Fraunhofer
IPM

FRAUNHOFER-INSTITUT FÜR PHYSIKALISCHE MESSTECHNIK IPM

System zur adaptiven Photonischen OberflächenTestung mit lernfähiger Bildauswertung in Kombination mit einem Reinigungssystem (SysPOT)

Automatisierte Überwachung und Optimierung von Reinigungsprozessen mittels Inline-Partikeldetektion und KI-basierter Klassifikation auf Freiformbauteilen

System zur adaptiven Photonischen OberflächenTestung mit lernfähiger Bildauswertung in Kombination mit einem Reinigungssystem (SysPOT)

Teilvorhaben: Entwicklung und Aufbau des optischen Sensors, Kooperation mit mechanischen Positioniersystemen und Integration der KI-basierten Algorithmen

Teil I: Kurzbericht

Dr.-Ing Dominic Buchta
Fraunhofer-Institut für Physikalische Messtechnik IPM
in Freiburg.

(interne) Projektnummer: 10-09484-2180-00001
Förderkennzeichen: 13N15474
Projektlaufzeit: 01.04.2021 bis 31.03.2024
Projektträger: VDI Technologiezentrum GmbH im Auftrag des Bundesministeriums für Bildung und Forschung

Inhalt

1 Kurzbericht 4
1.1 Aufgabenstellung 4
1.2 Wissenschaftlicher und technischer Stand zu Beginn 4
1.3 Ablauf des Vorhabens 5
1.4 Ergebnisse 5
1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen 5

1
Kurzbericht

1.1
Aufgabenstellung

Hauptziel des Gesamtvorhabens war es, ein neuartiges optisches System zu entwickeln, das zur Inline-Detektion von Partikeln, Defekten und im Idealfall auch filmischen Verunreinigungen in der Lage ist. Die Detektion sollte im Wesentlichen aus zwei Schritten bestehen. Zunächst sollten die Objekte mit einer optischen Messeinheit erfasst werden. Anschließen sollte ein trainiertes neuronales Netz die Messbilder auswerten und Verunreinigungen bzw. Defekte erkennen und klassifizieren. Ein weiteres Ziel des Vorhabens war es, die Ergebnisse solch einer Messung an eine Reinigungsanlage zurückzuspielen und auf Basis eines zweiten neuronalen Netzwerks eine Optimierung der Reinigungsparameter zu erreichen.

Ziel des hier beschriebenen Teilvorhabens war die Entwicklung des optischen Systems zur Erfassung der Verunreinigungen bzw. Defekte. Das Hauptaugenmerk sollte hierbei auf größtmögliche Flexibilität gelegt werden. Der Sensor sollte in der Lage sein sowohl für eben als auch für Freiformoberflächen KI-auswertbare Daten zu liefert. Darüber hinaus sollte er mehrere Messmodi für die Erkennung von Partikeln, Defekten und filmischen Verunreinigungen bieten sowie für unterschiedlich große Partikel nutzbar sein.

1.2
Wissenschaftlicher und technischer Stand zu Beginn

Die Detektion und Größenklassifikation von Partikeln beruhen im Wesentlichen auf kamerabasierten Verfahren. Hierbei werden zunächst Messbilder aufgenommen und diese anschließend auf Basis bestimmter Kriterien (beispielsweise Helligkeitsschwellwert) ausgewertet. Hauptnachteil dieser Verfahren ist die Abhängigkeit der Messergebnisse vom Untergrund. Da Oberflächenbeschaffenheit (beispielsweise Rauheit) oder Krümmung der Objekte starken Einfluss auf das Messbild haben, lassen sich kaum allgemeingültige Mess- und Auswerteparameter festlegen. Aus diesem Grund sind die Einsatzgebiet von Messsystemen die direkt auf der Oberfläche messen wie beispielsweise der „Partsens“ der Fa. PMT auf bestimmte Objekte (typischerweise flach und unstrukturierte Oberfläche) begrenzt. Weitaus verbreiteter ist deshalb das Verfahren wie es in der Norm VDA 19.1 / ISO 16232 beschrieben wird. Hierbei werden die Partikel zunächst vom Objekt extrahiert, was sowohl mit flüssigen Medien als auch trocken durch einen Luftstrom erreicht werden kann. Die Partikel im Medium werden anschließend auf einen Filter abgeschieden. Dieser Filter wird anschließend unter einem automatischen Mikroskop (bswp. von Fa. Jomesa) analysiert (typischerweise mit gekreuzten Polarisatoren, um Reflexe zu unterdrücken). Vorteil dieses Verfahrens ist, dass der Untergrund (der Filter) immer gleich ist und sich deshalb sehr gut allgemeingültige Parameter ableiten lassen. Nachteil ist hingegen, dass dieses Verfahren sehr zeitaufwendig ist, da die Filter entfernt und extern untersucht werden müssen. Des Weiteren können Partikel, die sich farblich nicht von den Filtern unterscheiden nicht erkannt werden.

1.3 Ablauf des Vorhabens

Das Vorhaben wurde als Kooperation zwischen dem IPS (Uni Dortmund), dem Fraunhofer IPM und mehrerer Industriepartner (beispielsweise PI Innovation oder Fa. Gläser GmbH) durchgeführt. Zur gemeinsamen Bearbeitung wurde ein eng abgestimmter Arbeitsplan erstellt, der vier (Haupt-)Arbeitspakete umfasst. Dabei bildeten Arbeitspaket 1.1 (Anforderungsspezifikation und Lastenhefterstellung) den Rahmen für die Zusammenarbeit. Fraunhofer IPM war im Wesentlichen für Arbeitspaket 1 (Entwicklung des optischen Sensors) verantwortlich.

1.4 Ergebnisse

Zentrales Ergebnis des Teilvorhabens ist die Entwicklung und der Aufbau eines Demonstrators zur adaptiven optischen Erfassung von Objekten. Der Demonstrator erlaubt eine Messung auf Freiformflächen dahingehend, dass Licht gezielt aus unterschiedlichen Richtungen eingestrahlt werden kann (sowohl gleichzeitig als auch sequenziell). Hierdurch ist es möglich die Beleuchtung dynamisch an das Objekt anzupassen oder auch mehrere Bilder mit unterschiedlicher Beleuchtung aufzunehmen und die Informationen anschließend zu fusionieren. Zusammen mit dem von Projektpartner IPS und IconPro entwickelten neuronalen Netz, kann hierdurch eine zuverlässige Detektion von Partikeln gewährleistet werden. Es muss allerdings erwähnt werden, dass bei stark gekrümmten oder stark reflektierenden Bauteilen nach wie vor Probleme entstehen können, die allerdings hauptsächlich die Fokussierung betreffen.

Weiteres wichtiges Ergebnis ist die Etablierung eines multimultimodalen Ansatzes für den Sensor. Durch Integration von zwei Messkanälen mit unterschiedlicher Vergrößerung kann zunächst ein schneller grober Scan des Bauteiles durchgeführt werden. Hierbei wird zunächst die Position von Partikeln bestimmt. Für eine Klassifikation können diese Partikel dann nochmals mit dem hochauflösenden Kanal analysiert werden. Darüber hinaus konnte der Informationsgehalt der Bilder durch Implementierung von Farbkameras erhöht werden. Insbesondere zur Materialklassifikation hat sich der Nutzen der spektralen Information gezeigt. Als weiterer Modus wurde auch die Möglichkeit einer Fluoreszenzbildgebung in den Sensor integriert. Es konnte gezeigt werden, dass hiermit sowohl die Detektion von filmischen Verunreinigungen als auch eine deutlich verbesserte Detektion von Partikeln auf Analysefiltern (im Vergleich zum Stand der Technik) erreicht werden kann.

Zusammenfassend sammelt der entwickelte Sensor deutlich mehr Informationen als bestehende Systeme und erlaubt der KI somit genauere Aussagen über Material und Herkunft der Partikel.

1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Die Projektpartner haben sich während der kompletten Projektlaufzeit in regelmäßigen (zweiwöchigen) digitalen sowie (1-2mal pro Jahr) persönlichen Treffen permanent abgestimmt und die Einhaltung von Zeitplan und Erreichen von Meilensteinen damit sichergestellt.

Trotz des Ausfalls von zwei Projektpartnern (Fa. Hexagon Vision GmbH und Fa. LPW Reinigungssysteme GmbH) während des Projekts konnten der Projektfortschritt und die Erreichung der Ziele durch die enge Zusammenarbeit aller Projektpartner sichergestellt werden.

Fraunhofer
IPM

FRAUNHOFER-INSTITUT FÜR PHYSIKALISCHE MESSTECHNIK IPM

System zur adaptiven Photonischen OberflächenTestung mit lernfähiger Bildauswertung in Kombination mit einem Reinigungssystem (SysPOT)

Automatisierte Überwachung und Optimierung von Reinigungsprozessen mittels Inline-Partikeldetektion und KI-basierter Klassifikation auf Freiformbauteilen

System zur adaptiven Photonischen OberflächenTestung mit lernfähiger Bildauswertung in Kombination mit einem Reinigungssystem (SysPOT)

Teilvorhaben: Entwicklung und Aufbau des optischen Sensors, Kooperation mit mechanischen Positioniersystemen und Integration der KI-basierten Algorithmen

Teil II: Eingehende Darstellung

Dr.-Ing Dominic Buchta
Fraunhofer-Institut für Physikalische Messtechnik IPM
in Freiburg.

