

# **Sachbericht/Abschlussbericht**

## **Teil I**

### **Kurzbericht**

# **Verbundprojekt System zur adaptiven Photonischen Oberflächen Testung mit lernfähiger Bildauswertung in Kombination mit einem Reinigungssystem (SysPOT) - Teilvorhaben: Erarbeitung der Adaptive Cleaning Process Control (ACPC) zur Selbstregulierung von Reinigungssystemen mit Hilfe von künstlicher Intelligenz**

Förderkennzeichen: 13N15468

Projektlaufzeit: 01.04.2021 bis 31.03.2024

Projektträger: VDI Technologiezentrum GmbH im Auftrag des Bundesministeriums für Bildung und Forschung



David Bartels

Höckh Metall- Reinigungsanlagen GmbH

Untere Reute 58-66

75305 Neuenbürg

## Ursprüngliche Aufgabenstellung

Das Hauptziel des Forschungsprojekts SysPOT war es ein neuartiges System zur optischen Bewertung von partikulären- und idealerweise auch filmischen Verunreinigungen zu entwickeln, welches auch Oberflächenbeschädigungen wie z.B. Kratzer oder Schlagmarken erkennen kann. Dieses System sollte mit einer lernfähigen Bildauswertung an ein effizientes Reinigungssystem integriert werden. Um diese Ziele zu erreichen, wurden moderne KI-Technologien für die Bildbearbeitung und Reinigungsoptimierung verwendet.

Die Überprüfung sollte in zwei Hauptschritten erfolgen.

1. Ein optisches System erfasst die partikulären- und filmischen Verunreinigungen sowie die Oberflächendefekte. Eine KI wertet diese erfassten Daten neuronal aus und teilt diese in entsprechende Klassen ein.

2. Die ausgewerteten Daten sollen dann an das Reinigungssystem weitergegeben werden, welches mit Hilfe dieser Daten den Reinigungsprozess optimieren soll.

Unser Teilvorhaben befasste sich hauptsächlich mit der selbstlernenden Reinigungsanlage. Hier sollte neben der Einhaltung der vorgegebenen Reinigungsergebnisse auch auf Energieeffizienz und Ressourcenschonung geachtet werden.

Um diese Ziele zu erreichen, wurde eng mit den Verbundpartnern zusammengearbeitet.

Trotz Pandemie, welche uns alle (kosten- und liefer-) technisch stark herausforderte, konnten nahezu alle geplanten Hauptziele erfolgreich abgeschlossen werden, sodass am Ende der Sensor, sowie die Integration der KI an das Reinigungssystem funktionieren.

## Technische Ausgangssituation zu Beginn

Die aktuellen Reinigungssysteme werden manuell von Mitarbeitern oder deren Vorgesetzte parametrieren. Dies bedeutet, dass Anlagenbetreiber bislang die Reinigungsergebnisse selbst anpassen mussten, wenn neue Produkte hergestellt wurden oder Sauberkeitsprobleme auftraten. Bei diesen manuellen Umstellungen konnte zumeist auch nicht auf Ressourcenschonung geachtet werden. Viele Marktbegleiter hatten zuvor schon ohne KI versucht die Bedienung der Reinigungsanlagen in Hinblick auf Service und Bedienbarkeit zu vereinfachen, was bislang nicht oder nur minimal gelang.

Um die Anlagen zu optimieren, wurde unter anderem auf Sauberkeitswerte zurückgegriffen, die durch zeitaufwändige Extraktionsverfahren nach VDA 19.1 / ISO16232 zur Partikelerkennung erstellt wurden. Dieses kamerabasierte Verfahren funktioniert gut, ist allerdings aufwändig und die Ergebnisse liegen, je nach Laborauslastung oftmals erst wenige Stunden bis Tage vor. Dieses Analyseverfahren unterscheidet Partikel bislang in reflektierend, nicht reflektierend und Faserartige. Hierbei wird eine Filtermembrane, welche nach der Extraktion des Bauteils mit dem Spülmedium beaufschlagt wurde, analysiert. Partikel, die sich farblich von dieser Membran nicht abheben konnten, wurden nicht erkannt und bewertet.

Auch Partikelüberlagerungen können nur im Nachgang durch manuelle, optische Kontrolle nachbearbeitet werden, was die Auswertung sehr aufwendig macht. Filmische Verunreinigungen oder Oberflächendefekte können mit dem aktuellen Verfahren nicht erkannt werden.

## Ablauf des Vorhabens

Nach Pandemiebedingter Verschiebung des Forschungsprojektes konnte dieses am 01. April 2021 mit einer Laufzeit von 3 Jahren bis 31. März 2024 gestartet werden. Hierbei wurde das Projekt in Arbeitspakete (AP) untergliedert, die, auch wenn sie sich manchmal überschneiden, aufeinander

aufbauten. In Kooperation mit z.B. der PI-Innovation, der Fa. Gläser GmbH, dem IPS der TU-Dortmund oder dem Fraunhofer Institut (IPM), wurden die Arbeitspakete des Vorhabens gemeinsam durchgeführt. Folgende Arbeitspakete wurden über die Laufzeit bearbeitet:  
Im ersten Jahr wurde sich auf das AP 1 konzentriert (April 2021 - März 2022): Entwicklung des optischen Sensors mit dem Teilarbeitspaket (TAP): Anforderungsspezifikation und Lasterhefterstellung  
Im zweiten Jahr (April 2022 - März 2023) wurden die Arbeitspakete AP 2.1 bis AP 2.5 bearbeitet: Hierbei wurden hauptsächlich die Themen Training der KI-Modelle, sowie die manuelle Partikelklassifikation zum Anlernen der KI angegangen. Hier waren wir hauptsächlich im TAP 2.4 „Klassifikation der Oberflächen nach Defekt- / Verschleißzustand“ mit tätig.  
Im Dezember 2022 wurden diese Modelle dann erfolgreich getestet. Der zweite Meilenstein konnte erreicht werden.  
Im dritten Jahr (April 2023 - März 2024) lag der Schwerpunkt sehr stark auf der Integration und Validierung der Systeme. Das AP 3 „Bedarfsorientierte Reinigung“ beinhaltete die TAP's 3.1: Automatisierte Adaption der Reinigungsparameter basierend auf dem Regelkreis der Messung und Zustand der Reinigungsanlage, TAP 3.2: Automatisierte Optimierung des Reinigungsprogramms durch verstärkendes Lernen und TAP 3.3: Anpassung der Reinigungsanlagen.  
Das TAP 4 wurde ebenfalls im dritten Jahr angegangen. Hier sollten nun alle Systeme miteinander verbunden werden. Insbesondere die Kombination von Sensor und der KI der Reinigungsanlage wurden durchgeführt und verbunden. Erst zum Projektende hin konnte die Integration der Systeme, trotz der Pandemie, die einen sehr starken Einfluss auf das Projekt hatte, abgeschlossen werden.

## **Wesentliche Ergebnisse**

Das Projekt SysPOT hat wichtige wissenschaftliche und technische Fortschritte erzielt. Ein Hauptresultat ist ein automatisiertes System zur genauen Oberflächenanalyse. Es nutzt lernfähige Bildauswertung und ein modernes Reinigungssystem, was die Effizienz und Qualität der industriellen Reinigung deutlich verbessert.

Ein entscheidender Erfolg war die Entwicklung von KI-Modellen, die mit ca. 95 - 98% Genauigkeit zwischen den einzelnen Partikelarten (metallischen- und nichtmetallischen Partikeln sowie Fasern) unterscheiden können. Die Verwendung Methoden zum Lernen der KI optimierte die Reinigungsprozesse und zeigte in Tests eine sehr deutliche bessere Reinigungsleistung. Durch die Kombination dieser KI-Modelle mit dem entwickelten Sensor konnte die technische Sauberkeit von Bauteilen deutlich besser und schneller bewertet werden. Dies konnten Vergleichsmessungen bestätigen.

## **Zusammenarbeit**

Die Zusammenarbeit der Projektpartner war sehr gut und war einer der größten Faktoren, um das Projekt erfolgreich abschließen zu können. Da die Projektpartner aus den verschiedensten Kerngeschäften kamen, konnten alle nötigen Fähigkeiten abgedeckt werden.  
Das IPS war hier ein sehr starker Partner, der im Bereich der KI ein entscheidender Faktor war und gemeinsam mit IconPro das KI-Training und deren Modelle entwickelten.  
Die Reinigungsanlagenhersteller (Höckh und LPW (ztw.)) stellten Daten zur Verfügung. Die Fa. Glaser wertete viele Membranen aus und generierte ebenfalls sehr viele Daten. Push4Impact sorgte für die Positionierung, damit der vom Fraunhofer IPM entwickelte Sensor die Positionen findet.

Diese Zusammenarbeit wurde mit regelmäßigen Meetings gefördert. In Zeiten der Pandemie war dies stellenweise nur online / digital möglich. Dennoch konnte der Wissenstransfer gewährleistet werden. Das Projekt konnte auch nach dem Ausscheiden der Projektpartner Fa. Hexagon Vision GmbH und der Fa. LPW Reinigungssysteme GmbH zielführend weitergeführt werden.  
Die sehr gute und enge Zusammenarbeit war einer der wesentlichen Bestandteile zum Erfolg des Projektes.

# **Sachbericht/Abschlussbericht**

## **Teil II**

### **„Eingehende Darstellung“**

**Verbundprojekt System zur adaptiven Photonischen OberflächenTestung mit lernfähiger Bildauswertung in Kombination mit einem Reinigungssystem (SysPOT) - Teilvorhaben: Erarbeitung der Adaptive Cleaning Process Control (ACPC) zur Selbstregulierung von Reinigungssystemen mit Hilfe von künstlicher Intelligenz**

Förderkennzeichen: 13N15468

Projektlaufzeit: 01.04.2021 bis 31.03.2024

Projektträger: VDI Technologiezentrum GmbH im Auftrag des Bundesministeriums für Bildung und Forschung



David Bartels

Höckh Metall-Reinigungsanlagen GmbH

Untere Reute 58-66

75305 Neuenbürg

## Inhaltsverzeichnis

<b>POS</b>	<b>Titel</b>	<b>Seite</b>
0	Abbildungs- und Tabellenverzeichnis	3
1	Zusammenfassung	4
1.1	Gesamtziel des Vorhabens	4
1.2	Bezug des Vorhabens zu den förderpolitischen Zielen (insbesondere Förderrichtlinie, Förderprogramm)	5
1.3	Wissenschaftliche und technische Arbeitsziele des Vorhabens	6
1.3.1	Ausgangssituation	6
1.3.2	Zusammengefasster Ablauf des Vorhabens	7
2	Technische Umsetzung	8
3	Wissenschaftlicher Transfer	27
4	Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen	28
5	Mittelverwendung	28
6	Erzielte Nebenergebnisse	30
7	Literaturverzeichnis	31

## 0. Abbildungs- und Tabellenverzeichnis

<b>Abbildung</b>	<b>Titel</b>	<b>Seite</b>
1	Zusammenspiel der Systeme	5
2	Algorithmus Beispiel	5
3	Membrane	10
4	Reinigungsanlage	11
5	Kommunikation im Gesamtsystem	12
6	Sinnersche Kreis	13
7	SITA Gesamtbild	15
8	SITA-Sensor auf Bauteil	15
9	Aufbau der Kommunikation zum Sammeln der Daten	16
10	Temperaturverlauf (o.) und Druckverlauf (u.) der Arbeitskammer	17
11	Temperaturverlauf (o.) und Konzentration (u.) von Tank 1	17
12	Messung der Trübung	17
13	Auswertung nach VDA 19.1 / ISO 16232	18
14	Sauberraum-Kabine	19
15	Vereinfachtes Anlagenschema	21
16	Erweiterter Sinnersche Kreis (Wildbrett 2006)	21
17	Sensor auf Schlitten	27

<b>Tabelle</b>	<b>Titel</b>	<b>Seite</b>
1	Auflistung Sensorik	20
2	Versuchsparameter	23
3	Legende	23
4	Versuch #0	24
5	Versuch #1	25
6	Versuch #2	25
7	Versuch #3	25
8	Bilder zur Versuchsreihe	26
9	TAP-Zielerreichung	29

## **1. Zusammenfassung:**

Die Bauteilsauberkeit stellt eine zentrale Herausforderung sowohl vor, während als auch nach dem Fertigungsprozess dar. Dabei steigen die Anforderungen kontinuierlich an und durch innovative Fertigungsverfahren, wie beispielsweise den 3D-Druck, werden die Geometrien der Werkstücke immer komplexer.

