Abschlussbericht KIOptiPack

zum Teilvorhaben:	KIOptiPack – Ganzheitliche KI-basierte Optimierung von Kunststoffverpackungen mit Rezyklatanteil
im Verbundprojekt:	KI-Anwendungshub Kunststoffverpackungen – nachhaltige Kreislaufwirtschaft durch Künstliche Intelligenz – KIOptiPack
Zuwendungsempfänger:	aiXtrusion GmbH Dr.-Ing. Rainer Peters Merzbrück 214 52146 Würselen
Federführung:	Lehrstuhl für Kunststoffverarbeitung der RWTH Aachen
Förderkennzeichen:	033KI132
Laufzeit des Vorhabens:	01.08.2022 - 31.12.2025
Verfasser:	Rainer Peters
Kontakt:	r.peters@aixtrusion.de; 02405 6999399

Teil I: Kurzbericht

Übergeordnetes Ziel des Teilvorhabens war die Entwicklung, Validierung und der Anwendungstransfer KI-gestützter Werkzeuge für das erfolgreiche Produktdesign und die qualitätsgerechte Produktion von Kunststoffverpackungen mit hohem Rezyklatanteil – bereitgestellt in einem KI-Anwendungs- und Datenraum und verknüpft mit dem Aufbau einer zentralen Netzwerkplattform für das Wertschöpfungsengineering. aiXtrusion sollte an drei Arbeitspaketen mitwirken: dem Aufbau der Datenmodellierung und Ontologie (AP 2.2), der Bereitstellung von Schnittstellen und Geräten zur Datenerfassung (AP 2.3) sowie den Folienextrusionsprozessen für die Verpackungsherstellung (AP 3.4).

Für die Auslegung und Nachrechnung von Schmelzeverteilersystemen (T-, Fischschwanz- und Kleiderbügelverteiler) setzte aiXtrusion die Software VERTIGO ein. Über ein elektrisches Analogiemodell (Widerstandsnetzwerk) wird die Werkzeuggeometrie segmentiert und der Einfluss von Geometrie und Betriebspunkt charakterisiert. Damit ließ sich die Auslegung des Flachfolienwerkzeugs optimieren, um einen gleichmäßigen Schmelzeaustritt zu erreichen; die vom IKV ermittelten Materialparameter dienten als Eingangsgrößen. In einem gemeinsamen Workshop

mit dem WZL IQS (26.02.2025) wurde der Vergleich der Auslegungsergebnisse eines Bügelverteilers mit VERTIGO verabredet – entsprechende Simulationsdaten für den Vergleich standen jedoch nicht zur Verfügung.

Entwickelt wurde ein flexibles Eingabesystem auf Basis eines Raspberry Pi mit Touchdisplay (Qt 5/QtCreator, Debian), das auf andere Devices portierbar ist und für die Compoundierung und Folienextrusion angepasst wurde. Über unterschiedliche Eingabemasken werden Material- und Prozessdaten erfasst, mit Daten aus einer übergeordneten Datenbank ergänzt und so ein erweiterbares Logbuch aller hergestellten Materialien aufgebaut. Die Datenübertragung erfolgt nicht zyklisch, sondern gezielt zu Versuchsstart, -ende und bei Änderungen, um den Datenfluss gering zu halten. Die Anbindung an die Systeme des IKV wurde über Apache Kafka realisiert. Zur Einhaltung der Qt-Lizenzbedingungen wurden eine eigene Bildschirmtastatur und ein Ziffernfeld entwickelt. Das Logbuch dient als Basis zur Optimierung von Effizienz, Zuverlässigkeit und Qualität – insbesondere zur Identifikation von Fehlern und Prozessschwierigkeiten bei unterschiedlichen Rezyklatanteilen – und als langfristige Versuchsdokumentation.

Zur Untersuchung der Folien wurde ein modulares, erweiterbares Folieninspektionssystem mit Zeilenkameras und eigenentwickelter Beleuchtung aufgebaut. Vom ursprünglich beantragten CIS-Sensor wurde abgerückt, da dessen geringe Tiefenschärfe (±1 mm) bei flatternden Folien problematisch ist und für Rezyklatfolien weder die hohe Auflösung noch die hohen Kosten Sinn ergeben – grobe Stippen und Gelpartikel zeigen sich ohnehin deutlich. Stattdessen kommt eine GigE-Zeilenkamera (Valine-4K1-CM-80GM, 4096 Pixel, 80 kHz) zusammen mit einem Inkrementalgeber zum Einsatz, womit bei 1.000 mm Folienbreite eine für Rezyklatfolien ausreichende Auflösung von 245 µm erreicht wird.

Das System ist als Server-Client-Architektur aufgebaut und über eine JSON-Datei flexibel auf einem oder mehreren Rechnern konfigurierbar. Jeder Client verarbeitet die Kamerabilder und erkennt Helligkeitsabweichungen gegenüber gemittelten Referenzbildern. Zwei Verfahren wurden untersucht: Die Mittelwert-/Differenzmethode (Subtraktion) und die etwas rechenintensivere Divisionsmethode, die geringfügig mehr Fehler erkennt. Beide liefern vergleichbare Ergebnisse mit nahezu linear steigender Verarbeitungszeit. Aus den Messungen (z. B. 524 Fehler in 33 ms) ergeben sich praxistaugliche Zeilenraten, wobei aktuelle CPUs gegenüber der eingesetzten Test-Hardware rund vierfache Verarbeitungsgeschwindigkeiten und damit deutliche Reserven bieten; zusätzliches Potenzial liegt in der Optimierung der Vorverarbeitungsalgorithmen.

Fehlerkandidaten auf den inspizierten werden mit Position, Größe und ihrem Bildausschnitt erfasst und in einer SQLite-Datenbank abgelegt. Die Klassifizierung erfolgt wahlweise über ein neuronales Netz oder klassische Bildverarbeitungsmethoden. Werkzeuge zur Client-Kalibrierung (Pixelgröße, Aufnahmebereich/ROI) und zur Kamerafokussierung wurden umgesetzt. Die Server-Applikation zeigt Fehler in Echtzeit an, bietet Statistiken sowie einen Qualitätsbeobachter über den gesamten Folienwickel und ermöglicht die Datenanbindung über OPC UA in die Cloud.

An der Collin-Laboranlage des IKV wurde das System mit Folien unterschiedlicher Recyclinganteile erprobt. Da sich die Folienhelligkeit mit dem Rezyklatanteil ändert, wurde die Einmessung der Belichtungszeit über einen PID-Regler automatisiert; reicht die Belichtungszeit nicht aus, wird der Gain erhöht (zulasten der Bildqualität). Der Messwert „Defect Ratio“ – der Anteil der Fehlerfläche an der Folienfläche – stieg in zahlreichen Versuchen erwartungsgemäß mit zunehmendem Rezyklatanteil und bestätigte damit die Eignung des Systems zur Qualitätsbewertung von Rezyklatfolien.

Insgesamt hat aiXtrusion in zwei Arbeitspaketen funktionsfähige, praxisnahe Werkzeuge bereitgestellt: ein portierbares Eingabe- und Logbuchsystem mit Kafka-Anbindung zur durchgängigen Datenerfassung sowie ein modulares, kameragestütztes Folieninspektionssystem mit automatisierter Belichtungsmessung und neuronaler Fehlerklassifizierung. Damit liegt eine zusammenhängende Datengrundlage von der Materialeingabe über die Prozessparameter bis zur optischen Qualitätsbewertung vor. Die Ergebnisse bestätigen, dass sich steigende Rezyklatanteile sowohl in der Folienhelligkeit als auch in messbaren Fehlerkennzahlen niederschlagen und damit automatisch beurteilbar werden. Weiteres Potenzial besteht in der Optimierung der Vorverarbeitungsalgorithmen sowie im Einsatz aktueller Rechenhardware, die deutlich höhere Verarbeitungsgeschwindigkeiten und damit höhere Bahngeschwindigkeiten und Auflösungen ermöglicht.

Teil II: EINGEHENDE DARSTELLUNG

II.1. Gesamtziel und Ziele des Teilvorhabens aiXtrusion GmbH

Übergeordnetes Ziel war die Entwicklung KI-gestützter Werkzeuge für das erfolgreiche Produktdesign sowie die qualitätsgerechte Produktion von Kunststoffverpackungen mit hohem Rezyklatanteil in einem KI-Anwendungs- und Datenraum bereitzustellen, zu validieren und in die Anwendung zu transferieren. Verknüpft war das mit dem Aufbau einer zentralen Netzwerkplattform für das Wertschöpfungsengineering

Die Teilziele der einzelnen Arbeitspakete an denen aiXtrusion mit gewirkt hat waren:

- AP 2.2: Aufbau Datenmodellierung & Ontologie
- AP 2.3: Schnittstellen und Geräte zur Datenerfassung: Schaffen von Werkzeugen zur automatisierten Zusammenführung von Messdaten verschiedener Instrumente, mit Blick auf Datenintegrität und Resampling-Methoden.
- AP 3.4: Folienextrusionsprozesse für die Verpackungsherstellung

Im Folgenden werden die einzelnen Arbeitspakete des Antrags aufgeführt und die ausgeführten Arbeiten dazu beschrieben.

AP 2.2 Aufbau Datenmodellierung & Ontologie

Für die Datenmodellierung und Simulation der Prozessdaten setzt aiXtrusion die Software VERTIGO ein. VERTIGO ist ein Programm zur numerischen Auslegung und Nachrechnung des Betriebsverhaltens von Schmelzeverteilersystemen, wie

- T-Verteiler,
- Fischschwanz- und
- Kleiderbügelverteiler.

Dabei können sowohl ebene Verteilersysteme als auch auf einen Dorn bzw. einen Kegelstumpf aufgewickelte Verteilersysteme (Pinolen) betrachtet werden.

In dem Modul VERTIGO wird der Strömungszustand in dem Schmelzeverteiler durch ein Widerstandsnetzwerk berechnet. Dabei wird die Werkzeuggeometrie in Segmente zerlegt und jedem Segment aufgrund der Geometrie und der Materialdaten ein Widerstand zugeordnet. Mit diesem elektrischen Analogiemodell lassen sich dann Geometrie- und Betriebspunkteinflüsse charakterisieren.

In einem Projektfenster werden alle Auslegungen einer Düse und den jeweiligen Nachrechnungen in einer Baumstruktur verwaltet. Der Anwender erhält so einen guten Überblick über die einzelnen Optimierungsschritte. Eine Düsenauslegung wird hierdurch sehr effizient gestaltet.