(interne) Projektnummer: 10-09484-2180-00001
Förderkennzeichen: 13N15474
Projektlaufzeit: 01.04.2021 bis 31.03.2024
Projektträger: VDI Technologiezentrum GmbH im Auftrag des Bundesministeriums für Bildung und Forschung

Inhalt

1 Eingehende Darstellung 4
1.1 Verwendung der Zuwendung 4
1.1.1 Zusammenarbeit 4
1.1.2 Arbeitspaket 1: Entwicklung des optischen Sensors 4
Arbeitspaket 1.1: Anforderungsspezifikation und Lastenhefterstellung 4
Arbeitspaket 1.2: Voruntersuchungen und Referenzmessungen 5
Arbeitspaket 1.3: Entwicklung und Aufbau eines Funktionsmusters des SySPOT-Sensors 11
Arbeitspaket 1.4: Methoden zur Lageerkennung für unterschiedliche Bauteilgeometrie 15
1.1.3 Arbeitspaket 2: KI-basierte Steuerung 16
Arbeitspaket 2.1: Erzeugung einer repräsentativen Datenbasis 16
Arbeitspaket 2.2: Aufbau eines Algorithmus zur Materialklassifikation 16
Arbeitspaket 2.3: Klassifikation der Partikel nach Entstehungsprozess 17
Arbeitspaket 2.4: Klassifikation der Oberfläche nach Defekt-/Verschleißzustand 17
1.1.4 Arbeitspaket 3: Bedarfsorientierte Reinigung 17
Arbeitspaket 3.1: Automatisierte Adaption der Reinigung 17
Arbeitspaket 3.2: Automatisierte Optimierung des Reinigungsprogramms 18
1.1.5 Arbeitspaket 4: Test des SPOT-Sensors an Reinigungsanlagen 18
Arbeitspaket 4.1: Test des SPOT- Funktionsmusters bei Anwendern 18
Arbeitspaket 4.2: Analyse der Produktionsoptimierung bei Anwendern 20
1.2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises 20
1.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit 21
1.4 Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit des Ergebnisses 21
1.5 Fortschritt anderer Stellen auf dem Gebiet des Vorhabens 22
1.6 Veröffentlichungen 22

1 Eingehende Darstellung

1.1 Verwendung der Zuwendung

1.1.1 Zusammenarbeit

Gemäß Antrag wurde das Projekt durch regelmäßige Projekttreffen im Halbjahresrhythmus begleitet. Diese fanden aufgrund der Corona-Pandemie entweder rein digital oder in hybrider Form (in Freiburg und Dortmund) statt. Zusätzlich zu den Projekttreffen haben sich die Partner in zweiwöchigen Regelmeetings (digital) zur Abstimmung getroffen. Hierdurch konnte eine effiziente Entwicklung des Sensors sichergestellt werden.

1.1.2 Arbeitspaket 1: Entwicklung des optischen Sensors

Arbeitspaket 1.1: Anforderungsspezifikation und Lastenhefterstellung

– *gemeinsames Arbeitspaket mit allen Projektpartner* –

Gemäß Arbeitspaket 1.1 haben die Projektpartner zu Beginn des Projekts wichtige Anforderungen an das Messsystem festgelegt. Hierzu fanden mehrere (digitale) Treffen aller Projektpartner statt. Wichtig war hierbei insbesondere auch der Input der assoziierten Partner, die einen direkten Anwendungsbezug herstellen konnten. In den Diskussionen hat sich gezeigt, dass die Anforderungen an ein geeignetes Messsystem sehr von der geplanten Anwendung abhängen. Idealerweise ist der Sensor also in der Lage sich adaptiv an unterschiedliche Situationen anzupassen. Dies gilt insbesondere für die möglichen Objekte. Hierbei wurden folgende Objektklassen als besonders wichtig (verbreitet) festgehalten:

1. Metallische Bauteile

   Dies umfasst sowohl ebene als auch gekrümmte Bauteile aus einem metallischen Werkstoff wie beispielsweise Aluminium oder Edelstahl. Ebenfalls abgedeckt sein sollen spiegelnde Lackierungen bzw. dünne Schichten beispielsweise aus Chrom

2. Analysefilter einer Extraktionsanlage

   Diese Filter bestehen zumeist aus einem Polymer wie Nylon oder PET und sind entweder gewebt oder geschäumt. Sie unterscheiden sich aufgrund ihres Materials und der Oberflächenstruktur stark von metallischen Bauteilen. Sie werden zumeist genutzt, um Partikel nach einer Extraktion abzuscheiden und anschließend zu untersuchen. Da dies den aktuellen Stand-der-Technik bei der Partikelanalyse darstellt, kommt der Untersuchung von Analysefiltern eine besondere Bedeutung zu. Weiterer wichtiger Punkt der Anforderungsspezifikationen stellte die Auswahl der zu identifizierenden „Merkmale“ dar. Hierbei wurden folgende Merkmale als besonders wichtig identifiziert:

1. Partikel

   Dies schließt Partikel unterschiedlicher Materialien ein. Aufgrund ihrer Kritikalität müssen insbesondere metallische Partikel zuverlässig erkannt werden. Aber auch Partikel aus Kunststoff und Fasern sollten detektiert werden.

2. Defekte

   Es sollen eine Vielzahl von Defekten an metallischen Bauteilen erkannt werden, insbesondere Dellen, Kratzer und Abplatzungen.

3. Filmische Verunreinigungen

   Neben der Detektion von Partikeln und Defekten sollen auch filmische Verunreinigungen von organischen Prozessstoffen wie Ölen und Fetten detektiert werden.

Weitere Teile des Lastenhefts sind in folgender Tabelle gezeigt

Lastenheft	**Pflichtenheft**
Partikel bzw. Defektgröße < 5µm	Auflösung besser als 0.5µm/Pixel (gemäß VDA 19.1)
Anwendung an Roboter+Hexapod möglich	Gewicht < 5 kg
Menge filmischer Verunreinigungen < 100mg/m²	Fluoreszenzmessung mit High Power LEDs

Arbeitspaket 1.2: Voruntersuchungen und Referenzmessungen

– *gemeinsames Arbeitspaket mit IPS und Hexagon* –

Ein Ziel von Arbeitspaket 1.2 bestand in der Identifizierung beziehungsweise der Ausarbeitung geeigneter Referenzverfahren, um das Sensorkonzept bzw. den Demonstrator hinsichtlich seiner Eignung zu bewerten. Da der Sensor unterschiedliche Anwendungen bedienen soll, sind auch mehrere Referenzverfahren notwendig. Für die Partikeldetektion kommen je nach Anwendung zwei unterschiedliche Verfahren zum Einsatz, die sich teilweise auch ergänzen können. Für die Messung auf Analysefiltern existiert mit einem automatisierten Mikroskop von Fa. Jomesa ein verbreitetes und in der Industrie akzeptiertes Messsystem. Bei Projektpartner Gläser GmbH steht ein solches System zur Verfügung, das im Projekt für Referenzmessungen genutzt wurde. Für die Messung direkt auf den Bauteilen steht ein solches Referenzsystem nicht zur Verfügung. Stattdessen kann hier auf die gezielte Verunreinigung mit Normpartikeln zurückgegriffen werden. Diese Partikel besitzen eine definierte Größe und können in unterschiedlichen Materialien und aus unterschiedlichen Herstellungsprozessen gekauft werden. Hierdurch kann neben der Detektion also auch die Klassifikation (Größe, Material, Herkunft) referenziert werden. Als Referenzverfahren zur Detektion von Defekten wurden von assoziierten Partner Walter GmbH Platten mit „Kugeleindrücken“ definierter Größe und Tiefe zur Verfügung gestellt. Als letztes Referenzverfahren kam ein gravimetrisches Verfahren zum Einsatz, das es ermöglicht über eine Hochpräzisionswaage die Ölauflage zu messen. Hierbei wird ein Bauteil zunächst gereinigt und gewogen. Anschließend wird ein Öl aufgebracht und mittels einer zweiten Wägung die Menge bestimmt. Über die

Oberfläche des Bauteils kann dann die mittlere Ölauflage berechnet werden. Folgende Tabelle gibt nochmals einen Überblick über die genutzten Referenzverfahren:

Messparameter	**Referenzverfahren**
Detektion von Partikeln auf Analysefilter	Jomesa-Mikroskop
Detektion von Partikeln auf Freiformoberflächen	Normpartikel
Klassifikation von Partikeln in metallische/nicht-metallisch	Jomesa-Mikroskop (auf Analysefiltern) und Normpartikel (auf Bauteil)
Größenklassifikation von Partikeln	Jomesa-Mikroskop (auf Analysefilter) (auf Bauteil) und Normpartikel
Klassifikation von Partikeln bezüglich Herkunft	Normpartikel
Ölauflage	Gravimetrisch mit Waage
Defekte	Norm-Kugeleindrücke auf Metallplatten

Nachdem die Referenzverfahren bestimmt waren, wurde ein Konzept des optischen Sensors ausgearbeitet, das die in Arbeitspaket 1.1 festgelegten Spezifikationen erfüllt. Kernideen waren dabei die Umsetzung einer adaptiven Beleuchtung sowie einer multiskaligen Detektion. Ersterem liegt zugrunde, dass eine Partikeldetektion auf metallischen Bauteilen im Allgemeinen am besten mit Dunkelfeldbeleuchtung (0° zur Oberfläche) gelingt. Bei Freiformbauteilen muss man die Beleuchtung also an die Krümmung des Objekts anpassen. Des Weiteren liegt die technische Innovation in der gleichzeitigen Detektion mit unterschiedlichen Vergrößerungen. Zunächst soll das Objekt mit einer geringen Vergrößerung vermessen werden, was zwar zu einem großen Messfeld und damit einer schnellen Messung führt, allerdings auch mit einer schlechteren Auflösung einhergeht. Die Idee ist nun diese Messung nur zur Lokalisation von Partikeln bzw. Defekte zu nutzen, nicht jedoch zu deren Klassifikation, da man hier typischerweise eine gute Auflösung benötigt. Anschließend an die erste schnelle Messung kann mit einer großen Vergrößerung bzw. hohen Auflösung nochmals gezielt an den Stellen der Partikel gemessen werden und damit gesicherte Aussagen über Größe, Typ und Herkunft der Partikel/Defekte getroffen werden. Hierbei wird sich zu Nutze gemacht, dass Partikel oder Defekte nur in sehr geringer Zahl erwartet werden. Es ist also davon auszugehen, dass nicht das komplette Bauteil mit der hohen Vergrößerung vermessen werden muss. Ein weiterer Teil des Sensorkonzepts beinhaltet die Messung der filmischen Verunreinigungen mittel Fluoreszenz. Hierbei sollen in den Sensor UV-LEDs sowie geeignete Filter eingebaut werden.

Auf Basis dieses Grundkonzepts wurden zunächst einige Voruntersuchungen durchgeführt, um den Aufbau detaillierter auszulegen. In ersten Versuchen wurde zur Umsetzung der unterschiedlichen Beleuchtungsrichtungen hierfür eine Beleuchtung mittels SLM, mikrostrukturierter Platte (Fresnel-Linse) und einer Spiegelkonstruktion untersucht. Auf Basis von Simulationen wurde ein Aufbau umgesetzt, der in Abb. 1 gezeigt ist.

