





Schlussbericht zum IGF-Vorhaben

Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen



Intelligentes Monitoringsystem zur Steigerung der Prozessqualität und Ressourceneffizienz in gewerblichen Wäschereien (Impress)

| IGF-Vorhaben Nr. 20792 N | Februar 2023 |

Finanzielle Förderung aus Haushaltsmitteln des Bundesminsteriums

für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) über das AIF-Rahmenprogramm



Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages



Schlussbericht vom 20.02.23

zu IGF-Vorhaben Nr. 20792 N

Thema

Intelligentes Monitoringsystem zur Steigerung der Prozessqualität und Ressourceneffizienz in gewerblichen Wäschereien (IMPRESS)

Berichtszeitraum

01.10.2019 - 31.08.2022

Forschungsvereinigung

Hahn-Schickard-Gesellschaft für angewandte Forschung e.V.

Wilhelm-Schickard-Straße 10

78052 Villingen-Schwenningen

Forschungseinrichtung(en)

FS 1: Hohenstein Institut für Textilinnovation gGmbH (HIT)

Schlossateige 1

74357 Bönnigheim

FS 2: Hahn-Schickard (HS)

Wilhelm-Schickard-Str. 10

78052 Villingen-Schwenningen



Gefördert durch:



Danksagung

Das IGF-Vorhaben 20792 N der Forschungsvereinigung Forschungskuratorium Textil e.V., Reinhardtstraße 14-16, 10117 Berlin wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der industriellen Gemeinschaftsforschung IGF vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

Das Hohenstein Institut für Textilinnovation gGmbH und Hahn-Schickard Gesellschaft für angewandte Forschung e.V. danken die genannten Institutionen für Bereitstellung der finanziellen Mittel.

Weiterhin danken wir allen Mitgliedern des projektbegleitenden Ausschusses, unseren Partnern aus Industrie und Verbänden, die das Vorhaben mit engagierter und konstruktiver Zusammenarbeit und Diskussionsbereitschaft sowie durch die Bereitstellung von Materialien und Know-how unterstützt haben.

Besonderer Dank geht an:

- Alpirsbacher Wäsche-Service GmbH & Co. KG
- Herbert Kannegiesser GmbH
- LAVATEC LAUNDRY TECHNOLOGY GMBH
- JENSEN GmbH
- Chemische Fabrik Kreussler & Co. GmbH
- Atec Automatisierungstechnik GmbH
- AQON Water Solutions GmbH
- Bartz & Bartz GmbH

Medical Mountains GmbH

- Imec Messtechnik GmbH
- Jung Electronic GmbH
- 281 Solutions UG
- Kreuznacher
 Zentralwäscherei
 GmbH & Co.
 Mietwäsche KG
- MEWA Textil-Service AG & Co.
 Management OHG
- ALSCO
 Berufskleidungs-Service GmbH
- Gummersbach Environmental Computing Center GmbH
- Prenode GmbH

- TriOS Mess- und Datentechnik GmbH
- DataPhysics Instruments GmbH
- mobile function gmbh
- Gebrüder Heyl Vertriebsgesellschaft für innovative Wasseraufbereitung mbH
- PSIORI GmbH
- SIC! Software GmbH
- MicroTEC Südwest e.V.
- Divis Intelligent Solutions GmbH

Der Schlussbericht ist bei Hohenstein Institut für Textilinnovation gGmbH und Hahn-Schickard Gesellschaft für angewandte Forschung e.V. erhältlich.

Inhalt

1. Einleitung	8
2. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse im Berichtszeitraum	9
Arbeitspaket 1: Anforderungsdefinitionen Hohenstein Institut für Textilinnovation gGi	mbH
(HIT) und Hahn-Schickard-Gesellschaft für angewandte Forschung e.V. (HS)	
Arbeitspaket 2: Analyse realer Waschwasserproben	11
Arbeitspaket 3: Datenerhebung mit Modellwaschwässern	17
Arbeitspaket 4: Entwurf des Tensid-Softsensors	35
Arbeitspaket 5: Aufbau des Tensid-Softsensors	
Arbeitspaket 6: Validierung des Tensid-Softsensors im Technikum	
3. Zusammenfassung und Ausblick	62
4. Wirtschaftlichkeit, Ergebnistransfer und erzielte Ergebnisse	63
Abbildungsverzeichnis	
Abbildung 1: Aufbau der prozessanalytischen und verfahrenstechnischen Messkonzeptes	
die Erfassung der relevanten Daten	
Abbildung 3: Übersicht der Ableitung des repräsentativen Mess- und Untersuchungsbereit	
und damit auch der Rezepturen für das Ansetzen der Modellwaschwässer	
Abbildung 4: Die Abbildung zeigt den Arbeitsfluss der Versuchsoptimierung. Im Labor wur	
die Messvorschläge aus der Datenbank im LabView Programm dargestellt	18
$Abbildung \ 5: \ Rohr leitungs-\ und\ Instrumenten fließbild\ (RI-Fließbild)\ des\ Versuchsaufbaus.$	
Abbildung 6: Bildaufnahme der Vorderseite des Sensorverbunds	
Abbildung 7: Bildaufnahme der Rückseite des Sensorverbunds	
Abbildung 8: Aufnahme der Nulllinie vor und nach dem Reinigungsprozess	23
Abbildung 9: Bedienoberfläche für die Online-Sensoren zur Überwachung des laufenden	0.4
Prozesses	
Abbildung 10: Bedienoberfläche für die Offline-Daten. Hier können die gemessenen Werte die Datenbank eingegeben werden.	
Abbildung 11: Laborwascheinrichtung Labomat.	
Abbildung 12: Zyklus des Datenmanagementkonzepts.	
Abbildung 13: Bestimmtheitsmaß Ri2 und statistische Power sämtlicher Einflussfaktoren.	
Benennung der Variablen ist wie folgt: X: nummerische Größe; X': kategorische Größe; X'	
quadrierte nummerische Größe	
Abbildung 14: Korrelationsmatrix Waschen des Definitive Screening Designs aus Design E	•
12Abbildung 15: Manuell selektierte, signifikante Einflussfaktoren für die Zielgröße "anionisch	
Tensidkonzentration" (Waschen)	
Abbildung 16: Streudiagramm der Residuen für die Zielgröße "anionische Tensidkonzentra	ation"
für die in Tabelle 4 ausgewählten Einflussgrößen	30

Abbildung 17: Korrelationen zwischen Einfluss- (A bis B') und Zielgrößen (R1 bis R15)
(Waschen, DSD)
Abbildung 18: Korrelationen zwischen Einfluss- (A bis B') und Zielgrößen (R1 bis R16) (Spülen,
DSD)
Abbildung 19: Oberflächenspannung in mN/m über Anzahl an Spüldurchgängen während Textilreinigung der Baumwoll-Standardgeweben
Abbildung 20: Oberflächenspannung in mN/m über Waschmittelkonzentration in g/L
Abbildung 21: Oberflächenspannung in mN/m über Anzahl der Spülzyklen34
Abbildung 22: Diese Heatmap zeigt für das Waschen und Spülen, welche Einflussgrößen einen hohen Einfluss auf die Zielgrößen (Oberflächenspannung, anionische Tenside und nicht
ionische Tenside) haben
Abbildung 23: Zusammenhänge zwischen den Online und Offline gemessenen Messgrößen. Die Werte für die Pearson Korrelation und den R ² zeigen die Werte für die Daten ohne
Ausreiser (transparentere Datenpunkte), in Klammern mit Ausreiser
Abbildung 24: Beispielhafte Darstellung der Messwerte. Gut zu sehen ist hier das Einschwingen des Prozesses. Die horizontale Linie zeigt den Mittelwert, die vertikale Linie zeigt den Beginn,
ab dem der Mittelwert bestimmt wurde
Abbildung 25: Einfacher Entscheidungsbaum
Abbildung 26: Oben: die Ergebnisse für den Waschprozess, Unten: die Ergebnisse für den
Spülprozess. Jeweils der Mittelwert (Linie) und der Bereich der Standardabweichung
(transparente Fläche). Die X-Achse zeigt den Vergleich der einzelnen Sensoren, wobei all als
Vergleich dient (hier wurden alle Sensoren verwendet), und die jeweiligen Sensornamen den
verwendeten Sensor darstellen
Abbildung 27: Der Softsensor mit seinem Innenleben. In Orange ist das Revolution Pi Compact
zu sehen, links oben das Raspberry Pi 4, links unten die 24V Spannungsversorgung/
Spannungstransformation und rechts unten die Schalter mit den darunter liegenden
Sensoranschlüssen42
Abbildung 28: Darstellung des Prozesses auf dem Embedded Device. Der Zeitstempel war als
UNIX Timestamp (vergangene Sekunden seit dem 01.01.1970 00:00:00 Uhr) gegeben. In der
Mitte sieht man den laufenden Prozess, sowie die Messwerte der einzelnen Sensoren. Auf der
rechten Seite sind die Vorhersagen der KI-Modelle für die Nichtionischen Tenside (NIT),
Anionischen Tenside (AN) sowie die Oberflächenspannung (OFS) dargestellt43
Abbildung 29: Eine bildliche Darstellung des FL-Ablaufs
Abbildung 30: Erläuterung der Berechnung eines einzelnen Neurons
Abbildung 31: Einfaches neuronales Netzwerk mit 2 verdeckten Schichten und einem
Ausgabewert. Die verdeckten Schichten sind von außen nicht direkt sichtbar, weshalb sie ihren
Namen tragen. Als einfacher Benutzer interagiert man nur mit den Eingabegrößen und erhält
die Ausgabe zurück
Abbildung 32: Auf der linken Seite ist die Ausgabe des Servers zu erkennen. Dort wurden nach
jedem abgeschlossenen Trainingsschritt die verfügbaren Modelle zu einem neuen Modell
kombiniert. Auf der rechten Seite (jeweils rot umrandet) waren die beiden Klienten/ Parteien zu
sehen. Hier ist zu sehen, dass die Modelle über mehrere Epochen trainiert wurden (je Epoche
wird das Modell optimiert)
Abbildung 33: (oben) Industrielle Waschmaschinen zur Simulation praxisnaher Bedingungen
und (unten) Einbau des Embedded Device im Waschtechnikum
Abbildung 34:Exemplarische Untersuchung der Qualität der Validierung nach ISO 15797-8 mit
den Snültestgewehen

Abbildung 35: Gegenüberstellung der online und offline ermittelten pH-Werte für das
Waschwasser51
Abbildung 36: Gegenüberstellung der online und offline ermittelten pH-Werte für das
Spülwasser51
Abbildung 37: Gegenüberstellung der online und offline ermittelten Trübungs- Werte für das
Waschwasser52
Abbildung 38: Gegenüberstellung der online und offline ermittelten Trübungs-Werte für das
Spülwasser52
Abbildung 39: Gegenüberstellung der online und offline ermittelten Leitfähigkeits- Werte für das
Waschwasser53
Abbildung 40: Aufzeichnung mit dem Softsensor, hier der Vergleich Softsensor Daten zu Offline
gemessenen Werten53
Abbildung 41: Wichtigkeit der Merkmale laut GBT für die Oberflächenspannung. Je höher die
Spitze des jeweiligen Merkmals, desto wichtiger ist es54
Abbildung 42: (oben) Fließbild Filteranlage. Das Modellprozessabwasser wird von dem
Wasserzulaufbehälter über eine Drehschieberpumpe [P] und Rohre [R] der Filtereinheit [F]
zugeführt, (unten) Fotoaufnahme der Filteranlage, die maßgeschneidert für das Projekt von Fa.
ATEC entwickelt wurde55
Abbildung 43: Veränderung der Beschaffenheit der Modellprozesswässer in Abhängigkeit der
Filtrationszeit im Vliesstoff-Filtrationsmodul56
Abbildung 44: Veränderung der Beschaffenheit der Modellprozesswässer in Abhängigkeit der
Vliesstoff-Belegung im Vliesstoff-Filtrationsmodul56
Abbildung 45: Aufbau einer praxisnahen Simulation für Wasch- und Abwasserrecyclingversuche
bei einem PA-Mitglied57
Abbildung 46: Vergleich des Spektrums des Waschmittels mit initialen Filtrationslösungen und
Systemverunreinigungen58
Abbildung 47: Vergleich der OPUS-Viper Spektren für das Abwasserrecycling nach 0 min und
12 Stunden Filtrationszeit59
Abbildung 48: Struktur und Zusammensetzung des Projektbegleitenden Ausschusses entlang
der Wertschöpfungskette, unterteilt in "Anwenderseite" und "Herstellerseite". (Einige
Unternehmen/Stakeholder wurden später in projektbegleitenden Ausschuss aufgenommen und
sind daher an dieser Stelle übersichtshalber nicht dargestellt.)64

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Zusammenfassung zur Beschaffenheit der Prozesswässer im repräsentativen	
Bereich auf Basis der erhobenen Daten des PA	13
Tabelle 2: Generelle Zusammensetzung des Modellwaschwassers	14
Tabelle 3: Laboranalytischer Abgleich/Überprüfung der Richtwerte für	
Prozesswasserbeschaffenheit mit dem entwickelten analytischen Workflow	15
Tabelle 4: Zusammenfassung der Literatur-, PA- und Messdaten zur Ableitung des	
repräsentativen Bereichs für Modellwaschwässer	16
Tabelle 5: Analyse der verschiedenen Rezepturen für Modellprozesswässer hinsichtlich der	
Wasserbeschaffenheit	17
Tabelle 6: Ergebnisse der GBT Modelle auf die Trainingsdaten	39
Tabelle 7: Ergebnisse der GBT Modelle auf die Validierungsdaten	39
Tabelle 8: Darstellung der Federated Learning-Lernrunden	46
Tabelle 9: Übersicht des Validierungswaschverfahrens ISO 15797-8	50
Tabelle 10: Übersicht der Prozesswasserbeschaffenheit in Abwasserrecyclingversuchen	58
Tabelle 11: Vorhersage KI zu den Recycling Daten	59
Tabelle 12: Übersicht der Kostenersparnis durch Reduzierung der Nachwäsche durch den	
Einsatz der Sensortechnik	60

1. Einleitung

Gewerbliche Wäschereien verzeichnen einen immensen Zuwachs an Umsätzen und ihre wirtschaftliche Bedeutung steigt stetig. Der Grund hierfür sind die hohen Anforderungen an Hygiene und Qualität der Aufbereitung von Textilien, z.B. im Gesundheitswesen, die nur von spezialisierten Wäschereien erfüllt werden können. Auch die immer strengeren Regularien hinsichtlich des effektiven Erhalts der Funktion, z.B. beim Waschen von persönlicher Schutzausrüstung (PSA), können nur mit besonderer Expertise erzielt werden. Deshalb sind weltweit viele Branchen auf die Dienstleistungen gewerblicher Wäschereien angewiesen.

Wäsche wird vom Textildienstleister eingekauft, dem Kunden zur Verfügung gestellt, nach der Benutzung gewaschen und wieder an den Kunden ausgeliefert. Um all diese herausfordernden Logistik- und Prozessschritte zu meistern, bedarf es eines Maschinenparks, in dem intelligente und vernetzte Maschinen optimal interagieren und in Zukunft autonom Entscheidungen treffen. Für diese fortschreitende Automatisierung abgestimmter Prozesse, wird die Etablierung und Verknüpfung von kostengünstigen, aber gleichzeitig robusten Sensoren zu einem intelligenten Monitoringsystem benötigt. Bisher werden in der Wäschereibranche jedoch, obwohl dringend benötigt, nur langsam und punktuell neue Trends, wie Industrie 4.0-Konzepte mit Sensortechnik und künstlicher Intelligenz (KI), umgesetzt. Für die Zukunft ist ein Wandel zu "intelligenten Wäschereien" unausweichlich, um ökonomisch und ökologisch sinnvolle Dienstleistungen anbieten zu können.

Um die Vision von intelligenten Wäschereien zu verwirklichen, bedarf es zunächst eines intelligenten Monitoringkonzepts bestehend aus Datenerfassung und insbesondere einer darauf aufbauenden hochentwickelten Datenanalyse. Dies würde langfristig zur Vollautomatisierung der Branche beitragen, denn eine wirtschaftlich interessante und über einen längeren Zeitraum robuste Datenerfassung ist ein grundlegender Baustein für die Realisierung von Industrie 4.0-Trends in Wäschereien.

Von besonderem Interesse ist dabei die Online-Erfassung von bisher messtechnisch nicht direkt oder nur schwer zugänglichen Prozessparametern, wie der Tensidkonzentration oder der Desinfektionsleistung. Durch deren Kenntnis in spezifischen Prozessschritten ließen sich Waschvorgänge besser verstehen und effizienter regeln.

Ziel des Forschungsvorhabens war es deshalb über einen Sensorverbund Daten zu erfassen und darauf aufbauend exemplarisch ein indirektes Online-Monitoring der anionischen und nichtionischen Tensidkonzentrationen zu realisieren.

Der Grundgedanke dabei ist, Tensidkonzentrationen nicht direkt, sondern indirekt aus anderen Messdaten zu bestimmen, u.U. auch räumlich und zeitlich verteilt und nicht nur an der eigentlichen Messstelle. Hierzu werden ausgewählte Sensoren (Sensorverbünde) in spezifische Prozessschritte (z.B. Klarwäsche, Spülprozess) integriert und dann aus den gemessenen Sensordaten die betreffenden Tensidkonzentrationen mit Hilfe von Methoden der künstlichen Intelligenz abgeleitet. Besonderer Wert wird hierbei auf eine robuste und wirtschaftliche Integration des Sensorverbunds sowie ein effektives Monitoring des Waschvorgangs gelegt.

