahme und Verarbeitung entstehen können und deshalb nicht ohne Weiteres als tatsächlicher Unterschied der Optik interpretiert werden dürfen. Für grenzwertnahe quantitative Entscheidungen ist die Flächenmessung daher weniger

geeignet als für eine unterstützende visuelle Bewertung. Dieser Fehler lässt sich auf das Rauschen der Kamera zurückführen. Tabelle 6 zeigt, dass das Programm andere Bilddaten bekommen muss, da die Ausgabe sonst identisch wäre.

Tabelle 8: Wiederholbarkeit der Drehmessung: Abweichungswerte der drei Messreihen. Messreihen dargestellt in Tabelle 13.

Messreihe	Kennwert	Mittelwert	Varianz	Standardabweichung (relativ)
Messreihe 1 ($n = 8$)	Erkannte Fehler	1109,75	31650,79	177,91 (16,03 %)
	Gesamte Fehlerfläche in mm^2	21,066	4,634	2,153 (10,22 %)
Messreihe 2 ($n = 6$)	Erkannte Fehler	124,17	1406,57	37,50 (30,20 %)
	Gesamte Fehlerfläche in mm^2	2,002	3,171	1,781 (88,96 %)
Messreihe 3 ($n = 7$)	Erkannte Fehler	362,43	6880,95	82,95 (22,89 %)
	Gesamte Fehlerfläche in mm^2	7,593	16,536	4,066 (53,55 %)

Tabelle 8 zeigt drei Messreihen, bei denen die Optiken zwischen den Aufnahmen gedreht wurden. Die Prüfseite blieb dabei unverändert; lediglich die Rotation relativ zur Kamera wurde verändert. In den vorliegenden Messreihen führt die Rotation insbesondere bei der Optik mit wenigen Fehlern zu großen relativen Abweichungen. Bei einer hohen Fehleranzahl und einer großen Gesamtfehlerfläche fallen die relativen Abweichungen geringer aus. Dieses Verhalten deutet auf eine inhomogene Ausleuchtung hin, die vermutlich auf die Verwendung nur einer Lichtquelle zurückzuführen ist.

Da Tabelle 6 zeigt, dass die Software bei identischen Eingangsdaten stets dieselben Ergebnisse liefert, sind die beobachteten Abweichungen nicht auf ein nichtdeterministisches Verhalten der Auswertung zurückzuführen. Sie entstehen daher bereits bei der Bildaufnahme oder durch äußere Einflüsse auf das Aufnahmesystem. Mögliche Ursachen sind beispielsweise Bildrauschen oder temperaturbedingte Veränderungen des Sensorverhaltens. Welche dieser Ursachen den größten Einfluss hat, wurde im Rahmen dieser Untersuchung jedoch nicht separat bestimmt.

Die Ergebnisse zeigen, dass die Bildaufnahme einen wesentlichen Einfluss auf die Wiederholungsgenauigkeit der gesamten Verarbeitungskette besitzt. Insbesondere die Beleuchtung und die relative Ausrichtung der Optik zur Kamera stellen begrenzende Faktoren der betrachteten Pipeline dar. Für eine Verbesserung der Wiederholungsgenauigkeit ist daher vor allem eine Kamera notwendig, welche über ein stabileres Rauschverhalten verfügt. Ebenfalls ist eine homogenere und rotationsunabhängigere Beleuchtung des Prüfbereichs erforderlich.

5.6. Grenzen

Die Aussagekraft der Evaluation wird durch das Fehlen von Vergleichsoptiken mit definierten Defekten eingeschränkt. Auch die qualitative Bewertung der Klassifizierung ist mangels eines industriellen Prüfsystems als Referenz nur begrenzt belastbar. Die zuvor dargestellten Ergebnisse zeigen sowohl die Funktionsfähigkeit des entwickelten Prototyps als auch Ein-

schränkungen in einzelnen Verarbeitungsschritten. Es konnten wesentliche Einflussfaktoren und Prozessabschnitte identifiziert werden, die das Analyseergebnis negativ beeinflussen.

Die eingesetzte Kamera, das Objektiv und die Beleuchtungsgeometrie wurden als wesentliche Einflussfaktoren auf die Analyseergebnisse identifiziert. Die Kameraauflösung reicht nicht aus, um kleinere Defekte zuverlässig zu erfassen, sodass diese in der Analyse unberücksichtigt bleiben können, die kleinste erkennbare ISO-Klasse ist 0,04. Zudem können helle Strukturen aufgrund der begrenzten Bildqualität überstrahlen oder unscharf erscheinen. Eine eindeutige Zuordnung zur Ober- oder Unterseite der Optik ist dann nicht mehr möglich, was auch die Wiederholungsgenauigkeit beeinträchtigt. Dieselben Einschränkungen wirken sich auf die Klassifikation aus: Konturen können verschwinden und Strukturen ineinander übergehen, wodurch die Zuordnung zu einer Defektklasse erschwert und fehleranfälliger wird. Die Kamera erfüllt damit die Anforderungen der Anwendung nur eingeschränkt.

Auch die Messgenauigkeit ist eingeschränkt, da das System nicht die reale Geometrie eines Defekts, sondern vor allem dessen Streuwirkung erfasst. Diese wird durch Beleuchtungsstärke, Beleuchtungsrichtung und Fokusslage stark beeinflusst. Dadurch werden einzelne Defekte unterschiedlich stark überschätzt, was Gegenmaßnahmen auf Ebene der Bildverarbeitung erschwert. Eine normgerechte Messung nach ISO 10110-7 ist mit dem derzeitigen Aufbau daher nicht gewährleistet. Ein sinnvoller Lösungsansatz besteht in einer Beleuchtung, die die tatsächliche Defektgeometrie möglichst unabhängig von Streueffekten hervorhebt, kombiniert mit einer geeigneteren Kamera.

Die genannten Einschränkungen betreffen damit vor allem die quantitative Größenbestimmung, die zuverlässige Unterscheidung ähnlich erscheinender Defektarten und die Robustheit gegenüber veränderten Aufnahmebedingungen. Die grundlegende Funktionsfähigkeit des Gesamtkonzepts wird dadurch jedoch nicht infrage gestellt: Defekte können automatisiert erkannt, lokalisiert und in einer Defektkarte dokumentiert werden. Der entwickelte Aufbau eignet sich im derzeitigen Zustand daher insbesondere für eine unterstützende Vorprüfung und zur strukturierten Aufbereitung der Prüfergebnisse. Eine abschließende, vollständig automatisierte und normgerechte Bewertung kann daraus noch nicht abgeleitet werden. Für eine belastbare Beurteilung der industriellen Einsatzfähigkeit wären weitere Untersuchungen mit mehreren Optiken, definierten Referenzdefekten und vorab festgelegten Akzeptanzgrenzen erforderlich. Die Evaluation liefert somit einen Funktionsnachweis des entwickelten Prototyps und zeigt zugleich konkret auf, an welchen Stellen die weitere Optimierung ansetzen muss.