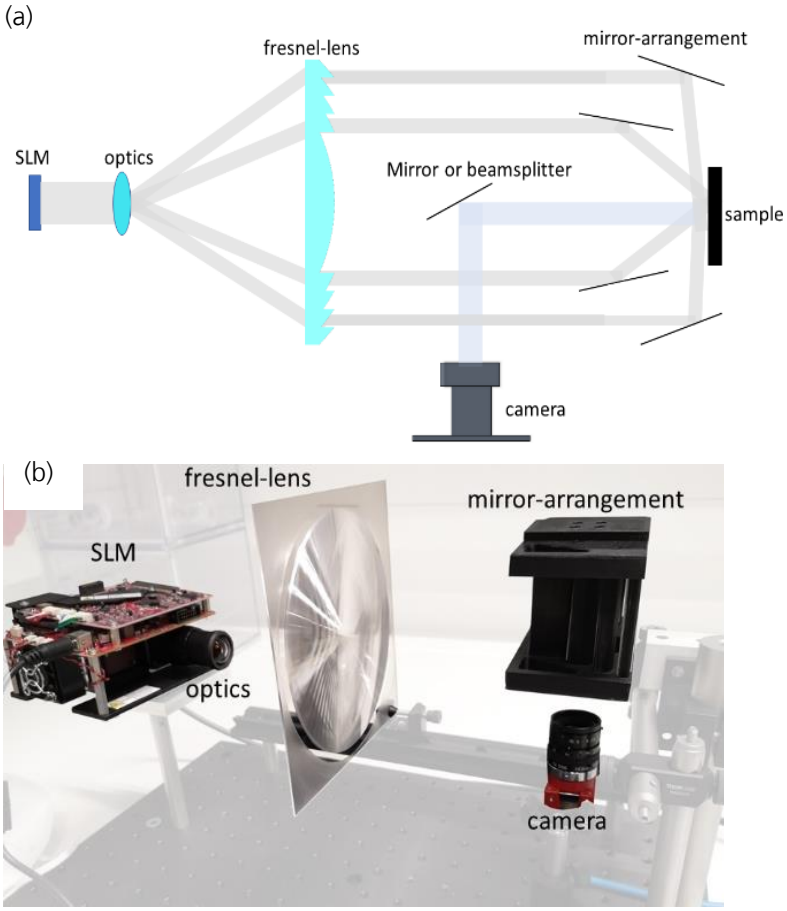


Abb. 1: Testaufbau zur adaptiven Beleuchtung mittels SLM. (a) Theoretische Skizze mit Strahlengängen. (b) Umgesetzter Laboraufbau.

Durch einfaches Schalten des SLM, können unterschiedliche Bereiche der Fresnel-Linse beleuchtet werden. Die Linse erzeugt paralleles Licht welches anschließend in die Spiegelkonstruktion fällt. Die Konstruktion hat mehrere Kanäle, bei denen die Spiegel in unterschiedlichen Winkeln angebracht sind. Durch Beleuchtung unterschiedlicher Kanäle mit dem SLM (+Fresnel-Linse) lassen sich somit unterschiedliche Winkel erzeugen. In Abb. 2 sind beispielhaft Ergebnisse bei der Beleuchtung mit unterschiedlichen Kanälen bei einem mit Partikeln verunreinigten Objekt gezeigt. Wie bei einem flachen Spiegel zu erwarten, wird deutlich, dass der beste Kontrast mit Kanal 1 (0°=Dunkelfeld) erreicht wird. Weitere Untersuchungen haben gezeigt, dass prinzipiell auch gekrümmte Oberflächen mit diesem Ansatz untersucht werden können. Vorteil dieses Aufbaus ist seine hohe Flexibilität. Durch eine zweite Fresnel-Linse anstelle der Spiegelkonstruktion, können praktisch beliebige Beleuchtungsmuster erzeugt werden. Hierbei gilt es allerdings zu beachten, dass mit einem solchen Aufbau kein extremes Dunkelfeld möglich ist, da die Fresnellinse ansonsten nur einen sehr kurzen Abstand zum Objekt haben dürfte. Eine Lösung könnte eine Kombination aus Spiegelkonstruktion (für Dunkelfeld) und zweiter Fresnellinse sein.

Obwohl sich dieser Aufbau also prinzipiell für eine äußerts flexible Beleuchtung eignet, hat er bezüglich der in AP 1.1 festgelegten Spezifikationen einige erhebliche Nachteile. Für ein kompaktes Design mit mikroskopischer Vergrößerung, die aufgrund der sehr kleinen Partikel von großer Bedeutung ist, ist der Aufbau mit Fresnellinse nur bedingt

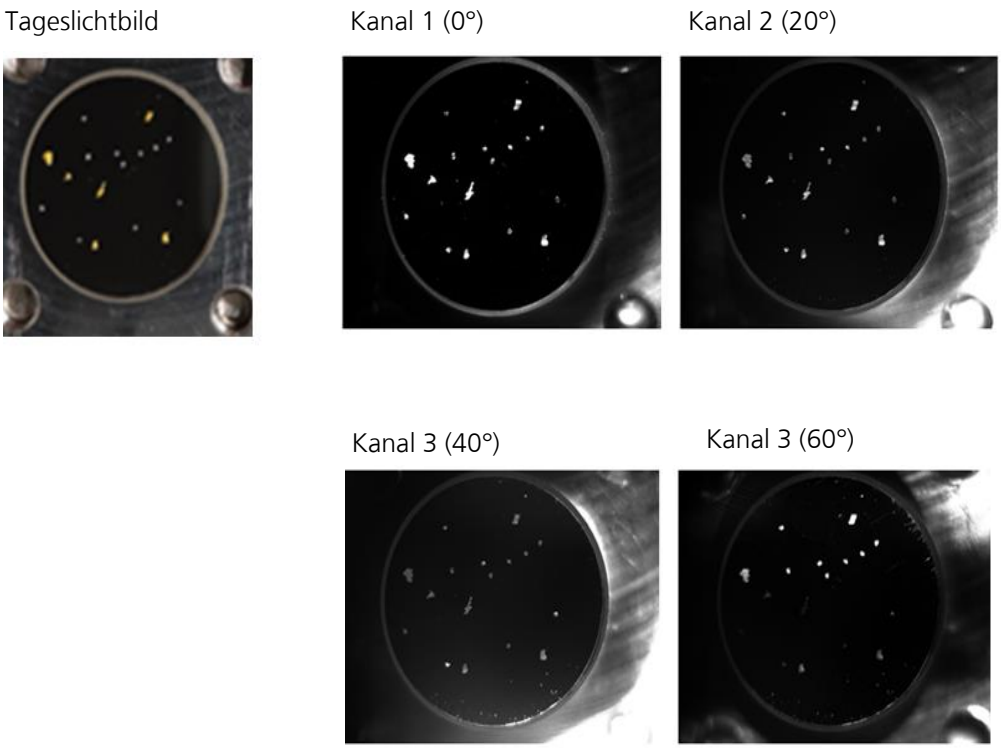


Abb. 2: Testmessungen mit SLM-Aufbau an einem Spiegel mit Partikeln (Kunststoff und Aluminium)

geeignet. Dies liegt im Wesentlichen daran, dass er keine kleinen Abstände von Objektiv zum Objekt vorsieht, was für eine hohe Auflösung allerdings notwendig ist. Darüber hinaus ist eine Fluoreszenzmessung, die zur Detektion filmischer Verunreinigungen genutzt werden soll mit einem solchen Aufbau nicht umsetzbar, da einerseits die LEDs des eingesetzten Projektors keine UV-Beleuchtung ermöglichen und andererseits die (Kunststoff-) Fresnellinse selbst fluoresziert.

Für weitere Voruntersuchen wurde stattdessen ein makroskopischer und ein makroskopischer Aufbau mit winkelverstellbaren Lichtleisten umgesetzt. Die beiden Aufbauten haben folgende Eigenschaften:

Makroskopischer Aufbau:

Bildfeld: 10x7,5mm²

Auflösung: 5µm/Pixel

Mikroskopischer Aufbau:

Bildfeld: 2x1,5mm²

Auflösung: 1µm/Pixel

Mit diesen beiden Labortestsystemen wurden zunächst wieder Partikel auf einem Spiegel untersucht. Die Ergebnisse für 36µm Aluminium (Makroskop und Mikroskop) sowie für

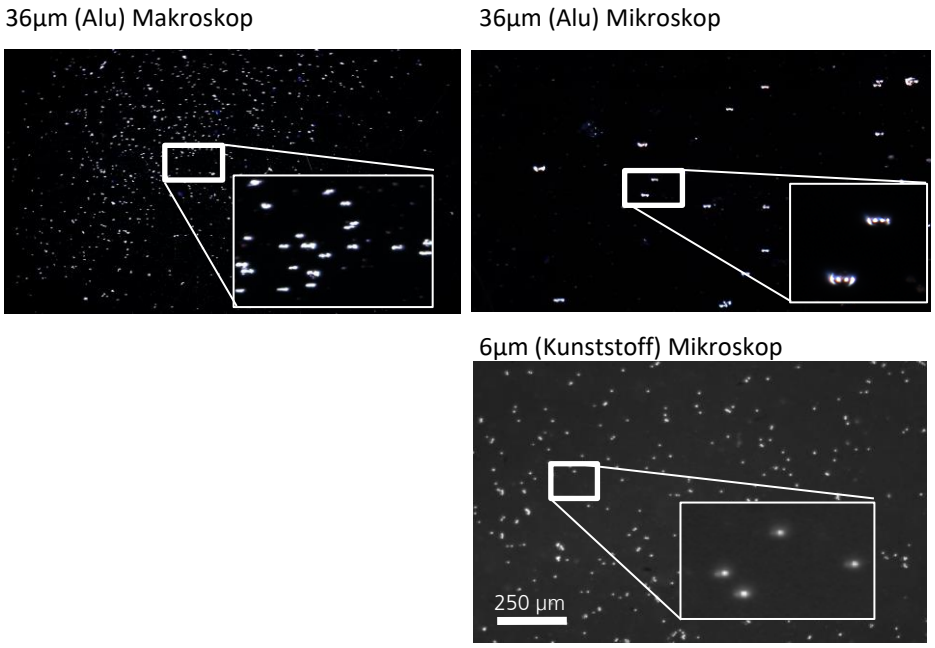


Abb. 3: Kleine Partikel (36µm Aluminium und 6µm Kunststoff) auf einem Spiegel, gemessen mit Testaufbauten zur makroskopischen und mikroskopischen Vergrößerung.