Alle für die Auslegung wichtigen Werkzeuggrunddaten werden übersichtlich in einem Fenster eingegeben. Mit VERTIGO können Auslegungsrechnungen für die Verteilersysteme

- "korrigierter Fischschwanz",
- "Kleiderbügel abhängig" sowie
- "Kleiderbügel unabhängig"

ausgeführt werden. Die Ergebnisse werden in einem Geometriedatenfenster dargestellt.

In diesem Projekt soll so eine Auslegung des Flachfolienwerkzeugs optimiert werden. Die Materialparameter als Eingangsgrößen wurden vom IKV ermittelt. Diese deinten als Eingangsgrößen in Vertigo. Mit diesem Tool können sehr schnell unterschiedliche Geometrievariationen mit den Materialdaten berechnet werden und so für einen optimalen gleichmäßigen Austritt der Schmelze am Werkzeug der Flachfolie sorgen. Diese sollen dann durch eine Anpassung im Werkezugbau berücksichtigt werde.

Am 26.02.2025 fand am IKV ein Workshop zusammen mit dem WZL IQS statt. Es fand ein Austausch über die bisherigen Ergebnisse über die bisherigen Ergebnisse der Auslegung eines Bügelverteilers für Extrusionswerkzeuge vom WZL IQS statt. Wir haben diskutiert und erläutert wie so ein Werkzeug in der Realität ausgeführt wird. Es wurde verabredet diese und weitere neue Ergebnisse mit dem Simulationsprogramm Vertigo zu vergleichen. Simulationsdaten für einen Vergleich haben wir aber nicht erhalten.

AP 2.3 Schnittstellen und Geräte zur Datenerfassung

Für Produktionsanlagen allgemein wurde ein Eingabesystem entwickelt, dass auf einem Raspberry Pi mit Touchdisplay arbeitet oder auch jedem anderem Device auf dem Qt Sourcecode kompiliert werden kann. Für dieses Projekt wurde es für die Compoundierung und die Folienextrusion angepasst. Dieses System dokumentiert aktuelle Prozessdaten und ermöglicht als Ergänzung die manuelle Eingabe von Daten über eine Eingabemaske, sodass alle Daten gesammelt, gespeichert und zur Verfügung gestellt werden können. Konkrete Material- und Anlagendatendaten werden aus einer übergeordneten Datenbank eingelesen. Somit entsteht eine Art Logbuch über alle hergestellten Materialien. Dieses Logbuch kann stetig um weitere Materialdaten und auch Messwerte erweitert werden. Für die Erstellung der Software wurden mit ihren Lizenzrechten geeignete Qt-Bibliotheken (Qt 5 und QtCreator) sowie auch Raspi-Betriebssysteme (Debian

Bullseye Version vom 1.7.22) ausgewählt. Es wurde eine Basisapplikation mit verschiedenen Eingabemasken für mehrere Displayvarianten erstellt und mit dem IKV diskutiert.

Die diskutierten Eingabemasken wurden in Software realisiert. Ein Screenshot einer der Logbuch-Eingabemasken ist in Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden. zu sehen.

Abbildung 1: Ansicht der Eingabemaske für die Compoundierung

In der Eingabemaske für die Compoundierung werden die einzelnen Materialkomponenten sowie allgemeine Informationen erfasst und zur Weiterverarbeitung bzw. Speicherung übermittelt. Nach Absprache mit den Kollegen vom IKV können aktuell 1-3 Komponenten erfasst werden, dies kann bei Bedarf auch erweitert werden. Die Eigenschaften der Komponenten können aus den Einträgen der übergeordneten Datenbank ausgewählt werden, zusätzlich können dieser Datenbank über die Eingabemaske auch neue Einträge hinzugefügt werden. Die übermittelten allgemeinen Informationen umfassen unter anderem einen Zeitstempel, den Namen des Versuchs und Freitext zum notieren besonderer Auffälligkeiten. Da sich die Daten dieser Eingabemaske nicht zyklisch (z.B. durch Abfrage eines Sensors), sondern nur durch ein Eingreifen des Benutzers ändern, werden die Daten auch nicht kontinuierlich zur Weiterverarbeitung übertragen, sondern es gibt die Möglichkeit, Daten zum Versuchsstart, -ende und bei Änderungen während des Versuchs gezielt zu übertragen. Dadurch wird der Datenfluss möglichst geringgehalten.

Die Eingabemaske zur Folienextrusion funktioniert analog und hat dementsprechend ein sehr ähnliches Erscheinungsbild, wobei hier mehr physikalische Daten zum Prozess protokolliert werden. Die einzelnen Elemente sind in Abbildung 2 zu sehen.

Abbildung 2: Ansicht der Eingabemaske für die Folienextrusion

Durch die Aufzeichnung von Betriebsparametern wie Walzentemperaturen, -geschwindigkeiten und Drehmomenten können Trends im Betrieb erkannt werden, welche auf Probleme oder Anomalien im Prozess hinweisen können.

Die Schnittstelle zur Anbindung der anfallenden Daten an die Systeme des IKV wurde über Apache Kafka realisiert.

Abbildung 3: Dialogfenster für Datenübertragung (links) und Bildschirmtastatur (rechts)

Dabei fungiert das Backend der Eingabemasken als Producer, welcher Daten in zwei verschiedenen Kafka-Topics („compounding“ oder „film_extrusion“) als Messages dem Kafka-Server des IKV zur Weiterverarbeitung und Speicherung zur Verfügung stellt. Zur Datenübertragung und -eingabe wurden diverse Nutzerdialoge und Fehlermeldungen eingerichtet, ein Beispiel zur erfolgreichen Übertragung einer Kafka-Message ist in Abbildung 3 links zu sehen. Die Konfiguration des Servers

kann durch den Benutzer am IKV angepasst werden und die Daten können von dort an eine Cloud weitergeleitet werden und ausgewertet werden.

Da das Eingabesystem für ein Touch-Display ohne weitere Eingabehardware entwickelt wurde, wurden auch eine für die Anwendung angepasste Bildschirmtastatur (siehe Abbildung 3 rechts) sowie ein Ziffereingabefeld eigens entwickelt, um die Anforderungen an Lizenzbedingungen einzuhalten.

Das Eingabesystem ist so voll lauffähig, kann aber nach Laufzeitende auch einfach für andere Prozesse und Kunden angepasst werden. Das Logbuch, das aus den Daten des Eingabesystems erstellt wird, soll Prozessdaten der Compoundierung und Folienextrusion an verschiedenen Anlagen und mit verschiedenen Materialzusammensetzungen und physikalischen Einstellmöglichkeiten protokollieren.

Letztlich soll das Logbuch die Daten aller hergestellten Materialien enthalten, welche als Basis zur Optimierung und Erhöhung der Effizienz, Zuverlässigkeit und Sicherheit des Flachfolienwerkzeugs und Herstellungsprozesses dienen sollen. Bei verschiedenen Materialzusammensetzungen, unter anderem auch Rezyklatanteilen, können die Daten Aufschluss über mögliche Fehler oder Prozessschwierigkeiten geben, sodass Probleme und ihre Ursachen identifiziert werden können und eine Fehlerbehebung bzw. gezielte Optimierung an entsprechender Stelle vorgenommen werden kann. Auch bestimmte geforderte Qualitätsstandards können so überprüft und die Anlagen bzw. hergestellten Produkte aktiv hinsichtlich dieser optimiert werden. Allgemein ist somit eine Leistungsbewertung des Prozesses möglich.

Zusätzlich stellt das Logbuch eine umfassende Dokumentation über die Versuche und den Verlauf der Prozessdaten über den Projektzeitraum und darüber hinaus dar. Somit können die Ergebnisse auch im Nachhinein analysiert und für zukünftige Fragestellungen und Projekte genutzt werden. Die Daten können innerhalb des Teams zur Verfügung gestellt werden, was effizienteren Austausch sowie einfachere Diskussion und Zusammenarbeit ermöglicht.

AP 3.4 Folienextrusionsprozesse für die Verpackungsherstellung

Für die Untersuchung der Kunststofffolien wurde ein Folieninspektionssystem mit mehreren Zeilenkameras und eigen entwickelter Beleuchtung aufgebaut. Das System ist so konzipiert, dass es konfigurierbar und erweiterbar ist, sodass mehrere Kameramodule parallel verschiedene Bereiche der Folie inspizieren können. Das System ist so modular aufgebaut das die Art der Kamera variabel ist.

Im Antrag ist die Anschaffung eines CIS-Sensors beantragt worden. In ausführlichen Diskussionen mit Lieferanten und auch den Folienproduzenten sind wir von diesem Sensor abgerückt. Der CIS-Sensor ist sehr lichtempfindlich und hochauflösend und zeichnet sich durch eine 1:1 Abbildung der gescannten Oberfläche aus. Ein Nachteil dieser Scaneinheit ist die geringe Tiefenschärfe von maximal +/- 1mm. Diese geringe Tiefenschärfe wird zum Problem bei der Inspektion von flatternden Folien. Rezyklat wird nicht in hochwertigen Folien, wie sie z.B. für Batterien oder in der Medizintechnik benötigt werden, eingesetzt. Die Produktionsanlagen dieser Folien sind relativ günstig und die Folienführung liegt nicht in der Genauigkeitsklasse die in der Größenordnung der Tiefenschärfe liegt. Außerdem gibt es nicht die Anforderungen diese Folien hochaufgelöst zu inspizieren. Im Gegenteil zeigt sich die Beimischung von Rezyklat sehr schnell in groben Stippen und Gelpartikeln in der Folie. Ein Inspektionssystem darf auch nicht allzu kostenintensiv zu den Gesamtkosten der Blasfolienanlage sein.

Aus diesen Gründen haben wir für die Bildaufnahme wird die Valine-4K1-CM-80GM GigE-Zeilenkamera von GetCameras in Kombination mit dem inkrementalen Drehgeber RI 32 von Hengstler entschieden. Der Drehgeber dient zur Erzeugung von Triggersignalen für die Zeilenkamera. Die Kamera hat eine Auflösung von 4096 Pixeln, eine Pixelgröße von 3,5 µm und erreicht eine maximale Zeilenrate von 80 kHz. Mit dieser Kamera kann bei einer Folienbreite von beispielsweise 1000 mm eine Auflösung von 245 µm erreicht werden. Dies reicht für die Inspektion von Rezyklatfolien völlig aus.