6. Fazit und Ausblick

Im Rahmen dieser Arbeit konnte ein funktionsfähiger Aufbau zur Inspektion von Oberflächen auf VHP-Optiken realisiert werden. Im Analyseteil wurde außerdem eine vollständige prototypische Pipeline ausgearbeitet. Der entwickelte Aufbau definiert die Positionen von Kamera, Optik und Beleuchtung und schirmt die Aufnahme weitestgehend von Fremdlicht ab. Kamera und Lichtquelle werden während des Aufnahmeprozesses softwareseitig gesteuert. Die entstehenden Bilder werden sofort auf den Host-Computer übertragen, wo die Bilder verarbeitet und ausgewertet werden. Die Softwarepipeline setzt die Bestimmung des relevanten Prüfbereichs, die metrische Skalierung, die Korrektur einer ungleichmäßigen Beleuchtung, die Erzeugung einer Fehlermaske, die Extraktion einzelner Defektkandidaten, die Bewertung der Fokusebene sowie die Ausmessung und Klassifizierung der erkannten Fehler um. Diese wesentlichen, in der Aufgabenstellung gesetzten, Ziele wurden erreicht.

Es wurde gezeigt, dass die Software bei gleichen Eingangsdaten immer zum selben Ergebnis kommt, sie arbeitet also deterministisch. Bei unmittelbar nacheinander aufgenommenen Bildern derselben Optik treten Abweichungen von rund 5,25 % bei der Anzahl der erkannten Defekte und rund 10,93 % bei der gesamten Defektfläche auf. Die softwareseitige Verarbeitung ist reproduzierbar. Die Wiederholungsgenauigkeit der gesamten Verarbeitungskette wird jedoch nachweislich durch die Kamera, also die Bildaufnahme, das Bildrauschen oder die Bildqualität oder den Aufbau eingeschränkt. Die Evaluation zeigt also, dass die erfolgreiche Umsetzung nicht automatisch zu einem einsatzfähigen System führt.

Die eingesetzte Kamera limitiert die Fehlererkennung des Systems durch ihre Auflösung von $30 \frac{\mu\text{m}}{\text{px}}$ bei den getesteten Optiken, wodurch die Defektanzahl und Defektfläche nur verzerrt ausgegeben werden können. Das Ziel einer vollständigen und normgerechten Fehlererkennung wurde unter den gegebenen Hardwarebedingungen daher nur teilweise erreicht. Dabei ist die eingeschränkte Fehlererkennung von kleinen Fehlern unter der ISO-Klasse 0,04 ausschlaggebend. Große und kontrastreiche Defekte wurden unter den untersuchten Bedingungen überwiegend gut erkannt.

Die Verfahren zur automatisierten Messung der Geometrie der Defekte zeigen eine grundsätzliche Machbarkeit. Insbesondere die Messung von dünnen Strukturen nah an der Oberfläche, beispielsweise Kratzer, zeigt geringe Abweichungen von etwa 7,3 % im Bereich der Längenmessung und jedoch höhere Abweichungen von 27,8 % im Bereich der Breitenmessung. Defekte, welche außerhalb des Kamerafokus liegen oder durch dreidimensionale Geometrie zu einem bestimmten Streuverhalten des Lichts führen, werden teilweise jedoch deutlich überbewertet. Die gemessenen Flächen liegen bei den untersuchten Defekten beispielsweise bis zu einem Faktor von 10,62 über der manuell bestimmten Defektfläche. Deren Größen hängen unter anderem von Beleuchtungsstärke, Beleuchtungswinkel, Belichtungszeit der Kamera und dem Fokuspunkt ab. Verfahren seitens der Software verbessern das Messergebnis zwar, können die Störeffekte jedoch nicht beheben. Die Messalgorithmen sind damit funktional, ihre metrologische Genauigkeit ist für eine abschließende Bewertung nach ISO 10110-7 jedoch noch nicht ausreichend nachgewiesen.

Die merkmalsbasierte Klassifizierung konnte ebenfalls umgesetzt werden. Die Einordnung in die Gruppen „Kratzer“ und „örtlich begrenzter Defekt“ funktioniert dabei zuverlässig. Einschränkungen bestehen allerdings in der Unterscheidung zwischen Randaussprüngen und normalen großflächigen Defekten und die Unterscheidung von Kratzern und Wisch- beziehungsweise Reinigungsrückständen. Da diese Fehlerarten im Analysebild teilweise sehr ähnliche Details aufweisen, reicht die ausschließliche Zuteilung durch eine geometrische und intensitätsbasierte Bewertung nicht aus.

Der Einsatz von künstlicher Intelligenz wurde in dieser Arbeit nicht als Klassifikationsverfahren umgesetzt. Es zeigt sich, dass zunächst eine umfangreiche, konsistent aufgenommene und fachlich gelabelte Datenbasis erforderlich wäre. Die Erstellung einer solchen Datenbasis hätte den zeitlichen Rahmen der Arbeit überschritten. Das merkmalsbasierte Klassifikationsverfahren wurde als annähernd robust und zweckmäßig bewertet, dass der Einsatz künstlicher Intelligenz in diesem Fall aufgrund des ungünstigen Aufwand-Nutzen-Verhältnisses als nicht gerechtfertigt angesehen wird.

Ebenfalls bestanden Anforderungen im Bereich der Laufzeit des Systems. Einschließlich Bildaufnahme und Kalibrierung benötigt das System abhängig vom Zustand der Optik ungefähr zwischen 40 und 60 Sekunden. Bei nahezu fehlerfreien Optiken kann eine manuelle Überprüfung schneller sein. Bei Optiken mit mehreren Defekten dauert die manuelle Überprüfung etwa fünf bis zehn Minuten, wodurch das entwickelte System in solchen Fällen unterstützen kann. Zusätzlich entsteht eine dokumentierte Defektkarte (siehe Abschnitt A.7) und mit Messdaten. Damit besitzt das System bereits im jetzigen Entwicklungsstand Potenzial als unterstützendes Werkzeug für eine Vorsortierung und Dokumentation.

Die Software hat gegen Ende des Entwicklungszeitraums bereits Einsatz gefunden. Für eine mit einem Dino-USB-Mikroskop untersuchte Optik fehlte die Datengrundlage für eine begründete Zustandseinschätzung. Aufgrund der Analysefähigkeit des Programms konnte eine Defektkarte mit zusätzlicher Größenmessung der Defekte erzeugt werden, welche dazu geführt hat, die Optik als fehlerhaft zu bestätigen und nicht einzubauen. Dies zeigt den Nutzen des Programms, wohingegen Aufbau und Kamera Verbesserungspotential bieten.

Zusammenfassend wurde das übergeordnete Ziel im Sinne eines Nachweises der grundsätzlichen Umsetzbarkeit erzielt. Durch die Arbeit wurde gezeigt, dass eine kamerabasierte Analysepipeline, bestehend aus Erkennung, Ausmessung und Klassifizierung von Oberflächenfehlern auf Optiken grundsätzlich möglich ist.