Neben der Entwicklung eines Sensors zur optischen Bewertung von Partikeln, filmischer Verunreinigungen und Oberflächenbeschädigungen im SysPOT, soll eine Lösung entwickelt werden, die mithilfe künstlicher Intelligenz den Reinigungsprozess möglichst effizient gestaltet. Ein photonisches Messsystem wird dazu eingesetzt, um partikuläre und filmische Verunreinigungen sowie Oberflächenbeschädigungen auf den Werkstücken zu analysieren. Durch den Abgleich dieser Messdaten mit der Bauteilgeometrie und den Parametern der Reinigungsanlage soll der Prozess optimiert werden.

### **1.1 Gesamtziel des Vorhabens**

Das Ziel von SysPOT ist die Entwicklung eines optischen Systems zur Inline-Messung von Partikeln und Defekten auf Freiform-Oberflächen sowie zur Regulierung des Reinigungsprozesses. Die Gesamtlösung umfasst:

1. einen optischen Sensor, der die Oberflächen von Bauteilen direkt nach der Reinigung auf Defekte und Partikel überprüft,
2. Reinigungsanlagen, die eine qualifizierte Reinigung komplexer Bauteile gewährleisten und
3. eine Steuerungslogik, die weitgehend autonom die Anforderungen der Bauteile und deren individuelle Prüfstandards bewertet und anpasst.

Diese Logik ermöglicht eine Feinabstimmung und erkennt selbstständig Abweichungen in der Oberflächensauberkeit sowie bei den Prüfeinstellungen, um entsprechende Anpassungen vorzunehmen.

Während des Projektzeitraums wurden verschiedene Hardware- und Softwarekomponenten erfolgreich entwickelt und getestet. Zum Abschluss des Projekts im März 2024 war eine Reinigungsanlage mit integrierten Sensoren sowie zwei SySPOT-Sensoren im Tischaufbau und ein SySPOT-Sensor im Roboteraufbau erfolgreich mit der KI-Software verbunden, wobei unser Hauptaugenmerk auf eine KI-basierte Steuerung lag, die das Reinigungssystem selbstständig parametrisiert, um somit die maximale Effizienz bei minimalen Ressourcen Einsatz zu erreichen.

Hierfür müssen Daten erstellt und gesammelt werden, um einen Algorithmus entwickeln zu können.

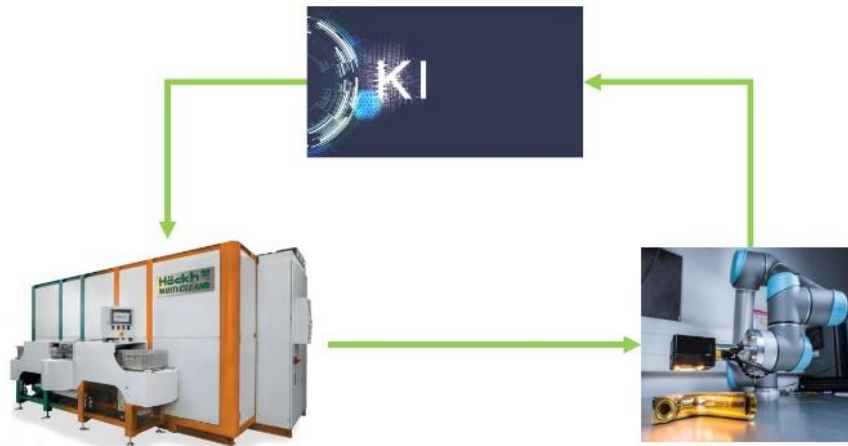


Abb. 1: Zusammenspiel der Systeme

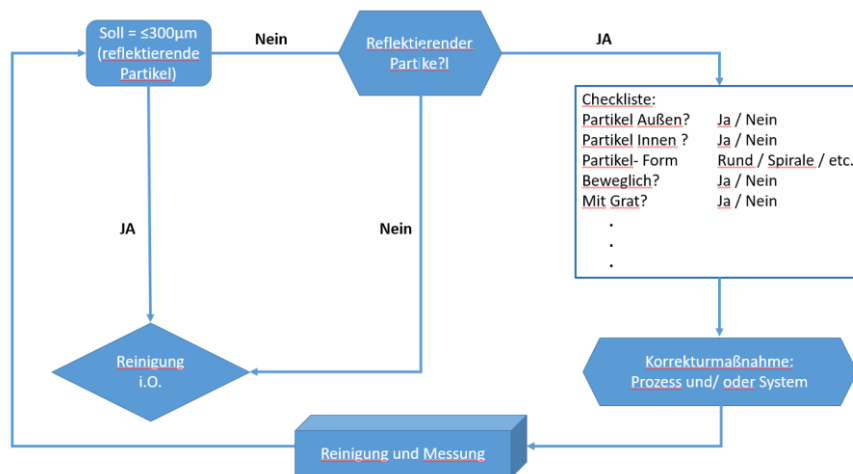


Abb.2: Algorithmus Beispiel

## 1.2 Bezug des Vorhabens zu den förderpolitischen Zielen (insbesondere Förderrichtlinie, Förderprogramm)

Programm „Photonik Forschung Deutschland“.

Mit dem „System zur adaptiven photonischen Oberflächentestung mit lernfähiger Bildauswertung in Kombination mit einem Reinigungssystem“ (Akronym SPOT) wird insbesondere das Handlungsfeld „Multi-/Hyperspektrale Datenaufnahme“ der Bekanntmachung „Computer-Aided Photonics – Ganzheitliche Systemlösungen aus photonischen Verfahren und digitaler Informationsverarbeitung“ angesprochen. Die Kombination aus photonischem Verfahren und Mustererkennung dient der Prozessüberwachung und Qualitätskontrolle in der Produktion.

Im Rahmen des Verbund- Projekts wurde ein flexibles System zur Oberflächenprüfung entwickelt, das photonische Technologien mit einer intelligenten Bildverarbeitung kombiniert. Dies führte zu einer umfassenden Lösung für optische Systeme, die Lichtquelle, Optik, Sensoren und datenverarbeitende Algorithmen effizient miteinander verbindet.

SySPOT nutzte fortschrittliche KI-Technologien und maschinelles Lernen, um die Bildverarbeitung zu verbessern und die automatische Erkennung sowie Klassifizierung von Partikeln zu optimieren. Ziel war es, innovative bildgebende Verfahren und Algorithmen zu schaffen, die in Bereichen wie der industriellen Oberflächenreinigung und Prozessüberwachung eingesetzt werden.

Im Laufe des Projektes wurden Systeme für die Echtzeit-Bildverarbeitung und Oberflächenanalyse entwickelt, die eine schnelle Datenerfassung und -verarbeitung ermöglichen. Zudem kamen multispektrale Aufnahmeverfahren und selbstlernende Algorithmen zum Einsatz, um die Genauigkeit und Effizienz der Oberflächeninspektion weiter zu verbessern.

Die wichtigsten technologischen Entwicklungen des Projekts wurden durch das Fraunhofer IPM patentiert.

Hierbei arbeiteten mehrere Unternehmen, sowie Forschungseinrichtungen zusammen, um das gesamte Spektrum von der Forschung, bis hin zur Anwendung abdecken zu können. Dies erfüllt die Vorgabe, dass die Resultate der geförderten Projekte praxisnah und wirtschaftlich verwertbar sein sollen.

## **1.3 Wissenschaftliche oder technische Arbeitsziele des Vorhabens**

### **1.3.1 Ausgangssituation**

Die industrielle Bauteilereinigung wird in der Industrie als Nadelöhr bezeichnet. Fast alle produzierten Bauteile müssen gereinigt werden, um diese entweder weiter zu verarbeiten oder zu verkaufen.

Um Sauberkeitsziele erreichen zu können müssen diese bewertet werden. Bestehenden Systeme zur photonischen Oberflächentests und Reinigung waren bislang sehr stark abhängig von manuellen Prozessen und der Erfahrung der Mitarbeiter. Dies machte diese Analyseverfahren unsicher, ineffizient und führte zu erhöhten Kosten.

Oft wurde die optische Bewertung auch nur manuell durchgeführt, was für sehr starke Schwankungen sorgte und zu nicht reproduzierbaren Ergebnissen führte. Oftmals wurden die zu bewertende Ware auch nur Stichprobenartig untersucht, was eine erhöhte Dunkelziffer an nicht bemerkten Fehlern (z.B. Sauberkeit; Defekte) zur Folge hatte. Dieses manuelle Vorgehen ließ viel Platz für Mängel und kostete sehr viel Zeit.

Aktuelle Technologien zur Bildgebung verwenden ein Auflicht. Dies ermöglicht es zwar Partikel zu erkennen, schaffte es aber nur die Partikel in die Klassen metallisch, nicht-metallisch und Fasern zu unterteilen, indem in einer zweiten Aufnahme mittels Polarität die Reflektionen der Partikel gefiltert wurden.

Da das Sichtfeld der Sensorik sehr stark eingeschränkt war, gingen hierbei sehr viele Informationen verloren und konnten bislang nicht berücksichtigt werden. Ebenfalls war die Auswertung der Reinigungsergebnisse ein langwieriges Unterfangen. Es fehlten integrierte Systeme, die sowohl die Erkennung von Verschmutzungen als auch die Optimierung der Reinigungsprozesse in Echtzeit ermöglichen.

Die Reinigungsprozesse, die für die Saubere Ware benötigt wurden, waren oft nicht optimiert und standardisiert, was die Prozesse in sich nicht sehr flexibel machte.

Dazu kommt die Komplexität der Reinigungsprozesse im Zusammenspiel mit den Prozessparametern, die sehr häufig von den Anlagenbedienern nicht nachvollzogen werden konnten.

Diese Standardisierung der Reinigungsprozesse machte diese ineffizient, auch in Bezug auf die eingesetzten Ressourcen.

Das Anpassen der Reinigungsparameter an die Anforderungen der technischen Sauberkeit (TecSa) war nur durch viel Erfahrung möglich oder benötigte übermäßigen Einsatz der eingesetzten Ressourcen wie z.B. Energie, Wasser, Reinigungsmitteln oder Zeit. Der hohe Einsatz dieser Ressourcen hatte ökologische und wirtschaftliche Nachteile.

Da die Situation vor Beginn des SysPOT- Projekts stark abhängig von sehr vielen manuellen Arbeitsschritten war, gab es einen klaren Bedarf an einer Lösung für diesen Bereich. Auch im Bezug auf ineffiziente Reinigungsprozesse. Die Notwendigkeit an neuer Sensorik und Hilfe durch künstliche Intelligenz in der Datenverarbeitung, sowie Auswertung der Reinigungsprozesse an sich war klar gegeben und genau darauf zielte das Forschungsprojekt SysPOT ab.

Es sollte ein Weg zur effizienten und ressourcenschonenden industriellen Teilereinigung gefunden werden, um eine moderne und prozesssichere Reinigung zu gewähren.

### **1.3.2 Zusammengefasster Ablauf des Vorhabens**

Die Projektlaufzeit von SysPOT hatte eine Laufzeit von 3 Jahren. Das Projekt startete am 01.04.2021 und endete am 31.03.2024.

In den drei Projektjahren wurden die geplanten Arbeitspakete (AP) nacheinander bearbeitet. Die uns gesetzten Ziele wurden weitgehend erreicht.

Zu Beginn und auch im Laufe des Projektes zeigte sich der Einfluss der COVID-Pandemie. Besonders die Beschaffung von Sensorik / Elektronik und die deutlich gestiegenen Preise sorgten für Verzögerungen.