Mithilfe des neuentwickelten Monitoringsystems kann weiterhin die Beschaffenheit des Abwassers dokumentiert werden, um eine ökologische Prozessführung in Wäschereien z.B.

mittels Abwasserrecyclingtechnologie zu etablieren. Durch Kopplung mit Membranfiltrationsanlagen und Erfassung der Recyclingquoten verschiedener Tenside können so wirtschaftliche Abwasserrecyclingtechnologien etabliert werden. Anhand der gemessenen Daten kann zusätzlich eine Schädigung (Verblocken) der Membranen durch Tenside rechtzeitig verhindert werden.

Weiterhin spielen auch wirtschaftliche Aspekte eine wichtige Rolle für Projektmotivation, denn die Qualitätssicherung mittels Labormethoden ist aktuell nicht mehr ausreichend, um der Komplexität der Prozesse in gewerblichen Wäschereien effektiv zu begegnen. Trotz des besonderen Knowhows der Branche sind Nachwäschen, Reklamationen und Wäschewiederbeschaffung alltägliche Probleme. Den Wäschereibetrieben fehlen aufgrund von diskontinuierlicher Datenerfassung und bisher messtechnisch unzugänglichen Messparametern immer noch effektive Maßnahmen, um ihre Kunden automatisiert mit einer gleichbleibenden Qualität versorgen zu können.

Als Folgen entstehen den Wäschereien hohe Kosten, welche sogar die Existenz der Betriebe gefährden. Weiterhin leidet die Kundenbindung unter dieser Entwicklung und auch neue Geschäftsfelder können nur schwer erschlossen werden. Das in dem Forschungsprojekt IMPRESS angestrebte intelligente Monitoringsystem würde zur kontinuierlichen Datenerfassung aller wichtigen Prozessparameter führen und somit die Nachhaltigkeit, Wirtschaftlichkeit, und Effizienz der Branche steigern.

2. Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse im Berichtszeitraum Arbeitspaket 1: Anforderungsdefinitionen Hohenstein Institut für Textilinnovation gGmbH (HIT) und Hahn-Schickard-Gesellschaft für angewandte Forschung e.V. (HS)

Das Ziel des Arbeitspakets 1 war es Anforderungsdefinitionen für das grundlegende Datenmanagement, die Sensorspezifikationen, den verfahrenstechnischen Aufbau, das Programmierparadigma, den prozessanalytischen Workflow und die statistische Auswertung zu erarbeiten. Auf Basis dieser Daten sowie weiterer Literatur, den Praxisinformationen von Mitgliedern des projektbegleitenden Ausschusses und den erhobenen Messwerten sollten repräsentative Messbereiche für Hauptwasch- und Spülprozesse definiert und Modellprozesswässer entwickelt werden.

AP 1.1. Anforderungsdefinitionen HIT

Der Fokus von HIT lag auf der prozessanalytischen Ebene. Somit wurden folgende Anforderungsdefinitionen im Rahmen des Projekts erarbeitet:

- Es wurde eine Auswahl der Messparameter und der Sensoren getroffen und ein Entwurf/eine Auslegung des Laboraufbaus für sequenzielle Erfassung der Messdaten entwickelt. Es wurden auch gleichzeitig die Messbedingungen zusammengetragen bzw. auch theoretisch errechnet (z.B. Anströmung, Verwirbelungsstrecke, Differenzdruck in verschiedenen Prozessabschnitten, Reinigungs- und Wartungszyklen). Die Abbildung 1 zeigt das ganzheitliche verfahrenstechnische Messkonzept, dass jedoch im Laufe des Projektes aus Praktikabilitätsgründen in separate Prozessabschnitte, nämlich Waschprozess und Abwasseraufbereitung, aufgeteilt wurde.

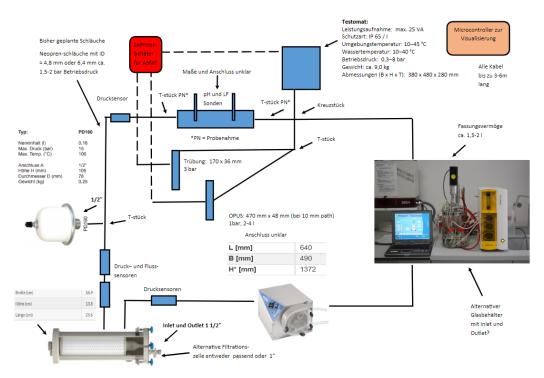


Abbildung 1: Aufbau der prozessanalytischen und verfahrenstechnischen Messkonzeptes für die Erfassung der relevanten Daten.

- Auf Basis des erfolgten prozessanalytischen und verfahrenstechnischen Konzeptes wurden alle Bauteile (z.B. Schläuche, Verbindungsstücke), Messutensilien sowie notwendigen Chemikalien zusammengetragen.
- Es wurde die Auswahl der Offline-Analytik sowie Entwicklung eines analytischen Workflows durchgeführt. Hieraus wurden wichtige Informationen für statistische Versuchspläne (Screening) abgeleitet. Der statistische Versuchsplan, sogenanntes Design of Experiment (DoE), war ein wichtiges prozessanalytisches Tool, um ein Screening der für die Entwicklung des Tensid-Sensors relevanter Messgrößen zu definieren. Der schematische Messablauf im Rahmen der statistischen Versuchsplanung ist in der Abbildung 2 erläutert. Anhand der grundlegenden Überlegungen zur statistischen Güte (stat. Power), Versuchsanzahl und Versuchsaufwand wurde das sogenannte Definitiv Screening Design als DoE-Methode ausgewählt.

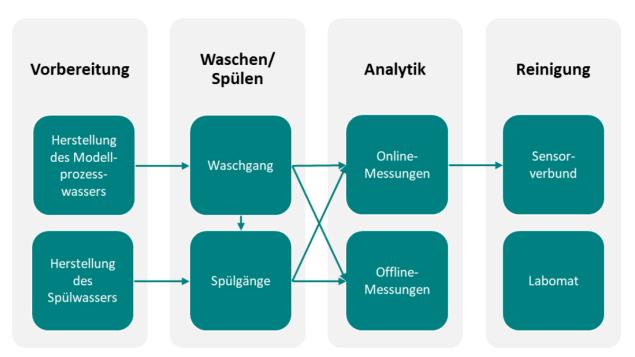


Abbildung 2: Schematischer Ablauf eines Versuchs im Rahmen der DSD-Versuchsreihe.

AP 1.2. Anforderungsdefinitionen HS

HS hat folgende Anforderungsdefinitionen erarbeitet:

- HS erarbeitete die Spezifikationen der Sensoren gemeinsam mit HIT. Dabei wurde das Sensorkonzept seitens HS auf Ausgangssignale und Schnittstellentechnik geprüft.
- Weiterhin wurde von HS, passend zu allen Anforderungsdefinitionen, ein Softwarekonzept für Datenerfassung (LabView-Programmierumgebung) und Datenanalyse (PostGreSQL + DesignExper12 + Python) erarbeitet.
- Die Evaluation der KI-Modelle wurde bereits zu diesem Zeitpunkt definiert.
- Die Spezifikation des Softsensors wurde definiert.

Arbeitspaket 2: Analyse realer Waschwasserproben

In diesem Arbeitspaket wurden im Rahmen einer Stichprobenuntersuchung Daten aus dem Projekt in Bezug auf reale Prozess- und Abwässer aus einer gewerblichen Wäscherei (Daten stammen vom PA-Mitglied, siehe VaW-Leistungen), Literaturdaten und Messungen aus der Laborumgebung analysiert. Hieraus wurde ein repräsentativer Messbereich erarbeitet für das Ansetzen der Modellwaschwässer, welche im Verlauf des Projekts minimal angepasst wurden. Diese Strategie ist schematisch in der Abbildung 3 zusammengefast.

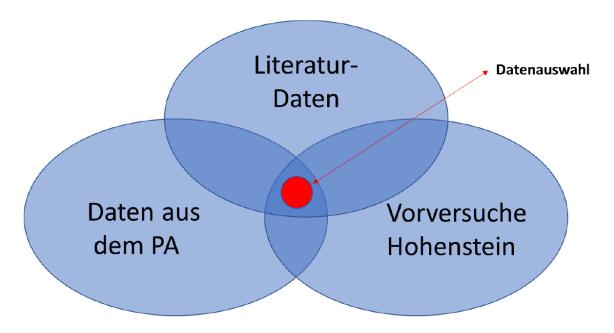


Abbildung 3: Übersicht der Ableitung des repräsentativen Mess- und Untersuchungsbereichs und damit auch der Rezepturen für das Ansetzen der Modellwaschwässer.

AP 2.1 Waschwasserproben vom PA

In diesem Teil-AP wurden direkte Gespräche mit PA-Mitgliedern zur Beschaffenheit der Abwässer geführt. Ein PA-Mitglied führte im Zeitraum 2019/2020 intensive Untersuchungen der Prozess- und Abwässer durch und stellte die Daten im Projekt IMPRESS zur Verfügung (siehe Tabelle 1). Weiterhin wurden alle Hintergrundinformationen zu den erhobenen Daten (z.B. Art der Probenahme) intensiv diskutiert. In der Tabelle 1 sind die aus dem PA erhobenen Daten im Detail gezeigt. Aus den Daten ist ersichtlich, dass insbesondere die organische Fracht, z.B. der CSB-Wert, als Funktion der Zeit stark schwankt. Ein weiterer wichtiger Aspekt ist die Tatsache, dass starke Unterschiede in der Prozesswasserbeschaffenheit hinsichtlich der Art der Probenahme. des Orts der Probenahme (z.B. stark Chlor-haltige Prozesse außerhalb der EU), der Art der bearbeiteten Wäsche (z.B. PSA vs. HORECA) und natürlich der eingesetzten Waschverfahren (z.B. Niedrigtemperaturwaschverfahren vs. Hochtemperaturwaschverfahren) gegeben sind. Wegen der hohen Variabilität der Daten und der damit verbundenen organisatorischen Herausforderungen, waren zielgerichtete Stichproben aus dem PA. Labor und historischen Literaturdaten eine sinnvolle Strategie (siehe Abbildung 3). Jedoch wurden diese statistischen Schwankungen bei der statistischen Versuchsplanung und bei dem analytischen Konzept berücksichtigt

Tabelle 1: Zusammenfassung zur Beschaffenheit der Prozesswässer im repräsentativen Bereich auf Basis der erhobenen Daten des PA.

	1. Probe	2. Probe
Scheinbare Färbung	stark, grau	stark, grau
Trübung, qualitativ	trüb	trüb
Geruch, qualitativ	schwach muffig	schwach aromatisch
Leitfähigkeit (25°C) [μS/cm]	2000 bei 19,7 °C	2300 bei 20,3 °C
CSB [mg/l]	1430	2340
TOC [mg/l]	520	770
DOC [mg/l]	380	640
BSB5 [mg/l]	620	1000
Arsen [mg/l]	0,008	0,010
Blei [mg/l]	0,060	0,080
Cadmium [mg/l]	0,004	0,007
Chrom ges. [mg/l]	0,460	0,660
Kupfer [mg/l]	0,530	0,970
Nickel [mg/l]	0,360	0,580
Quecksilber [mg/l]	0,001	0,001
Zink [mg/l]	2,200	3,200
Nitrat-Stickstoff [mg/l]	1,900	2,500
ortho-Phosphat [mg/l]	7,900	13,000
Gesamt-Phosphor [mg/l]	2,200	13,000
AOX (Schüttelmethode) [mg/l]	2,500	2,000
Kohlenwasserstoff-Index [mg/l]	15,000	34,000

AP 2.2 Labortechnische Analyse

Es wurden notwendige Stichprobenuntersuchungen mit diversen analytischen Methoden durchgeführt, um den repräsentativen Messbereich abzuleiten. Diese Daten waren wichtig, da durch Literatur und PA-Daten nicht die notwendige Datenvariabilität abgedeckt wurde. Weiterhin war diese Maßnahme wichtig, um die praktischen und statistischen Herausforderungen im Rahmen der Analyse zu erfassen, z.B. Phasenseparation der Öl-Phase aus dem Modellwaschwasser. Daher wurde eine grundsätzliche Mischung von Chemikalien definiert, welche in der Lage sind, ein typischen Prozesswasser der gewerblichen Wäscherei zu simulieren (siehe Tabelle 2).

Tabelle 2: Generelle Zusammensetzung des Modellwaschwassers.

Substanzklasse	Eigenschaften
Defibriniertes Schafsblut	simuliert die Menge die proteinhaltigen Verschmutzungen im Wäscherei-Prozesswasser (z.B. Blutflecken in Krankenhaus, tierische Eiweißflecken in Lebensmittelbetrieben)
Waschmittel	nach ISO15797 (siehe Tabelle 3) mit optischem Aufheller
Hochreines Öl für Analytik	Simuliert den Anteil des pflanzlichen Ölanteils in den Verschmutzungen. (Gastronomie, Wellness, Lebensmittelbetriebe)
Pektin	Simuliert die pflanzlichen Polysaccharide d.h. Ballaststoffe (vor allem in Früchten und Gemüse enthalten, d.h. Äpfel, Orange, Möhre), d.h. Orangensaft, Möhrensalat (Ballaststoffe wie Pektine sind auch einer der festen Hauptbestandteile von Kot)
Peressigsäure (optional)	Zeigt zeitlich-verändernde Zusammensetzung in Abhängigkeit der Schmutzfracht
Neutralisierungsmittel (optional)	Neutralisiert den pH-Wert nach der Hauptwäsche (z.B. Ameisen-, Essig- oder Citronensäure)
Zugabe vom Baumwollstandard- Gewebe (optional)	
Wasserentionisiert	Gesamt- und Carbonathärte: dH° = 0-1; dKH° = 0-1

Im Rahmen der Messversuche wurden auch grundsätzliche Informationen zu den physikochemischen Eigenschaften der eingesetzten Tenside ermittelt. Die Methode der dynamischen Oberflächenspannung (Blasendrucktensiomerter offline f10, Fa. Sita) ist eine spezielle Methode, welche die Diffusion der Tenside zu Luft-Wasser-Oberfläche abbildet. Die Versuche wurden zwar bei quasi-statischen Bedingungen durchgeführt (d.h. bei 1 Hz), jedoch unterscheiden sich die ermittelten Oberflächenspannungen deutlich von weiteren gängigen Analysemethoden, wie Wilhelmy-Platten-Methode oder Pendant-Drop-Methode. Diese Unterschiede wurden von dem PA-Mitglied ermittelt, der auf die Messtechnick der Tensidanalytik spezialisiert ist. Die Messungen, die in Zusammenarbeit mit PA durchgeführt wurden, stellen einen Teil des Abgleichs der Tensidanalytik dar, der bereits in früher Projektphase sinnvollerweise durchgeführt wurde. Aus den Analysen wurden u.a. fundiert die Blasenlebedauer

und Mizellenbildungskonzentration (CMC) für alle Versuchsarten und Tensidarten ermittelt. Alle Versuche wurden bei 1 Hz durchgeführt und es wurde die Waschmittel- bzw. Tensidkonzentration gezielt variiert, so dass es ausreichend Daten vor und nach dem Erreichen von CMC gibt. Diese Erkenntnisse waren wichtig, um die Messbereiche der Sensortechnik und der Offline-Analytik mit den Richtwerten (weitere Informationen siehe AP 2.3) zu der Beschaffenheit der Wäschereiprozesswässer abzugleichen und ggbf. sinnvolle Verdünnungsfaktoren bei der Probenahme festzulegen, um es schnell analytisch erfassen zu können, d.h. falls die Proben zu hochkonzentriert waren.

Tabelle 3: Laboranalytischer Abgleich/Überprüfung der Richtwerte für Prozesswasserbeschaffenheit mit dem entwickelten analytischen Workflow.

	"Richtwert"	Max. Messbereich der Sensortechnik	Messbereich der Offline- Analytik
Trübung [NTU]	550	1000	0,1 – 1000
рН	9	14	1 - 14
Leitfähigkeit [µS/cm]	2495	10.000	0 – 20.000
Alkalinität/ Carbonathärte [°dH]	0,9 g/L ca. 40 °dKH	1 - 20 °dKH	1 – 15 °dKH
CSB [mg/L]	2462	30 - 2200	0 – 1500
BSB [mg/L]	600	30–2200	2 – 3000
Dyn. OFS [mN/m]	56,08	-	30 – 72,5
SDS [mg/L]	39,57	-	0,2 – 3,5
Triton X-100 [mg/L]	23,59	-	0,3 – 15,0

AP 2.3 Ableitung Modellwaschwässer

In diesem Schritt wurden Literaturdaten und experimentelle Daten aus AP 2.1. und AP 2.2. zusammengefasst. Hieraus wurde für die Herstellung der Modellabwässer ein repräsentativer Messbereich und realistische Messfehler abgeleitet. Weiterhin wurden chemische Komponenten für die Entwicklung der Modellwaschwässer festgelegt. Im nächsten Schritt wurden stabile Modellwaschflotten auf der Basis der chemischen Komponenten entwickelt. In der Tabelle 4 ist die Ableitung der Mittelwerte/Richtwerte der typischen Modellprozesswässer gezeigt.

Tabelle 4: Zusammenfassung der Literatur-, PA- und Messdaten zur Ableitung des repräsentativen Bereichs für Modellwaschwässer.