Systemarchitektur

Das Folieninspektionssystem ist modular aufgebaut und besteht aus einem Server und ein oder mehreren Clients:

- Der Server dient zur Darstellung von Informationen für den Benutzer, verarbeitet Benutzereingaben und verwaltet die Fehlerinformationen.
- Jeder Client ist mit einer Zeilenkamera verbunden, nimmt die erfassten Bilder der Folien auf, führt eine Vorverarbeitung der Bilder zur Datenreduktion durch um daraus potenzielle Fehlerkandidaten zu identifizieren.

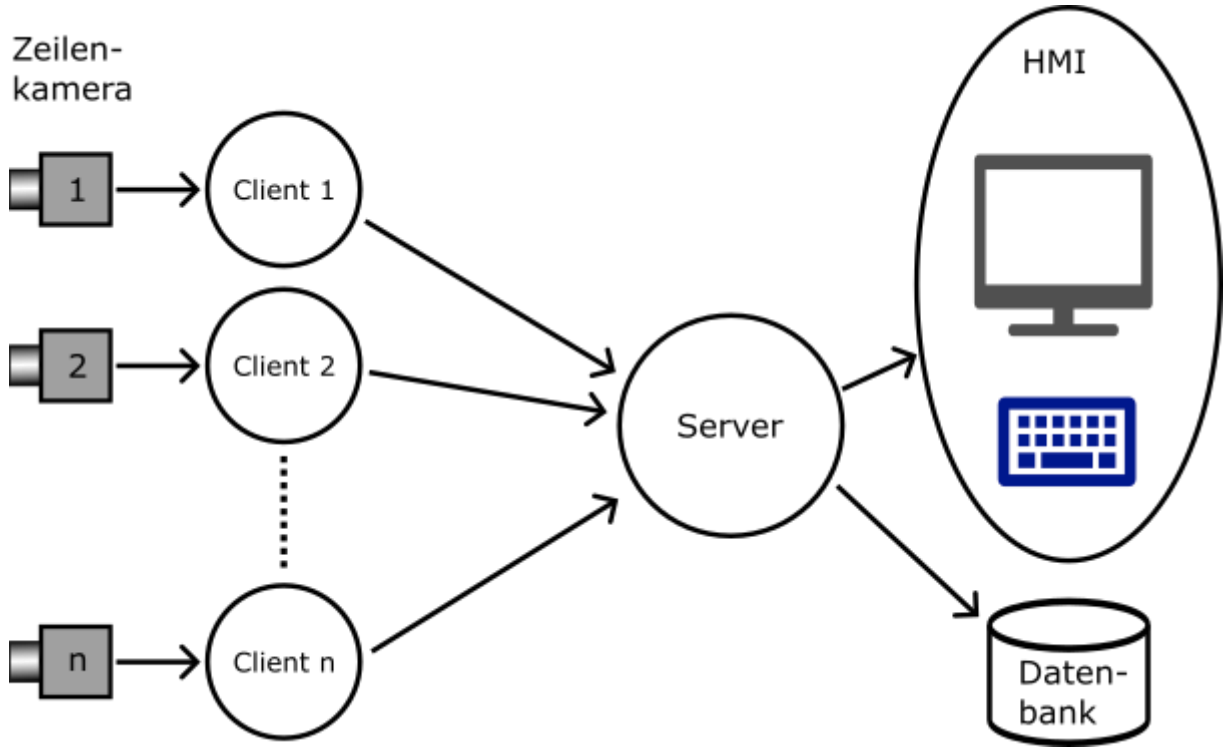
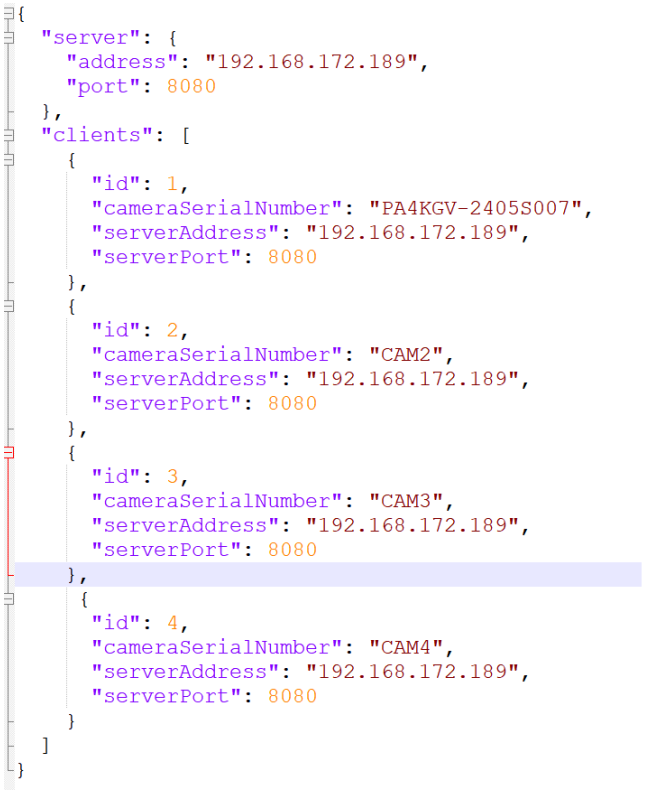


Abbildung 4: Systemarchitektur des Folieninspektionssystems

Der Server und die Clients können flexibel konfiguriert werden. Damit kann ein System entweder auf einer einzelnen Maschine oder in einer verteilten Umgebung betrieben werden kann. Damit können einfach, durch Auswahl unterschiedlich performanter PC-Systeme, eine Anpassung an unterschiedliche Geschwindigkeitsanforderungen vorgenommen werden. Eine „json“-Konfigurationsdatei ist in Abbildung 5 zu sehen. In dieser Datei werden die Kameras über ihre Seriennummer zugeordnet und die IP-Verbindungen zwischen Server und Client konfiguriert. Bei der hier aufgeführten Konfiguration befinden sich alle Server und Clients auf einem Rechner mit der identischen IP-Adresse.



```
{
  "server": {
    "address": "192.168.172.189",
    "port": 8080
  },
  "clients": [
    {
      "id": 1,
      "cameraSerialNumber": "PA4KGV-2405S007",
      "serverAddress": "192.168.172.189",
      "serverPort": 8080
    },
    {
      "id": 2,
      "cameraSerialNumber": "CAM2",
      "serverAddress": "192.168.172.189",
      "serverPort": 8080
    },
    {
      "id": 3,
      "cameraSerialNumber": "CAM3",
      "serverAddress": "192.168.172.189",
      "serverPort": 8080
    },
    {
      "id": 4,
      "cameraSerialNumber": "CAM4",
      "serverAddress": "192.168.172.189",
      "serverPort": 8080
    }
  ]
}
```

Abbildung 5: Einfache Konfiguration des Folieninspektionssystems über eine *.json Datei.

In Abbildung 6 sind die Komponenten des Bildverarbeitungssystems im Labor zu sehen. Die Folie kann in einen Rahmen aufgespannt werden und an der Kamera und Beleuchtung vorbei bewegt werden. Der Inkrementalgeber triggert die Zeilenkamera. Die Beleuchtung ist noch ein Eigenbau aus einfachen LED-Streifen mit vorgeschaltetem Diffusor und Fokussierungslinsen. Für die meisten PCR Anwendungen dürfte diese Beleuchtung ausreichend sein.

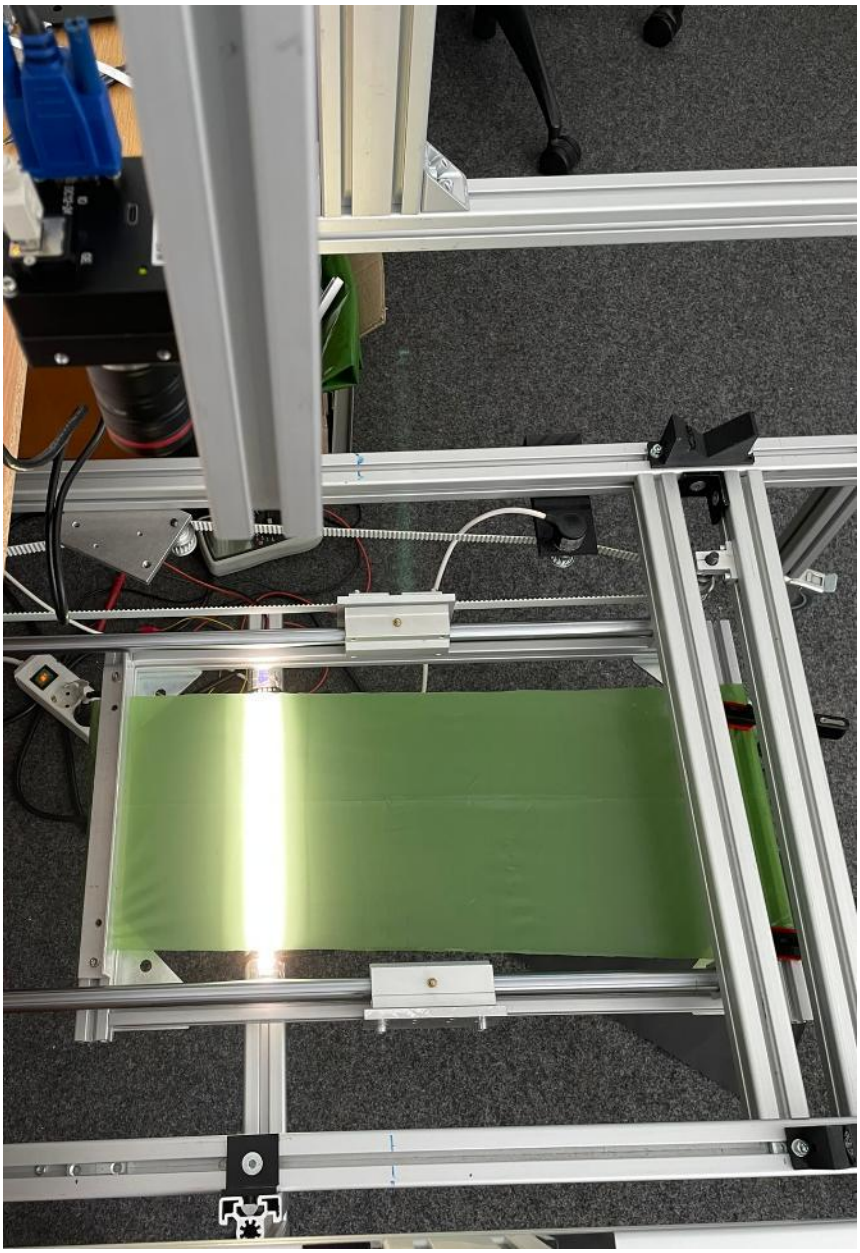


Abbildung 6: Laborsystem zur Folieninspektionssystems.