Ausblickend wird eine Weiterverfolgung der Technik als sinnvoll erachtet. Der größte Entwicklungsbedarf liegt dabei nicht in der grundsätzlichen Softwarearchitektur, sondern in der Erzeugung geeigneter und reproduzierbarer Bilddaten zur Auswertung. Somit ist eine Optimierung des im Verlauf dieser Arbeit angefertigten Aufbaus und eine gezielte Weiterentwicklung des Aufnahmekonzepts notwendig. Besonders relevant sind dabei eine rauschärmere Kamera, welche über eine höhere Auflösung verfügt und ein mechanisch steiferer und präzise kalibrierbarer Aufbau. Durch die aufgetretenen Hürden werden Untersuchungen mit einer mehrdirektionalen Beleuchtung als sinnvoll erachtet. Durch das große Verhältnis zwischen

Objektdurchmesser und kleinster Fehlergröße erscheint außerdem die Aufnahme mehrerer Einzelbilder mit anschließendem Stitching oder ein Scanansatz vielversprechender als die vollständige Prüfung über ein Einbildverfahren. Für eine schnelle Umsetzung kann dafür beispielsweise ein umfunktionierter 3D-Drucker oder ein automatisierter Schiebetisch verwendet werden. Weitere Ansatzpunkte für zukünftige Untersuchungen sind:

- Unterscheidung zwischen reinigbaren Verunreinigungen und tatsächlichen Oberflächendefekten, beispielsweise durch einen Vergleich vor und nach einer definierten Reinigung.
- Gezielter Einsatz künstlicher Intelligenz zur Klassifizierung schwer unterscheidbarer Fehlerarten wie Kratzer, Wischspuren und Randaussprünge.
- Untersuchung einer höher auflösenden und rauschärmeren Kamera in Verbindung mit einer Softbox zur Verbesserung der Aufnahmebedingungen.
- Anpassung des Verfahrens an gekrümmte Optiken, beispielsweise durch Fokussachführung, Fokus-Stacking oder Aufnahmen aus mehreren Positionen.

Zur Verbesserung der Systemoptimierung und der Bewertung sind zusätzlich Referenzoptiken mit bekannten und vermessenen Fehlern sowie ein großer, systematisch erstellter Bilddatensatz vonnöten. Auf dieser Grundlage wäre der Einsatz eines lernbasierten Klassifizierungsverfahrens sinnvoll zu bewerten und dessen Einsatznutzen zu bestimmen.

Kurzfristig bietet sich das System vor allem als Assistenzsystem an, das auffällige Bereiche erkennt, Defektkarten erzeugt und die manuelle Prüfung somit unterstützt. Langfristig kann aus dem entwickelten Prototyp ein objektives, nachvollziehbares und skalierbares Prüfverfahren entstehen. Die Ergebnisse dieser Arbeit begründen daher eine Weiterverfolgung des kamera-basierten Ansatzes.

Quellenverzeichnis

- [1] „Optics and photonics — Preparation of drawings for optical elements and systems — Part 7: Surface imperfections“, Nr. ISO 10110-7:2017. August 2017.
- [2] S. Knight, „Astronomers are finalizing a 3.2 gigapixel camera that'll map the sky over a decade“. Zugegriffen: 12. Juni 2026. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.techspot.com/news/96451-astronomers-finalizing-32-gigapixel-camera-thatll-map-sky.html>
- [3] Vera C. Rubin Observatory, „LSST Camera and SLAC Camera Team“. Zugegriffen: 5. Juli 2026. [Online]. Verfügbar unter: <https://rubinobservatory.org/gallery/collections/main-gallery/tjhefoq2s100pdc32ht0l41l6v>
- [4] DIOPTIC GmbH, „ARGOS – automatisierte Prüfung optischer Oberflächen“. Zugegriffen: 5. Juli 2026. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.dioptic.de/produkte/argos/argos-matrix-systeme/>
- [5] KEYENCE Deutschland GmbH, „VHX-7100 – 4K Fully-Integrated Head“. Zugegriffen: 5. Juli 2026. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.keyence.de/products/microscope/digital-microscope/vhx-x1/models/vhx-7100/>
- [6] Technische Universität Berlin, ZELMI, „Beleuchtungsarten“. Zugegriffen: 20. Mai 2026. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.tu.berlin/zelmi/services/mikroskopische-analysegeraete/limi-lichtmikroskopie/beleuchtungsarten>
- [7] Edmund Optics, „Common Illumination Types“. Zugegriffen: 7. Juni 2026. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.edmundoptics.com/knowledge-center/application-notes/illumination/choose-the-correct-illumination/>
- [8] Edmund Optics, „Machine Vision Filter Technology“. Zugegriffen: 7. Juni 2026. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.edmundoptics.com/knowledge-center/application-notes/imaging/filtering-in-machine-vision/>
- [9] R. C. Gonzalez und R. E. Woods, *Digital Image Processing*, 4. Aufl. Pearson, 2018.
- [10] L. Bergen und H. Burkhardt, „Morphologische Bildverarbeitung“. Zugegriffen: 14. Juni 2026. [Online]. Verfügbar unter: https://lmb.informatik.uni-freiburg.de/lectures/praktika_broch/bvpraktikum/BVAnI_morphologie.pdf
- [11] I. Valavanis und D. Kosmopoulos, „Multiclass defect detection and classification in weld radiographic images using geometric and texture features“, *Expert Systems with Applications*, Bd. 37, Nr. 12, S. 7606–7614, 2010, doi: 10.1016/j.eswa.2010.04.082.
- [12] G. Fu u. a., „A deep-learning-based approach for fast and robust steel surface defects classification“, *Optics and Lasers in Engineering*, Bd. 121, S. 397–405, 2019, doi: 10.1016/j.optlaseng.2019.05.005.
- [13] V. Nath, C. Chattopadhyay, und K. A. Desai, „Development of image-based fast defect recognition and localization network (FDRLNet) for steel surfaces“, *Manufacturing Letters*, 2023, doi: 10.1016/j.mfglet.2023.08.036.

-
- [14] digitalkamera.de, „Canon EOS 1100D Datenblatt“. Zugegriffen: 29. Mai 2026. [Online]. Verfügbar unter: https://www.digitalkamera.de/Kamera/Canon/EOS_1100D.aspx
- [15] LEDVANCE GmbH, „Produktdatenblatt: LED Star PAR16 80 36° 6.1W 840 GU10“. Zugegriffen: 16. Juli 2026. [Online]. Verfügbar unter: <https://bilder.obj.de/6922b3db-4433-4159-a41d-16a3e1adffb0/document.pdf>
- [16] Robot Electronics, „USB-RLY04 4 Relay Output Module“. Zugegriffen: 25. Juni 2026. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.robot-electronics.co.uk/files/usb-rlly04.pdf>
- [17] Canon Europe, „Noise Reduction Options Explained“. Zugegriffen: 19. Juni 2026. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.canon-europe.com/pro/stories/noise-reduction-low-light/>
- [18] Canon Europe, „Latest EOS SDK (Version 13.x)“. Zugegriffen: 19. Juni 2026. [Online]. Verfügbar unter: <https://developers.canon-europe.com/developers/s/article/Latest-EOS-SDK-Version-13-x>
- [19] B. Kirchheim, „Heiße und tote Pixel“. Zugegriffen: 25. Juni 2026. [Online]. Verfügbar unter: https://www.digitalkamera.de/Fototipp/Heisse_und_tote_Pixel/2315.aspx
- [20] scikit-image contributors, „Skeletonize“. Zugegriffen: 3. Juli 2026. [Online]. Verfügbar unter: https://scikit-image.org/docs/stable/auto_examples/edges/plot_skeleton.html
- [21] R. Szeliski, *Computer Vision: Algorithms and Applications*, 2. Aufl. Springer, 2022. doi: 10.1007/978-3-030-34372-9.
- [22] OpenCV, „Structural Analysis and Shape Descriptors“. Zugegriffen: 3. Juli 2026. [Online]. Verfügbar unter: https://docs.opencv.org/3.4.20/d3/dc0/group__imgproc__shape.html#ga2c759ed9f497d4a618048a2f56dc97f1
- [23] Dell Inc., „Dell Latitude 5300: Handbuch zu Setup und technischen Daten“. Januar 2022. Zugegriffen: 31. Mai 2026. [Online]. Verfügbar unter: <https://dl.dell.com/content/manual/19028534-dell-latitude-5300-handbuch-zu-setup-und-technischen-daten.pdf?language=de-de#page=12>