6µm schwarze Kunststoffpartikel (Mikroskop) sind in Abb. 3 gezeigt. Die Messungen haben gezeigt, dass auch Partikel mit einer Größe von ca. 5µm mit einer mikroskopischen Vergrößerung detektiert werden können. Die Untersuchungen haben weiterhin gezeigt, dass auch für größere Partikel eine höhere Vergrößerung sinnvoll sein kann, da mehr Details sichtbar werden. Durch die zusätzliche Information wird eine Klassifikation vereinfacht bzw. genauer.

Weitere Voruntersuchungen, die mit dem Testsystem durchgeführt wurden, beziehen sich auf die Defekte. Hierbei wurde gemäß des beschriebenen Referenzverfahrens Kugeleindrucke untersucht. Beispielhaft sind die Ergebnisse für Kugeleindrucke mit einem Durchmesser von 500µm und einer Eindringtiefe von 5µm sind in Abb. 4 gezeigt. Es konnte gezeigt werden, dass die Kugeleindrucken sowohl im makroskopischen als auch im mikroskopischen System zu detektieren sind. In Übereinstimmung mit den Untersuchungen an den Partikeln konnte nachgewiesen werden, dass unterschiedliche Beleuchtungsrichtungen zusätzliche Informationen bringen, die eine Detektion und Klassifikation der Defekte verbessern.

Speziell für die Untersuchung auf Filtern wurde in den Voruntersuchgen außerdem die Möglichkeit einer Detektion auf Basis der Fluoreszenz untersucht. In spektrometrischen Messungen von Nylon-Filtern hat sich gezeigt, dass bei einer Anregung mit 365nm eine starke Fluoreszenz im Bereich zwischen 390nm und 420nm auftritt. In weiteren Versuchen wurden die Filter gezielt mit Kunststoff- (Polypropylen) und Metallpartikeln (Aluminium) verunreinigt und die Fluoreszenzmessung mit der häufig eingesetzten Polarisation-Methode verglichen. Die Ergebnisse einer solchen Messung sind in Abb. 5 dargestellt.

Die durchgeführten Versuche zeigen, dass mit der „klassischen“ Variante einer Messung mit gekreuzten Polarisatoren der Großteil der Partikel detektiert werden kann. Es gibt allerdings bestimmte Partikel (in diesem Beispiel grüne Kunststoffpartikel), die keinen ausreichenden Kontrast erzeugen. Die Voruntersuchungen legen nahe, dass solche

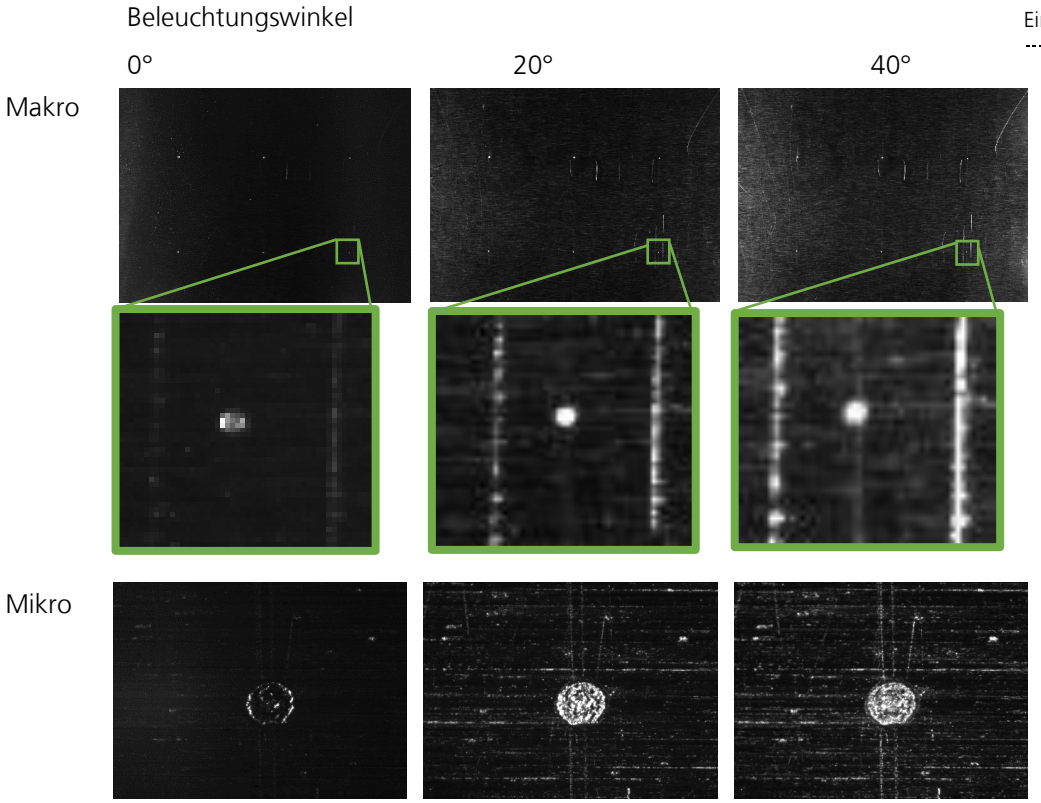


Abb. 4: Beispiel zu den Testmessungen bei unterschiedlichen Beleuchtungsrichtungen. Kugeleindrücke mit Kugeldurchmesser 500µm und Eindringtiefe 5µm (Aluminiumplatte)

Partikel im Allgemeinen mit der Fluoreszenz-Bildgebung sichtbar gemacht werden können. Darüber hinaus werden auch Fasern im Fluoreszenzbild gut sichtbar und lassen sich aufgrund ihrer Helligkeit von metallischen und nicht-metallischen Partikeln unterscheiden. Nachteil der Fluoreszenzmethode ist die unzureichende Unterscheidung von metallischen und nicht-metallischen Partikeln. Während bei der Polarisationsmethode durch einen Vergleich von gekreuzten und parallelen Polarisatoren eine Klassifikation möglich ist, kann dies anhand des Fluoreszenzbildes nicht gewährleistet werden. Die Fluoreszenz bildet also eine gute Ergänzung zur klassischen Bildgebung, kann diese aber nicht komplett ersetzen.

Des Weiteren ist bekannt, dass die Fluoreszenz auch zur Detektion filmischer Verunreinigungen auf metallischen Bauteilen geeignet ist.

Aus den Voruntersuchungen haben sich zusammenfassend folgende Eigenschaften ergeben, die der zu entwickelnde Sensor erfüllen sollte, um eine möglichst vollständige Detektion und Klassifikation von Partikeln, Defekten und filmischen Verunreinigungen zu gewährleisten:

- Zwei Vergrößerungen (1x und 5x)
- Lichtleisten in unterschiedlichen Winkeln (0°, 20°, 40°, 60°)
- Fluoreszenz-Bildgebung

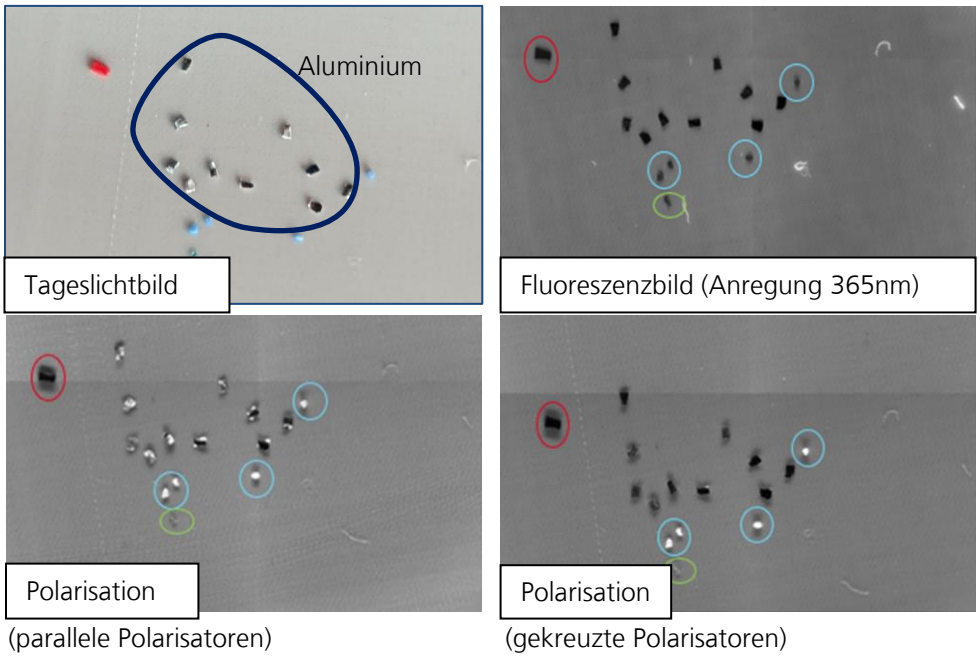


Abb. 5: Testmessungen zum Vergleich von Fluoreszenz- und Polarisationsbildgebung bei der Detektion von Partikeln auf Nylon-Filtern.