	Min.	Max.	Mittelwert
рН	6	12	9
LF [μS/cm]	260	4730	2495
CSB [mg/l]	127	4796	2462
BSB ₅ [mg/l]	200	1000	600
Trübung [NTU]	0,53	1100	550
Carbonathärte/Alkalinität [g/l]	0	1,8	0,9
Oberflächenspannung [mN/m]	70,30	41,85	56,08
Konz. der anionischen Tenside [mg/l]	1	78,13	39,57
Konz. der nichtionischen Tenside [mg/l]	1	46,18	23,59

In Tabelle 5 sind die Ergebnisse zu den verschiedenen Modellprozessabwässern (MPW) zusammengefasst. Zur Erzielung dieser Ergebnisse war die Optimierung der Messanalytik notwendig (siehe AP 2.2), z.B. ist die Tensidanalytik nur in einem bestimmten Konzentrationsbereich möglich. Auf Basis der Untersuchungen der Modellprozesswässer mit verschiedenen Beschaffenheiten konnte ein optimales Modellprozesswasser, dass am besten zu den definierten Richtwerten aus Tabelle 4 passt (d.h. MPW 3), für weitere Versuche ausgewählt werden. Ziel dabei war es möglichst nah an die Richtwerte zu kommen, wobei ohne reale Schmutzfracht gerade die Trübungswerte sich eher im niedrigen Bereich befanden. Die Priorität war es jedoch vor allem nah an die angestrebten Tensidwerte für Sodiumdodecylsulphat (SDS) und Triton-X100 zu kommen, was für MPW3 der Fall war. Im Laufe des Projekts wurde das

ausgewählte Modellprozesswasser validiert und es wurde bestätigt, dass diese Rezeptur gut die realen Wäschereiabwässer simuliert.

Tabelle 5: Analyse der verschiedenen Rezepturen für Modellprozesswässer hinsichtlich der Wasserbeschaffenheit.

MPW	Trübung [NTU]	рН	LF [μS/cm]	CH [°dH]	c (SDS) [mg/L]	c (Triton X-100) [mg/L]	CSB [mg/L]
1	13,03	8,23	2250,00	-	1673,33	980,0	677
2	37,07	8,77	1695,97	53,7	576,67	553,3	3510
3	48,90	7,85	1125,50	34,7	42,20	44,0	3250
4	116,00	8,91	720,00	19,1	34,13	-	1855
5	17,15	7,76	880,00	16,5	42,90	85,0	1825

Arbeitspaket 3: Datenerhebung mit Modellwaschwässern

In diesem Arbeitspaket wird eine Sensor-, Hardware- und Softwareumgebung in Einklang mit AP1 und AP 2 realisiert. Weiterhin erstellt HS einen Entwurf des Tensid-Softsensors, welche auf statistischen Prinzipien für Maschinelles Lernen beruht und die erhobenen Daten nutzt, um Vorhersagen zu der Tensid-Konzentration in Waschwässern zu ermitteln. Letztendlich übernimmt HIT die Durchführung, Auswertung und Überprüfung der Definitiv Screening Versuche.

AP 3.1 Software zur statistischen Erstellung Modellwaschwässer

HS entwickelte eine Software um eine sequentielle, statistische Versuchsplanung (Design of Experiment, kurz DoE) durchzuführen. Diese wurde auf Basis der Open-Source Bibliothek GPyOpt (https://github.com/ SheffieldML/GPyOpt) für Python entwickelt. Mit dieser konnte eine optimale, sequenzielle Durchführung der Versuche realisiert werden. Ziel der Software, die

Unsicherheiten eines Regressionsmodells (mathematisches Modell) auf die wirklichen Zielgrößen zu minimieren. Der Ablauf der Messung und Verwendung der Software war wie folgt:

- HIT legte gemeinsam mit HS fest, welche Parameter variiert werden sollen. Dies geschah auf Basis der durchgeführten Vorversuche. Die ausgewählten Parameter waren: Art des Waschmittels, Menge des Waschmittels und Anzahl der Spülzyklen
- HS schlug auf Basis dieser Informationen erste Messungen mithilfe der entwickelten Software vor. Diese Vorschläge wurden dann in der Datenbank abgelegt.
- HIT rief die Vorschläge auf und führte diese durch.
- Die Sensordaten werden sofort in der Datenbank abgespeichert. Die h\u00e4ndisch gemessenen Werte (Kontrollwerte und Tensidgr\u00f6\u00dfen) wurden manuell in der Datenbank abgespeichert.
- Die von HS erstellte Software optimierte daraufhin auf Basis der neuen Messungen das Regressionsmodell. Das Modell gab auch zurück, wie hoch die Unsicherheit ist. Basierend darauf, wurde die nächste Messung von der Software ausgewählt und in der Datenbank als Vorschlag gespeichert.
- Dies schloss den Optimierungskreislauf. HIT konnte damit ohne aktives Eingreifen von HS die Messungen durchführen.

Dieser Workflow wird in Abbildung 4 grafisch dargestellt.

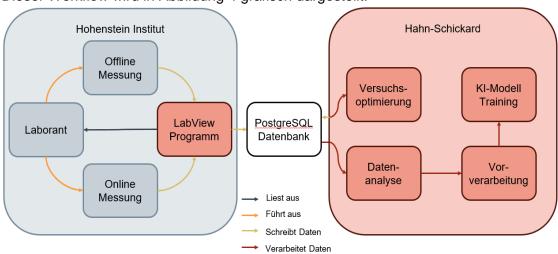


Abbildung 4: Die Abbildung zeigt den Arbeitsfluss der Versuchsoptimierung. Im Labor wurden die Messvorschläge aus der Datenbank im LabView Programm dargestellt.

Auf Grundlage der Vorversuche (DSD (Definitive Screening Designs) Versuchsdesign) wurde die Software gestartet. Durch eine umfangreiche Analyse der Vorversuchdaten konnte der zu variierende Parameterraum verkleinert werden. Die ausgewählten Parameter waren: Art des Waschmittels (d.h. Mischungsverhältnis von Triton X-100 zu SDS und zu Natriumhydrogencarbonat (siehe Tabelle 3); folgende Verhältnisse wurden verwendet 0,1:0,05:0,5, 0,22:0,22:0,22 und 0,11:0:0,54), Anzahl Spülzyklen (0,1,2,3,4,5) und die Waschmittelkonzentration (0,0,0,5,1,0,1,5,2,0,2,5,3,0 in g/l).

Diese ausgewählten Parameter wurden in der erstellten DoE Software eingepflegt. Mit den bereits verfügbaren Vorversuchsdaten konnte die Optimierung der weiteren Versuche gestartet werden. Dabei ergaben sich mehrere Schwierigkeiten, die vorab nicht zu sehen waren:

- 1. Pro Prozess und Zielgröße musste ein Optimierungssystem erstellt und optimiert werden. Diese, insgesamt sechs Optimierungssysteme, sorgten für eine große Menge an Daten, und zwar zu jeweils sechs Vorschlägen. Die Vorschläge lagen meist in einem ähnlichen aufgrund der entsprechend gewählten Parameter Einstellungsbereiche. Jedoch musste vor jeder Labormessung geschaut werden, welche Einstellungen nun die besten sind. Dies sorgte für etwas mehr händische Aufgaben als vorgesehen und sorgte für Messungen mit gleichen Parametereinstellungen. Dies wurde erkannt und durch ein Prüfsystem behoben. Dieses prüfte Parametereinstellungen und gab eine Rückmeldung, ob die Variante bereits gemessen wurde.
- 2. Durch das Hinzufügen eines bisher ungenutzten Waschmittels, fehlten den Optimierungssystemen dazu nötige Informationen. Daher war das neue Waschmittel in jedem Vorschlag beinhaltet. Dadurch wurden wenige bis keine neuen Messungen mit den anderen Waschmitteln durchgeführt.
- 3. Durch die Dauer eines Laborversuchs (ca. 1 Arbeitstag) wurden die sechs Optimierungssysteme nicht dauerhaft laufen gelassen. Die neu verfügbaren Daten wurden jeweils in ein neu gestartetes Optimierungssystem geladen, wobei nur in einem der sechs wirklich neue Daten verfügbar waren (da nur ein Versuch durchgeführt wurde). Dies sorgte für Komplikationen bei der Auswertung des DoE, sodass der Erfolg der DoE Messungen über die Ergebnisse der KI erfolgt.

AP 3.2 Aufbau eines Sensorarrays im Labormaßstab

In diesem Teil-AP wurde prozessanalytischer und verfahrenstechnische Aufbau der gesamten Sensorumgebung vollzogen und hinsichtlich der Eignung für statistische Versuchsplanung, d.h. Definitiv Screening Design mit DesignExpert12 untersucht. Diese Arbeiten erfolgten im Einklang mit AP1 und AP2. Im ersten Schritt wurde ein verfahrenstechnisch korrekte R&I-Schema von der dem Sensormesskabinett erarbeitet (siehe Abbildung 5).

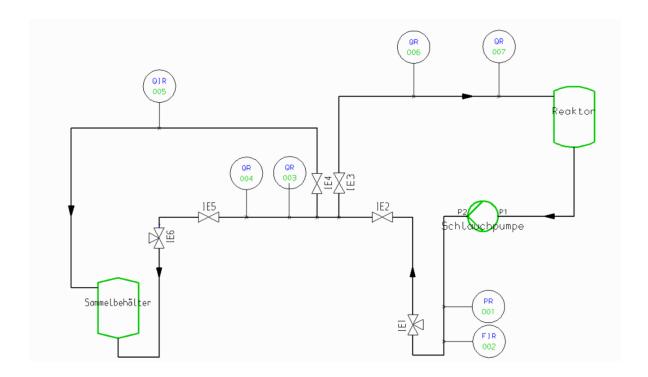


Abbildung 5: Rohrleitungs- und Instrumentenfließbild (RI-Fließbild) des Versuchsaufbaus. Die verwendeten Abkürzungen stehen dabei für: PR 001: Druckmessung; FIR 002: Durchflussmessung und - anzeige; IE1, IE6: 3-Wege-Ventile; IE2, IE3, IE4, IE5: Absperrventile; QR 003: pH-Messung; QR 004: Leitfähigkeitsmessung; QIR 005: Messung und Anzeige des Messwertes der Carbonathärte; QR 006: Spektralsensor zur Messung von CSBeq/CODeq, BSBeq und SAK; QR 007: Trübungsmessung; Durchfluss erfolgt in Pfeilrichtung.

In den Abbildungen 6 und 7 ist der finale Aufbau gezeigt. Die Prozessmess- und Prozessanalysentechnik für dieses Projekt ist ausgestattet mit verschiedenen Sensoren zur Messung der für Abwässer wichtiger Parameter. Gemeint sind pH-Wert, Leitfähigkeit, Carbonathärte, CSB_{eq}, BSB_{eq}, Trübung sowie die Absorptionswerte für die Wellenlängen 210 nm, 254 nm und 360 nm. Druck und Durchflussgeschwindigkeit werden ebenfalls gemessen und beobachtet, da bestimmte Sensoren eine Druckbegrenzung besitzen. Andere wiederum benötigen eine gewisse Anströmgeschwindigkeit, um einen Messwert aufzunehmen. Der Vorteil der Prozessanalytik besteht darin, dass eine zeitgleiche Aufzeichnung aller Parameter über einen längeren Zeitraum möglich ist. Somit werden im Gegensatz zu den Offline-Analysemethoden durch geringeren Aufwand mehr Daten aufgenommen und anschließend auch mit in die Auswertung einbezogen.

Bei dem Reaktor handelt es sich um einen Bench-Top Bioreaktor, der hier als Vorlagereaktor für die Modellwaschflotte dient. Das darin eingebaute Rührorgan, eine Double-Rushton-Turbine mit radialer Hauptbeschleunigungsrichtung, sorgt für eine Homogenisierung der Waschflotte. Mit einer Rührgeschwindigkeit von 50 rpm wird eine ausreichende Homogenisierung im laminaren Strömungsbereich gewährleistet und gleichzeitig die Tendenz zur Schaumbildung niedrig gehalten. Der Schaum stellt eine Problematik dar, da es sich bei diesem um gefangene Gasblasen im Flüssigmedium handelt. Diese Luftblasen können die Messungen durch die Sensoren beeinflussen und verfälschen.

Mit Hilfe einer 3-Rotor-Schlauchpumpe wird die Waschflotte aus dem Vorlagereaktor angesaugt und durch einen Neoprenschlauch an die Prozessmesstechnik weitergeleitet. Gemessen werden dann der Relativdruck durch einen Drucktransmitter mit keramischer Messzelle. Vor dem Drucktransmitter ist zusätzlich ein passiver Pulsationsdämpfer eingebaut, welcher dazu dient, den Durchflusswiderstand und die Druckschwankungen zu verringern, um eine homogene Förderung des Mediums sicherzustellen. Die Durchflussgeschwindigkeit wird durch ein magnetisch-induktives Durchflussmessgerät ermittelt, dessen Prinzip auf elektrisch leitfähigen Flüssigkeiten in Rohrleitungen und der daraus gemessenen Spannung beruht. Nach dem Durchflussmessgerät ist durch ein 3-Wege-Ventil eine Probeentnahme möglich. Die entnommene Probe wird anschließend für die Offline-Analysemethoden gebraucht.

Der pH-Sensor und Leitfähigkeitssensor sind in einer Durchflusszelle mit einem Gewinde eingebaut, wodurch die Sensoren auch immer aus der Durchflusszelle herausgenommen werden können, ggf. für die Reinigung.

Für die Messung der Carbonathärte ist der Testomat 2000 Duo zuständig. Die Messung ist auf eine Titration zurückzuführen. Es erfolgt eine automatische Zugabe einer Indikatorlösung in die Wasserprobe. Die bis zum Farbumschlag, welcher durch einen optischen Empfänger erkannt wird, gebrauchte Menge wird bestimmt und anschließend der gemessene Wert in °d angegeben. Die Probe wird nach der Titration automatisch verworfen und in dem Sammelbehälter aufgenommen.



Abbildung 6: Bildaufnahme der Vorderseite des Sensorverbunds.

Die Buchstaben stehen jeweils für: (a) Schlauchpumpe; (b) Pulsationsdämpfer; (c) Drucksensor; (d) Durchflussmessgerät; (e) Control Tower für Reaktor, welcher für den Rührer genutzt wird; (f) pH-Sensor; (g) Leitfähigkeitssensor; (h) TriBox 3 zur Anzeige der Summenparameter; (i) Testomat; (j) LabView-Programm zur Anzeige und Speicherung der Messwerte. Die Ventile sind jeweils mit römischen Zahlen (I-IV) versehen. Die Möglichkeiten zur Proben-ahme werden mit einem Pfeil angedeutet und sind mit arabischen Zahlen versehen.



Abbildung 7: Bildaufnahme der Rückseite des Sensorverbunds.

Die Kennzeichnung durch Buchtstaben stellen folgende Elemente der Prozess- und Analysenmesstechnik dar: (k) Vorlagereaktor für die Modellwaschflotte; (I) Trübungssensor; (m) OPUS-Sensor; (n) Schaltschrank mit dem IntelNUC-Rechner und dem Analog-Digital-Wandler; (o) Sammelbehälter: Die Möglichkeiten zur Probenahme sind mit einem orangenen Pfeil gekennzeichnet. Die Positionen zur Möglichkeit der Probeentnahme sind jeweils mit orangenen Pfeilen und den Zahlen 1, 2, 7 und 8 versehen.

Der UV-Spektralsensor *OPUS* dient zur Aufzeichnung der Absorptionsspektren von Stickstoffund Kohlenstoffverbindungen im UV-Bereich (200 nm – 360 nm). Zur Ermittlung der Absorptionswerte wird die Intensität I des Lichts, welches nicht von dem Medium absorbiert wird, durch ein Spektrometer aufgezeichnet und mit der Intensität I₀ von Reinstwasser verglichen. Mit dem Lambert-Beerschen Gesetz kann das Absorptionsmaß ermittelt werden. Der Sensor ist zudem in der Lage durch die hinterlegten theoretischen Absorptionsspektren Werte für Summenparameter wie CSB und BSB zu ermitteln. Diese Daten beruhen auf die durch den Hersteller als typisch erachteten Werte.

Nach dem OPUS-Sensor befindet sich der Trübungssensor, welcher ebenfalls in einer Durchflussmesszelle eingebaut ist. Wird ein Lichtstrahl durch ein optisch trübes Medium gelenkt, wird er je nach Größe und Anzahl der im Medium enthaltenen Partikel gestreut. Durch eine Photodiode, dem Detektor, wird die Intensität I des gestreuten transmittierten Lichts gemessen und die Transmission T im Verhältnis zur Intensität eines Mediums ohne Partikel I₀ ermittelt.

Nach dem Durchlauf der Messung wird die Waschflotte wieder in den Vorlagereaktor zugeführt, wodurch mehrere Wiederholungen des Messablaufs möglich sind.

Das gesamte verfahrenstechnische und prozessanalytische Konzept wurde hinsichtlich der Richtigkeit, Präzision, Akkumulation der Verunreinigungen (d.h. Reinigung- und Wartungszyklen) und Anpassung der Sensoren an die Versuchsvariabilität validiert. Bei pH, Leitfähigkeit und

Carbonathärte waren vor allem Druckschwankungen für Verfälschungen verantwortlich, was im Laufe der Versuche optimiert wurde. Der Online-Photometer und Trübungs-Sensoren reagierten sensibel auf Akkumulationen der Verunreinigungen (u.a. wurde die Kalibrierung des Online-Photometers verfälscht). Diesen Effekten wurde während der Versuche ebenfalls entgegengewirkt. In Abbildung 8 sind die Effekte der Reinigung auf den OPUS-Sensor dargestellt.