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1	Größte Digitalkamera der Welt. © Jacqueline Ramseyer Orrell/SLAC National Accelerator Laboratory [3].	2
Abbildung 2	Eingesetzte Vergleichstafel.	4
Abbildung 3	Eingesetzte Beleuchtungsbox.	4
Abbildung 4	Aufbau Analyse mit USB-Mikroskop.	5
Abbildung 5	Zielpipeline.	6
Abbildung 6	Hellfeld- und Dunkelfeldbeleuchtung im Vergleich.	8
Abbildung 7	Reflexion auf Optik im Dunkelfeld.	9
Abbildung 8	Starke Streuung durch Punktdefekt auf Optik.	10
Abbildung 9	Auswirkung linearer und nichtlinearer Filter.	11
Abbildung 10	Anwendung von einem Top-Hat-Filter.	12
Abbildung 11	Kontrastspreizung des Top-Hat-Bildes.	12
Abbildung 12	Darstellung der Oberflächenunvollkommenheiten, übernommen aus ISO 10110-7:2017 [1].	13
Abbildung 13	Schematische Darstellung und fotografische Aufnahme des Aufnahmeaufbaus, nicht maßstabsgetreu: 1 Kamera mit Objektiv, 2 zylindrische Abschirmung, 3 optische Komponente, 4 Lichtquelle, 5 Relais und 6 Abschirmscheibe. A = 15 cm, B = 9 cm, C = 3,6 cm	16
Abbildung 14	Darstellung des kleinsten durch die Kamera erfassbaren Fehlers. Das rechte Bild zeigt eine vergrößerte Ansicht des im linken Bild rechts dargestellten Kreises, der der ISO-Klasse 0,04 entspricht.	17
Abbildung 15	Vergleich der Versionen des Aufbaus.	18
Abbildung 16	Gemessener Winkel zwischen Lichtquelle und horizontaler Ebene. ...	19
Abbildung 17	Bildreihe zum Test der Belichtungszeit. Helligkeitsangabe ist der Wert der durchschnittlichen Helligkeit im Bild der Kamera. ISO = 100 Blende = f/4	20
Abbildung 18	Ausschnitte aus Belichtungsreihe: Überbewertung durch längere Belichtungszeit.	21
Abbildung 19	Ausschnitte aus Belichtungsreihe: Mehr Rauschen durch längere Belichtungszeit.	21
Abbildung 20	Stark vereinfachte Softwarearchitektur mit dem tatsächlichen Datenfluss der entwickelten Defekterkennung. Gestrichelte Knoten und Verbindungen kennzeichnen optionale Schritte oder benutzergesteuerte Exporte.	23

Abbildung 21	Darstellung des Frontends nach einer Analyse mit Analyseergebnis. .	24
Abbildung 22	Pixelbasierte Darstellung eines 5×5-Medianfilters.	26
Abbildung 23	Bildausgabe der Kamera.	27
Abbildung 24	Vergleich der Verarbeitungsschritte.	28
Abbildung 25	Algorithmus, um den Außenring zu finden: Grün: ROI-Maske, Blau: Suchband, Rot: Kreisbildung der hellsten Punkte.	29
Abbildung 26	Ergebnis der Blurfunktion nach Korrektur.	31
Abbildung 27	Darstellung der Maske von sehr hellen Pixeln.	32
Abbildung 28	Darstellung der Maske von erhellten Pixeln.	32
Abbildung 29	Darstellung der Kombination der Masken.	33
Abbildung 30	Darstellung des Kontur-Algorithmus	34
Abbildung 31	Darstellung eines Defekts auf der Rückseite. Umkreist ist ein Defekt mit Halo auf der Rückseite.	35
Abbildung 32	Beispiel des RANSAC-Verfahrens.	36
Abbildung 33	Messung von Pixeln einer Kontur. Rot: cv2-Funktion <code>contourArea(cnt)</code> Blau: Manuelle Pixelzählung.	38
Abbildung 34	Vereinfachte Kommunikation zwischen Frontend und Backend.	40
Abbildung 35	Streudiagramme zur Abhängigkeit der Ausführungszeit von der Fehleranzahl sowie der gesamten Fehlerfläche. Die roten Linien zeigen jeweils die aus den Messpunkten berechneten linearen Trendlinien. Die End-to-End-Prüfzeit beginnt mit dem Laden der Bilder in der Benutzeroberfläche und endet mit der vollständigen Anzeige und Speicherung der Ergebnisse. Messreihe dargestellt in Abschnitt A.4.	43
Abbildung 36	Prozentuale Laufzeitverteilung des Programms.	43
Abbildung 37	Vergleich von Reinigungsrückstand und Kratzer. Für diese Bilder wurde nicht die Testoptik verwendet.	49
Abbildung 38	Darstellung eines <i>flood-fill</i> -Algorithmus - Ausschnitt aus Programm. .	IX
Abbildung 39	Repräsentative Einzelmessungen verschiedener erkannter Fehlerarten und Fehlergrößen. Fehler S1 ist mittig rechts.	XI

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1	Zeitliche Bewertung der Kameravorbereitung sowie der Bildaufnahme inklusive Kalibrierung.	44
Tabelle 2	Ergebnisse der manuellen Verifizierung der Programmausgabe.	45
Tabelle 3	Aus der manuellen Verifizierung berechnete Kennwerte der Fehlererkennung.	45
Tabelle 4	<i>Vergleich der manuell und programmbasiert bestimmten Defektflächen. Der Faktor entspricht dem Quotienten aus Programmwert und manuellem Messwert. Darstellungen in Abschnitt A.5. P = Punktdefekt, S = Kratzer, GS = Kratzer aus mehreren Einzelstücken. .</i>	47
Tabelle 5	Vergleich der manuell und programmbasiert bestimmten Fehlerbreiten. Der Faktor entspricht dem Quotienten aus Programmwert und manuellem Messwert.	47
Tabelle 6	Abweichungswerte der Analyse derselben Bilddaten. Messwerte in Abschnitt A.6 Tabelle 11.	50
Tabelle 7	Abweichungswerte der Analyse derselben Optik in selber Position in unterschiedlichen Bildern. Messwerte in Abschnitt A.6 Tabelle 12.	50
Tabelle 8	Wiederholbarkeit der Drehmessung: Abweichungswerte der drei Messreihen. Messreihen dargestellt in Tabelle 13.	51
Tabelle 9	Kompakte Übersicht der gemessenen Laufzeiten und erkannten Fehler. . .	X
Tabelle 10	CSV-Auszug der vier für den Flächenvergleich verwendeten Fehlerstellen.	XII
Tabelle 11	Wiederholbarkeit: Analyse derselben Bilddaten.	XIII
Tabelle 12	Wiederholbarkeit: Analyse derselben Optik in unterschiedlichen Bildern.	XIII
Tabelle 13	Wiederholbarkeit der Drehmessung: Übersicht aller Einzelmessungen. .	XIV