Arbeitspaket 1.3: Entwicklung und Aufbau eines Funktionsmusters des SySPOT-Sensors

– *gemeinsames Arbeitspaket mit PI und Hexagon* –

In Arbeitspaket 1.3 wurde der optische Sensor zur Bildaufnahme entwickelt und ein Funktionsmuster für Tests aufgebaut und charakterisiert. Grundlage zur Entwicklung des Sensors bilden die in Arbeitspaket 1.1 festgelegten Spezifikationen sowie die in Arbeitspaket 1.2 untersuchten Eigenschaften. Wie bereits beschrieben spielt die Beleuchtung eine entscheidende Rolle bei der Detektion und Klassifikation von Partikeln bzw. Defekten. Da es je nach Bauteil und zu erwartender Verunreinigung sinnvoll sein kann die Beleuchtung anzupassen, wurde viel Wert auf eine flexible und auch austauschbare Beleuchtung gelegt. Für ein erstes Funktionsmuster wurde deshalb ein Beleuchtungsmodul entwickelt, das bei Bedarf ausgetauscht werden kann. Das Modul basiert auf schnell schaltbaren LEDs, die einen geringen Abstrahlwinkel von 20° besitzen. Hierdurch kann die Beleuchtung an die Oberfläche angepasst werden (zum Beispiel bei gekrümmten Oberflächen). Der Beleuchtungskopf ist in Abbildung 6 (a) gezeigt. Darüber hinaus ermöglichen die eingesetzten UV-LEDs auch eine Fluoreszenzmessung zur Detektion filmischer Verunreinigungen bzw. zur Messung auf Analysefiltern. Um noch mehr Flexibilität zu gewährleisten, kann die Beleuchtungseinheit optional mit einem transparenten Einsatz versehen werden (siehe Abb. 6 (b)). Je nach Einsatzgebiet kann hierdurch eine diffuse oder polarisierte Beleuchtung erreicht werden. Ein genereller Nachteil einer Dunkelfeldbeleuchtung (unterste Lichtleiste) ist der notwendige geringe Abstand zwischen Beleuchtungseinheit und Bauteil. Während bei ebenen oder konkav geformten Oberflächen dies im Allgemeinen kein Problem darstellt, kann bei konvex geformten Bauteilen ein geringer Abstand oft nicht erreicht werden, da es hierbei zu

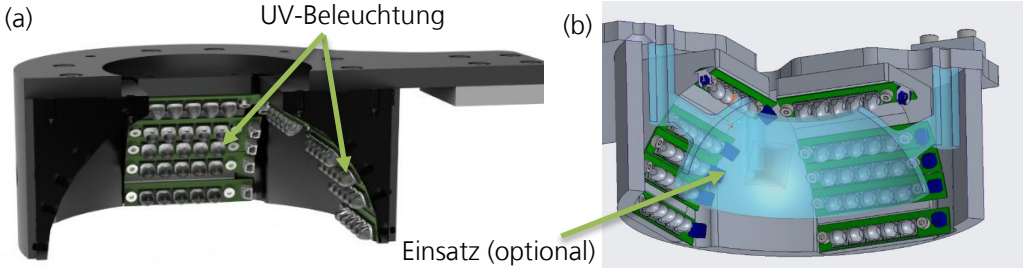


Abb. 6: (a) CAD-Bild der Beleuchtungseinheit. Pro Seite ist die Einheit mit vier Leisten Weißlicht-LEDs und einer Leiste UV-LEDs ausgerüstet. (b) optionaler Einsatz für diffuses Licht oder Polarisation

Kontakt (und damit Beschädigung) von Bauteil und Sensor kommen kann. Für diese Art von Bauteilen, wurde in einer weiterentwickelten Version des Beleuchtungskopfes die Möglichkeit vorgesehen die Dunkelfeld-Beleuchtung zu entfernen, wie in Abb. 7 gezeigt. Auch bei dieser Beleuchtung ist die Möglichkeit eines Diffusors oder Polarisators gegeben.

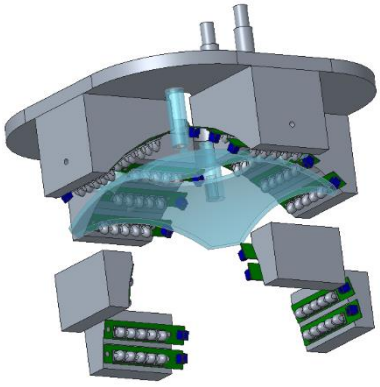


Abb. 7: CAD-Bild der Beleuchtungseinheit mit abnehmbaren Dunkelfeld.

Neben der Entwicklung der Beleuchtung kam der Entwicklung des Abbildungssystem entscheidende Bedeutung zu. Wie bereits beschrieben ist es für die vorliegende Messaufgabe sinnvoll sowohl mit 1x Vergrößerung als auch mit 5x Vergrößerung zu messen, um sowohl schnell als auch genau zu sein. Der „klassische“ Ansatz eines wechselbaren Objektivs (Objektivrevolver) würde den Sensor langsam und weniger robust machen als ein Ansatz ohne bewegliche Teile. Um dies zu realisieren wurde ein optisches System entwickelt, das mit einem festen Mikroskopobjektiv (MO) und unterschiedlichen Tubuslinsen arbeitet. Eine CAD-Zeichnung des entwickelten Senors ist in Abb. 8 gezeigt. Nachdem das vom Objekt zurückgestreute Licht das Mikroskopobjektiv passiert hat, wird es durch einen Strahlteiler in zwei Arme aufgeteilt. In einem Arm ist das gleiche MO in gegensätzlicher Richtung angebracht. Da der Lichtweg damit umgekehrt wird, wird in diesem Arm eine einfache (1x) Vergrößerung erreicht. Im anderen Arm kommt eine Tubuslinse mit fünfmal so großer Brennweite zum Einsatz. Dies sorgt dafür, dass das Objekt in diesem Arm fünffach vergrößert wird. In beiden Armen ist jeweils eine Kamera AV ALVIUM 1800U-1240C-CH-C (4024x3036 Pixel) verbaut. Diese Kameras sind aufgrund ihrer kleinen Pixel (1.8µm) ideal für eine Anwendung, die eine hohe Auflösung erfordert. Darüber hinaus bieten die Kameras Farbinformation über die Partikel. Dies ermöglicht der KI eine bessere Klassifikation (insbesondere metallisch, nicht-metallisch). Wie bereits beschrieben, ermöglicht der Beleuchtungskopf die Option einer UV-Beleuchtung, um Fluoreszenzmessungen

durchzuführen. Für eine Fluoreszenzmessung muss das direkt vom Objekt reflektierte Licht herausgefiltert werden. Hierfür besitzt der Sensor einen wechselbaren Filtereinsatz (siehe Abb. 8 (a)). Hierdurch kann der Filter einfach getauscht werden und somit an die eingesetzte Wellenlänge angepasst werden. Anstatt eines Fluoreszenzfilters kann an dieser Stelle auch ein Polarisationsfilter eingesetzt werden, was zusammen mit einem Polarisationseinsatz für die Beleuchtung mehr Information über das Partikelmaterial geben kann.

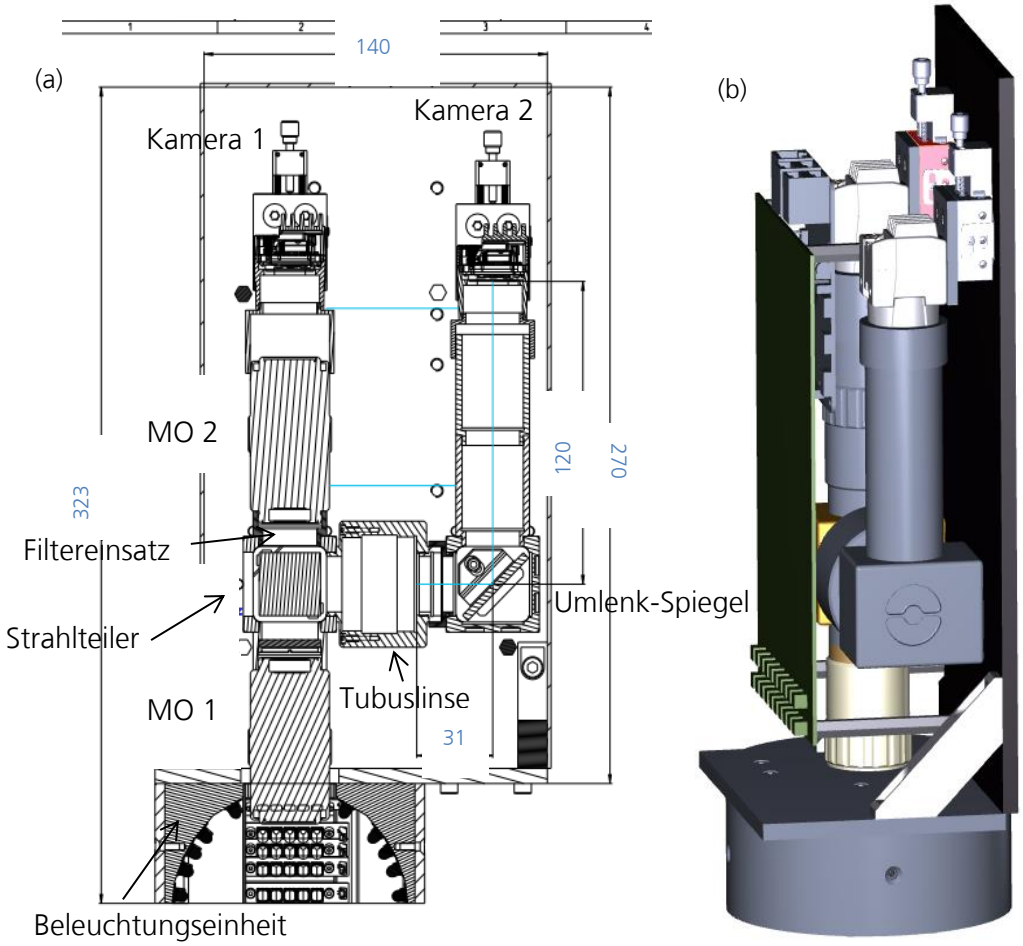


Abb. 8: (a) Skizze des entwickelten Sensors. (b) CAD-Bild des entwickelten Sensors.