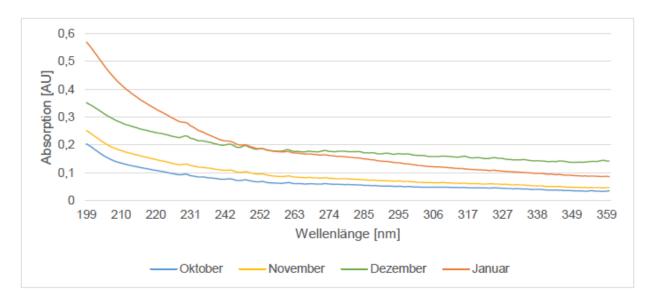


Abbildung 8: Aufnahme der Nulllinie vor und nach dem Reinigungsprozess.

Verschiebung der Nulllinie über die Zeit: Abgebildet sind die Absorptionsspektren von VE-Wasser im Zeitraum von Oktober (blau) bis Januar (rot), welches die Nulllinie des UV-Spektrometers darstellt.

AP 3.3 Aufbau Datenaufnahme und -aufzeichnung

HS entwickelte eine Software mit LabView zum Einlesen der Sensoren. Die Sensoren wurden mittels einer AD-Karte von National Instruments eingelesen. In der LabView Software im Reiter Online (siehe Abbildung 9) wurden die Parameter angezeigt, die für die ausgewählte Messung eingestellt werden sollten. Beispielsweise die Waschtemperatur, die Waschdauer, Anzahl der Spülzyklen, etc. Die Sensordaten waren auf der rechten Seite der Benutzeroberfläche sichtbar. Damit war es möglich die Sensoren während einer Messung zu überwachen und bei möglichen falschen Werten (beispielsweise Werte, die nicht messbar oder physikalisch unmöglich sind, beispielsweise der Wert für pH muss im Bereich zwischen 0 und 14 liegen) die Messung abzubrechen und das Messsystem zu prüfen.

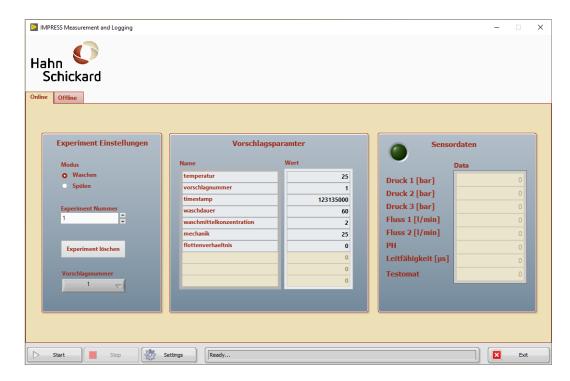


Abbildung 9: Bedienoberfläche für die Online-Sensoren zur Überwachung des laufenden Prozesses

Im Reiter Offline (zu sehen in Abbildung 10Abbildung 10: Bedienoberfläche für die Offline-Daten. Hier können die gemessenen Werte für die Datenbank eingegeben werden.) konnten die im Labor gemessenen Werte in die Datenbank eingepflegt werden. Dazu wurden zusätzlich der durchgeführte Vorschlag dokumentiert (Vorschlagsnummer), die Experimentnummer (zur Nachvollziehbarkeit und zur Zuordnung zu den Online-Daten), sowie das Datum und die Uhrzeit der Probeentnahme und der Labormessung. Im Feld Bemerkungen konnten zusätzliche Informationen hinterlegt werden.

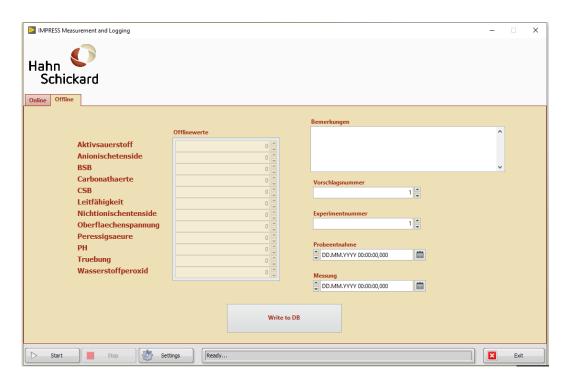


Abbildung 10: Bedienoberfläche für die Offline-Daten. Hier können die gemessenen Werte für die Datenbank eingegeben werden.

Die Software konnte planmäßig und fristgerecht entwickelt werden. Durch die gemeinsamen Gespräche zwischen HIT und HS konnte die Software auf die Bedürfnisse seitens HIT (Online und Offline-Messungen) angepasst und die nötigen Schnittstellen (Datenbank) für HS eingebunden werden.

AP 3.4 Sequentielle Erzeugung & Analyse Modellwaschwässer

Für die sequenziellen Wasch- und Spülversuche in Einklang mit der statistischen Versuchsplanung, d.h. Definitiv Screening Design, wurde eine Laborwaschmaschine, der sogenannte Labomat verwendet (siehe Abbildung 11). An einer ums sich selbst rotierenden Welle können acht verschließbare Becher angebracht werden. Jeder Becher fasst ein Volumen von 500 mL. Einer der Becher ist mit einem Temperaturfühler ausgestattet. Anhand dessen Messungen werden Aufheiz- und Abkühlphasen geregelt. Mithilfe der Infrarotstrahler wird der Apparat beheizt. Gekühlt wird mit einem Gas-Flüssig-Wärmetauscher unter Verwendung von Kühlwasser. Je nach Umgebungsbedingungen wie Temperatur des Kühlwassers oder Volumen der eingefüllten Flüssigkeiten in den Bechern kann die Aufheiz- und Abkühlzeit variieren. Die Zeit richtet sich nach den eingestellten Grenzwerten, wie 40 °C, 60 °C oder 80 °C für die Aufheizphasen und 30 °C beim Waschen und 20 °C beim Spülen für die Abkühlphase. Die Drehbewegung der Welle ist ähnlich wie bei handelsüblichen Waschmaschinen reversierend. Somit ändert sich alle 90 Sekunden die Drehrichtung. Die Rotation ist auf 60 rpm (*rounds per minute*) festgelegt.



Abbildung 11: Laborwascheinrichtung Labomat.

Dabei entsprechen die Nummerierungen folgenden Elementen: 1: um sich selbst rotierende Welle; 2: Becher mit Temperaturfühler; 3: Infrarotstrahler; 4: Einleitstelle der heruntergekühlten Kühlluft nach Gas-Flüssig-Wärmetauscher.

Der prinzipielle Versuchsablauf im Rahmen der statistischen Versuchsplanung ist in Abbildung 2 gezeigt. Für einen Versuch muss dabei im ersten Schritt ein Modellprozesswasser und ein Spülwasser hergestellt werden. Anschließend erfolgt ein Waschgang von Textilien mit dem Modellprozesswasser im Labomaten. Danach werden die Textilien mit dem Spülwasser ein bis fünf Mal gewaschen. Die Wasch- und Spülflotten werden online durch die Sensortechnik analysiert. Aus dem Sensorverbund werden jeweils zwei Proben von Wasch- bzw. Spülflotte genommen. Die Proben werden mit laboranalytischen Methoden offline vermessen. Im letzten Schritt werden Sensorverbund und Laborwaschmaschine gereinigt. Jeder einzelne Schritt wurde im Rahmen des Projekts validiert und definiert, z.B. Ansetzen von Modellprozess- und Spülwasser. Weiterhin wurde der gesamte Versuchsablauf durch ein fundiertes Datenmanagement untermauert. Das Konzept ist hierbei in der Abbildung 12 dargestellt.

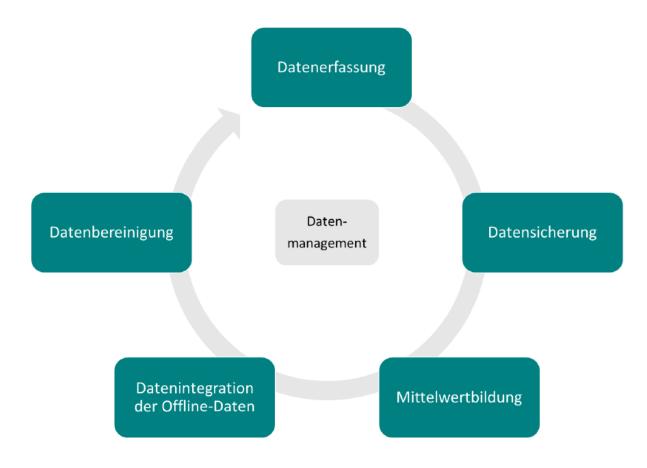


Abbildung 12: Zyklus des Datenmanagementkonzepts.

Hierbei werden die Daten über LabView-Umgebung, PostGreSQL-Datenbank und Python-Prozeduren erfasst, als csv.-Formate auf Cloud gesichert, grundlegend durch von HS festgelegte Python-Prozeduren bereinigt (u.a. Mittelwertbildung der Sensorsignale). Anschließend erfolgt die Integration aller Daten in die Software für statistische Versuchsplanung, nämlich DesignExpert12. Es findet eine sehr intensive Datenanalyse statt, die als Kernstück des Arbeitspakets angesehen werden kann. Zunächst wurde im Rahmen der Analyse die statistische Power, d.h. die Güte der statischen Analysen (u.a. ANOVA) für jede Einflussgröße betrachtet. Die statistische Power sollte für zuverlässige Aussagen mindesten über einem Wert von 80 % liegen (siehe Abbildung 13). Während die Power bei allen Haupteffekten sogar über einem Wert von 95 % liegt, erreicht keiner der quadratischen Effekte einen Wert von 80 %. Dies liegt an der Verkürzung des Versuchsplanes wegen Akkumulation der Tensidverunreinigungen (wird im weiteren Verlauf dieses Kapitels noch detaillierter erläutert). Durch die niedrige Power der quadratischen Effekte können diese in der weiteren Auswertung nicht berücksichtigt werden. Da jedoch der Hauptfokus der Versuchsplanung auf einem Screening liegt, war es nicht notwendig (quadratische Effekte und höhere Polynome sind für Anleitung von quantitativen Zusammenhängen notwendig; dieses Ziel wird durch eine weitere von HS erstellte Versuchsdurchführung nämlich Bayesische Optimierung erreicht).

V	0.70	Was	chen	Spü	len
Variable	Größe	Ri ²	Power	Ri ²	Power
Α	Waschtemperatur	0,4614	95,1 %	0,4614	95,1 %
В	Waschdauer	0,3005	99,0 %	0,3005	99,0 %
С	Waschmittelkonzentration	0,3007	98,9 %	0,3007	98,9 %
D	Konz. Bleich-/Desinfektionsmittel	0,3811	97,2 %	0,3811	97,2 %
E	Menge Modellverschmutzung	0,3818	97,6 %	0,3818	97,6 %
F	Waschmechanik	0,3950	95,1 %	0,3950	95,1 %
G	Anzahl Spülzyklen	0,3624	97,6 %	0,3624	97,6 %
Н	Spülmechanik	0,2690	99,0 %	0,2690	99,0 %
Y	Waschmittelart	0,2908	99,1 %	0,2908	99,1 %
Z	Flottenverhältnis Waschen	0,4095	97,8 %	0,4095	97,8 %
A'	Flottenverhältnis Spülen	0,2484	99,4 %	0,2484	99,4 %
B'	Beschaffenheit Spülwasser	0,4327	97,3 %	0,4327	97,3 %
A²	(Waschtemperatur) ²	0,3530	68,3 %	0,3530	68,3 %
B²	(Waschdauer) ²	0,9073	8,6 %	0,9073	8,6 %
C²	(Waschmittelkonzentration)²	0,7187	26,7 %	0,7187	26,7 %
D²	(Konz. Bleich-/Desinfektionsmittel) ²	0,3530	68,3 %	0,3530	68,3 %
E²	(Menge Modellverschmutzung) ²	0,7073	27,6 %	0,7073	27,6 %
F²	(Waschmechanik)²	0,7293	25,9 %	0,7293	25,9 %
G²	(Anzahl Spülzyklen)²	0,3530	68,3 %	0,3530	68,3 %
H²	(Spülmechanik)²				

Abbildung 13: Bestimmtheitsmaß Ri2 und statistische Power sämtlicher Einflussfaktoren. Die Benennung der Variablen ist wie folgt: X: nummerische Größe; X': kategorische Größe; X²: quadrierte nummerische Größe.

Der weitere Schritt, die Explorative Datenanalyse dient dazu sich einen ersten Überblick über die Korrelationen der Einflussgrößen gegenüber der Zielgrößen zu verschaffen. Hier ergeben sich für Waschen und Spülen unterschiedliche Korrelationsmatrizen (auch Korrelogramme genannt). Diese werden in der Abbildung 14 gezeigt. Im nächsten Schritt soll geprüft werden, zu welchen Einflussfaktoren die jeweilige Zielgröße signifikante Wechselwirkungen aufweist. Diese Untersuchung wird für jede Zielgröße vorgenommen. Iterativ wird der p-Wert für jeden Einflussfaktor geprüft und diese je nach dem Beibehalten oder aus dem Modell entfernt. Dieses Vorgehen wird nicht nur händisch durchgeführt, sondern auch mithilfe einer automatischen Auswahlfunktion für die verschiedenen Auswahlkriterien "p-values < 0,05" (vorwärts und rückwärts), "AICc" (Akaike-Informationskriterium), "BIC" (Bayessches Informationskriterium; vorwärts und rückwärts) und "Adj R-Squared < 0,05" (Adjustes R-Squared). Aufgrund des verkürzten Versuchsplans werden diese Selektionen nur für lineare Modelle (Haupteffekte) durchgeführt, was jedoch auch dem Ziel des Arbeitspakets entspricht. In der Abbildung 15 ist beispielhaft die Auswahl der signifikanten Einflussgrößen auf den Zielparameter "anionische Tensidkonzentration" gezeigt.

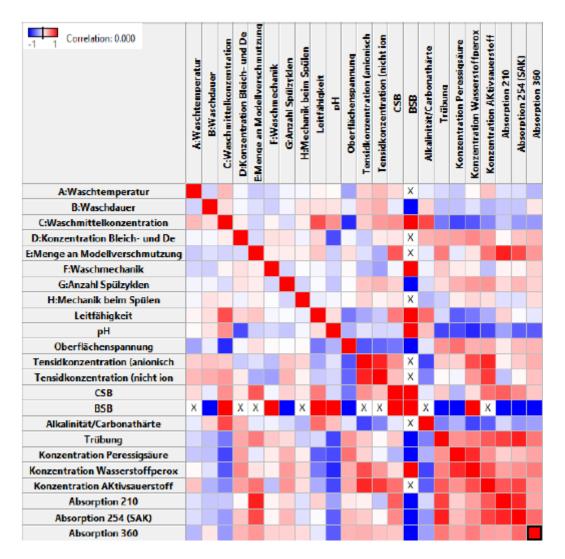


Abbildung 14: Korrelationsmatrix Waschen des Definitive Screening Designs aus Design Expert 12. Die Farbskala kennzeichnet die Stärke der Korrelationen. Nahe bei ±1 steht für hohe Korrelationen. Die BSB-Korrelationen werden aufgrund der wenigen Messpunkte als nicht aussagekräftig gewertet.

Einflussgröße	p-value
C-Waschmittelkonzentration	< 0.0001
D-Konzentration Bleich- und Desinfektionsmittel	0,0058
Y-Art des Waschmittels	< 0.0001
A'-Flottenverhältnis Spülen	0,0019

Abbildung 15: Manuell selektierte, signifikante Einflussfaktoren für die Zielgröße "anionische Tensidkonzentration" (Waschen).

Die Software *Design Expert 12* erstellt aus den übrig gebliebenen Einflussfaktoren diverse Streudiagramme, anhand derer geprüft werden kann, ob die Annahmen der statistischen Versuchsplanung erfüllt sind. Hierzu zählen die Normalverteilung der Residuen und die Unabhängigkeit der Reihenfolge. Anhand des in Abbildung 16 dargestellten Streudiagrammes

der Residuen (Plot der Residuen) können Ausreißer oder nichtlineare Zusammenhänge identifiziert werden. Als Residuen werden die Abstände der Messpunkte und der geschätzten Regressionsgerade bezeichnet. In Abbildung 16 stimmen die Messpunkte gut mit der Regressionsgerade überein. Die äußersten Messpunkte (Versuch 4: grün; Versuch 12: blau) könnten auf Ausreißer hindeuten.

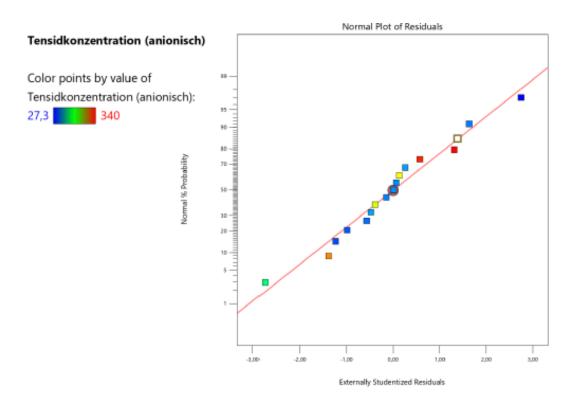


Abbildung 16: Streudiagramm der Residuen für die Zielgröße "anionische Tensidkonzentration" für die in Tabelle 4 ausgewählten Einflussgrößen.