Client Applikation:

Jeder Client hat eine Schnittstelle zu einer Zeilenkamera und verarbeitet die aufgenommenen Bilder. Er erkennt Helligkeitsabweichungen, indem die aktuellen Bilder mit Referenzbildern verglichen werden. Die Referenzbilder werden durch Mittelung der letzten n-Bilder erstellt, um eine stabile Vergleichsgrundlage zu schaffen. Die Mittelwertbildung erfolgt deutlich langsamer als

die Fehlerbilder auftauchen. Zur Berechnung der Abweichungen von den Referenzbildern wurden zwei Methoden entwickelt und untersucht:

1. Mittelwertmethode: Das aktuelle Bild wird vom Referenzbild subtrahiert. Die Abweichungen, die außerhalb eines definierten Toleranzbereichs um Null liegen, werden als Unregelmäßigkeiten bzw. mögliche Folienfehler eingeordnet.

2. Divisionsmethode: Das aktuelle Bild wird durch das Referenzbild dividiert. Die Abweichungen, die außerhalb eines festgelegten Toleranzbereichs um Eins liegen, werden als Unregelmäßigkeiten bzw. mögliche Folienfehler eingeordnet.

Beide Methoden liefern ähnliche Ergebnisse. Die Divisionsmethode ist jedoch etwas rechenintensiver als die Mittelwertmethode und erkennt geringfügig mehr Fehler als die Differenzmethode (siehe Abbildung 7 und Abbildung 8).

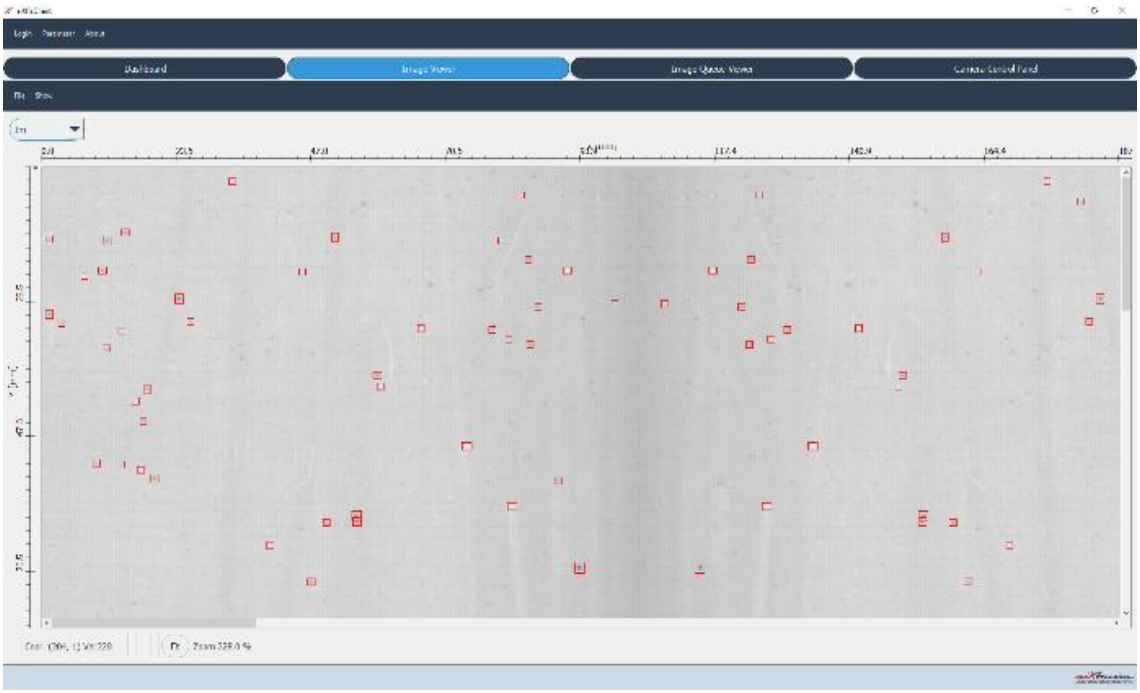


Abbildung 7: Fehlererkennung mit der Differenzmethode (524 Fehler wurden in einem 4096x500 Pixel großen Folienbild erkannt, Verarbeitungszeit: 33 ms)

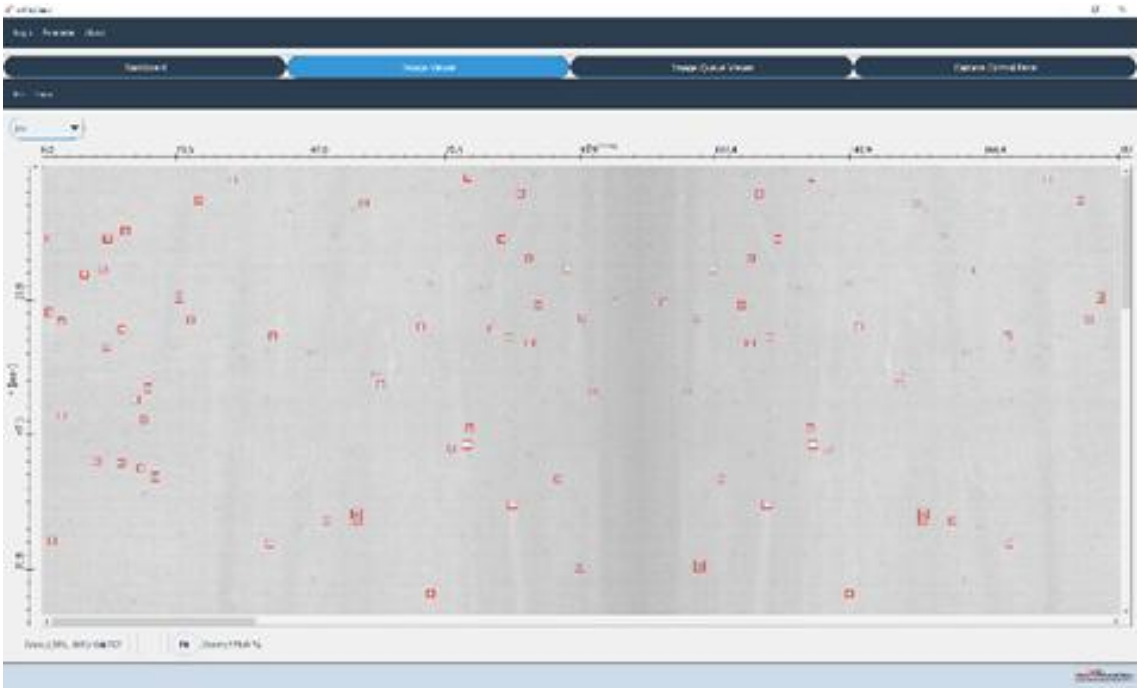


Abbildung 8: Fehlererkennung mit der Divisionsmethode (612 Fehler wurden in einem 4096x500 Pixel großen Folienbild erkannt, Verarbeitungszeit: 36 ms).

Der Zeitaufwand in Millisekunden steigt mit der Anzahl der erkannten Fehler für beide Methoden nahezu linear an (siehe Abbildung 9 und Abbildung 10).

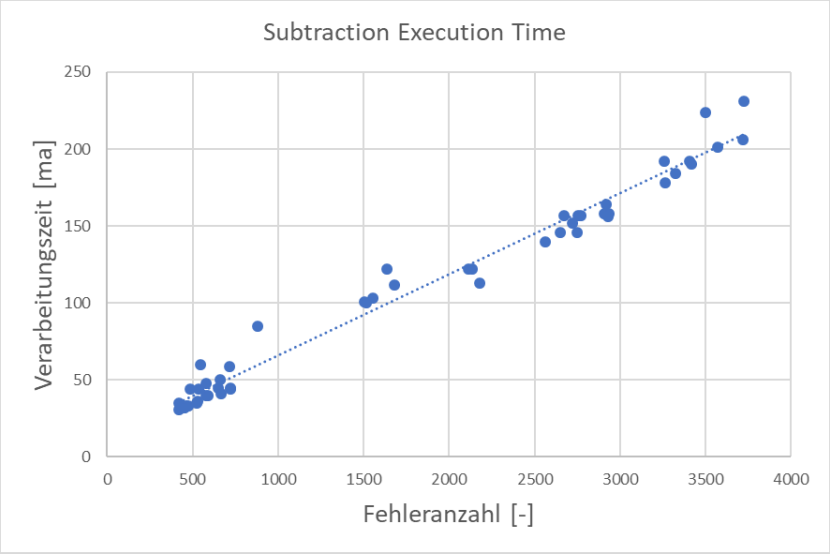


Abbildung 9: Vergleich der Verarbeitungszeit für die Subtraktionsmethode

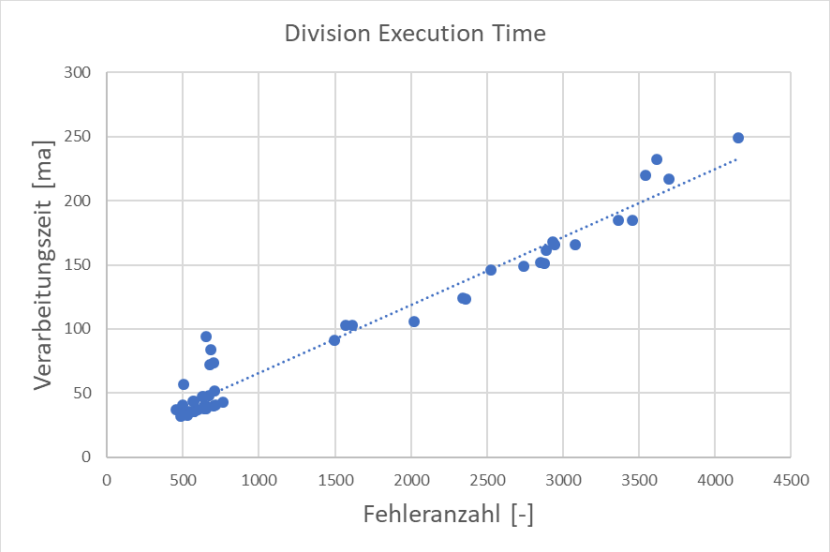


Abbildung 10: Vergleich der Verarbeitungszeit für die Divisionsmethode

Die Experimente wurden auf einem PC mit einem Intel(R) Core(TM) i7-8850H CPU @ 2.60GHz und auf einem PC mit einem Intel(R) Core(TM) i7-6800K CPU @ 3.40GHz durchgeführt, dies beschleunigte die Berechnungszeit um den 1,40. Dies entspricht der höheren Taktrate der zweiten CPU aber nicht den Benchmark Werten der CPUs. Dies lässt darauf schließen, das noch ein großes Verbesserungspotential bei den Algorithmen besteht. Die hier dargestellten Werte sind eher theoretische Werte. Eine Folie mit so vielen Fehlern kann kaum noch für eine Verpackung eingesetzt werden die Kunden akzeptieren werden. Bis zu so einer Fehlerschwelle muss ein Fehlerinspektionssystem problemlos arbeiten, bei mehr Fehlern wird die Folie aussortiert und das System muss wieder richtig mit der Auswertung einsetzen wenn die Fehlerereignisse wieder geringer ist.