Abkürzungsverzeichnis

APS-C	Advanced Photo System Type C (Kamerasensorformat)
CMOS	Complementary Metal-Oxide Semiconductor
CNN	Convolutional Neural Network (übersetzt: faltendes neuronales Netzwerk)
CSV	Comma-Separated Values (übersetzt: durch Trennzeichen getrennte Werte)
CV2	Python-Schnittstelle der Open Source Computer Vision Library
EDSDK	Canon EOS Digital Software Development Kit
EF-S	Electro-Focus Short Back Focus (Canon-Objektivanschluss)
EOS	Electro-Optical System
F1	F1-Score (harmonisches Mittel aus Präzision und Erkennungsrate)
FN	False Negative (übersetzt: falsch negatives Ergebnis)
FP	False Positive (übersetzt: falsch positives Ergebnis)
GP	Gigapixel
HTML	Hypertext Markup Language
HTTP	Hypertext Transfer Protocol
HSV	Hue, Saturation, Value (übersetzt: Farbton, Sättigung, Helligkeitswert)
ID	Identifizier (übersetzt: Identifikationsnummer)
ISO	International Organization for Standardization
JSON	JavaScript Object Notation
KI	Künstliche Intelligenz
LED	Light-Emitting Diode (übersetzt: Leuchtdiode)
ML	Machine Learning (übersetzt: maschinelles Lernen)
OpenCV	Open Source Computer Vision Library
PC	Personal Computer
PDF	Portable Document Format
PLA	Polylactide (übersetzt: Polymilchsäure)
RANSAC	Random Sample Consensus
RGB	Rot, Grün, Blau
ROI	Region of Interest (übersetzt: Bereich von Interesse)
SDK	Software Development Kit
TP	True Positive (übersetzt: richtig positives Ergebnis)
UART	Universal Asynchronous Receiver-Transmitter
USB	Universal Serial Bus
VHP	Very High Power (übersetzt: sehr hohe Leistung)

Formelzeichenverzeichnis

- A_g Äquivalente Defektgröße eines örtlich begrenzten oder großflächigen Defekts; entspricht der Quadratwurzel der Defektfläche [mm]
- B Geschätztes Hintergrund- beziehungsweise Beleuchtungsprofil [Grauwert]
- $d_{\min}$ Größe des kleinsten zu erfassenden Defekts [mm]
- d_{px} Durchmesser der Optik im Bild [px]
- E Maximale Tiefe eines Randaussprungs, gemessen von der theoretischen Optikkontur [mm]
- G_σ Gauß-Glättungsoperator mit der Standardabweichung σ
- I Grauwertbild beziehungsweise Matrix der Bildintensitäten [Grauwert]
- $I_{\text{korrigiert}}$ Beleuchtungskorrigiertes Grauwertbild [Grauwert]
- K Abmessung des quadratischen Gauß-Kernels zur Beleuchtungshomogenisierung [px $\times$ px]
- L Kantenlänge der quadratischen Prüffläche beziehungsweise erfasste Kantenlänge [mm beziehungsweise μm]
- M Binäre Prüfmaske beziehungsweise ROI-Maske
- m Kantenlänge eines quadratischen Filterkerns oder Pixelfelds [px]
- N Anzahl der zur Mittelwertbildung verwendeten Aufnahmen
- N_{pix} Erforderliche Gesamtzahl der Bildpixel [px]
- N_{px} Anzahl der Bildpixel entlang der betrachteten Kante [px]
- n Stichprobenumfang einer Messreihe
- $n_{\min}$ Mindestanzahl von Pixeln zur Abbildung des kleinsten Defekts [px]
- p Räumliche Auflösung [$\mu\text{m}/\text{px}$]
- W Breite eines langen Kratzers [mm]
- α Neigungswinkel der Lichtquelle gegenüber der horizontalen Ebene [$^\circ$]
- ε Kleine positive dimensionslose Konstante zur Vermeidung einer Division durch null
- μ Mittelwert der betrachteten Pixelwerte [Grauwert]
- σ Standardabweichung der Pixelwerte [Grauwert] beziehungsweise Standardabweichung der Gauß-Glättung [px]
- $\odot$ Elementweise Multiplikation zweier Bilder oder Matrizen (Hadamard-Produkt)

A Anhang

Inhaltsverzeichnis Anhang

A.1 Hardwaregrundlagen	IX
A.2 Auflösungsberechnung	IX
A.3 Untersuchung des Flood-Fill-Ansatzes zur ROI-Bestimmung	IX
A.4 Zeitmessungen	X
A.5 Defektgrößenmessungen	X
A.6 Wiederholbarkeitsmessungen	XII
A.7 Defektkarte	XV

A.1 Hardwaregrundlagen

Die Berechnungen finden zu Testzwecken auf einem DELL Latitude 5300 Laptop statt. Alle späteren gemessenen Zeiten und Werte beziehen sich, sofern nicht anders erwähnt, auf die folgende Hardware. Das vorliegende Modell ist mit einem Intel i5-8365U mit einem Takt von bis zu 4,1 GHz ausgestattet und besitzt vier Kerne und acht Threads. Zusätzlich verfügt der Laptop über 16 GB DDR4 RAM, welcher auf $2400 \frac{\text{MT}}{\text{s}}$ betrieben wird [23].

A.2 Auflösungsrechnung

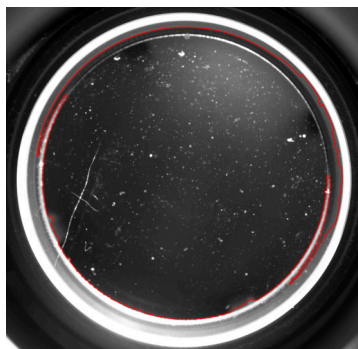
Die räumliche Auflösung ergibt sich aus dem Verhältnis zwischen der erfassten Kantenlänge und der Anzahl der Bildpixel entlang dieser Kante:

$$p = \frac{L}{N_{\text{px}}} \quad (9)$$

Dabei bezeichnet p die räumliche Auflösung in Mikrometern pro Pixel, L die erfasste Kantenlänge in Mikrometern und N_{px} die Anzahl der Pixel entlang dieser Kante.

A.3 Untersuchung des Flood-Fill-Ansatzes zur ROI-Bestimmung

Mit einem Blick auf ein Rohbild wirkt die Lösung logisch, denn der wichtige Bereich ist von einem hellen Außenring umschlossen. Für diesen Schritt ist also nur die Helligkeitsinformation relevant. Wendet man einen sogenannten *flood-fill*-Algorithmus auf das zugehörige Graustufenbild an, so sollte die relevante Fläche ausgeschnitten werden können. Ein solcher Füllalgorithmus vergleicht die Pixelwerte anhand ihrer absoluten oder relativen Differenz. Überschreitet diese einen festgelegten Schwellenwert, wird der betreffende Pixel nicht mehr der Fläche zugeordnet. Der Schwellenwert wird als positive ganze Zahl angegeben, da die Pixelintensitäten in diesem Bildformat nur diskrete Werte annehmen.



Absolute Übergangsdifferenz = 4



Absolute Übergangsdifferenz = 3

Abbildung 38: Darstellung eines flood-fill-Algorithmus - Ausschnitt aus Programm.