Die bisher vorgestellte Datenanalyse wird für sämtliche Zielgrößen mit den verschiedenen Auswahlkriterien "p-values < 0,05" (vorwärts und rückwärts), "AICc, "BIC" (vorwärts und rückwärts) und "Adj R-Squared < 0,05" durchgeführt. Die Ergebnisse der als signifikant ermittelten Einflussgrößen werden für Waschen und Spülen zur Auswertung jeweils in ANOVA-Korrelationsmatrizen (Abbildungen 17 und 18) aufgetragen. Dabei kennzeichnen die dunkel gefärbten Einheiten die Signifikanzen, die bei allen Auswahlkriterien auftreten. Die hell hinterlegten Kästchen zeigen Signifikanzen, die sich nicht bei allen Auswahlkriterien ergeben. Für die Hauptzielgrößen werden die drei Einflussgrößen gesucht, die die größten signifikanten Wechselwirkungen aufweisen. In der Abbildung 17 ist der Waschprozess dargestellt. Die Einflussgrößen "Waschmittelkonzentration", "Art des Waschmittels" und "Anzahl der Spülzyklen" weisen für alle drei Haupteinflussgrößen signifikante Wechselwirkungen auf. Auch für das Spülen sind die signifikanten Einflüsse in einer ANOVA-Korrelationsmatrix (Abbildung 18) aufgetragen. Ebenso wie beim Waschen werden die drei einflussreichsten Einflussfaktoren in Bezug auf die drei Hauptzielgrößen gesucht. Auch beim Spülen weisen die Einflussgrößen "Anzahl der Spülzyklen", "Art des Waschmittels" und "Waschmittelkonzentration" die meisten signifikanten Wechselwirkungen im Hinblick auf die drei Hauptzielgrößen auf.

Waschen	A-Waschtemperatur	B-Waschdauer	C-Waschmittelkonzentration	D-Konzentration Bleich- und Desinfektionsmittel	E-Menge an Modellverschmutzung	F-Waschmechanik	G-Anzahl Spülzyklen	H-Mechanik beim Spülen	Y-Art des Waschmittels	Z-Flottenverhältnis Waschen	A'-Flottenverhältnis Spülen	B'-Beschaffenheit Spülwasser
R1: Leitfähigkeit												
R2: pH-Wert												
R3: Oberflächenspannung												
R4: Tensidkonzentration (anionisch)												
R5: Tensidkonzentration (nichtionisch)												
R6: CSB												
R7: BSB												
R8: Carbonathärte												
R9: Trübung												
R10: Konzentration Peressigsäure												
R11: Konzentration Wasserstoffperoxid												
R12: Konzentration Aktivsauerstoff												
R13: Absorption 210												
R14: Absorption 254 (SAK)												
R15: Absorption 360												

Abbildung 17: Korrelationen zwischen Einfluss- (A bis B') und Zielgrößen (R1 bis R15) (Waschen, DSD). Dunkel gekennzeichnet sind Signifikanzen, die sich bei allen Auswertungsmodellen ergeben haben. Hell gekennzeichnet, sind Signifikanzen, die nicht bei allen Auswertungsmodellen aufgetreten sind. Nicht auswertbar ist die Zielgröße BSB5.

Spülen	A-Waschtemperatur	B-Waschdauer	C-Waschmittelkonzentration	D-Konzentration Bleich- und Desinfektionsmittel	E-Menge an Modellverschmutzung	F-Waschmechanik	G-Anzahl Spülzyklen	H-Mechanik beim Spülen	Y-Art des Waschmittels	Z-Flottenverhältnis Waschen	A'-Flottenverhältnis Spülen	B'-Beschaffenheit Spülwasser
R1: Leitfähigkeit												
R2: pH-Wert												
R3: Oberflächenspannung												
R4: Tensidkonzentration (anionisch)												
R5: Tensidkonzentration (nichtionisch)												
R6: CSB												
R7: BSB												
R8: Carbonathärte												
R9: Gesamthärte												
R10: Trübung												
R11: Konzentration Peressigsäure												
R12: Konzentration Wasserstoffperoxid												
R13: Konzentration Aktivsauerstoff												
R14: Absorption 210												
R15: Absorption 254 (SAK)												
R16: Absorption 360												

Abbildung 18: Korrelationen zwischen Einfluss- (A bis B¹) und Zielgrößen (R1 bis R16) (Spülen, DSD). Dunkel gekennzeichnet sind Signifikanzen, die sich bei allen Auswertungsmodellen ergeben haben. Hell gekennzeichnet, sind Signifikanzen, die nicht bei allen Auswertungsmodellen aufgetreten sind. Nicht auswertbar sind die Zielgrößen BSB, Konzentration Wasserstoffperoxid, Konzentration Aktivsauerstoff, Absorption 210, Absorption 254.

Die bereits erwähnte Verkürzung der Versuche ist durch eine Verschleppung der Tenside aus dem Standardtestgewebe entstanden. Die Verkürzung hatte keine negativen Effekte auf die statistischen Auswertungen. Durch Optimierung der Vorreinigung des Standardtestgewebes (siehe Abbildung 19) in industriellen Waschmaschinen konnte für die von HS-programmierte Bayesische Optimierung die Akkumulation der Tensidhaltigen Verunreinigungen ausgeschlossen

werden. Die weiteren Versuche im Rahmen der Bayesischen Optimierung brachten keine Widersprüche in Bezug auf die wichtigen Einflussgrößen im Wasch- und Spülprozess. In der Optimierung (z.B. Bayesischen wurde mit mehr Faktorstufen statt Waschmittelkonzentrationen) gearbeitet. Es wurden insgesamt (inkl. Screening) 84 Versuche durchgeführt und ausgewertet. Die weiterführenden Versuche der Bayesischen Optimierung waren wichtig, um die Güte der KI-Voraussagen zu verbessern und auch präzisere quantitative Funktionszusammenhänge z.B. zwischen Oberflächenspannung und Waschmittelkonzentration darzustellen (siehe Abbildung 20). Durch die Bayesische Optimierung, die auf den Ergebnissen des Definitive Screening Designs basiert, wurden ausschließlich Versuchsvorschläge noch unerforschter Faktorstufen ausgegeben. Daher liegen die untersuchten Waschmittelkonzentrationen für beide Versuchspläne in unterschiedlichen Bereichen. Unter der Annahme, Oberflächenspannung die ohne eine Zugabe (Waschmittelkonzentration: 0 g/L) zu dem Modellprozesswasser 72,7 ± 2 mN/m (20 °C) betragen müsste, könnten für die Ergebnisse der Bayesischen Optimierung ebenfalls von polynomischen Zusammenhängen ausgegangen werden. Für den Spülprozess (Desorption der Tenside von der Oberfläche) liegen ebenfalls polynomielle/exponentielle Zusammenhänge vor. Für beide wurden quadratische Trendlinien gewählt, da diese die Bestimmtheitsmaße aufweisen (siehe Abbildung 21). Zusammenfassend lässt sich aus der Auswertung der Bayesischen Optimierung schließen, dass die Einflussgrößen, die durch das Definitive Screening Design als signifikant eingestuft wurden, bestätigt werden können. Bei der Auswertung wurde sich auf die Zielgröße "dynamische Oberflächenspannung" konzentriert. Diese stellt einen vielversprechenden Prozessparameter für das Training des Softsensors dar. Eine weitere Auswertung der Messungen für die Zielgrößen "anionische" und "nichtionische" Tensidkonzentration wird weiteren Aufschluss über die Wechselwirkungen der Parameter geben.

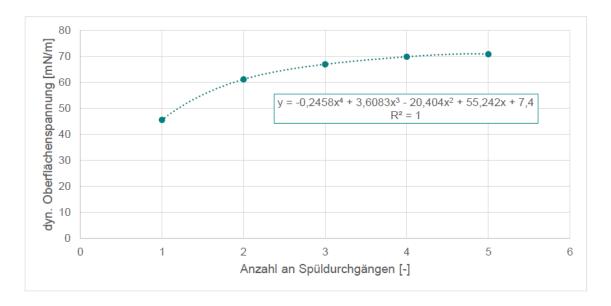


Abbildung 19: Oberflächenspannung in mN/m über Anzahl an Spüldurchgängen während Textilreinigung der Baumwoll-Standardgeweben.

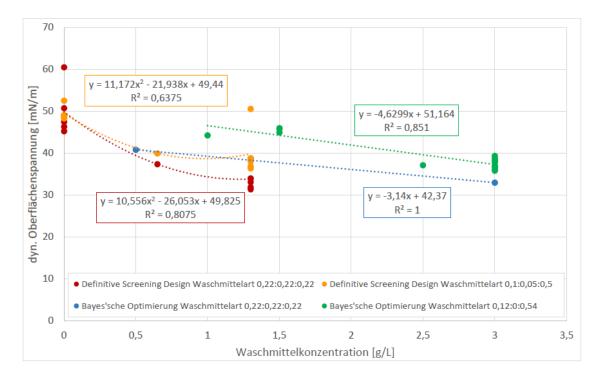


Abbildung 20: Oberflächenspannung in mN/m über Waschmittelkonzentration in g/L. Unterschieden wird zwischen den Ergebnissen des Definitive Screening Designs und der Bayes'schen Optimierung. Diese wiederum werden je nach Art des Waschmittels (g/L Niotensid: g/L Aniotensid: g/L NaHCO₃) differenziert. Diese Angaben beziehen sich je auf 0,65 g/L insgesamten Waschmittel.

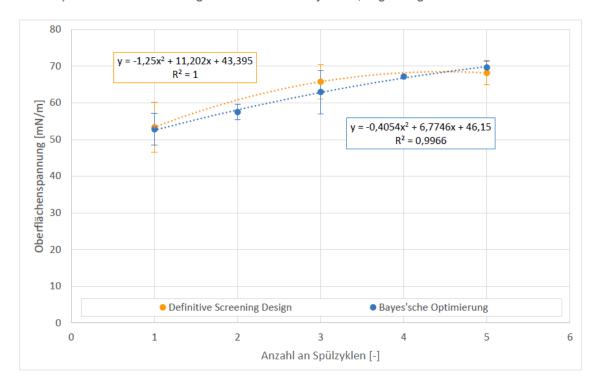


Abbildung 21: Oberflächenspannung in mN/m über Anzahl der Spülzyklen. Unterschieden wird zwischen den Daten des Definitive Screening Designs und der Bayes'schen Optimierung. Für jede Faktorstufe der Spülzyklenanzahl sind die Mittelwerte und die Standardabweichungen aufgetragen.

Arbeitspaket 4: Entwurf des Tensid-Softsensors

AP 4.1 Datenanalyse und Aufbau von Machine Learning-Modellen

Die ersten Daten die untersucht wurden waren die Vorversuche. Hier wurde untersucht, welche Parameter (Waschdauer, Waschtemperatur, Waschmittelmenge, etc.) den größten Einfluss auf die Zielgrößen (Tenside und Oberflächenspannung) hatten. Hier hat HS gemeinsam mit HIT die Analyse durchgeführt und sich auf mehrere Parameter festgelegt.

Um dies zu untersuchen wurde eine Korrelationsmatrix erstellt. Die Werte sind als Pearson-Korrelation dargestellt, was den linearen Zusammenhang der beiden Größen darstellt. Dabei steht ein Pearson-Wert von -1 für eine negative lineare Korrelation, dies bedeutet, dass der Wert des einen steigt, während der andere sinkt. Ein Pearson-Wert von 1 steht für eine positive lineare Korrelation, beide Werte steigen positiv. Für die Pearson-Korrelation ist das angestrebte Ziel also ein Wert nahe von -1 bzw. 1.

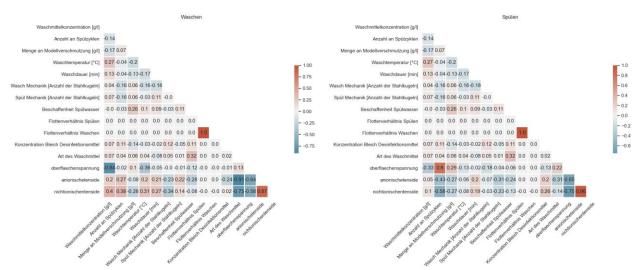


Abbildung 22: Diese Heatmap zeigt für das Waschen und Spülen, welche Einflussgrößen einen hohen Einfluss auf die Zielgrößen (Oberflächenspannung, anionische Tenside und nicht ionische Tenside) haben.

In Abbildung 22 sind besonders die unteren 3 Reihen interessant. Sie zeigen den Zusammenhang zwischen den Zielgrößen und den Parametern. Daraus konnte man sehen, dass die Waschmittelkonzentration und die Waschmittelart im Waschprozess besonders wichtig sind. Im Spülprozess wiederum sind die Anzahl der Spülzyklen sehr wichtig.

Diese drei Parameter wurden in den nachfolgenden Versuchen gezielt variiert, um eine möglichst gute Datengrundlage zu erhalten.

Außerdem lässt sich erkennen, dass zwischen der Oberflächenspannung und den Tensiden ein Zusammenhang besteht. Daher kann die Oberflächenspannung, wenn sie gut mittels einer künstlichen Intelligenz vorhergesagt werden kann, für die Tenside verwendet werden.

Es wurde weiterhin ermittelt, wie gut die Online- und Labormessungen zueinander korrelieren, siehe Abbildung 23. Hier wurde wieder die Pearson-Korrelation geprüft, sowie auch der Wert von \mathbb{R}^2 . Dieser gibt an, wie sehr die Messwerte um eine Gerade schwanken. Idealerweise liegt der Wert bei $\mathbb{R}^2 = 1$, was bedeuten würde, die Daten liegen genau auf einer Geraden (siehe Trübung).

Für die Werte von CSB_{eq} , BSB_{eq} und Alkalinität/Carbonathärte liegen nicht genügend Daten vor, um hier eine gute Aussage zu treffen. Zudem spielt die untere Messgrenze der Sensoren hier noch eine Rolle. Für die Sensoren pH, $Tr\"{u}bung$ und $Leitf\"{a}higkeit$ ließen sich hohe lineare Zusammenhänge erkennen.

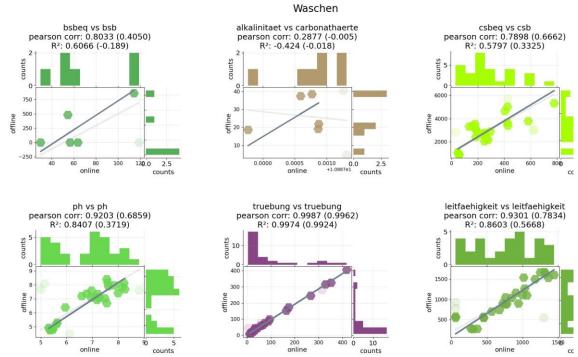


Abbildung 23: Zusammenhänge zwischen den Online und Offline gemessenen Messgrößen. Die Werte für die Pearson Korrelation und den R² zeigen die Werte für die Daten ohne Ausreiser (transparentere Datenpunkte), in Klammern mit Ausreiser.

Die Entwicklung der KI-Modelle wurde nach ungefähr der Hälfte der Labormessungen (sequentielle, statistische Versuchsplanung) begonnen. Dazu wurden die Messdaten untersucht, wobei auffiel, dass die Messdaten sich nach einer gewissen Zeit einpendeln, siehe Abbildung 24. Dies bedeutet, dass die Messdaten nur noch in einem gleichbleibenden Bereich schwanken. Dies passte zu den Prozessen, da keine weiteren Veränderungen des Prozesses während des Waschens/ Spülens vorgenommen wurden. Mit diesem Wissen konnte die Auswahl der zu berechnenden Merkmale schon stark vereinfacht werden. Folgende Merkmale wurden für jeden Sensor berechnet: Mittelwert, Standardabweichung, Median, 1. Quartil, 3. Quartil und der Quartilabstand. Mit diesen Merkmalen können die Daten vereinfacht abgebildet werden und die KI-Modelle trainiert werden.

Zur Verifikation der Aussagekraft der KI-Modelle, wurden die Daten in zwei bzw. drei Gruppen geteilt. Die Zuordnung geschah zufällig, wobei 90 % der Daten in die Gruppe "Training und Validierung", die anderen 10 % in der "Testgruppe" zugeordnet wurden. Die Trainings- und Validierungsdaten wurden verwendet, um die KI-Modelle zu trainieren (Trainingsdaten), zu prüfen wie das Modell auf ungesehene Daten reagiert und dementsprechend das Modell weiter bzw. anders zu trainieren (Validierungsdaten).

Wenn ein KI-Modell erstellt ist, dass die angesetzten Anforderungen erfüllt, kann auf die Testdaten geprüft werden, was das Modell schlussendlich leisten kann.

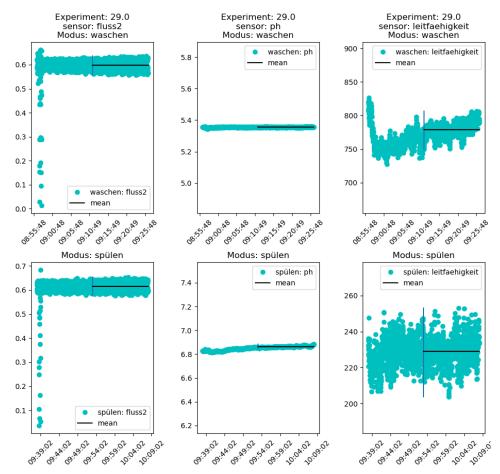


Abbildung 24: Beispielhafte Darstellung der Messwerte. Gut zu sehen ist hier das Einschwingen des Prozesses. Die horizontale Linie zeigt den Mittelwert, die vertikale Linie zeigt den Beginn, ab dem der Mittelwert bestimmt wurde.