Aus der Berechnungsgeschwindigkeit für die Verarbeitungsgeschwindigkeit von 524 Fehlern in 33 ms ergibt sich eine Zeilenrate von: 500 Pixel / 33 ms = 15.151 Hz. Die hier für den Test eingesetzten PCs entsprechen nicht mehr dem aktuellen Standard. Der PC Benchmark nach: https://www.cpubenchmark.net/compare/3247vs2785/Intel-i7-8850H-vs-Intel-i7-6800K
gibt einen CPU Mark von ungefähr 10.000 an. Aktuelle Core i-7 CPUs liegen bei einem Wert von ca. 50.000. D.h. damit können 4x höhere Verarbeitungsgeschwindigkeiten erzielt werden.

In Abbildung 11 sind mögliche Arbeitsbreiten, die Auflösungen und Abzugsgeschwindigkeiten bei variabler Kameraanzahl der Folienanlagen dargestellt. Darüber hinaus sind die Grenzen für die CPU Benchmarks (BM) von 10.000 und 30.000 angegeben. Beim Einsatz aktueller Hardware ist also noch Luft nach oben. Eine weitere Optimierung der Vorverarbeitungsalgorithmen kann hier auch noch eine deutliche Steigerung bringen. Ein Arbeitspunkt mit 250 µm Auflösung beim Einsatz von 2 Kameras ergibt bei einer Abzugsgeschwindigkeit von 100 m/min eine Zeilenrate 7.100 Hz und bei 200 m/min 14.200 Hz.

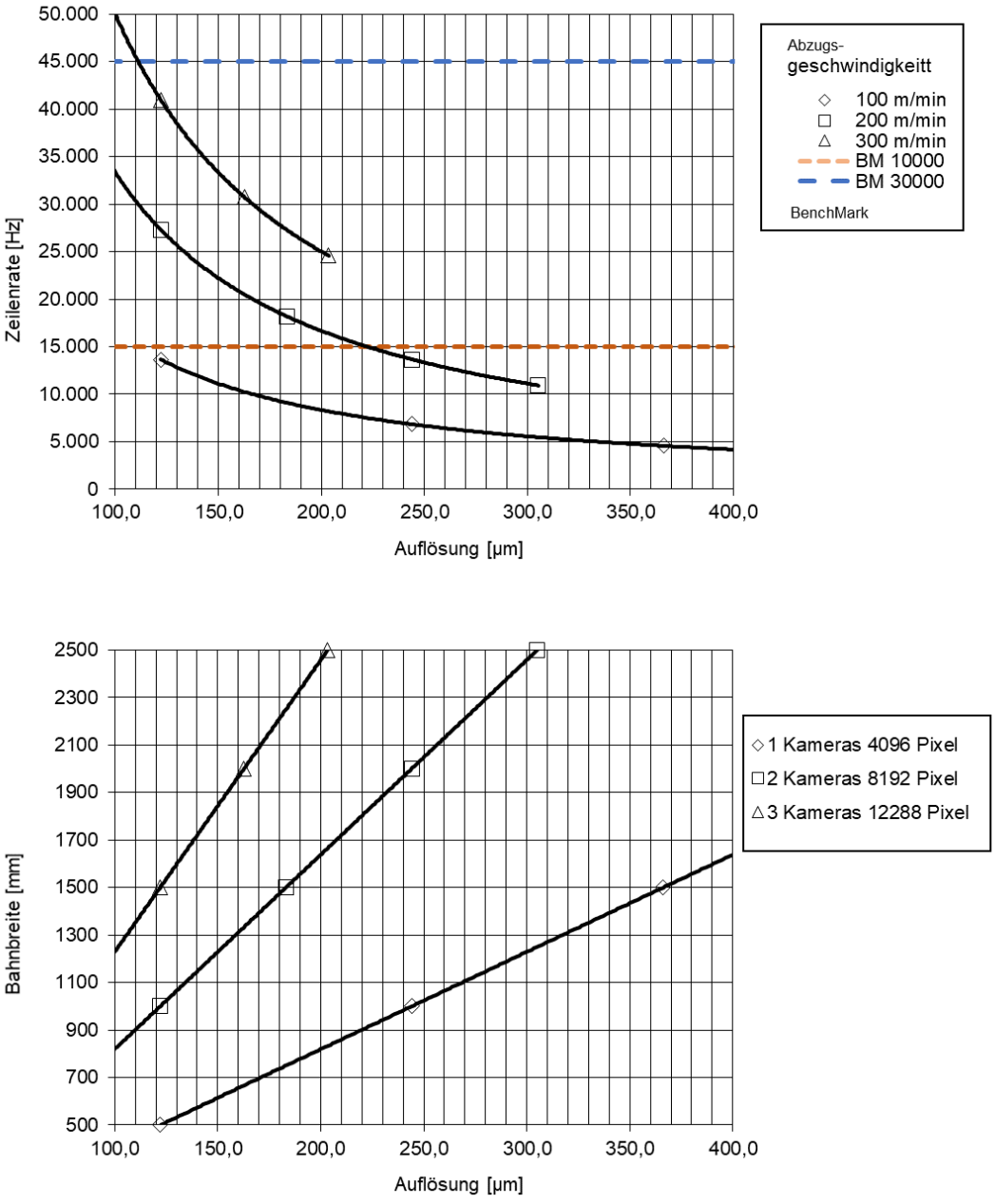


Abbildung 11: Auflösungen der Inspektionssystems bei unterschiedlichen Kamera-konfigurationen, Abzugsgeschwindigkeiten und Bahnbreiten

Die erkannten Unregelmäßigkeiten werden als Fehlerkandidaten klassifiziert. Jeder Fehlerkandidat umfasst folgende Informationen des detektierten Fehlers, Größe des Fehlers und Bildausschnitt des betroffenen Bereichs. (siehe Abbildung 12)

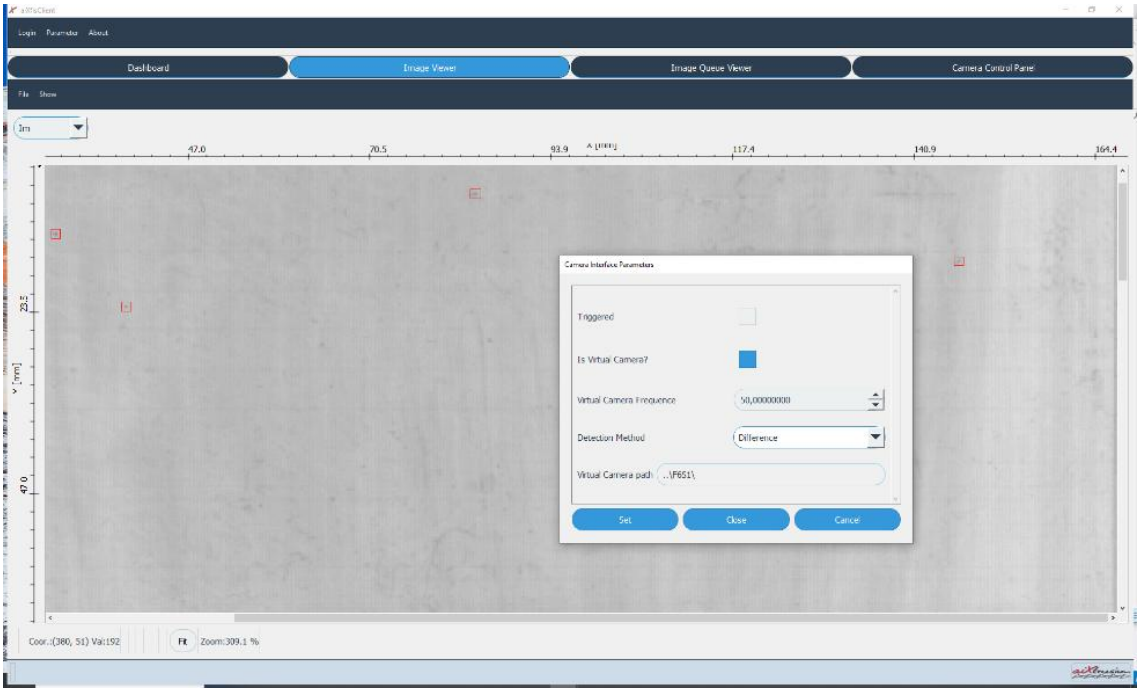


Abbildung 12: Die Client-Applikation erfasst Bilder der Zeilenkamera und erkennt Unregelmäßigkeiten

Die Position und Größe der Fehler werden als Ganzzahlen in Pixeln gespeichert und in die Datenbank übertragen, um Speicherplatz zu sparen. Die Umrechnung findet auf der Server Applikation statt. Diese Umrechnung von Pixeln in Millimeter erfolgt mithilfe eines Kalibrierungsparameters, der mit der Client-Zellen-Kalibrierung ermittelt wird.