Projektjahr 1: 04/2021 bis 04/2022

hier lag der Fokus auf der Erstellung des Lastenhefts und der Spezifikation der Schnittstellen für die digitale Kommunikation der künstlichen Intelligenz (KI) mit unseren Anlagensystemen.

Projektjahr 2 (01/2022-12/2022)

hier wurde die KI, zur Anlagenoptimierung, mit den Daten aus unserer Test-Reinigungsanlage weiterentwickelt (Reinforcement Learning (RL)).

Die Schnittstelle zwischen dem Agenten und der Test-Reinigungsanlage wurde erfolgreich realisiert.

Defekte und Partikel wurden, gemeinsam mit den Verbundpartnern, definiert, optisch bewertet und den jeweiligen Defekt- und Partikelklassen Klassen zugeordnet.

Projektjahr 3 (01/2023-12/2023)

Im letzten Jahr des Projektes wurden weitere Daten für die KI gesammelt. Unter Anderem wurden gezielte Reinigungsversuche gefahren, bei denen Bauteile definiert verunreinigt wurden. Dank Kundenversuche im Alltagsbetrieb, konnten auch Tests mit Anwenderbauteilen in der realen Praxis durchgeführt werden. Die Ergebnisse wurden durch Firma Gläser bewertet.

Zu Projektende konnten die vor Beginn des Projektes gesteckten Ziele weitestgehend erreicht und umgesetzt werden. Auch nach dem Projekt werden weiter Daten gesammelt, um das System noch weiterzuentwickeln.

Durch eigene Vorträge und Publikationen in Fachzeitschriften konnte ein Wissenstransfer in die Industrie erfolgreich realisiert werden.

## **2. Technische Umsetzung**

Nachfolgend eine detaillierte Auflistung der Arbeitspakete und Teilarbeitspakete an denen wir mitgewirkt haben.

### **AP 1: Entwicklung des optischen Sensors**

#### **TAP 1.1: Anforderungsspezifikation und Lasterhefterstellung**

Das Lastenheft wurde gemeinsam mit allen Verbundpartnern erstellt und es wurden die Anforderungen definiert.

Die Anforderungen wurden im Lastenheft wie folgt aufgegliedert:

- Der Sensor (inkl. Bewegung)
  - Die optischen Anforderungen wurden genau betrachtet und nieder definiert.
  - Welche Testobjekte können verwendet werden? Hier wurde z.B. auf Geometrie und Material geachtet.
  - Filtermembranen zur Auswertung mussten definiert werden, da es unter den Filtermembranen verschiedene Arten / Typen gibt.
- Software
  - Software für diverse Sensoren und den Roboter
  - Anlagenanbindung/ Integration
  - welche Form von KI wird eingesetzt
- Schnittstellen zur Kommunikation geeinigt
  - Hier hatte man sich schnell auf OPC/UA geeinigt
- Formate der Daten
  - wie sollen die Dateiformate-definiert werden, welche zur Kommunikation geeignet sind?
- Partikel:
  - besonders metallische Partikel müssen zuverlässig erkannt werden. Kunststoffe und Fasern sollen aber ebenfalls detektiert werden. Es wurden auch Werte definiert, welche die heutigen Methoden übertreffen sollten, wie z.B. sollen Partikel/ Defekte prozesssicher erkannt werden, die welche  $<5\mu\text{m}$  sind, mit einer Auflösung die höher als  $5\mu\text{m/ Pixel}$  ist(gemäß VDA19.1)

- Defekte:
  - Insbesondere Augenmerk auf Verformung (Dellen), Kratzer und Abplatzungen
- Filmische Verunreinigungen
  - es soll möglich sein Öl und Fette erkennen zu können.

Die Firma Höckh konnte sich hier besonders im Bereich Verunreinigungen, Anbindung und verfahrenstechnisch in die Definition und Gestaltung des Lastenheftes einbringen.

## **AP 2: KI-basierte Steuerung**

### **TAP 2.3 und 2.4: Klassifikation der Oberflächen nach Defekt- / Verschleißzustand**

Aufgrund des Ausstieges der Firma LPW aus dem Projekt haben wir diesen Teil hauptsächlich in Zusammenarbeit mit den Firmen IPS TU-Dortmund und Gläser GmbH durchgeführt.

In den Teilarbeitspaketen der obengenannten Partner wurden Messungen mit dem Sensor auf Filtermembranen durchgeführt.

Diese Filteraufnahmen wurden anschließend gemeinsam in der OpenSource Labeling-Plattform Label Studio bearbeitet. Jeder der an diesem Arbeitspaket teilnehmender Partner hatte Zugriff auf dieses Programm und konnte einzelne Bilder der Filtermembranen bearbeiten.

Beim Öffnen des Label Studios wurden einzelne Bilder zum Bearbeiten vorgeschlagen, die bislang noch unbearbeitet waren. Dies hatte den Vorteil, dass kein Bild unbeabsichtigt ein zweites Mal bearbeitet wurde.

Bei den zu bearbeitenden Bildern handelte es sich um kleine Teilaufnahmen der Gesamtmembran. Auf diesen Teilbildern konnten Partikel und Fasern erkannt werden. Diese Partikel wurden manuell betrachtet und bewertet.

Hierbei wurde der Partikel manuell mittels PC-Cursor erst einmal markiert, indem die Kontur angegeben wurde. Danach wurde der Partikel in eine der Partikelklassen gestellt (Faser, Metallisch, nicht metallisch, Kratzer, Delle, Abplatzung).

Dieser Prozess wurde für hunderte Bilder gemeinsam durchgeführt, um Daten zu sammeln. Jeder der Partner hat längere Erfahrung im Bereich der bildgebenden Analyse von Partikeln, sodass die Daten sehr aussagekräftig waren.

Mit Hilfe dieser gewonnenen Daten der manuellen Auswertung wurde die KI trainiert.

Die KI lernte so, wie Partikel bewertet werden können und welche Unterschiede es in der gleichen Art der Partikelklasse geben kann.

Die Firma Höckh unterstütze mit Ihrer mehr als 50 Jahren Erfahrung in der Bauteilereinigung diesen Arbeitskreis in der manuellen Bewertung der Partikel im Label Studio.

Nachfolgend ein Auszug dieser Bewertung auf dem Online-Portal:

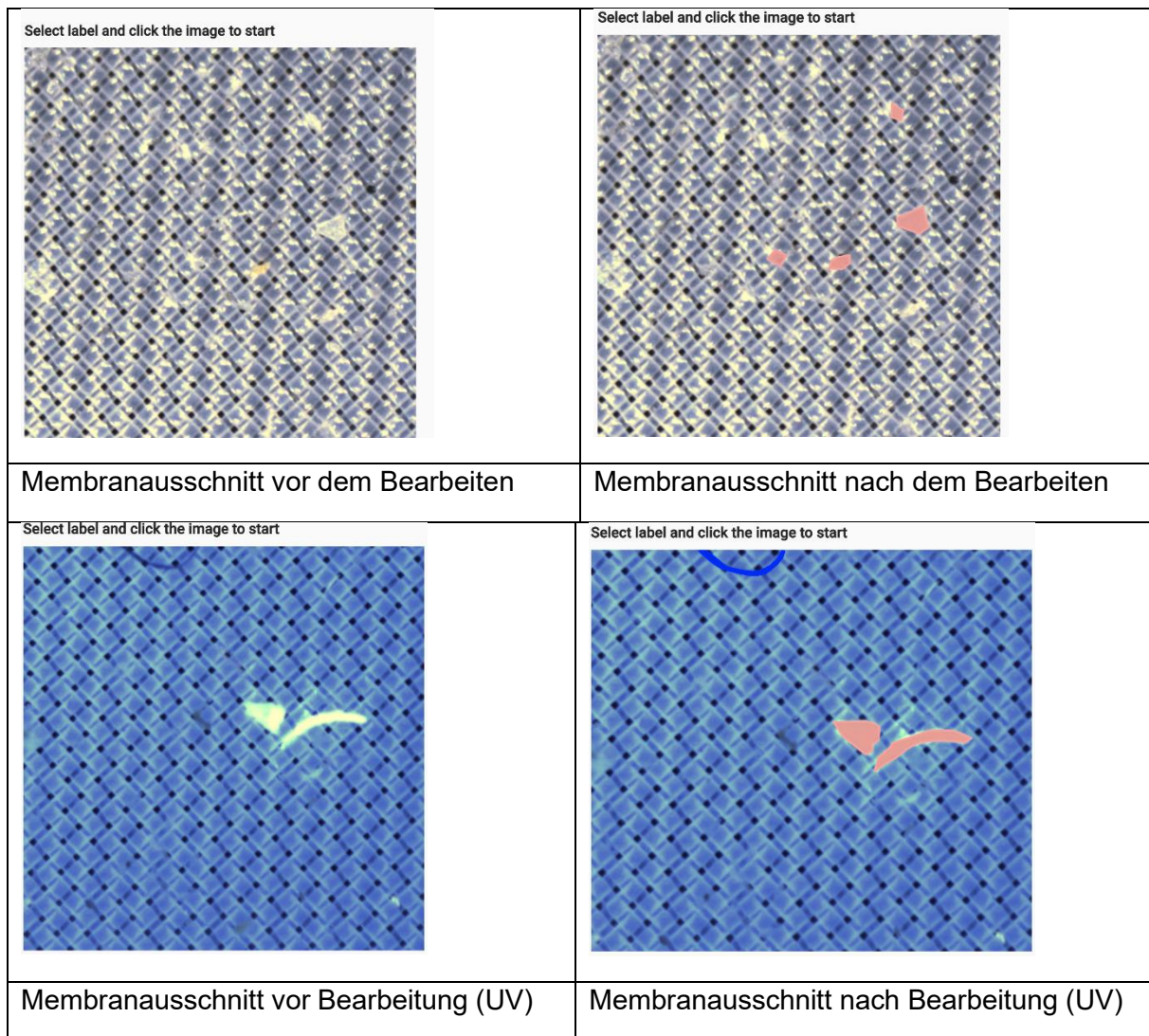


Abb. 3 Membrane

### AP 3: Bedarfsorientierte Reinigung

#### TAP 3.1: Automatisierte Adaption der Reinigungsparameter basierend auf dem Regelkreis der Messung und Zustand der Reinigungsanlage

In Arbeitspaket 3 soll ein System zur automatisierten Adaption der Reinigungsparameter basierend auf dem Zustand der Reinigungsanlage entwickelt werden. Diese Arbeit wurde zusammen mit IPS und IconPro durchgeführt.

Hierbei wurden die Daten von IPS und IconPro gesammelt und bewertet.

Die Firma Höckh kümmerte sich um die Verfahrenstechnik, die Parametrierung und die Erstellung der Reinigungsprozesse.

Im ersten Schritt mussten die notwendigen Parameter für die Klassifikation des Zustands des Reinigungssystems erhoben und gelabelt werden. Außerdem mussten die Auswirkungen des Zustands der Reinigung auf das Ergebnis bewertbar gemacht werden. Diese Informationen konnten dann für eine Rückführung in den Reinigungsprozess genutzt werden.

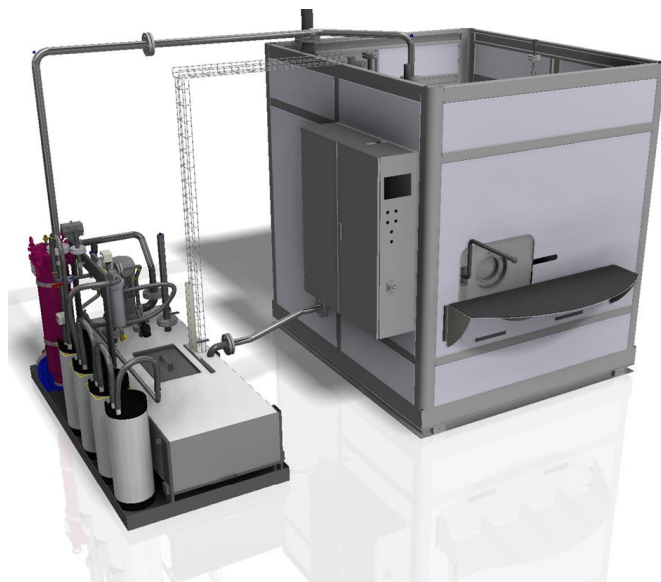
Um diesen Vorgang teilautomatisiert vornehmen zu können mussten die Prozessparameter der Reinigungsanlagen automatisiert ausgelesen und gespeichert werden. Hierzu wurde die Anlage mittels Hardware und Softwaretools mit der Industrieschnittstelle OPC/UA ausgerüstet, um die Kommunikation gewährleisten zu können.