Nach dem Aufbau des Sensors wurden dessen Eigenschaften charakterisiert. Über die MTF (siehe Abb. 9 (a) und (b)) kann die optische Auflösung bestimmt werden. Diese ist zu unterscheiden von der Pixelauflösung, die lediglich die Kamera betrachtet, allerdings nicht das Objektiv. Die Charakterisierungs-Messungen wurden für jeden der beiden Arme des Sensors separat durchgeführt und brachten die Folgenden Ergebnisse:

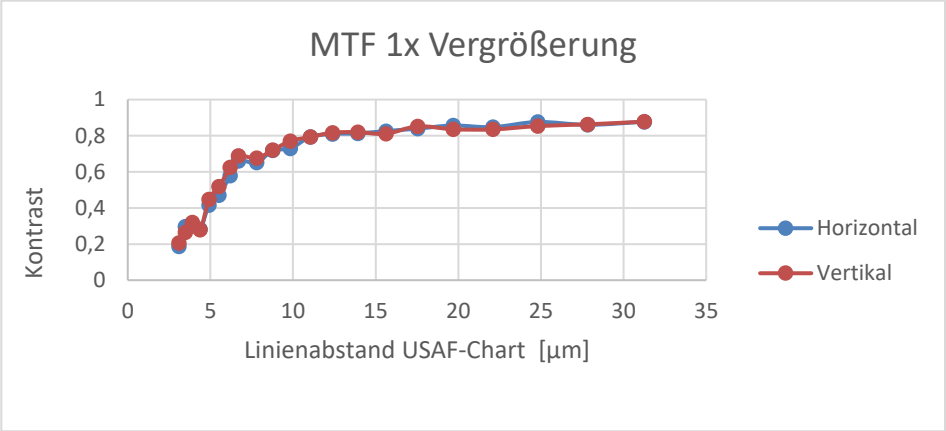
Mikroskopischer Arm:

Vergrößerung:	4.93x
Optische Auflösung:	2.5 µm
Pixelauflösung:	0.38µm/px
Messfeld:	1.5x1.1mm²

Makroskopischer Arm:

Vergrößerung:	1.006x
Optische Auflösung:	5µm
Pixelauflösung:	1.85µm/px
Messfeld:	7.5x5.7mm²

(a)



(b)

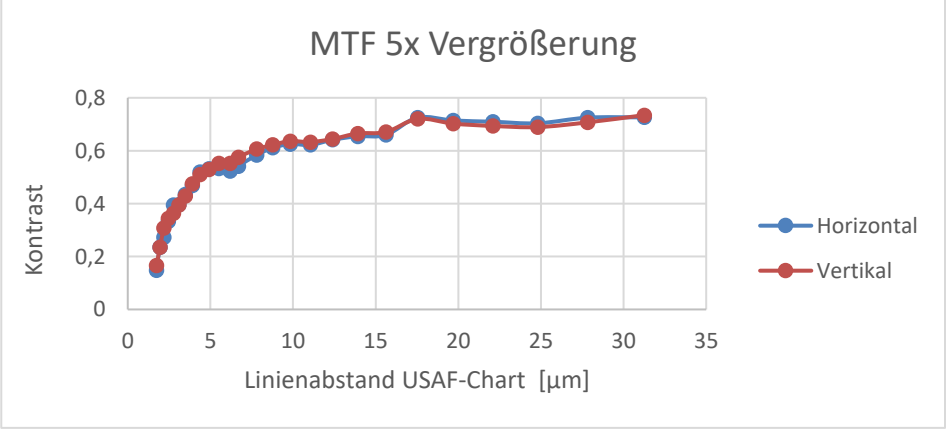


Abb. 9: (a) MTF für den makroskopischen Arm des Sensors (1x Vergrößerung). (b) MTF für den mikroskopischen Arm des Sensors (5x Vergrößerung).

Vergleicht man die erreichten Ergebnisse mit den Spezifikationen aus AP 1.1 wird deutlich, dass der Sensor die Anforderungen erfüllt. Gemäß VDA 19.1 können bei einer Pixelauflösung von 0.38µm/px Partikel einer Größe von 3.8µm klassifiziert werden (Größe- und Material).

Wie bereits beschrieben, soll der neu-entwickelte Sensor nicht nur in der Lage sein kleinste Partikel und Defekte zu erkennen, sondern auch filmische Verunreinigungen

(beispielsweise Öle) zu detektieren. Hierfür wurde im Rahmen der Charakterisierung ein sauberes Blech definiert beölt (Ölsorte: Zeller+Gmelin Multidraw KTL-N16) und die Ölmenge mit Hilfe einer Präzessionswaage bestimmt. In Abb. 10 ist das (auf die Integrationszeit skalierte) Signal in Abhängigkeit der gemessenen Ölmenge gezeigt. Mit Hilfe dieser Kalibrierung kann aus dem Messsignal des Sensors die Menge der filmischen

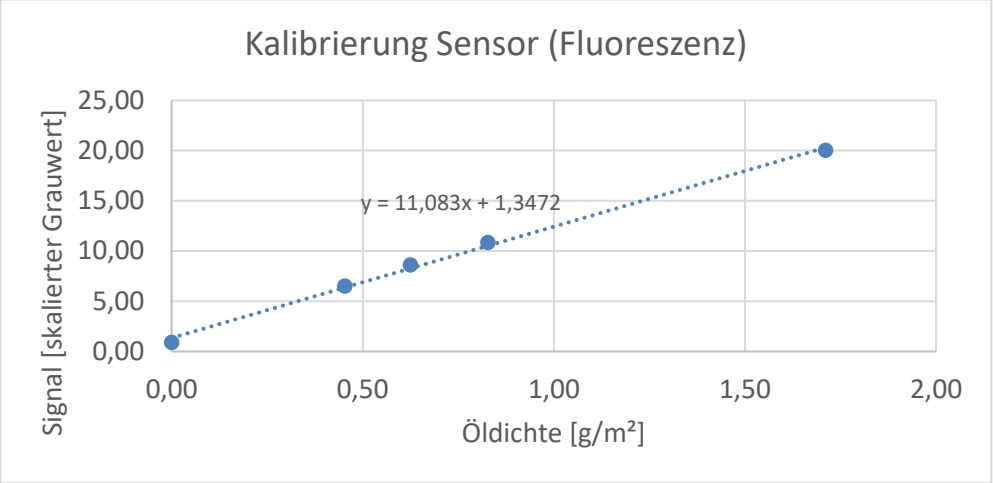


Abb. 10: Kalibrierkurve des Sensors für die Detektion von Öl (KTL-N16). Als Referenzverfahren wurde hier das gravimetrische Verfahren mittels Präzessionswaage verwendet.

Verunreinigung bestimmt werden. Ein wichtiger Punkt bei der Detektion filmischer Verunreinigungen stellt die Sensitivität des Messsystems dar. Zur Berechnung der Sensitivität wurde zunächst die Wiederholgenauigkeit (bzw. die Standardabweichung σ) bei der Messung eines sauberen Bauteils bestimmt. Es wird davon ausgegangen, dass ein Messwert größer 3σ sein muss, um noch vom Hintergrund unterscheidbar zu sein. Hieraus ergibt sich eine Sensitivität (für das Öl KTL-N16) von 53 mg/m². Ein System von Fraunhofer IPM (F-Camera), das bereits im industriellen Einsatz ist und speziell für den Zweck der Detektion von filmischen Verunreinigungen entwickelt wurde, erzielt mit 26 mg/m² nur eine gering bessere Sensitivität.

Im Rahmen der Charakterisierung wurde also gezeigt, dass die gestellten Anforderungen an den Sensor hinsichtlich Partikel- bzw. Defekt-Detektion und Messung filmischer Verunreinigungen erfüllt wurden.

Arbeitspaket 1.4: Methoden zur Lageerkennung für unterschiedliche Bauteilgeometrie

– *gemeinsames Arbeitspaket mit PI und Hexagon* –

Der oben beschriebene Sensor wurde bei Projektpartner Hexagon und PI installiert. Aufgrund des Ausscheidens von Hexagon konnten hier leider keine Messungen zur Lageerkennung mehr durchführt werden. Der bei PI installierte Sensor (siehe Abb. 11) erlaubt eine vollständig automatisierte Vermessung von Bauteilen. Die erzeugten Daten werden sowohl als Trainingsdaten für die KI genutzt, als auch zur Lageerkennung. Für detaillierte Ergebnisse zur Lageerkennung wird auf den Bericht von Projektpartner PI verwiesen.

(a) (b)

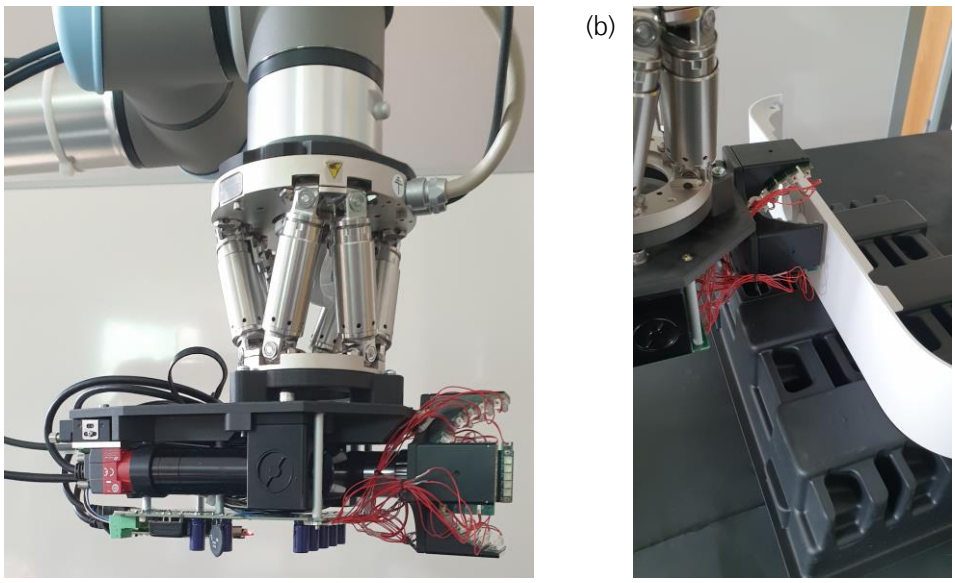


Abb. 11: (a) Sensor am Roboter (+ Hexapod) bei PI integriert. (b) Gesamtsystem bei der Vermessung von Bauteilen

1.1.3 Arbeitspaket 2: KI-basierte Steuerung

Arbeitspaket 2.1: Erzeugung einer repräsentativen Datenbasis

– *gemeinsames Arbeitspaket mit IconPro, IPS und PI* –

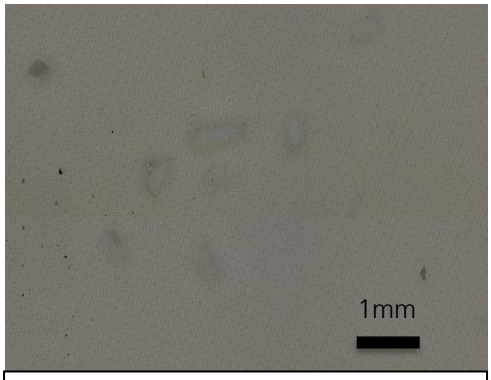
Neben den Daten, die vom IPM bereits in AP. 1.2 erzeugt wurden (die sich hauptsächlich auf die Untersuchung unterschiedlicher Beleuchtungswinkel und Oberflächen bezieht), wurden mehrere Sensoren aufgebaut und bei den Projektpartnern integriert. Neben den Sensoren für Hexagon und PI wurde ein weiterer Sensor durch Projektpartner PI an eine x-,y-,z-Kinematik montiert. Das komplette System ermöglicht die vollautomatisierte Vermessung von Membranfiltern. Das System wurde anschließend bei Projektpartner Gläser integriert. Hierdurch wird eine ausreichend große Datenbasis zum Training und der Validierung des neuronalen Netzwerks gewährleistet. Die mit dem Sensor erzeugten Daten wurden von Projektpartnern IconPro und IPS zum Training des neuronalen Netzwerks genutzt. Für die Bewertung der erzeugten Datenbasis wird auf die Berichte von IconPro und IPS verwiesen.