Client-Kalibrierung

Die Client-Kalibrierung hat zwei Hauptaufgaben: Die erste Aufgabe ist die Bestimmung der Pixelgröße in Millimetern: Ein 2D-Objekt mit bekannten Abmessungen in X- und Y-Richtung (z. B. ein Checkerboard wie in Abbildung 13 zu sehen) wird unter der Kamera die sich im Trigger Modus (getriggert durch einen Inkrementalgeber) befindet hin- und her bewegt. Die y-Auflösung ergibt sich durch die Breite der aufgenommenen Struktur dividiert durch die Anzahl der Pixel in der Kameraauswertung.

Um quadratische Pixel zu erhalten wird der programmierbare Integralgeber entsprechend konfiguriert, damit er die richtige Anzahl von Triggern pro Umdrehung ausgibt. Bei Anlagen mit konstanter Abzugsgeschwindigkeit kann die Zeilenrate der Kamera entsprechend der Umrechnung

aus Abbildung 11 ermittelt werden. Mithilfe des Software-Tools aus Abbildung 13 wird dann die Pixelgröße in Millimetern berechnet und in einer Konfigurationsdatei gespeichert.

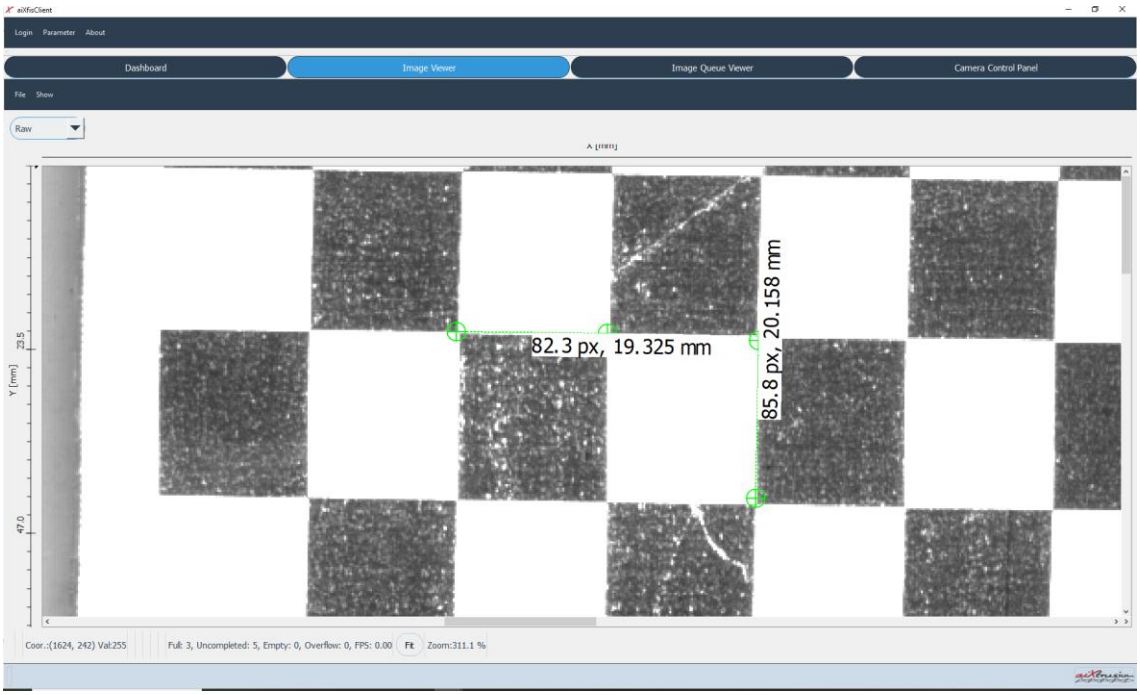


Abbildung 13: Client-Zellen-Kalibrierung zur Festlegung der Pixelgröße in Millimetern

Die zweite Aufgabe ist die Bestimmung des Aufnahmebereichs jeder Kamera. Werden mehrere Kameras eingesetzt, muss der Aufnahmebereich jeder Kamera festgelegt werden. Dazu wird eine Skalierung unter die Kamera gelegt und die Region of Interest (ROI) für jede Zelle wird definiert, sodass klar festgelegt wird, welcher Folienbereich von welcher Kamera erfasst und verarbeitet wird. (siehe Abbildung 14)

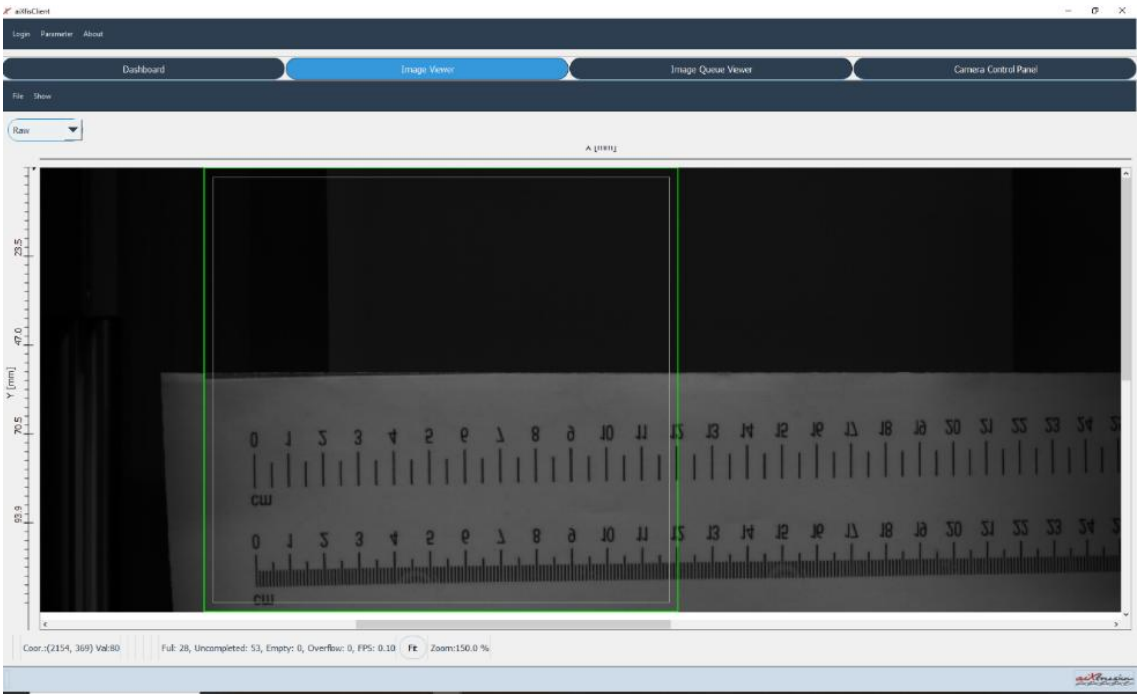


Abbildung 14: Client-Zellen-Kalibrierung zur Bestimmung des Aufnahmebereichs im Mehrzellensystem

Fokussierung der Kamera

Zum Fokussieren der Kamera wurde ein Fokussierungstool implementiert. Dazu wird die Kamera im Live-Modus gestartet und ein Objekt mit scharfen Kanten wird unter die Kamera gelegt

Wird der Fokussierungsmodus ausgewählt, erscheint eine RoI (Region of Interest) im Bild, die verschoben und in der Größe angepasst werden kann. In dem Fenster wird ein Wert von 0 bis 100 angezeigt der die Fokussierung im wieder spiegelt. (siehe Abbildung 15) Das Objektiv muss so eingestellt werden, dass der höchstmögliche Wert an einer Kante erreicht wird.

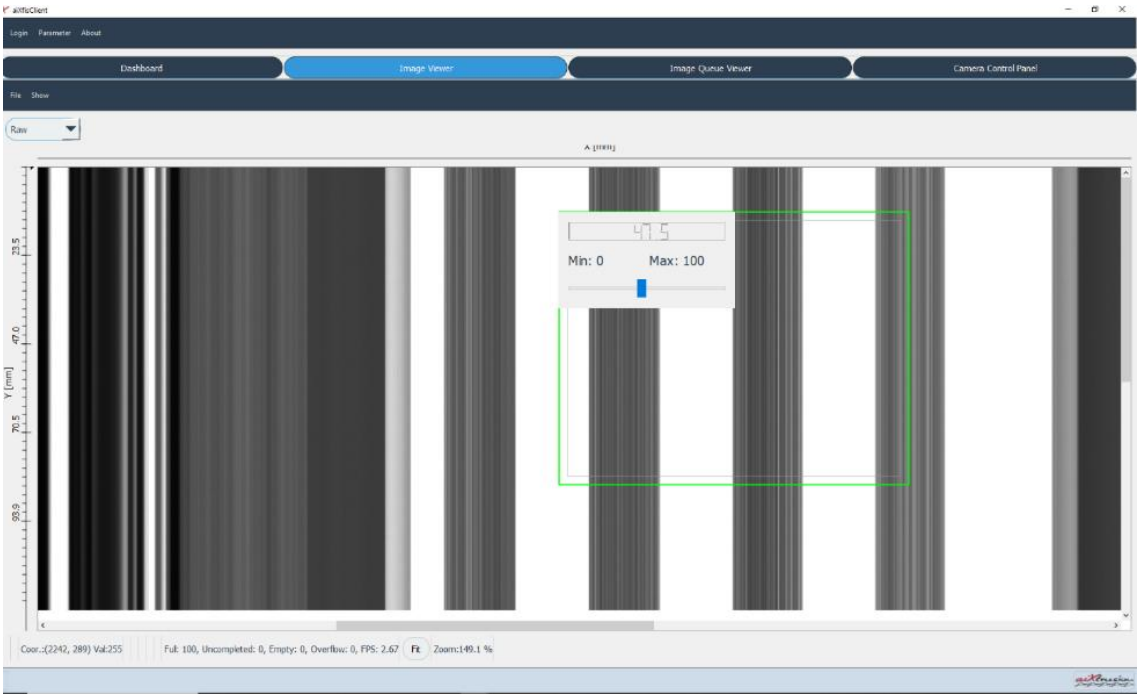


Abbildung 15: Kamera-Fokussierungs Dialog

Server-Applikation für die Fehleransicht und Steuerung

Die Server-Applikation zeigt dem Benutzer die erkannten Fehler in Echtzeit an und speichert diese in einer Datenbank. Darüber hinaus bietet sie die Möglichkeit, im Offline-Modus die Fehlerhistorie eines bestimmten Produkts abzurufen und zu analysieren. Der Server sammelt Informationen von mehreren Clients und stellt sie in einer einzelnen Benutzeroberfläche (GUI) dar. Ein Beispiel ist in Abbildung 16 zu sehen in der der Server Informationen von drei Client-Applikationen anzeigt.