Durch einen zu entwickelnden Klassifikationsalgorithmus werden nun die Zustandsdaten der Reinigungsanlage und eine konstante Reinigungswirkung ermittelt. Im ersten Schritt werden dazu statistische Verfahren des maschinellen Lernens verwendet und bewertet. Hierbei wurde ebenfalls auf bereits vorhandene Erfahrung zurückgegriffen, um schneller Daten generieren zu können.

Die Bewertung des Modells erfolgt über die Kontrolle der gleichbleibenden Reinigungsleistung bei variierenden Prozessparametern der Reinigungsanlage, welche durch intensive Versuchsreihen ermittelt werden mussten.

Um die Daten für die Umsetzung an der Anlage brauchbar machen zu können, wurde eine IF-Abfragefolge erstellt.

Die Kommunikation zwischen KI-Box, Messsystem und Reinigungsanlage wird durch Industrie-Standard OPC/UA realisiert.



2 Tanks integriert + 1 Beistelltank

Vollausstattung mit allen möglichen Reinigungsmechaniken

Trocknung mit Heißluft und / oder Vakuum

Warenträger (L x H x B mm)  
670 x 480 x 300mm

Verwendung von  
Reinigungschemie von pH5 bis  
pH13

Tank 3 mit integrierter  
Badaufbereitung (VE-Wasser)

*Abb. 4: Reinigungsanlage*

### **TAP 3.2: Automatisierte Optimierung des Reinigungsprogramms durch verstärkendes Lernen**

Wie im TAP 3.1 wurde auch in diesem TAP sehr eng mit IPS und IconPro gearbeitet. Hierbei ging es stark um die Kommunikation des KI-Moduls mit der Reinigungsanlage mit späterer, weiterer Kommunikation mit dem Sensor.

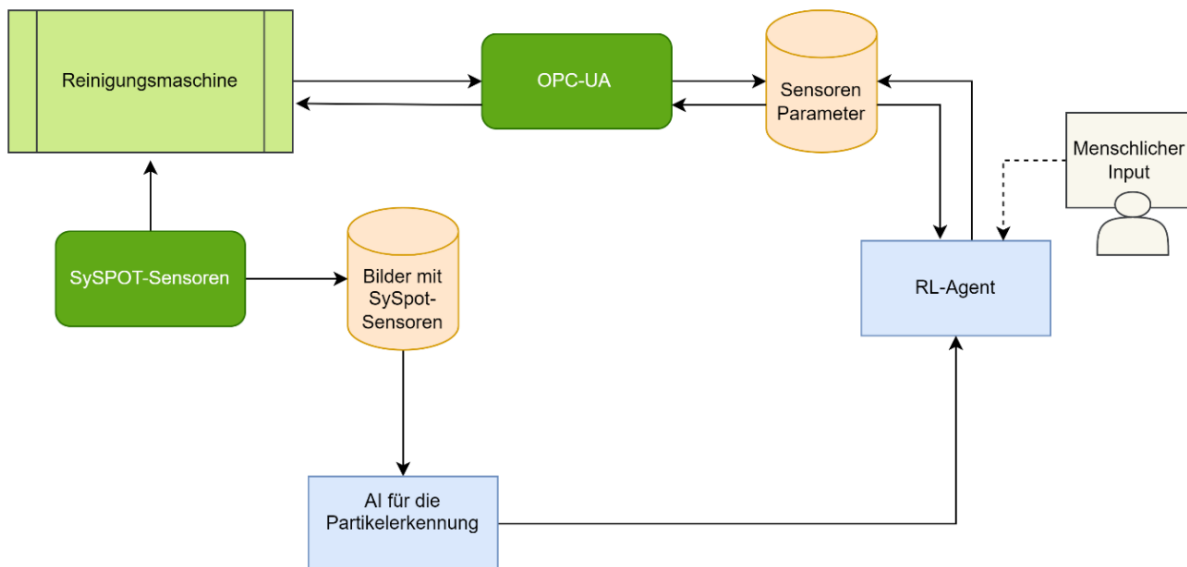


Abb. 5: Kommunikation im Gesamtsystem (Grafik: IPS)

Um das Projekt umsetzen zu können wurde sich zu Beginn überlegt, welcher Anlagentyp für das SysPOT-Projekt in Fragen kommen könnte. Um viele Parameter und Prozessschritte abdecken zu können wurde sich für das wässrige Einkammersystem Typ Höckh Multiclean A-Standard entschieden. Ein Einkammersystem bietet den Vorteil, dass diese kompakte Anlage nahezu alle gängigen Reinigungsprozesse abbilden kann. Hierzu zählen:

- **Warenbewegung:**  
Die in einem Warenträger platzierte Ware kann in jedem beliebigen Winkel geschwenkt oder rotiert werden. Ebenfalls können hier die Drehgeschwindigkeiten angepasst werden.
- **Spritzreinigung:**  
Die Bauteile werden mittels Sprühdüsen abgespritzt
- **Tauchreinigung:**  
Die Arbeitskammer wird zu einem beliebigen Füllstand gefüllt, sodass die Ware von Flüssigkeit umgeben ist
- **Druckfluten:**  
Hierbei wird die Flüssigkeit um die getauchte Ware gespült. Dies wird mittels Umwälzung über Partikelfilter durchgeführt. Hierbei entstehen starke Turbulenzen in der Flüssigkeit und somit um die zu reinigende Ware
- **Ultraschall:**  
Hierbei werden Stabschwinger im Tauchverfahren (auch beim Druckfluten möglich) eingesetzt. Diese Schwinger erzeugen Kavitationen in der Flüssigkeit, sodass der Partikel an der Waren-Oberfläche leichter gelöst und entfernt werden können
- **Trocknung:**  
Hier wird klassisch in Heißlufttrocknung und Vakuumtrocknung unterschieden. Bei einer Heißlufttrocknung wird mittels Seitenkanalverdichter und einem technisch hochwertigem Heizelement Luft erhitzt und um das Bauteil geströmt. Durch die warme Luft verdampft die am Bauteil anhaftende Flüssigkeit. Bei der Vakuumtrocknung wird der Druck in der Arbeitskammer reduziert. Durch die Reduktion des Druckes, wird eine Siedepunktverschiebung erreicht, welche die

Flüssigkeit zum Sieden bringen kann. Durch die Absenkung entlang der bekannten physikalischen Dampfdruckkurve der Flüssigkeit bei niedrigeren Temperaturen verdampft die Flüssigkeit und somit trocknet das Bauteil entsprechend effizienter ohne zusätzlichen Energie-Einsatz.

Damit die KI die Zusammenhänge einer Reinigungsanlage im Bezug auf eingesetzte Ressourcen und wählbare Parameter besser verstehen konnte, wurde der allgemein anerkannte Sinnersche Kreis zur Hilfe genommen. Dafür wird auf ein Teilgebiet des maschinellen Lernens, das sogenannte „bestärkende Lernen“ zurückgegriffen. Per Definition nutzt diese Art des Lernens historische Daten, um ein in sich dynamisches System zu beeinflussen. Eine Definition, die auch auf das betrachtete Gebiet der Regelungstechnik zutrifft. Der Ansatz das überwachte Lernen mit bestärkendem Lernen zu kombinieren, wurde bereits erfolgreich bei der Entwicklung des besten Go-Computersystems (Alpha-Go) verwendet, ist allerdings noch in vielen Kontexten unerforscht.

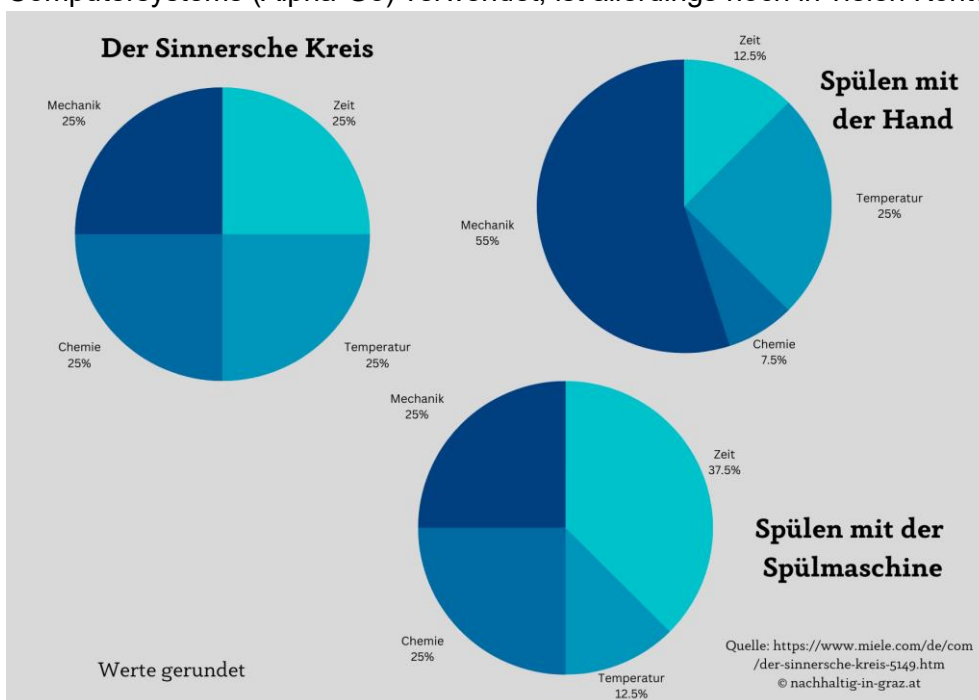


Abb. 6: Sinnerscher Kreis

Der Sinnersche Kreis beschreibt das Zusammenspiel der vier Grundfaktoren der Reinigung: Zeit, Temperatur, Mechanik und Chemie. Das Zusammenspiel dieser Faktoren ist die wichtigste Grundlage für die Reinigung.

Die wichtigste Aussage des Sinnerschen Kreises ist (Zitat Wikipedia):

*„Alle vier Faktoren sind voneinander abhängig, aber untereinander in ihrer Größe veränderbar. Sie machen den Erfolg eines Reinigungs- oder auch Desinfektionsvorganges aus, müssen im exakten Verhältnis zueinanderstehen und ergeben stets dieselbe Gesamtsumme.“*

Alle Reinigungsaufgaben werden mit Hilfe dieses Schemas bewertet. Somit wurde dies auch für die KI als Grundlage genommen.

Um der KI die Programmauswahl zu erleichtern, wurden von uns auch 4 Basisprogramme erstellt, welche die KI selbstständig auswählt, um die Basisprogrammierung eines Programmes starten zu können. Die Basisprogramme wurden wie folgt untergliedert:

- Basisprogramm 1:
  - für einfache Reinigungsaufgaben ohne Reinigungsanforderungen
  - System versucht sich auf die Einsparung von Ressourcen zu fokussieren
  
- Basisprogramm 2:
  - Für Reinigungsaufgaben mit geringen Reinigungsanforderungen
  - Für Partikel bis ca.  $<400\mu\text{m}$
  - fokussiert sich ebenfalls auf Ressourcenschonung
  
- Basisprogramm 3:
  - Für anspruchsvollere Reinigungsaufgaben
  - Für Partikel  $<200\mu\text{m}$
  - Ressourcen sollen auch hier geschont werden
  
- Basisprogramm 4:
  - Für „High-Purity“ Anwendungen
  - sehr hohe Sauberkeitsanforderungen
  - Ressourcen sollen auch hier eingespart werden

Da es im laufenden Betrieb nicht oft möglich war die Anlage mit diesen Basisprogrammen laufen zu lassen um Daten zu sammeln, wurde jeder Kundenversuch an der für das Projekt gewählte Reinigungssystem anonymisiert mitgeschrieben.