Abbildung 38 zeigt die Anwendung eines solchen Algorithmus mit unterschiedlichen festgelegten Thresholds für die Differenzen und deren Auswirkung. Bei einem zu großen Threshold (Abbildung 38 links) wird ein Stück des Außenrings zur Innenfläche hinzugezählt, da die Helligkeitsabweichung nicht groß genug ist. Wird der Threshold jedoch verkleinert (Abbildung 38

rechts), wird die Innenfläche nicht ganz ausgefüllt, da durch die Beleuchtung ein erhellter Bereich auf dem Boden und auf der Optik entsteht.

A.4 Zeitmessungen

Die Tabelle 9 zeigt die Messergebnisse der Zeitmessung des Analyseprogramms. Ebenfalls werden Werte wie Mittelwert, Median und Fläche aufgeführt.

Tabelle 9: Kompakte Übersicht der gemessenen Laufzeiten und erkannten Fehler.

Lauf	Fehler_ges	Flaeche_mm2	Laden_s	Mittel_s	Vorver_s	Analyse_s	ISO_s	Detektion_s	Gesamt_s
L01	161	12.56	7.4	0.14	2.23	1.86	0.25	4.34	11.92
L02	752	28.35	7.18	0.12	2.04	8.01	0.31	10.36	17.7
L03	846	26.75	7.06	0.16	2.13	8.29	0.35	10.78	18.04
L04	584	11.9	7.08	0.14	2.13	3.75	0.22	6.11	13.37
L05	485	18.44	7.12	0.24	3.1	5.28	0.28	8.67	16.1
L06	656	9.87	6.92	0.14	2.0	2.76	0.26	5.03	12.13
L07	510	13.91	7.13	0.15	2.17	2.89	0.18	5.24	12.57
L08	89	3.84	7.27	0.12	2.25	0.88	0.13	3.26	10.7
L09	98	0.98	7.2	0.12	2.35	0.98	0.1	3.43	10.79
L10	16	1.78	7.51	0.14	2.59	0.74	0.1	3.43	11.12
L11	31	1.14	7.35	0.12	2.05	0.78	0.09	2.92	10.43
L12	1028	20.43	7.26	0.14	1.99	8.65	0.33	10.97	18.41
L13	1282	16.14	7.94	0.13	2.54	11.99	0.41	14.95	23.07
L14	122	1.44	8.47	0.15	2.28	1.51	0.12	3.91	12.58
L15	80	2.87	7.92	0.18	2.26	1.54	0.16	3.96	12.11
L16	106	1.26	8.16	0.14	2.11	1.1	0.11	3.32	11.67
L17	141	2.87	8.31	0.15	2.37	1.33	0.11	3.81	12.31
L18	626	12.98	7.77	0.12	2.05	3.75	0.23	6.03	13.96
MW	422.9	10.42	7.5	0.14	2.26	3.67	0.21	6.14	13.83
Min	16	0.98	6.92	0.12	1.99	0.74	0.09	2.92	10.43
Max	1282	28.35	8.47	0.24	3.1	11.99	0.41	14.95	23.07

A.5 Defektgrößenmessungen

Folgende Abbildungen (Abbildung 39) zeigen Beispiele für die händische Gegenmessung von Fehlern. Die Tabelle 10 zeigt einen beispielhaften Auszug aus dem Analyseprogramm. So wurden die Fehler händisch gegenübergestellt.

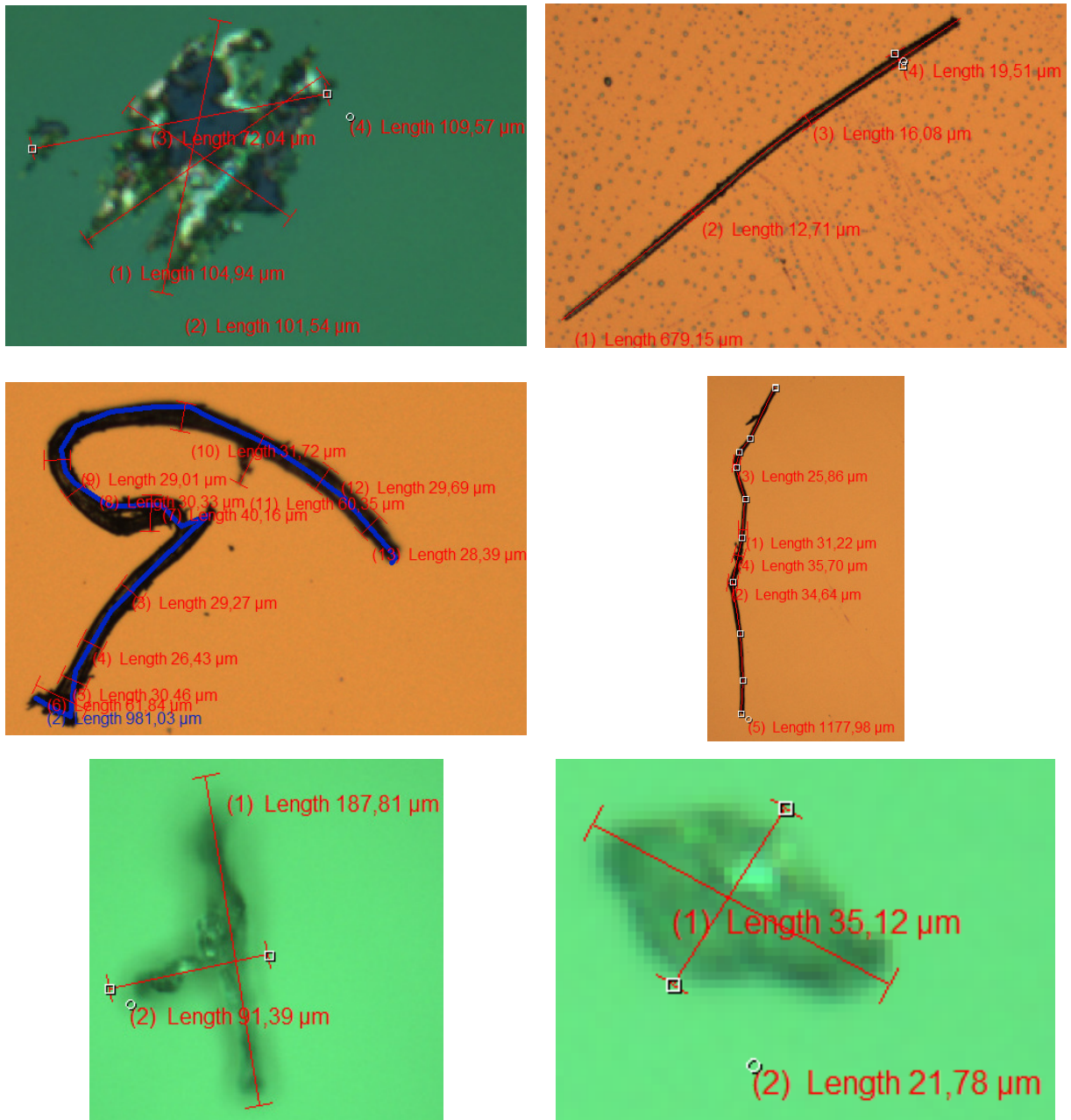


Abbildung 39: Repräsentative Einzelmessungen verschiedener erkannter Fehlerarten und Fehlergrößen. Fehler S1 ist mittig rechts.