Im linken Teil des Bildes ist die Folie über die letzten Laufmeter mit jeweils Symbolen von den detektierten Fehlern dargestellt. Die Symbole können, entweder angepasst zur tatsächlichen Größe oder auch als Symbol einer Fehlerklasse dargestellt werden. Oberhalb dieser Darstellung ist die Statistik der gefundenen Fehler zur jeweiligen Position auf dem Folienwickel zu erkennen. Rechts oben sind die Bedienelemente zur Bedienung des Systems angeordnet. Dort können Einstellungen für unterschiedliche Produkte, alte Aufzeichnungen und die aktuelle Position geändert odereingefroren werden. Darunter sind einige Statistikinformationen aufgeführt.

Abbildung 16: Server Applikation mit Größenstatistik.

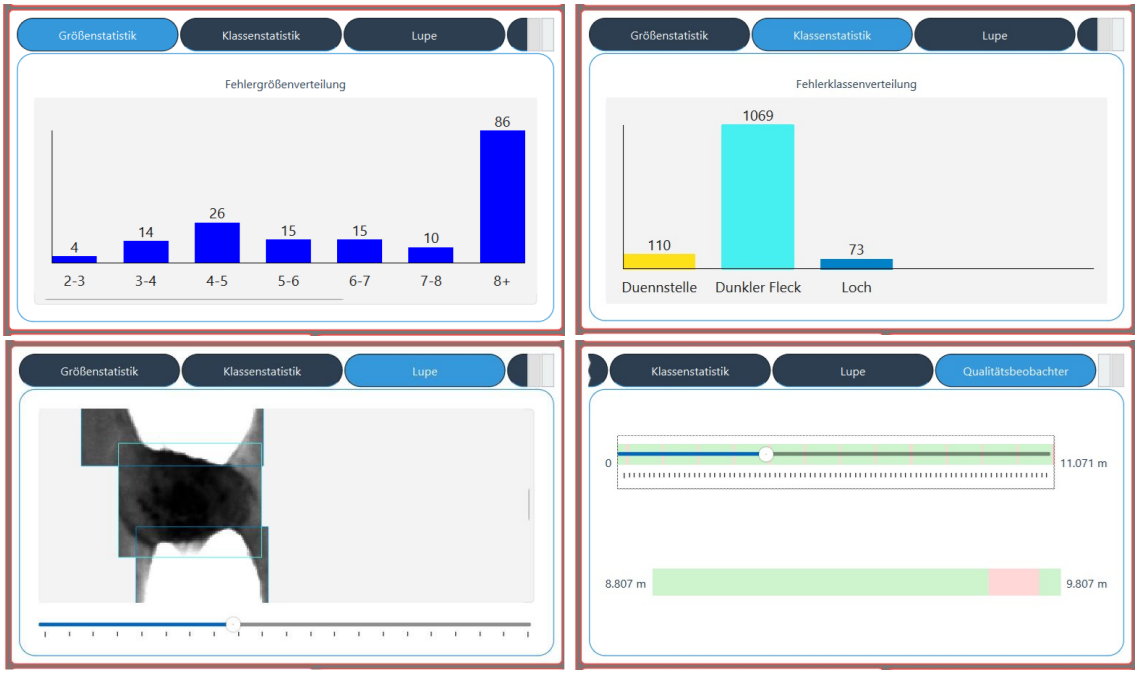


Abbildung 17: Server Applikation mit den unterschlichen Ansichtmöglichlkeiten

In Abbildung 17 ist der Qualitätsbeobachter zu sehen. Dieser enthält auf einen Blick die Qualität eines gesamten Folienwickels. Bereiche mit schlechter Qualität werden dort rötlich markiert. Klickt man auf einen Bereich der Gesamtansicht wird dieser skaliert in der kleineren Ansicht angezeigt. Diese Ansicht ist synchronisiert mit Anzeige des Folienwickels auf der linken Seite. So hat der Benutzer sehr schnell die Qualität eines ganzen Wickels im Blick.

In Abbildung 18 ist die Fehlerdatenbank zu sehen. Die gefundenen Fehler werden in einer SQL Lite Datenbank abgelegt. Zu jedem Fehler werden Position, Größe, die Bildinformationen und die mit einem Neuronalen Netz (NN) bestimmte Fehlerklasse abgelegt. Bei der Fehlerklasse kann gewählt werden, ob die Bestimmung über ein NN oder über das Erscheinungsbild (hell, dunkel, Verlauf, rund, länglich, etc.) erfolgt.

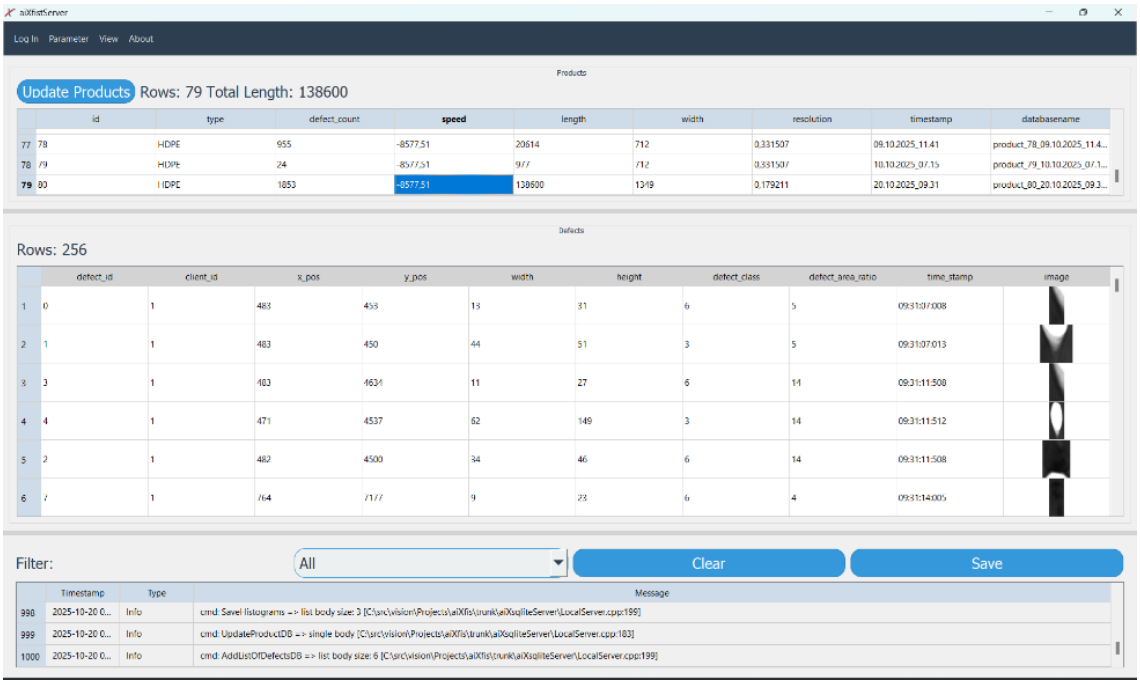


Abbildung 18: Server Applikation: Anzeige der Serverstatistik

Die Fehlerdaten können über eine OPC UA Schnittstelle abgefragt und so in jede Cloud überführt werden.

Untersuchungen an der Laboranlage des Instituts für Kunststoffverarbeitung (IKV)

In Abbildung 19 ist das Inspektionssystem montiert in der Collin Laboranalage zur Folienherstellung zu sehen. Das System besteht aus einer LED Leuchte, einer Zeilenkamera, einem Inkrementalgeber und einem PC zur Auswertung. Hier wurde ein Inkrementalgeber montiert, damit auf die unterschiedlichen Abzugsgeschwindigkeiten reagiert werden kann.

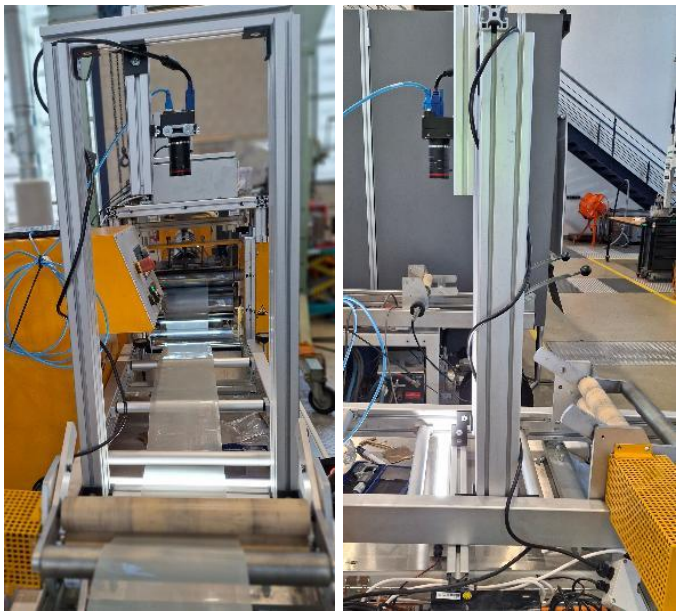


Abbildung 19: Folieninspektionssystem montiert an der Laboranlage des IKV.

Zur Untersuchung wurden Folien aus dem Projekt mit unterschiedlichen Recyclinganteilen über das Inspektionssystem gefahren. Eine Auswahl der Folien die untersucht wurden ist in Abbildung 20 zu sehen.