Hierbei konnte neben der eigenen Bewertung der Reinigungsergebnisse auch die Expertise des Kunden mit in die Bewertung der Sauberkeit einbezogen werden.

Um die Bewertung für die KI greifbar machen zu können, wurde ein Schulnoten-System eingesetzt.

Hier dienten die Schulnote 1 bis 6 zur manuellen Bewertung des Reinigungsergebnisses.

Nachdem ein Reinigungsversuch abgeschlossen war, wurde die Sauberkeit durch uns und den Kunden bewertet, wobei die Bewertung des Kunde immer ausschlaggebend war.

Je nach Ergebnis wurden dann Schulnoten für das Reinigungsergebnis verteilt.

Ein Einfaches „gut“ oder „schlecht“ zur Bewertung anzugeben konnte der KI nicht zeigen, wie weit das Ergebnis vom geforderten Ziel entfernt ist.

Sobald die gewünschte Reinigungsaufgabe erfüllt wird, soll das System die Reinigungsparameter weiter anpassen. Hierbei soll der Hauptfokus auf Ressourcenschonung liegen.

Dies bedeutet, dass Mechanik, Zeit, Temperatur und Chemie so weit reduziert werden sollen, bis das Reinigungsergebnis nicht mehr erreicht wird. So kann das System erkennen, mit welchem minimalen Einsatz an Energie (Mechanik und Temperatur), Wasser und Reinigungschemie gearbeitet werden kann, um weiterhin ein perfektes Reinigungsergebnis zu erzielen.

Die manuelle Bewertung der Reinigungsergebnisse wurden auf unterschiedlichste Weise festgestellt:

- Optisch und / oder haptisch
  - nur durch Betrachten der Bauteiloberfläche
  - sehr einfache, nicht reproduzierbare Bewertung
  - bei einfachen Anwendungen gängig
- Bewertung der Oberflächenspannung
  - Mittels Kontaktwinkel-Messgerät oder Testtinten
  - es wird die Restenergie der Oberfläche gemessen, die zeigt, wie gute eine Oberfläche benetzbar ist (z.B. zum Beschichten)
  - misst filmische Verunreinigungen
- Bewertung durch Fluoreszenz:
  - mit Hilfe von Handmessgeräten (z.B. Sita CleanoSpector) filmische Verunreinigung über Restfluoreszenz gemessen werden (RFU-Wert)
- Bewertung der partikulären Verunreinigung:
  - Extraktion der Partikel vom Bauteil in einem Kabinett
  - automatische Auswertung der Filtermembrane nach VDA 19.1 / ISO16232
  - aktueller Bewertungsprozess der durch SysPOT verbessert wird

Um die manuelle Bewertung der Bauteilsauberkeit genauer erfassen zu können, wurden Kosten umgeschichtet, damit wir uns ein Messgerät zur Bewertung von filmischen Verunreinigungen beschaffen konnten.

Für die Bewertung wurde ein CleanoSpector der Firma SITA angeschafft.

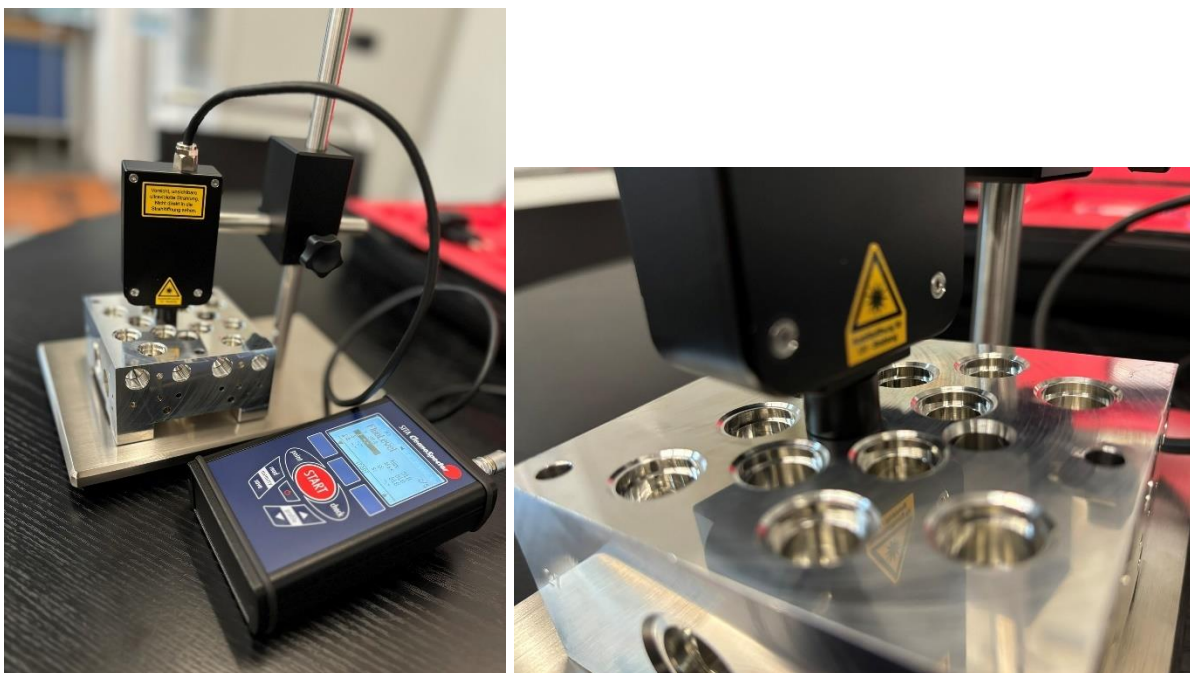


Abb. 7 & 8: SITA Gesamtbild / SITA Sensor auf Bauteil

Damit die KI die Ergebnisse bewerten kann, wurden neue Sensoren in die Multiclean A-Standard eingebaut, auf die im nachfolgenden TAP 3.3 „Anpassung der Anlage“ näher eingegangen wird.

Die im Standard verbauten Sensoren, sowie die neu installierte Sensorik erkennen und dokumentieren den Ist- Zustand der Anlage. Somit kann nach jeder Bewertung des Reinigungsergebnisses Rückschlüsse zur aktuellen Qualität der Reinigungsanlage gezogen werden. Jede Veränderung im Prozess wird dokumentiert und ausgewertet.

Um nach einem Erfolg oder Misserfolg die Parameter neu einzustellen wird nur ein einzelner Parameter nach dem Sinnerschen Kreis verändert.

Verändern sich gleich mehrere Parameter, die zum gewünschten Erfolg führen, kann kein Rückschluss darauf gezogen werden, welcher geänderte Parameter den Erfolg bewirkt hat.

Durch diese ständigen Änderungen am Reinigungsprogramm und den einzelnen Parametern lernt die KI, welche Parameter welchen Einfluss haben kann, was die KI immer intelligenter, schneller und erfolgreicher macht.



Abb. 9: Aufbau der Kommunikation zum Sammeln der Daten bei Höckh

Ein Raspberry Pi wurde als Edge-Device für die Datenintegration eingerichtet, welches die Daten vom OPC-UA-Server der Anlage über ein Protokoll ausliest und auch Steuerbefehle über denselben Kommunikationsweg empfangen kann.

Die zu lesenden und zu schreibenden Variablen lassen sich über eine benutzerfreundliche grafische Oberfläche an der Anlage konfigurieren und bei Bedarf durch zusätzliche Sensoren erweitern. Dank der flexiblen Programmierung des Moduls kann das System problemlos an verschiedene Anforderungen und zukünftige Erweiterungen angepasst werden.