Arbeitspaket 2.2: Aufbau eines Algorithmus zur Materialklassifikation

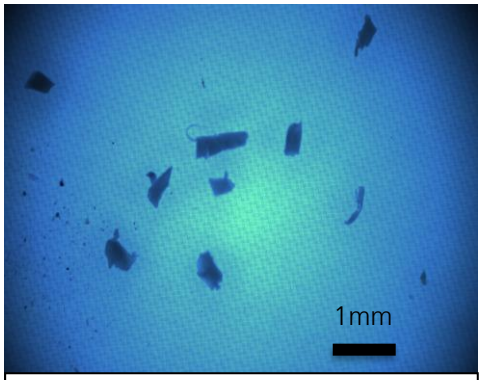
– *gemeinsames Arbeitspaket mit IconPro, IPS und PI* –

Zusammen mit den Projektpartnern PI, IPS Dortmund und Gläser GmbH, wurde eine ausführliche Studie durchgeführt, bei der Membranfilter am IPM gezielt mit Normpartikel unterschiedlicher Materialien und Größen verunreinigt werden. Anschließend wurden die Membranen bei der Fa. Gläser GmbH sowohl mit einem Polarisationsmikroskop als auch mit dem SySPOT-Sensor vermessen. Hierbei bewegt sich der Sensor mit einem von PI bereitgestellten und automatisierten Verfahrtisch über die Probe. Die Auswertung der Messergebnisse erfolgt anschließend mit dem von IPS Dortmund bereitgestellten

neuronalen Netzwerk. Die Studie konnte zeigen, dass der SySPOT-Sensor den aktuellen Systemen (Jomesa Polarisationsmikroskop) (siehe AP 1.2 Referenzverfahren) in mancher Hinsicht deutlich überlegen ist. Dies gilt insbesondere für die Detektion von hellen Partikeln wie beispielsweise Strahlmittel oder hellem Kunststoff. Während diese aufgrund der Ähnlichkeit zum weißen Membranfilter im Polarisationsverfahren kaum Kontrast aufweisen, können durch das innovative und zum Patent angemeldete Verfahren der Fluoreszenzbildgebung (siehe AP 1.2) auch helle Partikel detektiert werden. In Abb. 12 ist beispielhaft der Vergleich eines Jomesa-Mikroskops mit dem Fluoreszenzkanal des SySPOT-Sensors bei einer Messung eines Membranfilters mit 200-400µm großen und weißen Polystyrol(PS)-Partikeln gezeigt. Es wird deutlich, dass die Partikel beim Stand-der-Technik praktisch nicht erkannt werden können, wohingegen eine Detektion beim SySPOT-Sensor kein Problem darstellt.



Stand-der-Technik (Jomesa-Mikroskop)



Fluoreszenzkanal SySPOT-Sensor

Abb. 12: Vergleich von Jomesa-Mikroskop und SySPOT-Sensor bei der Messung eines Membranfilters mit weißen PS-Partikeln

Arbeitspaket 2.3: Klassifikation der Partikel nach Entstehungsprozess

– *gemeinsames Arbeitspaket mit IconPro, IPS und PI* –

Für die Klassifikation der Partikel nach Entstehungsprozess wurde der vom IPM entwickelte Sensor den Projektpartnern zur Verfügung gestellt. Für Ergebnisse zu den Untersuchgen wird auf die Berichte der genannten Partner verwiesen.

Arbeitspaket 2.4: Klassifikation der Oberfläche nach Defekt-/Verschleißzustand

– *gemeinsames Arbeitspaket mit IconPro, IPS und PI* –

Für die Klassifikation der Oberfläche nach Verschleißzustand wurde der vom IPM entwickelte Sensor den Projektpartnern zur Verfügung gestellt. Für Ergebnisse zu den Untersuchgen wird auf die Berichte der genannten Partner verwiesen.

1.1.4 Arbeitspaket 3: Bedarfsorientierte Reinigung

Arbeitspaket 3.1: Automatisierte Adaption der Reinigung

– *gemeinsames Arbeitspaket mit Höckh, LPW, Gläser, IconPro, und IPS* –

Für die automatisierte Adaption der Reinigung wurde der vom IPM entwickelte Sensor den Projektpartnern zur Verfügung gestellt. Für Ergebnisse zu den Untersuchgen wird auf die Berichte der genannten Partner verwiesen.

Arbeitspaket 3.2: Automatisierte Optimierung des Reinigungsprogramms

– *gemeinsames Arbeitspaket mit Höckh, LPW, IconPro, IPS und PI* –

Für die automatisierte Optimierung des Reinigungsprogramms wurde der vom IPM entwickelte Sensor den Projektpartnern zur Verfügung gestellt. Für Ergebnisse zu den Untersuchgen wird auf die Berichte der genannten Partner verwiesen.

1.1.5 Arbeitspaket 4: Test des SPOT-Sensors an Reinigungsanlagen

Arbeitspaket 4.1: Test des SPOT- Funktionsmusters bei Anwendern

– *gemeinsames Arbeitspaket mit allen anderen Projektpartnern* –

Wie bereits in AP 1.4 beschrieben, wurde der erste Demonstrator des SySPOT-Sensors bei Projektpartnern Hexagon, Gläser und PI integriert. Die Anwender haben den SySPOT-Sensor in unterschiedlichen Szenarien getestet. Für die Ergebnisse wird auf die Berichte der Projektpartner verwiesen. Auf Basis der Ergebnisse wurden einige Optimierungsmöglichkeiten identifiziert:

1. Je nach Anwendung kann es sinnvoll sein, auf die Dunkelfeldbeleuchtung zu verzichten, um einen größeren Arbeitsabstand zu bekommen. Auch andere speziellere Beleuchtungsmethoden können sinnvoll sein. (beispielweise farbige LEDs anstatt Weißlicht)
2. Für bestimmte Bauteile kann es mitunter zu einer Kollision des Sensors mit dem Bauteil kommen. Dies kann sowohl Bauteil als auch Sensor beschädigen
3. Die Justage der beiden Arme (Makroskop und Mikroskop) ist äußerts kompliziert
4. Im makroskopischen Arm gibt es eine starke Vignettierung. Dies sorgt dafür, dass nicht der komplette Teil des Bildes ausgewertet werden kann. Dadurch ist die Geschwindigkeit der Bildaufnahme reduziert, was speziell bei großen Bauteilen, die Messzeit deutlich verlängert.
5. Das aktuelle Gewicht des Sensors (ca. 3kg) ist zu groß für die Verwendung an einem Hexapod (spezifiziert für 2.5kg)

Hieraus wurden Änderungen am Sensor abgeleitet und eine verbesserte Version entwickelt und aufgebaut.

Um eine schnelle Anpassung der Beleuchtungseinheit an spezifische Anwendungen zu gewährleisten, wurde der Beleuchtungskopf komplett neu designt. Anstatt einer festen Verbindung wurde eine magnetische Verbindung auf Basis kommerziell erhältlicher Magnetstecker implementiert (Abb. 13). Neben einem einfachen Wechsel der Beleuchtungseinheit bietet der Magnetmechanismus noch einen weiteren Vorteil: Sollte es beim Einsatz an komplex geformten Bauteilen versehentlich zu einem Kontakt von Bauteil und Sensor kommen, ist die Beleuchtung nicht komplett starr und kann sich bezüglich des Sensorkopfs bewegen. Hierdurch wird die Kraft bei der Kollision reduziert und eine Beschädigung des Bauteils oder des Sensorkopfs verhindert.

Abb. 13: Magnetstecker Rosenberger M9K102-199L

Um sowohl Gewicht als auch Kosten zu sparen wurden darüber hinaus die LED-Leisten verkleinert. Während in der ersten Version noch 5 LEDs pro Leiste zum Einsatz kamen, wurde dies beim aktuellen Sensor auf 3 LEDs pro Leiste reduziert (Abb. 14). Hierdurch konnten nicht nur 40 LEDs (20 Leisten) eingespart werden, sondern auch der Bauraum reduziert werden.

Abb. 14: Beleuchtungskopf des SySPOT-Sensors nach Redesign

Durch Verwendung eines kleineren Strahlteilers und selbst designten Objektiv-Halterung, wurde der Gesamtabstand der beiden Objektive im Makrostrahlen von 50mm auf 26mm verringert. In Abb. 15 ist beispielhaft jeweils eine Messung von Membranfiltern mit dem alten und dem neuen SySPOT-Sensor gezeigt. Speziell im Linienschnittplot wird deutlich, dass durch diese Maßnahme die Vignettierung in den Ecken deutlich verringert werden konnte.