Tabelle 10: CSV-Auszug der vier für den Flächenvergleich verwendeten Fehlerstellen.

Fehler	CSV-Feld	Wert
P71	Index	75
	Label	point_candidate
	ISO-Kategorie	limited_imperfection
	ISO-Größe	84,95 μm
	ISO-Klasse	0,1 mm
	Position	x = 2161 px, y = 1665 px
	Bounding Box	6 px $\times$ 7 px
	Fläche	8 px / 7 216,59 μm^2
P79	Index	83
	Label	point_candidate
	ISO-Kategorie	limited_imperfection
	ISO-Größe	301,84 μm
	ISO-Klasse	0,4 mm
	Position	x = 2105 px, y = 1603 px
	Bounding Box	27 px $\times$ 13 px
	Fläche	101 px / 91 109,46 μm^2
P116	Index	120
	Label	point_candidate
	ISO-Kategorie	limited_imperfection
	ISO-Größe	301,84 μm
	ISO-Klasse	0,4 mm
	Position	x = 2485 px, y = 1461 px
	Bounding Box	19 px $\times$ 17 px
	Fläche	101 px / 91 109,46 μm^2
S1	Index	484
	Label	scratch_candidate
	ISO-Kategorie	limited_imperfection
	ISO-Größe	263,55 μm
	ISO-Klasse	0,4 mm
	Position	x = 2986 px, y = 1537 px
	Bounding Box	16 px $\times$ 40 px
	Fläche	77 px / 69 459,69 μm^2
	Länge	1264 μm
	Breite	48,79 μm

A.6 Wiederholbarkeitsmessungen

Die dargestellten Tabellen zeigen die durchgeführten Messreihen zur Überprüfung der Wiederholungsgenauigkeit. Tabelle 11 zeigt dabei die Messung derselben Bilddaten. Tabelle 12 zeigt die Messungen derselben Optik, jedoch mit unterschiedlichen Bilddaten. Tabelle 13 zeigt einen Rotationstest, bei dem Optiken gedreht wurden und deren Fehleranzahl und -fläche notiert wurden.

Tabelle 11: Wiederholbarkeit: Analyse derselben Bilddaten.

Test	Erkannte Fehler	Gesamte Fehlerfläche in μm^2
Test 0	127	5807895,32
Test 1	127	5807895,32
Test 2	127	5807895,32
Test 3	127	5807895,32
Test 4	127	5807895,32
Test 5	127	5807895,32
Test 6	127	5807895,32
Test 7	127	5807895,32
Test 8	127	5807895,32
Test 9	127	5807895,32

Tabelle 12: Wiederholbarkeit: Analyse derselben Optik in unterschiedlichen Bildern.

Test	Erkannte Fehler	Gesamte Fehlerfläche in μm^2
Test 10	1442	30959183,40
Test 11	1473	28306686,05
Test 12	1396	25135572,72
Test 13	1294	26931875,22
Test 14	1476	25704779,09
Test 15	1344	22450619,88

Tabelle 13: Wiederholbarkeit der Drehmessung: Übersicht aller Einzelmessungen.

Mes- sung	Rei- he	Bild	Erkann- te Fehler	ISO-Ge- samt	Begrenz- te Fehler	Lan- ge Feh- ler	Kanten- abplat- zungen	Groß- flächen- fehler	Gesamtflä- che in mm ²
1	1	IMG_0061_mean_10	1096	1090	1086	3	1	6	22,232
2	1	IMG_0076_mean_10	990	983	978	5	0	7	24,832
3	1	IMG_0091_mean_10	1346	1333	1328	4	1	13	20,902
4	1	IMG_0095_mean_10	1346	1333	1328	4	1	13	20,902
5	1	IMG_0106_mean_10	872	864	857	7	0	8	22,589
6	1	IMG_0121_mean_10	1132	1123	1118	5	0	9	20,009
7	1	IMG_0136_mean_10	1172	1166	1159	7	0	6	18,009
8	1	IMG_0151_mean_10	924	915	910	5	0	9	19,051
11	2	IMG_0166_mean_10	119	118	117	1	0	1	3,072
12	2	IMG_0211_mean_10	89	88	86	2	0	1	1,120
13	2	IMG_0226_mean_10	79	79	78	0	1	0	5,185
14	2	IMG_0256_mean_10	182	180	180	0	0	0	0,963
15	2	IMG_0271_mean_10	139	138	138	0	0	0	0,807
16	2	IMG_0286_mean_10	137	136	136	0	0	0	0,863
21	3	IMG_0006_mean_10	291	288	288	0	0	3	13,481
22	3	IMG_0021_mean_10	298	296	296	0	0	2	11,858
23	3	IMG_0036_mean_10	323	322	320	2	0	1	2,354
24	3	IMG_0051_mean_10	420	419	417	2	0	1	4,724
25	3	IMG_0066_mean_10	518	517	516	1	0	1	4,425
26	3	IMG_0081_mean_10	377	374	374	0	0	3	8,221
27	3	IMG_0096_mean_10	310	308	306	2	0	2	8,089

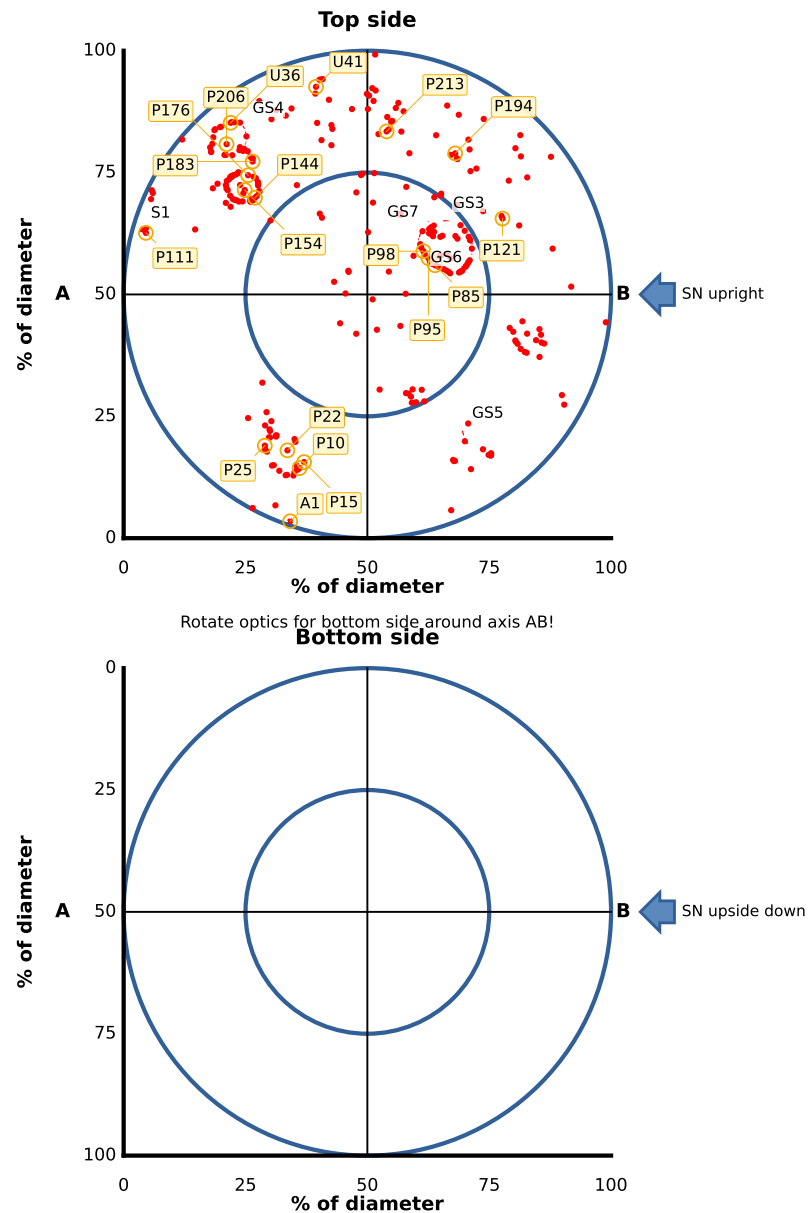
A.7 Defektkarte

Beispiel für Ausgabe einer Defektkarte nach einer Analyse einer defekten Optik.