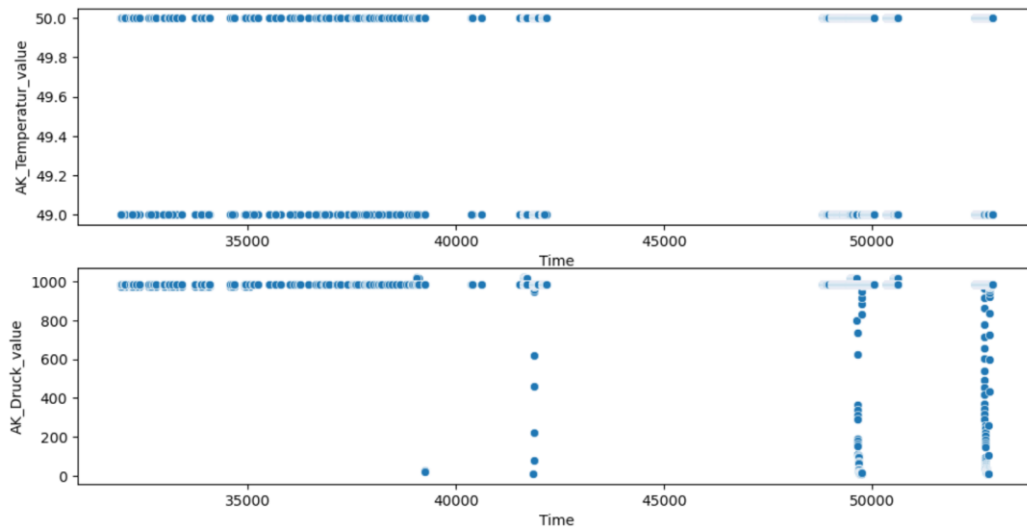


Abb. 10: Temperaturverlauf (o.) und Druckverlauf (u.) der Arbeitskammer

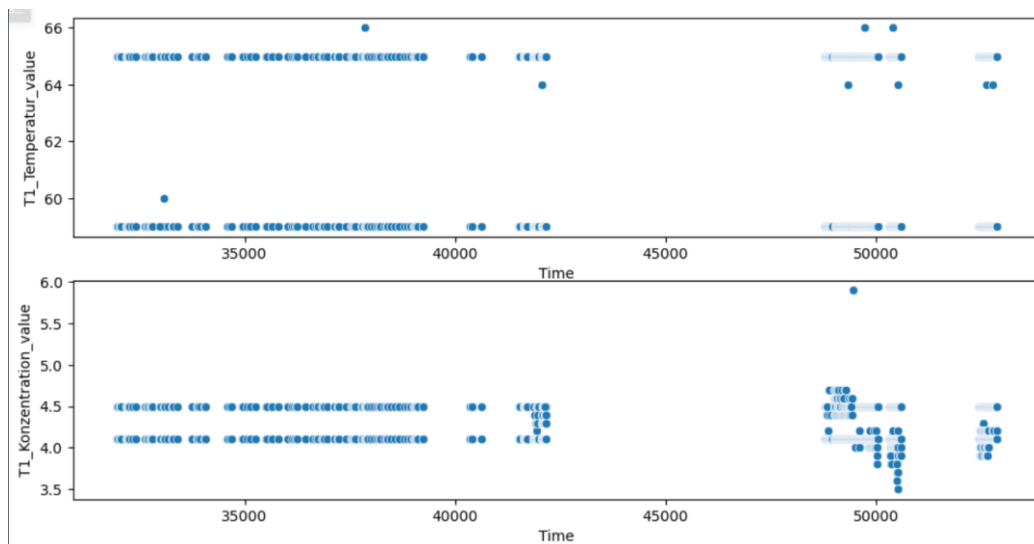


Abb. 11: Temperaturverlauf (o.) und Konzentration (u.) von Tank 1

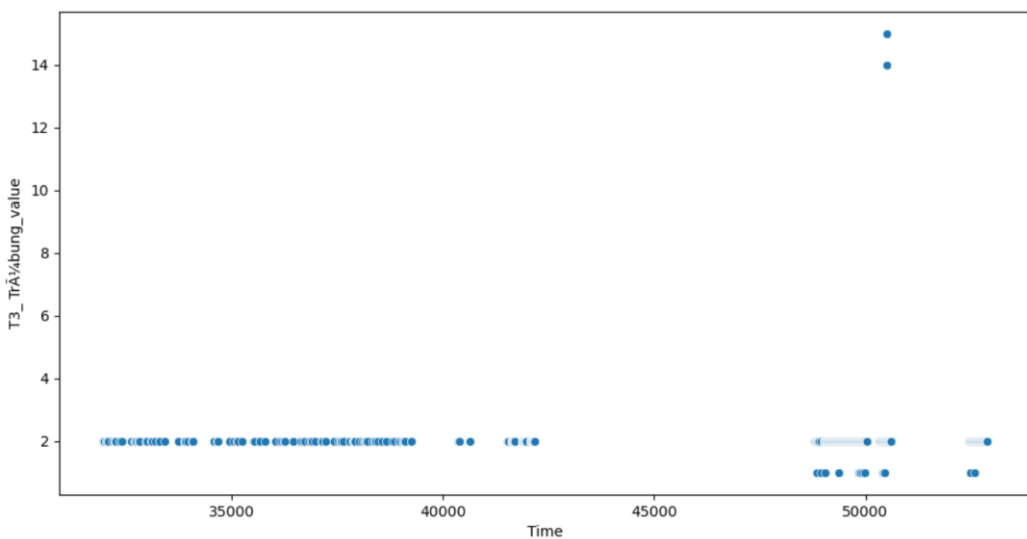


Abb. 12: Messung der Trübung in Tank 3

Anhand der Abbildung 12 „Messung der Trübung in Tank 3“ kann man deutlich erkennen, wann das finale Spülen im dritten Reinigungstank aktiv war. Nachdem der Spülvorgang mit VE-Wasser abgeschlossen ist und die Flüssigkeit zurück in den Vorratstank gepumpt wurde, kann man einen deutlichen Ausschlag erkennen, der zeigt, dass es über die Ware oder die Arbeitskammer, zu Verschleppung von Medium von Kreislauf 2 in Kreislauf 3 gekommen ist. Das System hat dies erkannt und entgegengesteuert. In relativ kurzer Zeit kann gesehen werden, dass der Trübungswert wieder auf Normalwert gefallen ist, da die Aufbereitungseinheit der VE- Anlage zur Hilfe genommen wurde.

Nach einigen Versuchen ist aufgefallen, dass bei unseren Analysen der partikulären Verunreinigung auf den Bauteilen vermehrt Fasern und Organische Verunreinigungen einen Einfluss auf das Analyseergebnis haben. Die Firma Höckh verwendet für die Analyse nach VDA 19.1 / ISO 16232 folgendes System:

- Extraktionseinheit CTU 1000 der Firma Hydac
- Ø40mm Membranen Fa. Sefar 1µm bis 20µm Nylon oder Cellulosenitrat (geschäumt)
- Feinwaage der Fa. Sartorius
- Trocknungsofen Fa. Hörmann
- Exsikkator der Fa. Carl Roth (Eigenmarke)
- Automatisches Mikroskop der Fa. Olympus
- Kamera Olympus UCD
- Auswerteprogramm der Firma Olympus



Abb. 13 Auswertung nach VDA 19.1 / ISO 16232

Da sich das Technikum nicht in einem Reinraum befindet, können ungewünschte Partikel durch die Umgebung (Luft / Mitarbeiter an der Anlage/ etc.) ungewollt auf das Bauteil gelangen, welches analysiert werden soll.

Um den Umwelteinfluss deutlich zu verringern, wurden durch die Firma Höckh nochmals Fördermittel umgelegt. Diese Fördermittelverschiebung / Umwidmung wurde ebenfalls durch den VDI genehmigt. Die Idee war es eine mobile Sauberraum-Kabine zu konstruieren, mit der die Umgebungsluft verbessert werden kann.

Hierzu wurde ein mobiles Gestell entwickelt, welches mit Makrolon-Scheiben geschlossen wird. Der Eingang in die Kabine wird mittels Lamellen-Vorhängen geschlossen.

Im vorderen Bereich wird das Gestell direkt an die Reinigungsanlage „angedockt“.

Ziel ist es so wenig Spalte wie möglich zu haben.

Auf das Dach wurde ein Laminar-Flow-System der Firma Spetec montiert, welches die Raumluft in der Kabine mittels Hepa Filter der Klasse H13 (Filtereinsatz auswechselbar von Klasse H10 bis Klasse H14) filtert.

Durch den Dachaufbau entsteht ein laminarer Luftfluss von oben nach unten und erzeugt einen leichten Überdruck in der Kabine, sodass kein Partikel mehr von Außen in diese Kabine gelangen kann.



Abb. 14: Sauberraum-Kabine

Durch diese Installation konnten die Auswertung der Reinigungsergebnisse drastisch erhöht werden.

### TAP 3.3: Anpassung der Reinigungsanlagen

Zu Beginn des SysPOT-Projektes wurde die Sensorik festgelegt, die noch nachträglich in das bestehende Anlagensystem eingebaut werden muss, um ausreichend Anlagendaten erzeugen zu können. Am Anfang war nicht klar, wie der Einfluss mancher Analysewerte auf die Reinigungsparameter und den Reinigungsprozess haben. Aus diesem Grund wurde alle Sensoren eingebaut die einen Einfluss auf den Sinnerischen Kreis messen konnten.

Einbauort	Schon installiere Sensorik	Neu verbaute Sensorik
Tank 1	- Temperatur (PT100) - Füllstand (LSA- / LS+ / LSA+)	- Konzentrationsmessung (E+H) - Partikelmessung (Pamas) - pH-Wert (E+H) - Leitfähigkeit (E+H)
Tank 2	- Temperatur (PT100) - Füllstand (LSA- / LS+ / LSA+)	- Konzentrationsmessung (E+H) - Partikelmessung (Pamas) - pH-Wert (E+H) - Leitfähigkeit (E+H)
Tank3	- Temperatur (PT100) - Füllstand (LSA- / LS- / LS+)	- Konzentrationsmessung (E+H) - Partikelmessung (Pamas) - pH-Wert (E+H) - Leitfähigkeit (E+H)
Arbeitskammer	-Temperatur (PT100) - Füllstand (LSA- / LS+ / LSA+) - Druck (Ceraphant)	- Konzentrationsmessung (E+H) - Partikelmessung (Pamas) - pH-Wert (E+H) - Leitfähigkeit (E+H) - Trübungsmessung (E+H)
Resoucen	-----	Stromverbrauchsmessung (Siemens)  Durchflussmessung (E+H)

Tabelle 1: Auflistung Sensorik

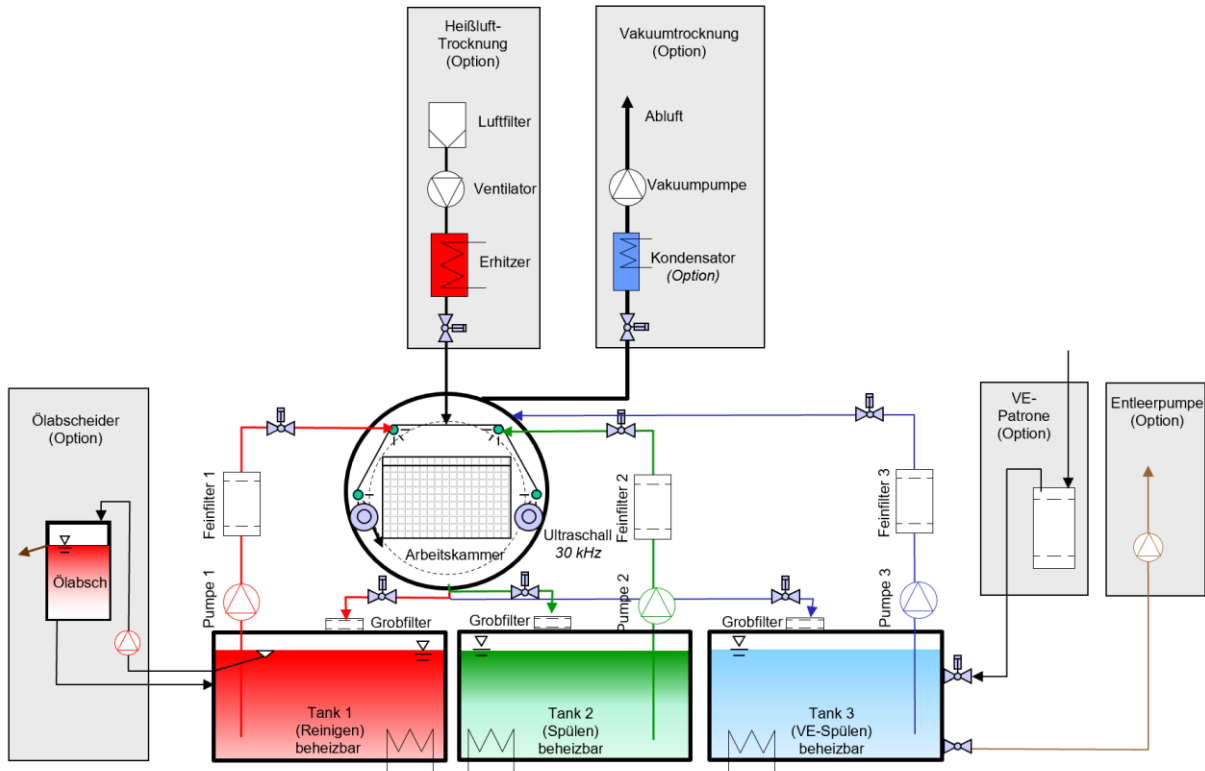


Abb. 15: vereinfachtes Anlagenschema

Mit der eingebauten Sensorik und in Kombination mit dem Sensor ist die KI nun fähig die Parameter des Sinnerschen Kreises zu erweitern, was die Genauigkeit erhöht.

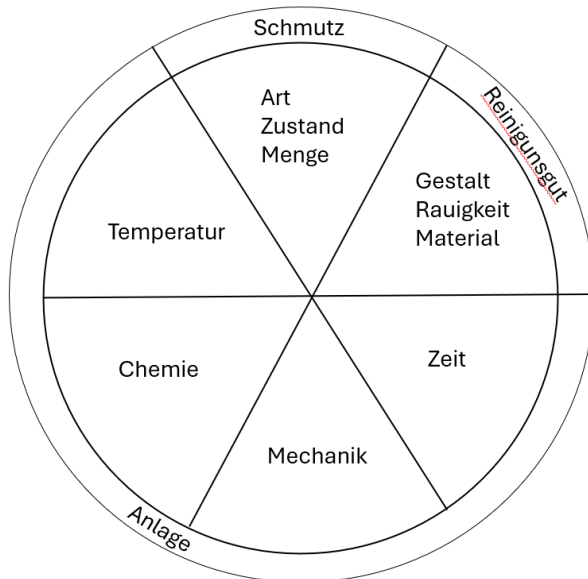


Abb. 16: erweiterter Sinnersche Kreis (Wildbrett 2006)

Die Anfangsfrage, ob sich das Reinigungssystem anhand von erhaltenen Daten und logischen Algorithmen, selbst regulieren und einen Reinigungsprozess im laufenden Betrieb dauerhaft konstant halten kann, um über den gesamten Reinigungsprozess reproduzierbare Ergebnisse zu erlangen, kann mit Ja beantwortet werden.

SysPOT macht dies möglich. Es werden allerdings noch weitere Daten benötigt, um das Ziel der komplett eigenständigen Reinigungsanlage zu erreichen.

## **AP 4 Test des SPOT-Sensors an Reinigungsanlagen zur Messung des Reinigungserfolgs**

### **TAP 4.1: Test des SPOT- Funktionsmusters bei Anwendern**

Um Reinigungstests durchzuführen, besuchte das IPS und die Firma IconPro erneut das Technologiecenter der Firma Höckh, wo sich die Reinigungsanlage für die SysPOT-Tests befindet. Für realitätsnahe Tests mit Kundenbauteilen wurde ein Kunststoffbauteil (Blende) des assoziierten Partners Hans Grohe verwendet, da sich dieses unter dem von IPM entwickelten Sensors besonders gut bewerten ließ. Alle Anpassungen an der Anlage wurden durch die Firma Höckh realisiert.