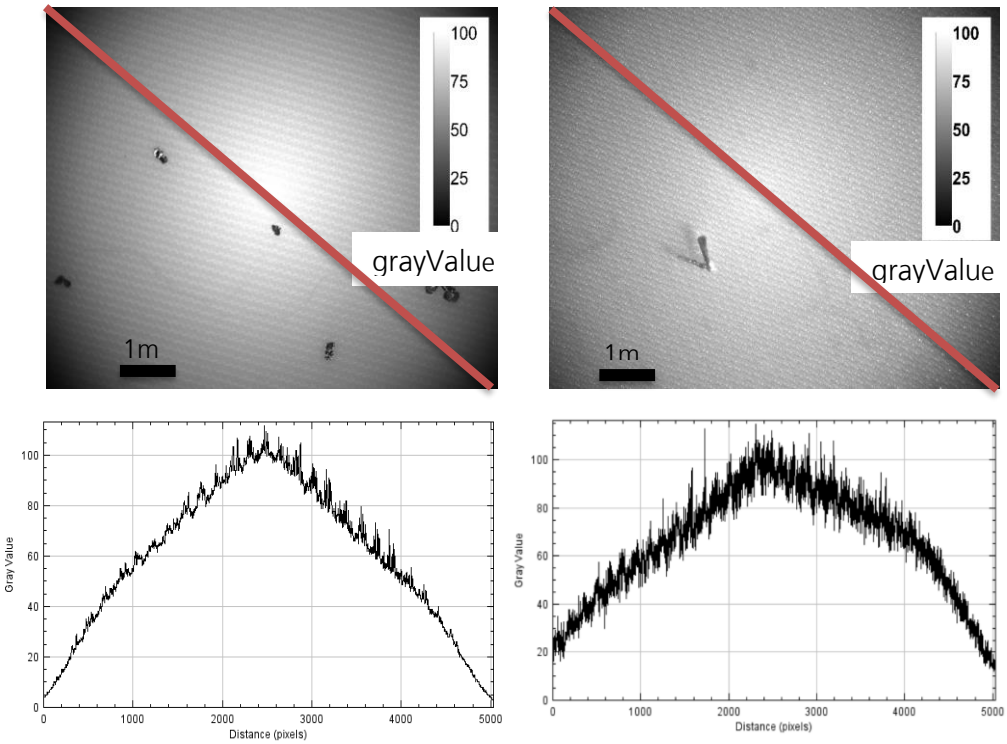


Abb. 15: Links: Aufnahme mit altem SySPOT-Sensor. Auf dem Linienplot ist deutlich die starke Vignettierung zu erkennen. Zum Rand hin fällt die Helligkeit unter 5%. Hierdurch ist keine Auswertung mehr möglich. Rechts: Aufnahme mit neuem SySPOT-Sensor. Die Vignettierung ist deutlich kleiner und liegt in den Ecken im Bereich von 20%. Damit kann das ganze Bild noch ausgewertet werden.

Arbeitspaket 4.2: Analyse der Produktionsoptimierung bei Anwendern

– *gemeinsames Arbeitspaket mit allen anderen Projektpartnern* –

Für die Analyse der Produktionsoptimierung bei Anwendern wurde der vom IPM entwickelte Sensor den Projektpartnern zur Verfügung gestellt. Für Ergebnisse zu den Untersuchgen wird auf die Berichte der genannten Partner verwiesen.

1.2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Der zahlenmäßige Nachweis wird separat durch unsere Zentrale erstellt und eingereicht. Die wichtigste Position darin betrifft die Personalkosten. Diese Kosten verteilen sich auf das interdisziplinäre Projektteam, das aus Wissenschaftlern, Graduierten, Technikern und wissenschaftlichen Hilfskräften bestand. Die Beteiligung von erfahrenen wissenschaftlichen Mitarbeitern war wegen des hohen technischen

Aufwands und der Komplexität der Aufgaben zur Erreichung der Projektziele unbedingt nötig.

Die Sachkosten für Komponenten und Verbrauchsmaterialien stellen einen weiteren wesentlichen Anteil der Gesamtkosten dar. Dies betrifft im Wesentlichen die Komponenten zum Aufbau der Sensoren. Die Reisekosten betreffen in erster Linie die Projekttreffen mit unseren Projektpartnern.

1.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Das zentrale Ziel des Projekts bestand darin, ein vollautomatisiertes und flexibel einsetzbares Inline-System zur Partikeldetektion und Klassifikation zu entwickeln. Im Wesentlichen sollte dieses System aus drei Komponenten bestehen:

1. Sensorkopf, der die Bilddaten aufnimmt
2. Aktuator, der ein abscannen der Proben ermöglicht
3. Neuronales Netz, das die Daten des Sensors auswertet

Fraunhofer IPM war im Rahmen des Projekts in erster Linie für die Entwicklung des optischen Sensorkopfs verantwortlich.

Im Rahmen des Projektes ist es gelungen, einen Sensor zu entwickeln, der verschiedene Bildgebungsarten (Hellfeld, Dunkelfeld, Fluoreszenz, Spektralanalyse) kombiniert und somit einen deutlich erhöhten Informationsgehalt im Vergleich zu bestehenden Systemen bietet. In Kombination mit dem von Projektpartnern IPS und IconPro entwickelten neuronalen Netzwerk, kann diese große Datenmengen schnell ausgewertet werden. Es konnte gezeigt werden, dass der entwickelte Sensor insbesondere für die Untersuchung auf Membranfiltern dem aktuellen Stand der Technik deutlich überlegen ist.

Mit dem Demonstrator konnte die Validierung der Praxistauglichkeit des Systems erbracht werden. Da das System nur durch die Kombination unterschiedlicher Disziplinen (Optik, Mechanik, KI, Anwendung), die gesetzten Anforderungen vollumfänglich erfüllen konnte, war eine enge Kooperation zwischen allen beteiligten Projektpartnern und möglich. Ohne die Förderung wäre diese Zusammenarbeit und die daraus entstandenen Ergebnisse nicht finanzierbar gewesen.

1.4 Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit des Ergebnisses

Mit dem im Projekt entwickelten Demonstrator konnte im Vergleich zum Stand der Technik mehr Partikel bzw. Defekte detektiert und klassifiziert werden. Die Untersuchungen von Projektpartner PI haben gezeigt, dass eine schnelle Detektion auf beliebig geformten Bauteilen schwierig ist. Dies hat weniger mit der Erkennung der Partikel/Defekte als vielmehr mit der genauen Positionierung des Sensors zu tun. Hier bleibt die Anwendung wohl auf bestimmte Spezialfälle (vergleichsweise ebene Bauteile) beschränkt. Ein größeres Anwendungsgebiet stellt die Untersuchung von Membranfiltern dar. Durch die von Fraunhofer IPM im Projekt entwickelte inverse Fluoreszenzerkennung (siehe Kapitel 1.6 Patente) können auch helle Partikel zuverlässig detektiert werden, was im Stand der Technik nicht möglich ist. Da die Extraktion der Partikel auf Membranfiltern in vielen Branchen weit verbreitet ist, ist hier ein großer Markt für das System zu erwarten. Obwohl das System bereits einen hohen Reifegrad besitzt, müssen jedoch weitere Entwicklungen folgen, um es für den breiten Einsatz in der Industrie tauglich zu machen.

Im Nachgang des Projekts sind wir deshalb insbesondere mit Gesprächen mit Projektpartnern Gläser und Höckh über eine mögliche Weiterentwicklung sowie

Vertrieb des Systems beschäftigt. Hauptaugenmerk liegt dabei auf der Weiterentwicklung des Systems zu einem Modul, das in die Extraktionsmaschinen und/oder direkt in die Reinigungsmaschinen integriert werden kann. Im Gegensatz zu etablierten Systemen wäre hierdurch keine Entnahme des Membranfilterns mehr notwendig. Aktuell werden die entnommenen Membranen oft in Labore zur Analyse geschickt. Hierdurch dauert es mitunter mehrere Tage bis die Messergebnisse vorliegen. Der integrierte SySPOT-Sensor würde die Ergebnisse stattdessen instantan liefern und es besteht überdies nicht die Gefahr einer Querkontamination beim Handling der Membranen.

Was die technischen Lösungen seitens Fraunhofer IPM angeht wird hierbei zunächst eine Weiterentwicklung in einem anschließenden Forschungsprojekt angestrebt. Anschließend soll der Sensor im Rahmen eines Technologietransfers im Lizenzmodell an Gläser und/oder Höckh übergeben werden.

1.5 Fortschritt anderer Stellen auf dem Gebiet des Vorhabens

Obwohl die Hersteller etablierter Systeme (beispielsweise Jomesa), ihre Produkte stetig weiterentwickeln ist aktuell kein System in der Lage helle Partikel auf weißen Membranfiltern zu detektieren. Einzig existierende Lösung ist hierfür die Wahl eines Membranfilters einer anderen Farbe (oft gelb), was allerdings den Kontrast anderer Partikel reduziert. Mit dem im Projekt entwickelnden System haben wir deswegen ein Alleinstellungsmerkmal

Ein interessanter Fortschritt zeichnet sich auf Seite der Regularien ab. Während die bisherige Version der VDA 19.1, auf die sich die Partikelanalyse meist bezieht, nur die Polarisationsmethode erwähnt wird, ist aktuell eine neue Version in Ausarbeitung, die bezüglich der Detektion von Partikeln höchstwahrscheinlich mehrere Technologien in Betracht zieht. Sollte sich dies Bewahrheiten würde das System, das auf der Fluoreszenz und KI basiert, davon sicher profitieren und ein Marktzugang erleichtert werden.

1.6 Veröffentlichungen

Veröffentlichungen

[1] D. Buchta, S. Adolph, and A. Brandenburg. "A cheap, fast, and versatile illumination system for technical cleanliness." *Unconventional Optical Imaging III*. Vol. 12136. SPIE (2022).

[2] E. Kardamaki, D. Buchta, A. Blättermann and D. Carl, "Erfassung und Klassifizierung von extrahierten Partikeln." *JOT Journal für Oberflächentechnik* 64.5 (2024): 32-35.

Abschlussarbeiten

[3] E. Kardamaki, Masterarbeit: „*Ultraviolet multimodal imaging technique towards in-line particle detection and classification*", Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, Institut für Mikrosystemtechnik (2023).

Patente

[4] „Verfahren und System zum Prüfen einer Oberfläche eines Prüflings" (Europäisches Patentamt, Angemeldet, Kennzeichen 22 216 474.1)