Wie bereits beim DoE, wurden für jeden Prozess und jede Zielgröße ein Modell trainiert. Daraus ergaben sich sechs Modelle:

- Waschen Oberflächenspannung
- Waschen Nichtionische Tenside
- Waschen Anionische Tenside
- Spülen Oberflächenspannung
- Spülen Nichtionische Tenside
- Spülen Anionische Tenside

Es wurden verschiedene Modelle aus dem Bereich der Künstliche Intelligenz getestet und verglichen. Unter anderem wurden einfache neuronale Netze, Gradient Boosted Trees (kurz: GBT, deutsch: erweiterte Entscheidungsbäume) und Support Vector Machines. Die Modelle liefern vergleichbare Werte, wobei die GBT ein wenig besser waren. Daher wurde der Fokus auf dieses Modell gesetzt.

Entscheidungsbäume gehören zu den beliebtesten Modellen aus dem Bereich des maschinellen Lernens. Sie sind einfach verständlich und in komplexerer Form äußerst leistungsfähig. In Abbildung 25 ist ein einfacher Entscheidungsbaum zu sehen. In den Knoten (rot dargestellt) werden Werte des Datensatzes abgefragt und entsprechend des Schwellwerts an den nächsten

Knoten oder das nächste Blatt weitergeleitet. Die Blätter des Entscheidungsbaums stellen die Ausgabe bzw. die Vorhersage des Entscheidungsbaums dar.

Entscheidungsbäume lernen im Trainingsprozess, welche Merkmale an welchem Knoten und mit welchem Schwellenwert abgefragt werden müssen.

Gradient Boosted Trees sind eine erweiterte Version dieser einfachen Entscheidungsbäume. Die Ausgaben des ersten Baums gehen in den zweiten Baum, etc. Dadurch erhält man einen Zusammenschluss von Bäumen die aufeinander aufbauen. Dadurch ist das Gesamtsystem aufwändiger zu trainieren, erzielt aber bessere Ergebnisse wie einfache Entscheidungsbäume.

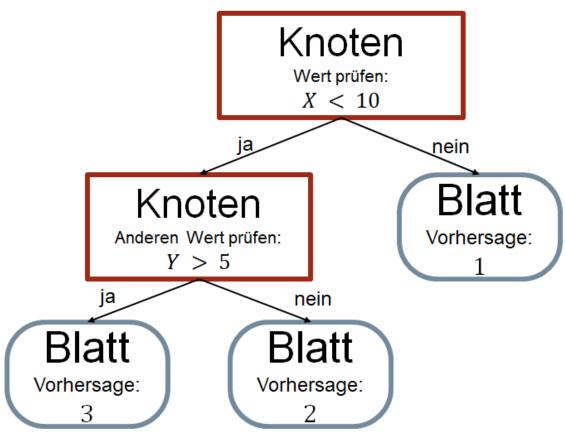


Abbildung 25: Einfacher Entscheidungsbaum

Es wurden mehrere Iterationen des GBT erstellt, um die beste Parameter-Kombination zu finden. Diese Parameter umfassen unter anderem die Größe der Bäume, die Anzahl der hintereinander gereihten Bäume, sowie mehrere Größen um das Training der Modelle zu beeinflussen. Der Mittlere Absolute Fehler (eng. mean absolut error (MAE)) wurde als Bewertungsgröße ausgewählt.

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} |\hat{Y}_i - Y_i|$$

Der MAE gibt an, wie viel die Modelle im Mittel Falsch liegen. Je geringer dieser Wert, desto besser ist das Modell. Die Werte müssen jedoch in Bezug auf den Wertebereich betrachtet

werden. In Beispiel (1) ist der MAE so groß wie der Wertebereich maximal groß ist. Damit entspricht es einer Abweichung von 100 %.

In Beispiel (2) ist der MAE gleich groß, jedoch ist der Wertebereich größer. Dadurch entspricht die Abweichung nur 10 %.

Formel (3) zeigt wie die Prozente berechnet wurden.

$$MAE = 1, Wertebereich: (0,1)$$
 (1)

$$MAE = 1, Wertebereich: (0,10)$$
 (2)

$$MAE_{prozentual} = \frac{MAE}{Wertebereich_{max}} \cdot 100\%$$
 (3)

Die Modelle wurden mit einem Teil der Daten trainiert, das heißt die Parameter für das Modell mathematisch festgelegt. Mit diesen Trainingsdaten wird das Model anschließend überprüft. Auf diese Daten sollte das Modell bereits ziemlich gut funktionieren. Interessant wird es anschließend, wie das Modell auf Daten antwortet, die es noch nicht gesehen hat. Hier kommen die Validierungsdaten ins Spiel. Mit diesen wird das Modell geprüft. Damit erhält man eine Antwort auf die Frage, wie das Modell auf neue Daten reagiert.

Die Messwerte der Sensoren pendeln sich nach einer gewissen Zeit auf einen Wertebereich ein. Daher sind keine komplexen statistischen Merkmale nötig. Daher wurden diese Merkmale ausgewählt: Mittelwert, Standardabweichung, Median, Perzentile 25, Perzentil 75 und der Interquartilsabstand.

Für die GBT wurden mittels Optimierungsverfahren die Optimalen Werte gefunden. Insgesamt werden 6 GBT-Modelle erstellt. Je ein Modell für die Zielgrößen (Anionische Tenside, Nichtionische Tenside, Oberflächenspannung), sowie für die Prozesse (Waschen, Spülen).

Nachfolgend die MAE-Ergebnisse für das Training der Daten, in Klammern jeweils die prozentuale Angabe wie in Formel (3) aufgezeigt.

Tabelle 6: Ergebnisse der GBT Modelle auf die Trainingsdaten

Prozess	Anionische Tenside	NichtionischeTenside	Oberflächenspannung		
Waschen	53,9 (7,2%)	55,4 (5,5%)	0,3 (0,4%)		
Spülen	5,2 (11,6%)	5,6 (3,7%)	0,2 (0,3%)		

Und hier die Ergebnisse für die Validierungsdaten:

Tabelle 7: Ergebnisse der GBT Modelle auf die Validierungsdaten

Prozess	Anionische	NichtionischeTenside	Oberflächenspannung		
	Tenside				
Waschen	30,5 (4,1%)	83,3 (8,3%)	2,3 (3,2%)		
Spülen	3,7 (8,1%)	13,1 (8,7%)	1,6 (2,2%)		

In den Daten ist gut ersichtlich, dass die Oberflächenspannung, durch die gegebenen Sensordaten gut vorhergesagt werden kann. Für die Tenside (anionische, nichtionische) sieht es dagegen etwas schlechter aus.

Firma Kannegiesser welche das Projekt im Projektbegleitenden Ausschuss begleitete zeichnete systematisch Prozessdaten (u.a. Oberflächenspannung) auf und stellte hohe Standardabweichungen fest. Die im September 2021 beim PA-Treffen vorgestellten KI Ergebnisse, mit einer Abweichung von 10-15 %, passen zu den Erfahrungen von Firma Kannegiesser und sind für sie akzeptabel.

Weiterhin war geplant künstliche Daten mittels Generative Adversarial Networks zu erstellen. Durch das Feedback des Projektbegleitenden Ausschusses, war nicht zu erwarten, dass die künstlich generierten Daten einen Mehrwert liefern. Daher wurde der Ansatz fallen gelassen.

AP 4.2 Sensitivitätsanalyse (Identifikation Sensorkombinationen)

Zur Prüfung des Einflusses einzelner Sensoren auf die Gesamtgenauigkeit des Softsensors wurde jeweils ein GBT mit jedem Sensor alleine trainiert.

Um die Aussagekraft der Versuche zu erhöhen, wurde jeder GBT 50 Mal pro Sensor neu trainiert. Damit konnten die Abweichungen des KI-Modells über verschiedene Trainingszyklen beobachtet werden. In Abbildung 26 wurde die mittlere Abweichung in Prozent aufgetragen. Hierbei wurden die Ergebnisse für die Validierungs- und Testdaten gemittelt.

Zu sehen ist, dass mit allen Sensoren die beste Performance erreicht wurde. Besonders bei der Oberflächenspannung hat sich der Opus Sensor als sehr wichtig gezeigt. Dieser Sensor vereint mehrere Messwerte in einem System (verschiedene Lichtwellen Absorptionsgrade, etc.)

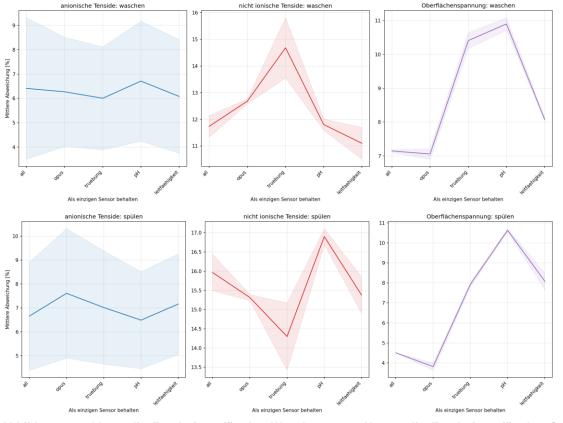


Abbildung 26: Oben: die Ergebnisse für den Waschprozess, Unten: die Ergebnisse für den Spülprozess. Jeweils der Mittelwert (Linie) und der Bereich der Standardabweichung (transparente Fläche). Die X-Achse zeigt den Vergleich der einzelnen Sensoren, wobei *all* als Vergleich dient (hier wurden alle Sensoren verwendet), und die jeweiligen Sensornamen den verwendeten Sensor darstellen.

AP 4.3 Erstellung des Tensid-Softsensormodells

Für den Aufbau des Softsensors wurde ein Modell mit allen Sensoren verwendet, da hier die Gesamtleistung der KI-Modelle am besten ist.

Damit war das Softsensor Modell erstellt, welche für das nächste Arbeitspaket verwendet werden sollte.

Arbeitspaket 5: Aufbau des Tensid-Softsensors

AP 5.1 Aufbau Datenaufnahme und -aufzeichnung

Für den Softsensor wurde ein Embedded Device entwickelt und aufgebaut. Dieses bestand aus einem RevolutionPi Compact, Anschlüssen für die Sensoren sowie einer industrietypischen 24V Spannungsversorgung. Weiterhin wurde ein Raspberry Pi 4 eingebaut, auf welche eine Datenbank läuft, sowie eine Visualisierung der Daten via Internetbrowser möglich war.

Die Sensoren wurden via analoger Schnittstelle und via Modbus Schnittstelle angeschlossen und entsprechend von der Software eingelesen.

Es wurden 2 Hardwareschalter am Gehäuse angebracht, mit welchen eine Umschaltung zwischen Wasch- und Spülprozess sowie das Starten und Stoppen einer Messung einstellbar ist. Dies wurde für eine einfachere Handhabung, sowie eine potenzielle Automatisierung, integriert. Das Embedded Device bzw. der Softsensor sind in Abbildung 27 dargestellt.



Abbildung 27: Der Softsensor mit seinem Innenleben. In Orange ist das Revolution Pi Compact zu sehen, links oben das Raspberry Pi 4, links unten die 24V Spannungsversorgung/ Spannungstransformation und rechts unten die Schalter mit den darunter liegenden Sensoranschlüssen.

AP 5.2 Aufbau Sensorhardware

In diesem Arbeitspaket wurde der Sensorverbund umgebaut mit dem Ziel das von HS aufgesetzte (siehe AP 5.1.) Embedded Gerät einzubinden. Im Rahmen des Austausches von Hardware wurden der AD-Wandler mit IntelNUC aus dem Aufbau entfernt. Die Neuverkabelung war damit verbunden, dass auch die Widerstände für die Messwerterfassung neu gesetzt werden mussten. Hier wurde im Rahmen der Validierung geprüft, ob Messwertschwankungen und Wackelkontakte vorlagen, gerade weil in Technikums-Umgebung mehr Vibration und Luftschwankungen (Temperatur, Feuchte etc.) entstehen. Nach geringfügigen Anpassungen konnte davon ausgegangen werden, dass die Messwerte sauber erfasst werden. Gerade im Technikum gelten hohe Anforderungen an die Sicherheit, so dass die gesamte Verkabelung überdacht und optimiert wurde, um ein Abreißen der Kabel zu verhindern. Letztendlich wurde auch die Peripherie des Sensorverbunds so gestaltet, z.B. Anpassung von der Monitorposition, dass die direkt berechneten Werte des Tensidsoftsensors direkt reagiert werden konnte, z.B. Unterbrechung der Versuche am Monitor und mechanisch im Aufbau. All diese Umbaumaßnahme und Anpassungen waren notwendig, um das Embedded Device optimal in den Sensorverbund einzubinden und wurden erfolgreich durchgeführt.

Die Sensoren wurden von HS mit dem Softsensor/ Embedded Device verbunden. Dies geschah via Analoger-Schnittstelle als auch via Modbus-Schnittstelle.

AP 5.3 Implementierung des Softsensors auf Embedded Gerät

Die Software des Softsensors sah zum Abschluss des Projekts, vereinfacht, wie folgt aus:

- Einlesen der KI-Modelle
- Prüfen, ob eine Messung gestartet werden soll
- Solange Sensordaten einlesen, bis eine vorgegebene Menge verfügbar ist, da sonst keine Merkmalsberechnung durchgeführt werden kann
- Die Merkmale auf die Sensordaten berechnen
- Bestimmung der Oberflächenspannung durch ein KI-Modell, die Rückgabe des KI-Modells zu den Merkmalen hinzufügen um Oberflächenspannung für die Tenside als Information zu verwerten
- Anionische und Nichtionische Tenside durch die KI-Modelle bestimmen lassen
- Daten in Datei bzw. Datenbank speichern.
- Daten darstellen/ visualisieren

Die Ausgabe auf dem Embedded Device selbst sah wie in Abbildung 28 dargestellt aus.

1649961884					Prozessschalter							
1649961885					Prozessschalter							
1649961886	Prozess	nicht	gestartet,	zum starten	Prozessschalter	umlegen.						
1649961887	Prozess	nicht	gestartet,	zum starten	Prozessschalter	umlegen.						
1649961888	Prozess	nicht	gestartet,	zum starten	Prozessschalter	umlegen.						
Prozess gestar	tet:											
Zeitstempel	Prozess	csb	truebung	pH	leitfaehigkei	t bsb	abs254	abs360	abs210	NIT	AN	0FS
1649961889	Spülen	9.5	11.55	10.97	10.04	1.33	0.01	0.01	0.27	nan	nan	nan
1649961891	Spülen	9.5	11.55	10.97	9.78	1.33	0.01	0.01	0.27	nan	nan	nan
1649961893	Spülen	9.5	11.59	10.97	8.75	1.33	0.01	0.01	0.27	nan	nan	nan
1649961895	Spülen	9.5	11.59	10.97	8.49	1.33	0.01	0.01	0.27	0.5	-0.07	62.3
1649961914	Spülen	10.19	11.45	10.98	9.01	4.47	0.02	0.01	0.3	0.5	71.28	53.3
1649961938	Spülen	10.19	11.45	10.98	7.46	4.47	0.02	0.01	0.3	0.5	66.1	54.1
1649961960	Spülen	10.19	10.85	10.99	7.72	4.47	0.02	0.01	0.3	4.66	66.31	53.3
1649961983	Spülen	9.48	10.9	10.99	7.98	3.48	0.02	0.01	0.31	4.66	64.18	53.8
1649961998	Spülen	9.48	10.9	10.99	7.98	3.48	0.02	0.01	0.31	4.66	58.07	54.6
1649962013	Spülen	9.48	10.72	11.0	7.46	3.48	0.02	0.01	0.31	1.16	67.04	53.8
1649962040	Spülen	9.91	11.18	11.0	7.46	4.02	0.02	0.01	0.3	4.66	46.11	54.2
1649962062	Spülen	9.91	11.33	11.0	7.46	4.02	0.02	0.01	0.3	4.66	49.1	54.0
1649962074	Spülen	9.91	11.46	11.0	8.24	4.02	0.02	0.01	0.3	4.66	48.08	54.2
1649962094	Spülen	9.57	11.44	11.0	7.2	4.11	0.05	0.04	0.33	1.16	12.42	61.2
1649962109	Spülen	9.57	11.27	11.0	8.24	4.11	0.05	0.04	0.33	1.16	2.18	63.5
1649962132	Spülen	9.57	10.42	11.0	7.72	4.11	0.05	0.04	0.33	4.66	11.08	61.2
1649962155	Spülen	9.94	11.28	11.0	1 7.2	4.88	0.03	0.02	0.31	4.66	75.55	53.3
1649962172	Spülen	9.94	11.38	11.0	7.72	4.88	0.03	0.02	0.31	4.66	75.55	53.3
1649962189	Spülen	9.94	11.72	11.0	7.2	4.88	0.03	0.02	0.31	4.66	67.63	53.3
1649962212	Spülen	8.67	11.21	11.0	7.98	5.02	0.04	0.03	0.32	4.66	66.72	50.9
1649962230	Spülen	8.67	11.56	10.99	7.2	5.02	0.04	0.03	0.32	4.66	68.04	54.0
1649962246	Spülen	8.67	10.79	10.99	6.95	5.02	0.04	0.03	0.32	4.66	76.6	50.9
1649962269	Spülen	8.67	11.18	10.97	6.95	5.02	0.04	0.03	0.32	4.66	2.72	64.9
1649962289	Spülen	9.13	11.06	10.9	7.2	4.42	0.03	0.01	0.31	4.66	77.03	53.3
1649962311	Spülen	9.13	10.99	10.94	6.95	4.42	0.03	0.01	0.31	1.16	67.85	52.4
1649962326	Spülen	9.13	11.31	10.93	3 7.2	4.42	0.03	0.01	0.31	1.16	67.15	53.3
1649962351	Spülen	10.42	10.51	10.93	6.95	5.82	0.03	0.02	0.31	4.66	59.47	52.0
1649962370	Spülen	10.42	11.19	10.9	6.95	5.82	0.03	0.02	0.31	4.66	55.95	52.1
1649962395	Spülen	8.75	10.69	10.88	8.49	3.57	0.02	0.01	0.3	4.66	68.36	52.0
1649962417	Spülen	8.75	10.94	10.86	7.2	3.57	0.02	0.01	0.3	4.66	70.22	52.0
1649962435	Spülen	8.75	10.81	10.86	6.95	3.57	0.02	0.01	0.3	4.66	67.74	51.2
1649962460	Spülen	9.45	11.18	10.8	7.72	4.86	0.03	0.01	0.31	4.66	70.97	53.3
1649962478	Spülen	9.45	11.18	10.83	8.24	4.86	0.03	0.01	0.31	4.66	68.75	54.1
1649962496	Spülen	9.45	10.29	10.83	6.95	4.86	0.03	0.01	0.31	4.66	72.94	53.3
1649962519	Spülen	9.86	10.62	10.82	6.69	4.87	0.03	0.01	0.31	4.66	5.19	64.9
1649962542	Spülen	9.86	10.93	10.82	6.95	4.87	0.03	0.01	0.31	4.66	6.23	64.9

Abbildung 28: Darstellung des Prozesses auf dem Embedded Device. Der Zeitstempel war als UNIX Timestamp (vergangene Sekunden seit dem 01.01.1970 00:00:00 Uhr) gegeben. In der Mitte sieht man den laufenden Prozess, sowie die Messwerte der einzelnen Sensoren. Auf der rechten Seite sind die Vorhersagen der KI-Modelle für die Nichtionischen Tenside (NIT), Anionischen Tenside (AN) sowie die Oberflächenspannung (OFS) dargestellt.