In mehreren Versuchsreihen wird die Fehlererkennung geprüft und validiert. Die Performance des Systems wird der manuellen Sichtprüfung und konventionellen Bildverarbeitungssystemen gegenübergestellt. Schnittstellen und Anbindung der entwickelten Verfahren und Modelle werden entwickelt und verfeinert.

Eine große Anzahl von bereits geprüften Bauteilen wird aufgenommen und die Bilddaten mit dem zuvor entwickelten Werkzeug gelabelt. Diese Bilddaten mit der zugehörigen Klassifizierung werden verwendet, um ein künstliches neuronales Netz zu trainieren, welches die Basis für den zu entwickelnden Erkennungs-Algorithmus bildet.

Neben den schon gesammelten Daten aus Leerversuchen und firmeninternen Kundenversuchen aus unserem Alltagsgeschäft konnten nun, gemeinsam mit unseren Projektpartnern der IconPro und dem IPS gemeinsam Versuche mit der ABS-Kunststoffblende der Firma Hans Grohe fahren.

Nachfolgend der Bericht und Angaben zur Versuchsdurchführung:

Anwesende:	IconPro: Akshay Paranjape IPS: Roman Möhle Höckh: David Bartels
Aufgabenstellung:	Reinigen mit neutralem Reiniger
Geforderte technische Sauberkeit:	Tests, um KI mit Daten zu füllen. Ebenfalls Tests zum Versenden von Partikelstempel an Gläser.
Versuchsanlage (Symbolbild)	
Anlagenbezeichnung und Ausstattung:	Typ: Multiclean-A-Standard Ultraschall: 2x 1,5 kW / 30 kHz Manuelle Beschickung der Körbe
Reinigungsmedium	Tank 1 = SurTec 102 (2,5 %) Tank 2 = Stadtwasser (~100mS/cm) Tank 3 = VE-Wasser (<10mS/cm)
Anlagenparameter:	Temperatur Tank 1 = 65°C Temperatur Tank 2 = 65°C Temperatur Tank 3 = 65°C

Tabelle 2: Versuchsparameter

<b>Abkürzungen / Legende:</b>		
VR = Vorreinigen	SPR = Spritzreinigen	FL = Flutreinigen
DF = Druckfluten	US = Ultraschall	US-VC= US + Vakuumentgasen
DE = Dampfentfettung	HL = Heißlufttrocknung	VC = Vakuumtrocknung
Z-VC = Zwischenvakuum	N-VC = Nachvakuum	IR = Infrarottrocknung
o.E. = ohne Entleeren	Abtr. = Abtropfen	

Tabelle 3: Legende

Das Bauteil wurde mit definierten Partikeln verunreinigt.  
Danach wurde das Bauteil an 3 Punkten mit dem Partikelstempel (erhalten von der Firma Gläser) „abgestempelt“. Dies diente zur Bewertung der Ausgangsverunreinigung.

Das Bauteil wurde nun mit dem Reinigungsprogramm gereinigt.  
Im Anschluss wurde es wieder definiert verunreinigt, um daraufhin im Anschluss das gereinigte Bauteil mit dem Partikelstempel zu stempeln.  
Dies soll Rückschlüsse auf die Reinigung geben.

Das Bauteil wurde für diesen Versuch mit folgendem Programm gereinigt:

<b>Versuch # 0</b>	Bauteilbezeichnung: Hans Grohe- ABS- Testteil (Blende) zur Definition der Grundverunreinigung	
Prozess	Zeit [s]	Ergebnis / Bewertung
Drehen, langsam ~2-3rpm		Reinigung des Bauteils nah der Definition der Partikelbelastung.  Alle weiteren Versuche werden mit dieser definierten Verunreinigung gefahren. Die Sauberkeit wird dann mit dem Partikelstempel bewertet, welche bei Gläser mit dem SySPOT-Sensor analysiert werden.
SPR Tank 1	90	
SPR Tank 2	30	
SPR Tank 3	30	
HL 120°C	90	
VC <150 mbar	90	
Taktzeit gesamt	09:33 min	

Tabelle 4: Versuch #0

Informationen zur definierten Verunreinigung des Bauteils:

Partikel = 2000mm x 2000mm & 72µm - 80µm Partikel

Es wurde eine 1,5 ml Verschlusskappe genommen, um 1,5ml 2000µm Partikel auf der Testfläche zu verteilen.

Danach wurden 20 „Swap-Schübe“ der 72-80µm Partikel auf der Testfläche verteilt.

Dieser Vorgang wird für jeden weiteren Versuch versucht exakt nachzustellen.

Die Partikelstempel wurden im Anschluss an die Firma Gläser gesendet.

Diese werden die Stempel mit dem neuartigen Sensor auswerten.

<b>Versuch # 1</b>	Bauteilbezeichnung: Hans Grohe- ABS- Testteil (Blende)	
Prozess	Zeit [s]	Ergebnis / Bewertung
Drehen, langsam ~2-3rpm		Das Bauteil sieht optisch gut aus
SPR Tank 1	90	
SPR Tank 2	30	
SPR Tank 3	30	
HL 120°C	90	
VC <150 mbar	90	
Taktzeit gesamt	09:35 min	

Tabelle 5: Versuch #1

<b>Versuch # 2</b>	Bauteilbezeichnung: Hans Grohe- ABS- Testteil (Blende)	
Prozess	Zeit [s]	Ergebnis / Bewertung
Drehen, langsam ~2-3rpm		Das Bauteil sieht optisch gut aus
SPR Tank 1	30	
SPR Tank 2	10	
SPR Tank 3	10	
HL 120°C	90	
VC <150 mbar	90	
Taktzeit gesamt	08:15 min	

Tabelle 6: Versuch #2

<b>Versuch # 3</b>	Bauteilbezeichnung: Tellerfeder-Zylindergehäuse (von Höckh)	
Prozess	Zeit [s]	Ergebnis / Bewertung
Drehen, langsam ~2-3rpm		Das Bauteil sieht optisch gut aus
SPR Tank 1	90	
SPR Tank 2	30	
SPR Tank 3	30	
VC <150 mbar	90	
Taktzeit gesamt	05:38 min	

Tabelle 7: Versuch #3

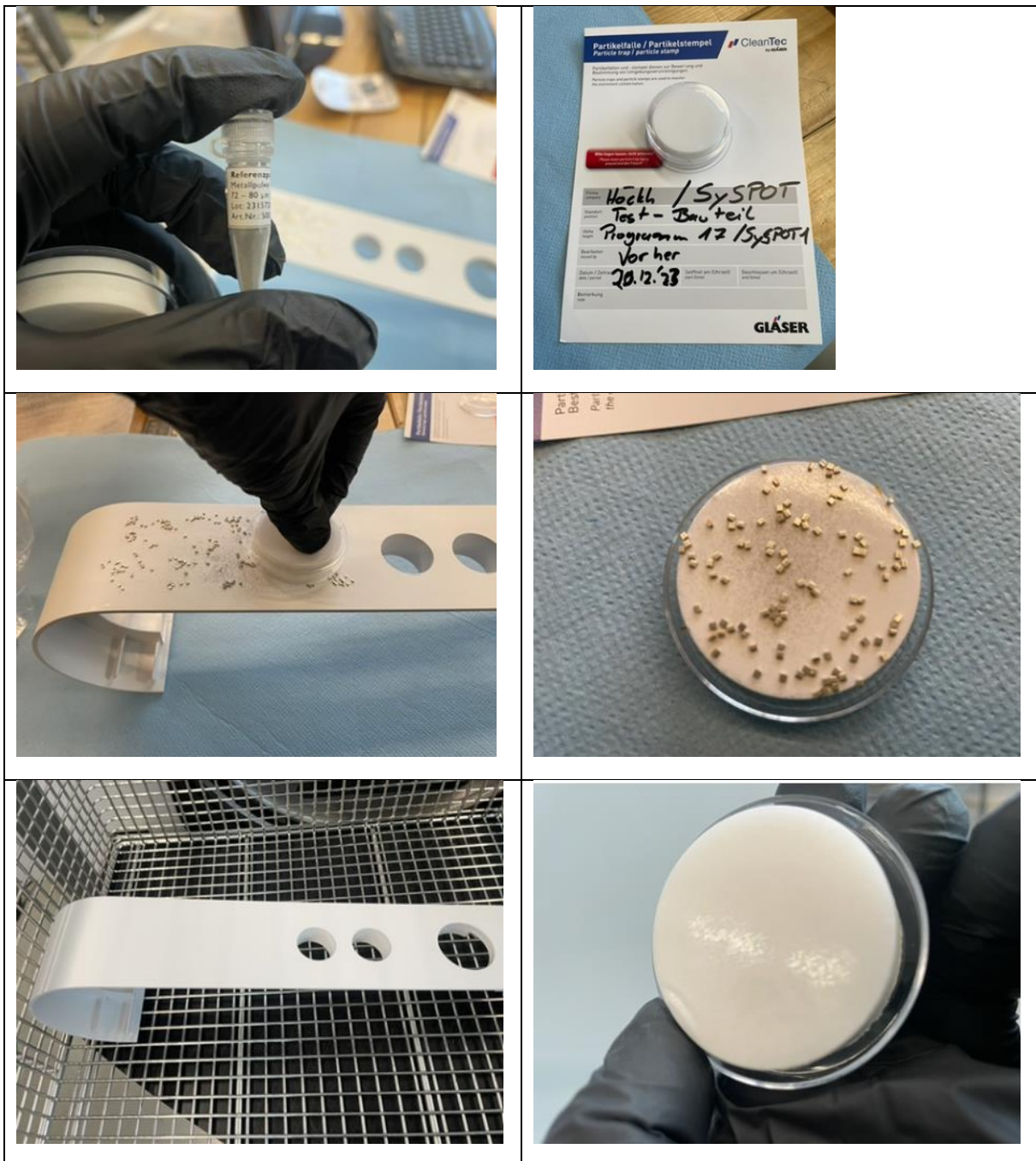


Tabelle8: Bilder zur Versuchsreihe

Anhand dieser Versuchsreihen konnten erstmals originale Bauteile eines assoziierten Partners im Gesamtsystem betrachtet werden, auch wenn die einzelnen Systeme noch räumlich getrennt waren.

## **TAP 4.2: Analyse der Produktionsoptimierung bei Anwendern**

Da wir in unserem Technikum regelmäßig viele Anwender mit Originalbauteilen und originaler Verunreinigung begrüßen dürfen, kann das System die Produktionsoptimierungen direkt in unseren Technologiecenter erstellen.

Es wurden alle Komponenten des Gesamtverbundes zusammengesetzt. Hierfür wurde die Version 1 des vom IPM entwickelten Sensors an die Firma Höckh übergeben.

Dieser Sensor wurde zuvor bei der Firma Gläser zur Analyse der Filtermembranen verwendet. Bei der Firma Höckh soll der Sensor nun Ergebnisse in Echtzeit an die KI übermitteln. Dieses Ziel konnte noch nicht erreicht werden, da die Anbindung und die Robotik sehr komplex sind. Dies wird weiterhin fortgesetzt, um auch nach Ablauf des Projektes weiter Daten sammeln zu können und das Gesamtsystem prozesssicher serienreif zu bekommen.