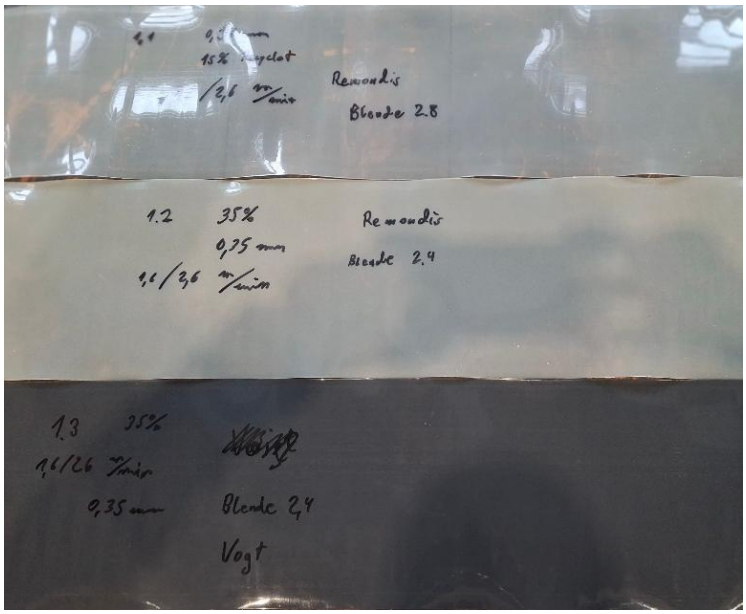


Abbildung 20: Untersuchung unterschiedlicher Folien mit variablen Recycling-Anteil

Es zeigte sich schnell, dass für eine optimale Erfassung die Belichtungszeit der Kamera variabel eingestellt werden musste. Dies ist in den beiden Bildern der Abbildung 21 zu erkennen.

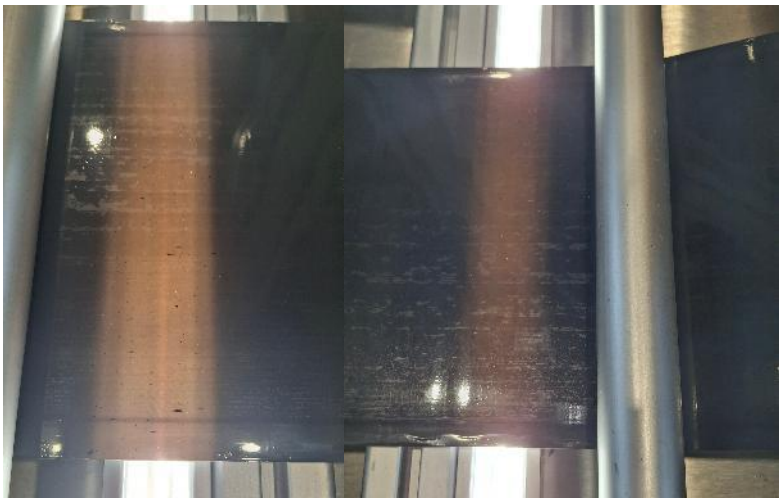


Abbildung 21: Unterschiedlich Helligkeiten durch unterschiedliche Recylinganteile.

Damit die Messungen der Fehlerpartikel vergleichbar werden und für die einfache Einrichtung bei einem Folienwechsel wurde die Einmessung der Folienhelligkeit automatisiert. Die Oberfläche zur Einmessung der Belichtungszeit ist in Abbildung 22 zu sehen. Die maximale Belichtungszeit und damit die Zeilenrate ist abhängig von der Abzugsgeschwindigkeit. Die Abzugsgeschwindigkeit kann entweder fest eingestellt werden oder, wenn vorhanden, durch einen Inkrementalgeber bestimmt werden. Im zweiten Fall ist die Abzugsgeschwindigkeit dann begrenzt durch die Maschine.

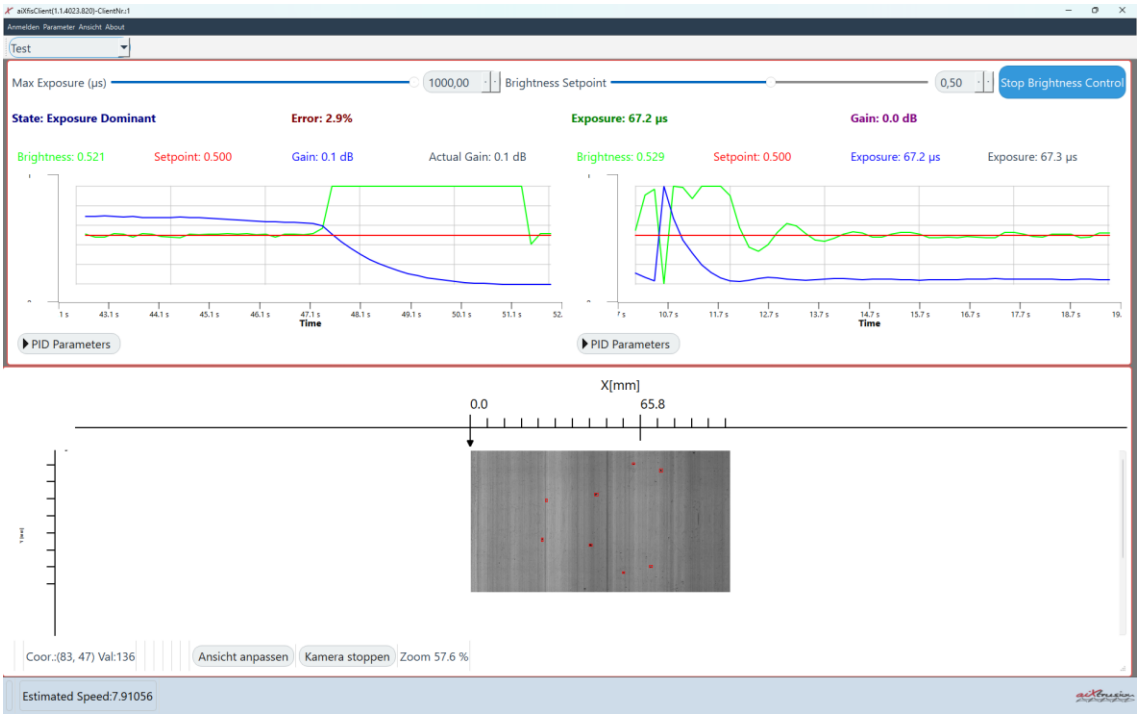


Abbildung 22: Oberfläche zur Einmessung der Belichtungszeit der Zeilenkamera.

Die Regelung über einen PID-Regler ist in dem rechten Diagramm der Abbildung 22 zusehen. Dort zeigt sich wie die Helligkeit um den Setpoint (entspricht 0,5 * 255 Grauwerte) schwingt bis die Helligkeit im mittleren Grauwertbereich bei 128 angekommen ist. Der Benutzer bekommt auch das aktuelle Kamerabild für eine Bewertung angezeigt.

Reicht die Belichtungszeit nicht aus wird, wie in Abbildung 23 zu sehen, der Gain für die weitere Verstärkung benutzt. Dies hat den Nachteil, dass mit steigendem Gain die Bildqualität und damit die Fehlererkennung schlechter wird.

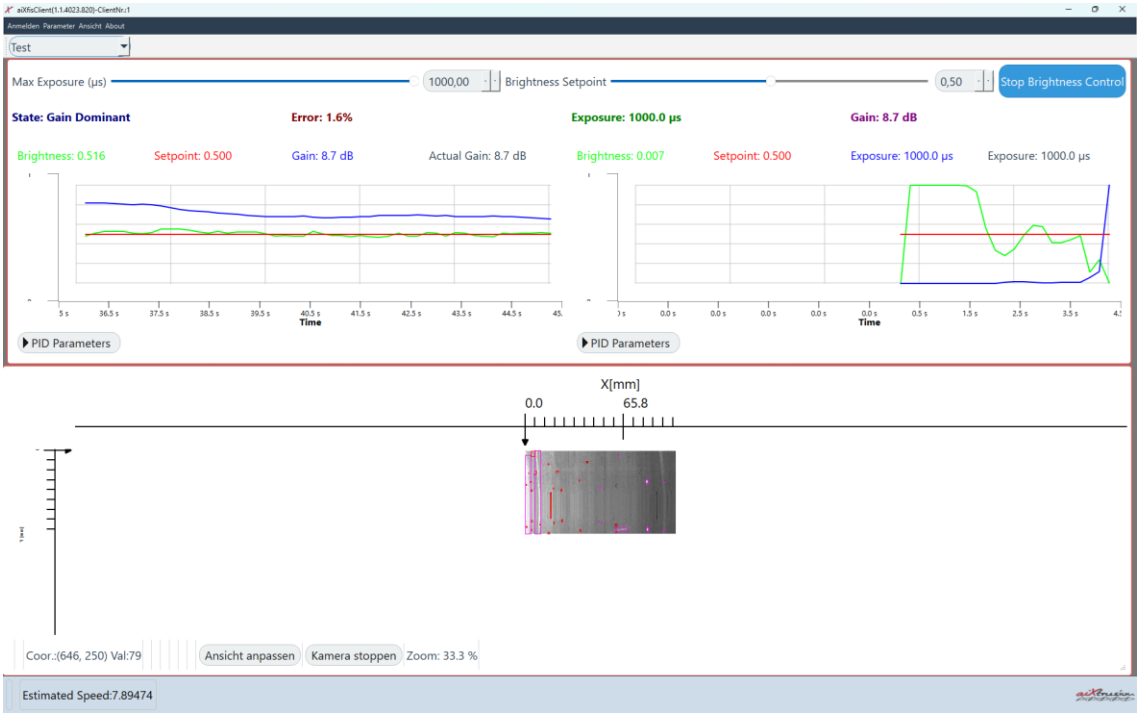


Abbildung 23: Oberfläche zur Einmessung des Gains der Zeilenkamera.

In Abbildung 24 sind für die untersuchten Folien die ermittelten Belichtungszeiten aufgeführt. Für die Folien „Remondis 28“ und „Remondis 24“ war es nicht nötig den Gain der Kamera zu erhöhen. Die Belichtungszeiten stimmen korrelieren auch mit dem Recyclinganteil der Folien. Das gleiche gilt auch für die Folie „Vogt 21“. Hier hat die maximale Belichtungszeit aber nicht ausgereicht und es musste zusätzlich die Verstärkung erhöht werden.

Die Fehlerausauswertung zeigt sich auch direkt in dem Messwert „Defect Ratio“. Dieser gibt den Anteil der Fehlerfläche bezogen auf die Folienfläche an. Dieser Messwert steigt erwartungsgemäß mit der Erhöhung des Recyclinganteil der in die Folie eingebracht wurde. Dies wurde in zahlreichen Versuchen am IKV untersucht.

	Vogt 21	Remondis 28	Remondis 24
Exposuretime [µs]	1000	13,9	31,9
Gain [dB]	0,2	0	0
Defect ratio [-]	0,43%	0,31%	0,15%

Abbildung 24: Ergebnisse der Helligkeitsregelung und Fehlererkennung bei Folien mit unterschiedlichem Rezyklatanteil.