Damit war das Embedded Device, inkl. Der künstlichen Intelligenz, lauffähig und bereit für die nächsten Schritte.

AP 5.4 Umsetzung Federated Learning und Cloud Infrastruktur

Federated Learning (deutsch: verteiltes Lernen, kurz FL) ist eine Technik des maschinellen Lernens, die viele KI-Modelle (des gleichen Typs) bündelt. Damit ist es möglich über mehrere beteiligte Parteien KI-Modelle zu verbessern ohne, dass die lokalen (teilweise sensiblen) Daten ausgetauscht werden müssen. Der Ablauf von FL sieht wie folgt aus, siehe hierzu auch Abbildung 11:

- Ein zentraler Server erstellt ein erstes (initiales) KI-Modell
- Dieses erste KI-Modell wird an alle beteiligten Parteien versendet
- Jede Partei trainiert auf Basis ihrer eigenen Daten dieses KI-Modell lokal
- Nach dem Training kann das KI-Modell zurück an den Server geschickt werden
- Dieser sammelt die KI-Modelle aller Parteien und kombiniert sie zu einem neuen globalen KI-Modell
- Dieses neue globale KI-Modell wird an alle beteiligten Parteien versendet
- Damit können alle von einem verbesserten KI-Modell profitieren

Es ist außerdem möglich, dass die Parteien ihre trainierten KI-Modelle asynchron, das heißt nicht zeitgleich, an den Server senden. Damit können viele vom Training einzelner profitieren. Weiterhin profitieren alle davon, dass ihre Daten nicht versendet werden. Damit sind sowohl der Datenschutz eingehalten als auch die Sicherheit der Daten gewährleistet.

Step 3 Step 4 Step 2 Step 1 Step 5 Server Server Server Server Server model model model model model Model sync Upload Model sync Edge Edge Edge Edae Edge Edge Edae Edge Edae Edge device 3 device 1 device 3 device 1 device 1 device 1 device 1 Edge Edge Edge Edge Edge device 2 device 2 device 2 device 2 device 2

FEDERATED MACHINE LEARNING IN STEPS



Abbildung 29: Eine bildliche Darstellung des FL-Ablaufs.

Die Umsetzung des FL wurde in einer Simulationsumgebung aufgesetzt. Dieser Ansatz wurde aufgrund der hohen Anschaffungs- und Aufbaukosten der Hardware gewählt.

Dazu wurde die Software Docker verwendet, welche ermöglichte mehrere Computersysteme (sogenannte Container) auf einem Computer zu simulieren. Diese Container boten ein in sich geschlossenes, vordefiniertes System. Die benötigte Software wurde in einer entsprechenden Initialisierungsdatei definiert. Bei Ausführung der Initialisierungsdatei wurde ein Abbild erstellt

(Image), auf dessen Basis die Container erstellt werden. Damit konnten aus einem Image mehrere gleichartige Container erstellt werden.

Eine Umsetzung im Embedded Device verwendeten Gradient Boosted Trees (GBT) war zum Zeitpunkt der Umsetzung nicht möglich, da keine funktionierende Implementierung verfügbar war. Daher wurde ein anderes KI-Modell, und zwar neuronale Netze, verwendet.

Neuronale Netze, auch als Deep Learning bezeichnet, orientieren sich an den Neuronen des Menschen. Mehrere Eingabegrößen werden in einem Neuron zusammengerechnet. Jede Eingabegröße wird dabei mit einer Gewichtung versehen, um die Wichtigkeit der Eingabegröße zu verdeutlichen. Ein zusätzlicher Wert (Bias genannt) wird addiert, um den Wertebereich verschieben zu können. Dies ist besonders im darauffolgenden Schritt wichtig, der Aktivierungsfunktion. In dieser wird die Ausgabe (die Berechnung) des Neurons betrachtet und mittels einer Funktion einem neuen Wert zugeordnet. Damit wird verhindert werden, dass die Werte viel zu groß oder zu klein werden und in einem vorgegebenen Bereich bleiben. In Abbildung 30 ist ein solches Neuron dargestellt. Dort kann man sehen, wie die Eingabegrößen im Neuron verrechnet werden und anschließend durch die Aktivierungsfunktion zu einer endgültigen Ausgabe verrechnet werden.

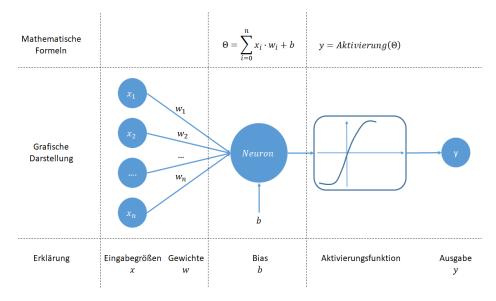


Abbildung 30: Erläuterung der Berechnung eines einzelnen Neurons.

Ein neuronales Netz ist eine entsprechende Erweiterung dieses Konzepts. Hierbei werden mehrere Neuronen miteinander verbunden, sowohl parallel als auch hintereinander, wie in Abbildung 31 dargestellt. Die Berechnung läuft in jedem Neuron wie oben dargestellt ab, das gesamte neuronale Netz liefert am Ende dann seinen Ausgabewert bzw. mehrere Ausgabewerte. Diese Art von neuronalen Netzen nennt man vollvernetzt, da jedes Neuron einer Schicht mit jedem Neuron der vorherigen und folgenden Schicht verbunden ist.

Für die Umsetzung des Federated Learning wurde ein einfaches neuronales Netz dieser Art aufgebaut.

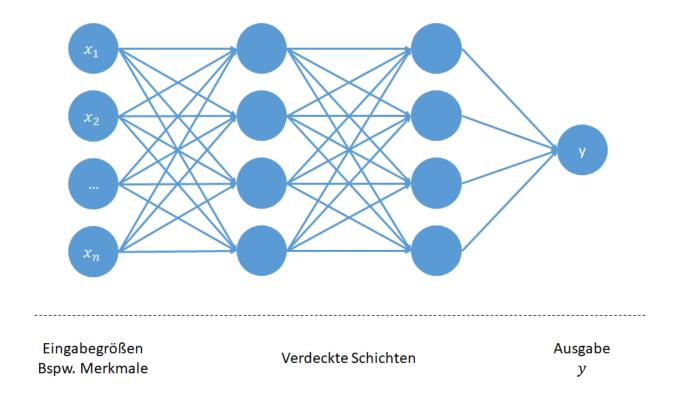


Abbildung 31: Einfaches neuronales Netzwerk mit 2 verdeckten Schichten und einem Ausgabewert. Die verdeckten Schichten sind von außen nicht direkt sichtbar, weshalb sie ihren Namen tragen. Als einfacher Benutzer interagiert man nur mit den Eingabegrößen und erhält die Ausgabe zurück.

Mithilfe der Python Bibliotheken *Flwr* und *Tensorflow* konnte ein Federeted Learning System aufgesetzt werden. Getestet wurde es mit einem Server und zwei Klienten/ Parteien.

Die Ergebnisse waren wie erwartet nahe an den Ergebnissen der bisherigen Modelle. In der untenstehenden Tabelle 8 dargestellt sind die MAE-Werte aus Abbildung 32 zu sehen.

Tabelle 8: Darstellung der Federated Learning-Lernrunden.

Nummer der	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Trainingsrunde									
MAE	19,23	2,52	4,65	3,17	1,64	6,78	1,03	3,89	1,11

```
of 2)
flower 2022-09-09 13:46:59,247 | server.py:260 | fit_round received 2 results and 0 fa
                                                                                                                    lower 2022-09-09 13:46:59 255 | server.pv:201 | evaluate round: strategy sampled 2 cl
                                                                                                                    10
========>:.....] - ETA: 0s - loss: 4.0761 - mea
=======] - 0s 52ms/step - loss: 3.7924
error: 3.7924 - val_loss: 5.4210 - val_mean_absolute_error:
                                                                                                                    10
=========>.....] - ETA: 0s - loss: 4.8379 - mea
=======] - 0s 49ms/step - loss: 4.7052
error: 4.7052 - val_loss: 1.6842 - val_mean_absolute_error:
       2022-09-09 13:47:00.576 | server.pv:201 | evaluate round: strategy sampled 2 cl
                                                                                                                        er 2022-09-09 13:47:00 840 | server.pv:251 | fit round: strategy sampled 2 clients
                                                                                                                  e error: 1.8138 - val loss: 3.2328
     er 2022-09-09 13:47:01.864 | server.pv:260 | fit round received 2 results and 0 fa
     er 2022-09-09 13:47:01.875 | server.pv:201 | evaluate round: strategy sampled 2 cl
                                                                                                                          2022-09-09 13:47:04.353 | connection.pv:68 | Insec
       2022-09-09 13:47:02.055 | server.pv:210 | evaluate round received 2 results and
     er 2022-09-09 13:47:02.055 | server.pv:251 | fit round: strategy sampled 2 clients
     er 2022-09-09 13:47:02.992 | server.pv:260 | fit round received 2 results and 0 fa
                                                                                                                 er 2022-09-09 13:47:03.005 | server.pv:201 | evaluate round: strategy sampled 2 cl
       2022-09-09 13:47:03.183 | server.pv:210 | evaluate round received 2 results and
     ar 2022-09-09 13:47:03.183 | server.pv:251 | fit round: strategy sampled 2 clients
     er 2022-09-09 13:47:04.154 | server.pv:260 | fit_round_received 2 results and 0 fa
                                                                                                                                       ......] - ETA: 0s - loss: 1.1675 -
======] - 0s 49ms/step - loss: 3.4
val_loss: 5.6820 - val_mean_absolute_er
     er 2022-09-09 13:47:04.162 | server.pv:201 | evaluate_round: strategy sampled 2 cl
       2022-09-09 13:47:04.345 | server.pv:210 | evaluate_round received 2 results and
      2022-09-09 13:47:04,345 | server.py:172 | FL finished in 13.717831199999978 2022-09-09 13:47:04,345 | app.py:119 | app.fit: losses_distributed [(1, 19.23341 (2, 2.518223762512207), (3, 4.645780563354492), (4, 3.1691155433654785), (5, 1.6
360046387), (6, 6,
1152162551879883)
                                     app.py:120 | app_fit: metrics_distributed {}
app.py:121 | app_fit: losses_centralized []
app.py:122 | app_fit: metrics_centralized {}
```

Abbildung 32: Auf der linken Seite ist die Ausgabe des Servers zu erkennen. Dort wurden nach jedem abgeschlossenen Trainingsschritt die verfügbaren Modelle zu einem neuen Modell kombiniert. Auf der rechten Seite (jeweils rot umrandet) waren die beiden Klienten/ Parteien zu sehen. Hier ist zu sehen, dass die Modelle über mehrere Epochen trainiert wurden (je Epoche wird das Modell optimiert).

AP 5.5 Integration des Softsensors im Technikum

Hohenstein hat den Sensoraufbau sowie Laboranalytik in das Waschtechnikum transferiert. Hier wurden nun die Proben aus den industriellen Waschmaschinen (siehe Abbildung 33) entnommen und vermessen. Es wurden spezielle Waschprogramme geschrieben, um eine Prüfung des Tensid-Softsensors unter Praxisbedingungen zu ermöglichen. In diesem Versuchsaufbau wird an einer industriellen Waschmaschine 18 kg weiße Wäsche gewaschen und in drei Spülgängen gespült. Die Waschmaschine besitzt an der Seite eine Leitung, aus dem die Flotte herauskommt und aufgefangen werden kann. Zuerst wird die Waschflotte aufgefangen und anschließend die Spülflotte. Während die Flotten nacheinander im Sensorverbund gemessen werden, kann der Rest der aufgefangenen Wasch- und Spülflotten in der Offline-Analytik vermessen werden. In der Abbildung 33 ist die industrielle Waschmaschine zu sehen. Es wurden die Validierungen unter praxisnahen Bedingungen durchgeführt. Weiterhin wurde ein Embedded Device unter praxisnahen Bedingungen integriert (siehe AP 5.2). (siehe Abbildung 33)





Abbildung 33: (oben) Industrielle Waschmaschinen zur Simulation praxisnaher Bedingungen und (unten) Einbau des Embedded Device im Waschtechnikum.

AP 5.6 Validierung mit Modellwaschwässern

Integration des Sensormesskabinetts Tensidsoftsensors Nach und des in Technikumsmaßstab wurde die Validierung mit Modellwaschwässern durchgeführt. Hierzu wurden Wasch- und Spülwässer aus dem industriellen Waschprozess gesammelt und mit Hilfe der Online- und Offline-Messtechnik vermessen. Die Betriebsparameter wie Wasserzugabe, Temperatur, pH-Wert und Dosierung der Waschagenzien wurden dokumentiert. Weiterhin wurde Standard-Baumwollgewebe eingesetzt, um die Güteparameter, wie anorganische Inkrustation, Weißqualität, Reißfestigkeit und chemische Faserschädigung zu monitoren. Hier wurden keine Abweichungen zu Erfahrungswerten festgestellt, so dass diese Untersuchung nicht weiter erläutert wird. Die primäre Waschwirkung mittels EMPA-Farbfleckgeweben und mikrobiologische Untersuchungen mittels Bioindikatoren wurden nicht durchgeführt, da dies für die Feinjustierung des Tensidsensors oder Beurteilung der Validierungsparameter nicht von Bedeutung war. Stattdessen wurde ein besonderer Fokus auf die Beurteilung der Validierung mit Spültestgeweben (Polyester und Baumwolle) gelegt. Diese ergeben eine Anreicherung und Schwankung der nichtionischen Tensidkomponenten, was bei dem Vergleich der Ergebnisse mit dem Tensidsoftsensor berücksichtigt wurde.

	Durchführung / Ergebnisse									
Durchzu- führen	Analysen Prinzin mungs- weichung		Sach- bearbeiter/							
	Amaryser		Timesp	grenze ±% vom Richtwert	Wert 1	Wert 2	Mittel- wert	Datum		
X	pH-Wert		DIN EN ISO 3071, Punkt 5.2 ^A		-	5,3			10322 ssch	
×	Organische Inkrustation	%	DIN 53919-2, Punkt 8.4.2 ^A	< 0,1 %	+ 10 %	0,2		a	233,22	
×	Aniontenside	µg/g	DIN EN 903, Modifikation: wässriges Textileluat ^A	< 10 µg/g	+ 10 %	33			21.5.22 FRU	
×	Niotenside	µg/g	DIN 38409-23, Modifikation: wässriges Textileluat ^A	< 75 μg/g	+ 10 %	135			21.3.22 FRA	

	Durchführung / Ergebnisse									
Durchzu- führende	Durchgeführte		Analysen-	Bestim- mungs-	- weichung		Sach- bearbeiter/			
Prüfung	Analysen		Prinzip	grenze	±% vom Richtwert	Wert 1	Wert 2	Mittel- wert	Datum	
Д нтті	pH-Wert		DIN EN ISO 3071, Punkt 5.2 A		-	6,3			27.4.22 ssch	
⋈ нтті	Organische Inkrustation	%	DIN 53919-2, Punkt 8.4.2 A	< 0,1 %	+ 10 %	0,3		- 17	28.4.22	
Д нтті	Aniontenside	µg/g	DIN EN 903, Modifikation: wässriges Textileluat ^A	< 10 µg/g	+ 10 %	28	_	_	27.04.26 JFR	
Д́нтті	Niotenside	µg/g	DIN 38409-23, Modifikation: wässriges Textileluat ^A	< 75 μg/g	+ 10 %	240	_	_	21.04.22 JFR	
□ WL	Anorganische Inkrustation	%	DIN 53919-2, Punkt 8.4.2 A	< 0,1 %	+ 10 %					

Abbildung 34:Exemplarische Untersuchung der Qualität der Validierung nach ISO 15797-8 mit den Spültestgeweben.