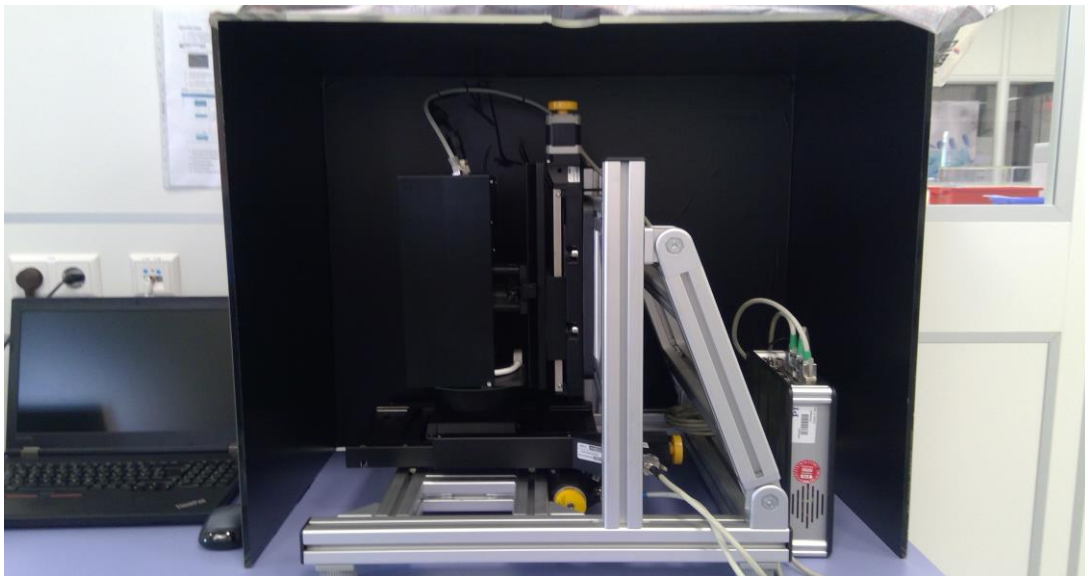


Abb.17: Sensor auf Schlitten

## **TAP 4.3: Dokumentation**

Die Firma Höckh Metall-Reinigungsanlagen GmbH dokumentiert die Projektergebnisse des Teilvorhabens und unterstützt bei der Dokumentation des Gesamtvorhabens.

## **3. Wissenschaftlicher Transfer**

Im Verlauf des Projekts wurde ein umfangreicher wissenschaftlicher Transfer der Forschungsergebnisse umgesetzt. Die entwickelten KI-Ansätze zur automatisierten Oberflächeninspektion und Optimierung der Reinigungsprozesse wurden auf verschiedenen nationalen und internationalen Fachkonferenzen sowie Messen, darunter die parts2clean, einem breiten Fachpublikum vorgestellt und diskutiert. Besonders bei Veranstaltungen des Fachverbands für industrielle Teilereinigung (FiT) konnten die Ergebnisse einer größeren Fachöffentlichkeit zugänglich gemacht werden.

Zudem wurden die Projektergebnisse durch Fachartikel in internationalen Zeitschriften wie dem Journal für Oberflächentechnik (JOT), dem Magazin für Oberflächentechnik (MO) und dem International Paint and Coating Magazine (IPCM) veröffentlicht, um ein internationales wissenschaftliches Publikum zu erreichen. Diese Veröffentlichungen, die in Deutsch, Englisch und Italienisch erschienen, beleuchteten unter anderem den Einfluss von KI auf die moderne industrielle Reinigung und thematisierten, wie diese Prozesse in naher Zukunft aussehen könnten.

#### **4. Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen**

Im Laufe des SysPOT-Projektes wurden auch andere Fortschritte an anderen Stellen begonnen. Da das Thema KI in aller Munde ist, wurde hier hauptsächlich im Bereich des Deep Learnings und in den Bereichen der KI-Programmierung von anderen Stellen einschlägige Publikationen veröffentlicht.

Die neuesten technischen Entwicklungen zur digitalen Integration von Anlagensystemen mit Augenmerk auf Reinigungsanlagen in die Industrie 4.0 wurden vom VDMA e.V. durch den Arbeitskreis VDMA OPC ST CWG4 PG1 – OPC UA Cleaning- and Pretreatment Machinery in einen Standard überführt, indem wir zusammen mit weiteren Reinigungsanlagenherstellern tätig sind. Die Firma Höckh und das IPS tauschen sich über neueste Erkenntnisse aus und profitieren dabei von Fortschritten anderer Projekte, insbesondere im Bereich des energieflexiblen Einsatzes von Reinigungsanlagen, wie sie im Forschungsprojekt SynErgie erzielt wurden. Diese Ergebnisse können weiter in SysPOT integriert werden, um das System noch besser zu machen.

Die Fortschritte im Bereich der Künstlichen Intelligenz während des Projekts sind schwer genau zu messen, sondern lassen sich eher in allgemeinen Entwicklungen zeigen. Im Laufe des Projekts wurden die Fähigkeiten der KI-Modelle deutlich verbessert, und diese Verbesserungen flossen in jede neue Versuchsreihe der KI ein.

#### **5. Mittelsverwendung**

Die erhaltenen Fördermittel sind bestimmungsgemäß verwendet worden. Verschiebungen und Umwidmungen wurden rechtzeitig mit dem Projektträger besprochen und auf dem Wege des Antragsverfahrens umgesetzt.

Der zahlenmäßige Nachweis wird separat erstellt und eingereicht.

Der größte Posten dabei sind die Personalkosten, die sich auf die einzelnen Abteilungen verteilen. Das Team bestand aus Mechanikern, Konstrukteuren, Technikern und Ingenieuren.

Ein weiterer wesentlicher Kostenfaktor sind die Materialkosten, die sich vor allem auf die Komponenten der Sensoren und das benötigte Verbrauchsmaterial beziehen.

Die zuvor eingeplanten Reisekosten wurden komplett in Materialkosten umgewandelt. Demnach wurden anfallende Reisekosten durch die Firma Höckh abgedeckt.

Durch den Pandemieverzögerten Start des SysPOT Projektes war es sehr schwer die Kosten äquivalent zur geplanten Summe zu gestalten. Es wurde mit allen Mitteln versucht der geplanten Summe gerecht zu werden.

Es folgt eine Übersicht in Form einer Tabelle, der Zielerreichung der einzelnen TAP's

<b>(T)AP</b>	<b>Ziel des (T)AP's</b>	<b>Ziel erreicht?</b>
1.1	Erstellung eines Lastenheftes. Die Anforderungen an das Reinigungssystem und an die Produktprüfung werden ermittelt. Reinigungsverfahren, die damit verbundenen Reinigungsprozesse, die zu prüfenden Bauteiloberflächen und Filtermaterialien werden in Absprache zwischen Anwendern und Systementwicklern festgelegt.	JA
2.4	Klassifikation der Oberflächen nach Defekt- / Verschleißzustand Hierzu sollen Versuchsreihen durchgeführt werden. Partikel und Defekte werden manuell bewertet und eingeteilt.	JA
3.1	Automatisierte Adaption der Reinigungsparameter basierend auf dem Regelkreis der Messung und Zustand der Reinigungsanlage In diesem Arbeitspaket soll ein System zur automatisierten Adaption der Reinigungsparameter basierend auf dem Zustand der Reinigungsanlage entwickelt werden.	JA die KI ist noch nicht ganz fähig die Parameter der Anlage komplett selbstständig auswählen zu lassen. Es ist aber ein großer Erfolg, dass die KI die Anlage bei der Entscheidung eines Grundprogrammes unterstützt.
3.2	Eine künstliche Intelligenz für die Optimierung des Reinigungsprogrammes basierend auf dem erweiterten Sinnersche Kreis wird entwickelt. Dafür wird auf ein Teilgebiet des maschinellen Lernens, das sogenannte „bestärkende Lernen“ zurückgegriffen. Per Definition nutzt diese Art des Lernens historische Daten, um ein in sich dynamisches System zu beeinflussen.	JA

3.3	Anpassung der Reinigungsanlagen durch Sensorik und generelle Verfahrenstechnik, um den Erfolg des Projektes zu gewährleisten	JA
4.1	Test des SPOT- Funktionsmusters bei Anwendern, wobei die Anwender in diesem Fall im Höckh- Technikum versuche fahren konnten.	JA
4.2	Analyse der Produktionsoptimierung bei Anwendern Die Anwender nutzen die Daten für Analyse von Optimierungspotentialen bzgl. Effizienzsteigerung in der Produktion, Kosteneinsparungen der Ressourcen, von Energien oder Qualitätssteigerung der Produkte.	JA

Tabelle 9: TAP-Zielerreichung

Das übergeordnete Ziel, ein anpassungsfähiges photonisches Oberflächentestsystem mit intelligenter Bildauswertung in Verbindung mit einem Reinigungssystem zu entwickeln und zu betreiben, wurde planmäßig erreicht. Dies geschah durch die schrittweise Bearbeitung der Arbeitspakete und das Erreichen der festgelegten Meilensteine. Der Fördermittelgeber wurde regelmäßig und zeitnah über die Entwicklungsphasen, den Mitteleinsatz sowie mögliche Änderungen im Zuwendungsbescheid informiert.

## 6. Erzielte Nebenergebnisse

Das größte Nebenergebnis ergab sich aus dem Vergleich von UV- und Weißlichtbeleuchtung zur Erfassung unterschiedlicher Partikelklassen.

Dieser Ansatz wurde vom Projektpartner Fraunhofer IPM entwickelt und wurde zum Patent angemeldet. Diese Form von Bewertung der Partikel gab es bislang noch nicht und zeigt die Fähigkeit, Partikel auch auf gleichfarbigen Untergründen erkennen zu können, was die Auswertung der Partikel auf ein noch neues Level anhebt. Das Verfahren eröffnet neue Möglichkeiten für die zerstörungsfreie Analyse von Oberflächen und kann in verschiedenen Anwendungsbereichen, wie z.B. der Qualitätskontrolle oder der Materialwissenschaft, eingesetzt werden

## 7 Literaturverzeichnis

Prof. Dr. Ing. Robert Weiner (1969): Metall-Entfettung und Reinigung, 2. Auflage, Band 7  
Eugen G. Leuze Verlag, Saulgau (Württ.)

T.W. Jelinek (1999): Reinigen und Entfetten in der Metallindustrie, 1. Auflage  
Eugen G. Leuze Verlag, Saulgau (Württ.)

Oberbayrisches Technologie-Transfer-Institut e.V. (OTTI /2009):  
Reinigen und Vorbehandeln vor der Beschichtung  
OTTI e.V. Regensburg

Wildbrett, G (2006): Reinigung und Desinfektion in der Lebensmittelindustrie, 2. Auflage,  
Behrs Verlag Hamburg

Kurt Hertlein (2000): Reinigen mit Kohlenwasserstoff-Lösemitteln und Wasser: im  
metallbearbeitenden Gewerbe, im Druck- und Elektronikbereich (Band 576)  
Expert Verlag, Renningen-Malmsheim

Büscher, Jan; Paranjape, Akshay; Möhle, Roman; Polikarpov, Mikhail; Plettenberg, Nils;  
Zwinkau, Ronny et al. (2023): Bauteile ressourceneffizient reinigen mithilfe von KI. In: J Oberfl  
Techn 63 (1), S. 40–43. DOI: 10.1007/s35144-022-2338-z.

Deuse, Jochen (2018): Wertstromübergreifende Auslegung von Bauteilreinigungskonzepten  
(CLEAN) (Schlussbericht). Online verfügbar unter [http://www.gvb-  
ev.de/fileadmin/pdfs/Schlussbericht\\_19110N\\_CLean\\_Kurz.pdf](http://www.gvb-ev.de/fileadmin/pdfs/Schlussbericht_19110N_CLean_Kurz.pdf).

Grün, Reiner (2016): Industrielle Teilereinigung: Eine Übersicht. In: Galvanotechnik 107 (5),  
877–888.

VDA 19.1 (2015): Qualitätsmanagement in der Automobilindustrie. Prüfung der Technischen  
Sauberkeit. Partikelverunreinigung funktionsrelevanter Automobilteile. 2. Aufl. 2 Bände.  
Berlin (Qualitätsmanagement in der Automobilindustrie).

Zwinkau, Ronny (2019): Adaption von Verfahren der Bilderkennung auf die Regelung  
partikelsensibler Produktionssysteme.

Prüfnorm: ISO 16232:2018

David Bartels, Stéphane Itasse 2024: KI in der Reinigung macht weitere Fortschritte  
Journal für Oberflächentechnik (JOT) Ausgabe 2024, 64. Jahrgang  
SPECIAL Industrielle Teilereinigung  
Springer Fachmedien, Wiesbaden

David Bartels, Stéphane Itasse 2024: Die selbstlernende Anlage rückt näher  
Magazin für Oberflächentechnik (MO) Ausgabe 9/2024 Seite 46-47  
I.G.T. Informationsgesellschaft Technik mbH, Ottobrunn