COHERENT.

Defect map

Type:



SN			Diameter [mm]		Customer inspection	
					☐ OK	
PN		PN coated part	Remark			

Note: according to ISO10110-7 defect sizes smaller than 16% of max. specified defect size and long scratches smaller than 30% of max. specified width for long scratches are not plotted.

Defect Map D137876 Rev. AH

Defect evaluation / ISO 10110-7

Page 1/1

Summary

Counted defects:	296	Edge chips:	1	Counted area:	4,204,923.5 μm^2
Limited imperf.:	293	Large-area:	0		
Long imperf.:	2	Areas total:	2,755,168.9 μm^2		

Defects (top 25 of 296 by ISO class)

Name	ISO type	x [%]	y [%]	Length [μm]	Width [μm]	Area [μm^2]	Size [mm]	ISO class
A1	Edge chip	34.2	3.5	-	-	2755168.9	2.746	4
GS5	Limited imperfection	70.1	20.3	1512.9	40.3	59006.9	0.243	0.25
GS6	Limited imperfection	60.8	60.8	1867.8	46.5	42666.5	0.207	0.25
GS4	Limited imperfection	23.8	85.0	1057.8	36.1	32680.8	0.181	0.25
GS3	Limited imperfection	67.4	64.8	1047.8	39.9	31773.0	0.178	0.25
P176	Limited imperfection	25.5	74.5	-	-	30865.2	0.176	0.25
P206	Limited imperfection	21.1	80.8	-	-	29957.4	0.173	0.25
S1	Limited imperfection	3.4	62.9	392.3	60.2	23602.8	0.154	0.16
P144	Limited imperfection	26.9	69.8	-	-	22695.0	0.151	0.16
GS7	Limited imperfection	62.5	64.1	607.2	40.3	16340.4	0.128	0.16
P25	Limited imperfection	29.0	19.0	-	-	14524.8	0.121	0.16
P213	Limited imperfection	53.9	83.4	-	-	12709.2	0.113	0.16
P98	Limited imperfection	61.5	58.9	-	-	11801.4	0.109	0.16
U41	Limited imperfection	39.5	92.6	-	-	11801.4	0.109	0.16
P111	Limited imperfection	4.6	62.6	-	-	10893.6	0.104	0.16
P183	Limited imperfection	26.5	77.3	-	-	10893.6	0.104	0.16
P10	Limited imperfection	36.1	14.4	-	-	9985.8	0.100	0.1
P121	Limited imperfection	77.7	65.6	-	-	9985.8	0.100	0.1
P154	Limited imperfection	24.8	71.4	-	-	9985.8	0.100	0.1
P95	Limited imperfection	62.5	57.4	-	-	9985.8	0.100	0.1
P15	Limited imperfection	37.0	15.6	-	-	9078.0	0.095	0.1
P194	Limited imperfection	68.0	78.9	-	-	9078.0	0.095	0.1
P22	Limited imperfection	33.6	18.0	-	-	9078.0	0.095	0.1
P85	Limited imperfection	63.9	56.0	-	-	9078.0	0.095	0.1
U36	Limited imperfection	21.9	85.2	-	-	9078.0	0.095	0.1

ISO size: $A_g = \sqrt{\text{area}}$ for limited and large-area defects, W for long scratches, E = edge-chip depth. Class = next preferred ISO 10110-7 size.

Übersicht verwendeter Hilfsmittel

Produktname	Bezugsquelle	Genutzter Funktionsumfang
ChatGPT 5.5 / ChatGPT 5.6	chatgpt.com	Unterstützung bei der Erstellung der Benutzeroberfläche auf Grundlage der vorgegebenen Kommunikationslogik und der bereits implementierten Backend-Schnittstellen. Rechtschreib- und Grammatikkorrektur sowie Verbesserung des Sprachflusses
Codex	chatgpt.com	Fehlersuche und Überarbeitung von Programmcode

Selbstständigkeitserklärung

Hiermit versichere ich, dass die vorliegende Arbeit mit dem Titel

„Optiken unter neuem Licht - Automatisierte Detektion, Messung und Klassifizierung von Oberflächenfehlern auf Hochleistungslaseroptiken“

selbstständig von mir und ohne fremde Hilfe verfasst worden ist, dass keine anderen Quellen und Hilfsmittel als die angegebenen benutzt worden sind und dass die Stellen der Arbeit, die anderen Werken – auch elektronischen Medien – dem Wortlaut oder Sinn nach entnommen wurden, durchgängig unter Angabe der Quelle kenntlich gemacht worden sind. Dies gilt auch für Zeichnungen, Skizzen, bildliche Darstellungen und dergleichen.

Ich erkläre hiermit, dass ich beim Einsatz von IT-/KI-gestützten Schreibwerkzeugen diese Werkzeuge unter der Rubrik < Übersicht verwendeter Hilfsmittel > mit ihrem Produktnamen, meiner Bezugsquelle und einer Übersicht des im Rahmen dieser Arbeit genutzten Funktionsumfangs vollständig aufgeführt habe. Die mit IT-/KI-gestützten Schreibwerkzeugen erstellten Inhalte habe ich steuernd bearbeitet. Ich versichere, dass ich die vorliegende Arbeit oder Teile daraus nicht anderweitig als Prüfungsarbeit eingereicht habe oder diese als Veröffentlichung erschienen ist.

.....

Ort, Datum

.....

Unterschrift

Erklärung zu Nutzungsrechten und Verwertungsrechten¹

Ich bin hiermit einverstanden, dass von meiner Abschlussarbeit (ggf. nach Ablauf der Sperre) ein Vervielfältigungsstück erstellt werden kann, um es der Bibliothek der HAWK zur Verfügung zu stellen und Dritten öffentlich zugänglich zu machen. Ich erkläre, dass Rechte Dritter der Veröffentlichung nicht entgegenstehen.

.....

Ort, Datum

.....

Unterschrift

Sperrvermerk der Abschlussarbeit

- ☐ Kein Sperrvermerk
- ☐ Sperrvermerk für die Dauer der Sperre:
 - ☐ 3 Jahre ☐ 5 Jahre ☐ Dauerhaft

.....

Ort, Datum

.....

Unterschrift

¹Dadurch räumen Sie der HAWK ein einfaches, zeitlich unbeschränktes, unentgeltliches Nutzungsrecht nach §§ 15 Abs. 2 Nr. 2, 16, 17, 19a, 31 Abs. 2 UrhG ein.