Tabelle 9: Übersicht des Validierungswaschverfahrens ISO 15797-8.

22.1.7.008 2							
_						Facoretoff	Gewich
						raseision	t in kg
1 WGK							
PES/CO weiß							
Maulwaag e	10 06 01 99 1/6						18,0
Favorit +	09 01 01 09 FC						
8							
ISO 15797-8							
Verfahren sschritt	Produktname	Menge pro I Flotte	Einheit		Flotte nver- hältni s 1:	Gesamt- menge	Einheit
Hauptwäs che	Annex A2	5,0	g		4	360	g
3. Spülen	Essigsäure (60%)	0,3	ml		5	27	ml
	` ,						
					Fin	ishertrockn Verfahren	
keine Trocknung							
		Waschen					
Zyklus Nr.	Bemerkungen	Uhrzeit Start			Uhrze it Start		Sach- bearbei ter
	PES/CO weiß Maulwaag Person Favorit + B SO 15797-8 Verfahren sschritt Hauptwäs che 3. Spülen Lufttroc Trickeine Trocknung	1 WGK PES/CO Weiß Maulwaag 10 06 01 99 1/6 Pavorit + 09 01 01 09 FC B SO 15797-8 Verfahren sschritt Hauptwäs che Hauptwäs che 3. Spülen Lufttrocknung/keine Trocknung Keine	1 WGK PES/CO Weiß Maulwaag 10 06 01 99 1/6 Pavorit + 09 01 01 09 FC B SO 15797-8 Verfahren sschritt Produktname pro I Flotte Hauptwäs Annex A2 5,0 3. Spülen Essigsäure (60%) Lufttrocknung/keine Tumb Trocknung Keine Trocknung Waschen Waschen	1 WGK PES/CO weiß Maulwaag 10 06 01 99 1/6 Pavorit + 09 01 01 09 FC 3 SO 15797-8 Verfahren sschritt Hauptwäs che Che Essigsäure (60%) Lufttrocknung/keine Trocknung Trocknung Waschen Zyklus Nr. Bemerkungen Zyklus Nr. Bemerkungen Uhrzeit Sachbearbe Sachbearbe	1 WGK PES/CO weiß Maulwaag 10 06 01 99 1/6 Favorit + 09 01 01 09 FC 3 SO 15797-8 Verfahren sschritt Hauptwäs che Sche Essigsäure (60%) Lufttrocknung/keine Trocknung Trocknung Waschen Zyklus Nr. Bemerkungen Uhrzeit Sach- pH letztes Spülbad	Werfahren sschritt Produktname pro I Flotte nverhältni s 1: Hauptwäs che Annex A2 5,0 g 4 3. Spülen Essigsäure (60%) Lufttrocknung/keine Trocknung Verfahren A Werfahren A Werfahren Schritt Werfahren Produktname pro I Flotte nverhältni s 1: Hauptwäs che Annex A2 5,0 g 4 Uhrzeit Schrift Waschen Trocknung Fin Verfahren A Waschen Trocknung Wasc	Faserstoff WGK PES/CO weiß Maulwaag 10 06 01 99 1/6 Favorit + 09 01 01 09 FC SO 15797-8 Verfahren sschritt Produktname pro 1 Flotte pro 1 Flotte nver- hältni s 1: menge st. 1: Annex A2 5,0 g 4 360 3. Spülen (60%) Lufttrocknung/keine Trocknung Verfahren A Finishertrockn Verfahren Finishertrockn Verfahren Verfahren A Trock nen Waschen Waschen Uhrzei Sach- pH letztes hen Turnoblertrock Uhrze bearbe Spülbad ift Min. für T

Im Nachfolgenden sind exemplarische Versuche der Validierung gezeigt. Das Waschprogramm und die Menge des Waschmittels wurden in beiden Versuchen nicht variiert. Es wurden für beide Versuche dieselben Bedingungen beibehalten.

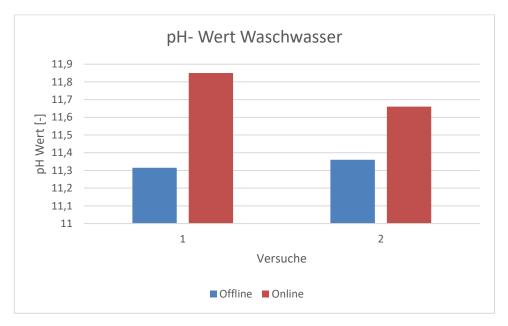


Abbildung 35: Gegenüberstellung der online und offline ermittelten pH-Werte für das Waschwasser.

Der pH-Wert liegt in einem Bereich zwischen 11,3 und 11,8. Auffällig ist, dass der pH- Wert an der industriellen Waschmaschine höher ist als bei den Versuchen an dem Labomaten. Dies ist dadurch zu begründen, dass der pH-Wert bei realen Waschprozessen im alkalischen Bereich vorteilhafter ist, da dadurch die Wäsche Weiß gehalten wird und Flecken effektiv entfernt werden können.

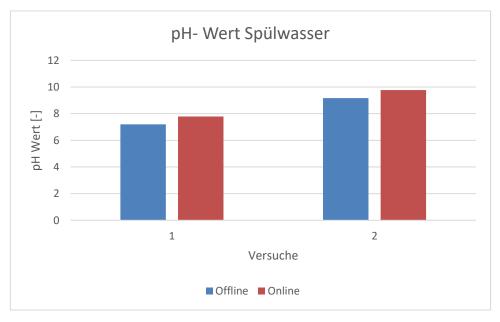


Abbildung 36: Gegenüberstellung der online und offline ermittelten pH-Werte für das Spülwasser.

Das Spülwasser weist einmal einen pH- Wert von ca. 7,5 und einmal von 9,5 auf. Das Spülwasser hat einen niedrigeren pH-Wert als das Waschwasser.

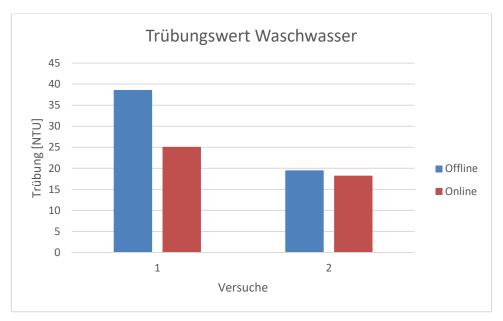


Abbildung 37: Gegenüberstellung der online und offline ermittelten Trübungs- Werte für das Waschwasser.

Die Trübungswerte liegen zwischen 18 und 39 NTU. Die Werte sind im Allgemeinen niedriger als bei dem Versuch an dem Labomaten. Es lässt sich daraus schließen, dass die zu waschende Wäsche nicht stark verschmutzt war.

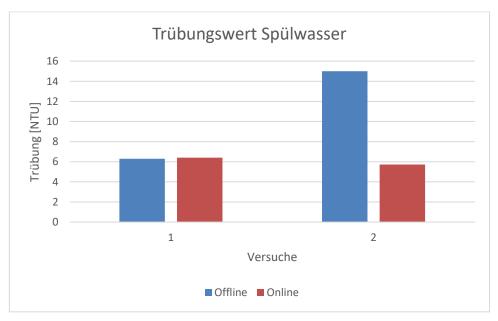


Abbildung 38: Gegenüberstellung der online und offline ermittelten Trübungs-Werte für das Spülwasser.

Die Werte für die Trübung beim Spülwasser sind geringer als beim Waschwasser, da mit jedem Spülgang Schmutz entfernt wurde.

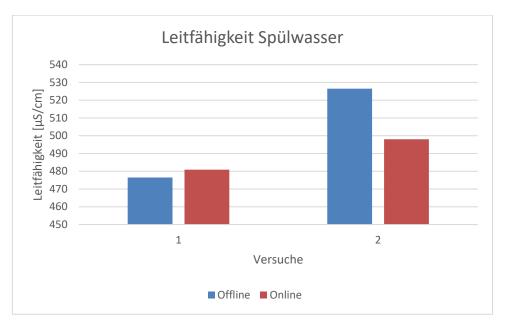


Abbildung 39: Gegenüberstellung der online und offline ermittelten Leitfähigkeits- Werte für das Waschwasser.

Die Leitfähigkeit beträgt für das Spülwasser Werte zwischen 475 µS/cm und 525 µS/cm. Es besteht eine geringe Abweichung zwischen Online und Offline ermittelten Werten. Für das Waschwasser wies der Leitfähigkeitssensor wegen einem Wackelkontakt Messwertsprünge auf.

Im Allgemeinen lässt sich zu dieser Versuchsreihe sagen, dass im Vergleich zu den Versuchen an dem Labomaten der pH-Wert einen erhöhten Wert anzeigt und die Trübung einen geringeren Wert hat. Generell ist aber eine gute Übereinstimmung gegeben, so dass die Validierung als erfolgreich angesehen werden kann.

AP 5.7 Anpassung und Überarbeitung des Softsensors

Mit dem Softsensor wurden vier Messungen aufgezeichnet bei denen jeweils die Oberflächenspannung Offline verifiziert wurde. Bei diesen Messungen hat das System höhere Abweichungen wie bisher. Dies kann mit Umbau des Messsystems zu einem Softsensor zusammenhängen.

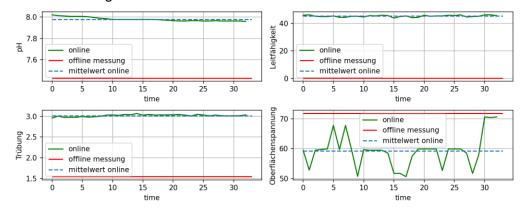


Abbildung 40: Aufzeichnung mit dem Softsensor, hier der Vergleich Softsensor Daten zu Offline gemessenen Werten

In Abbildung 40 ist beispielhaft eine der Messungen dargestellt. Dort ist die Abweichung insbesondere bei der Leitfähigkeit deutlich zu sehen. Hierzu ist die nähere Betrachtung der Modelle wichtig. Bei den verwendeten Gradient Boosted Trees (GBT) kann man die Gewichtung einzelner Merkmale ausgeben. Dies ist beispielhaft für die beiden KI-Modelle für die Oberflächenspannung in Abbildung 41 dargestellt. Deutlich zu sehen ist, dass die Leitfähigkeit hier eine entscheidende Rolle spielt. Betrachten wir die Daten aus Abbildung 40 wird ersichtlich, dass hier eine deutliche Abweichung vorliegt. Leider konnte der Fehler hierbei innerhalb der zur Verfügung stehenden Zeit nicht genauer lokalisiert werden.

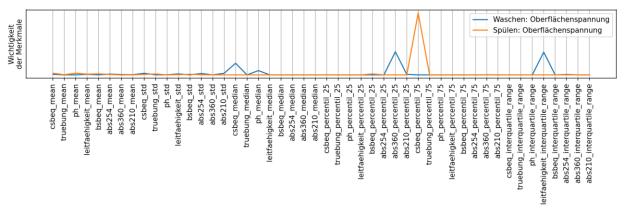


Abbildung 41: Wichtigkeit der Merkmale laut GBT für die Oberflächenspannung. Je höher die Spitze des jeweiligen Merkmals, desto wichtiger ist es.

Das KI-Modelle konnte auf Grundlage der aufgezeichneten Daten nicht weiter optimiert werden. Diese Versuche zeigten jedoch gut, wie das Gesamtsystem funktioniert und bereits während einer laufenden Messung Vorhersagen für die Oberflächenspannung und die Tenside ausgegeben werden.

Dies zeigt, dass das System von zuverlässigen Sensordaten abhängig ist und damit auch die Vorhersage des KI-Systems steht und fällt.

Arbeitspaket 6: Validierung des Tensid-Softsensors im Technikum

AP 6.1 Simulation von Wasch- und Recyclingprozessen

Im folgenden Arbeitspaket wurden Simulation von Wasch- und Recyclingprozessen durchgeführt. Die Dimension des Aufbaus und die Komplexität der Automatisierung wurde im Vorfeld unterschätzt. Auch die Lieferschwierigkeiten der Steuerungsmodule war eine erhebliche Herausforderung bei der Planung der Simulationstechnik für Wasch- und Recyclingversuche. Deshalb wurde eine praxisnahe Lösung für die Feldversuche angewandt, die jedoch optimal die Projektziele erfüllte. Die Versuche zu der Behandlung/Recycling von Tensid-haltigen Prozesswässern fanden bei der Fa. ATEC statt. HIT hat jedoch das Vliesstoff-Filtrationsmodul von ATEC ausführlich im Labormaßstab validiert. Dieses Modul eignete sich wegen der Einsatzflexibilität besser für die geplanten Untersuchungen als z.B. Membranfiltrationsanlagen. In der Abbildung 40 ist das Vliesstoff-Filtrationsmodul (u.a. kostengünstige Badreinigung der Tensid-haltigen Abwässer) als Fließdiagramm und Fotoaufnahme gezeigt.

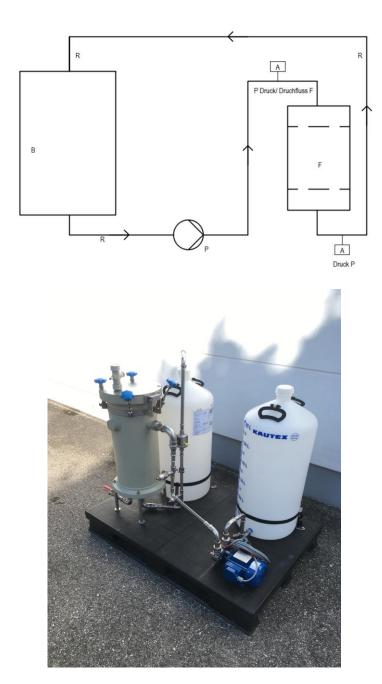


Abbildung 42: (oben) Fließbild Filteranlage. Das Modellprozessabwasser wird von dem Wasserzulaufbehälter über eine Drehschieberpumpe [P] und Rohre [R] der Filtereinheit [F] zugeführt, (unten) Fotoaufnahme der Filteranlage, die maßgeschneidert für das Projekt von Fa. ATEC entwickelt wurde.

Die Anlagen wurden hinsichtlich der im IMPRESS festgelegten Prozessindikatoren validiert. Hierbei wurden Modellprozesswässer (Laboransatz und aus industriellen Waschmaschinen) von und nach 30 min Filtrationszeit unter Laborbedingungen entnommen. Die Versuche wurden beim Einfahren des Moduls bei Filtrationsversuchen bei Fa. ATEC wiederholt. In den Abbildungen 41 und 42 sind die Ergebnisse gezeigt. Wie zu erwarten, adsorbieren vor allem Tenside auf Vliesstoffoberflächen, so dass ein Teil der Tenside bei rezirkulieren der Waschlösungen verloren geht. Dies äußert sich im Absinken der Tensidkonzentration und des Werts der

Oberflächenspannung im Filtrationsverlauf. Mit einer hohen Belegung an Vliesstoffen von bis zu 30 Stück (siehe Abbildung 42) werden bei allen Werten der Prozesswasserbeschaffenheit signifikante Veränderung beobachtet. Die Schmutzkomponenten, ausgedrückt als CSB und Trübung, werden aus dem Prozesswasser ebenfalls eliminiert.

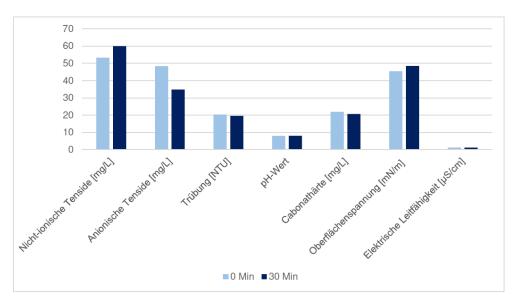


Abbildung 43: Veränderung der Beschaffenheit der Modellprozesswässer in Abhängigkeit der Filtrationszeit im Vliesstoff-Filtrationsmodul.

	Vliesstoff-Belegungen						
	0	1	3	5	10	20	30
Elektrische Leitfähigkeit [mS/cm]							
pH-Wert							
Oberflächenspannung [mN/m]							
Anionische Tenside [mg/L]							
Nicht-ionische Tenside [mg/L]							
Trübung [NTU]							
CSB [mg/L]							
Carbonathärte [mg/L]							

Abbildung 44: Veränderung der Beschaffenheit der Modellprozesswässer in Abhängigkeit der Vliesstoff-Belegung im Vliesstoff-Filtrationsmodul.

AP 6.2 Validierung unter praxisnahen Bedingungen

Wie bereits erwähnt ist die Verschaltung/Verrohrung von der realistischen Abwasseraufbereitung and diverse Herausforderungen gekoppelt (Raumbedarf, Inbetriebnahme/Kontrolle, Automatisierung trotz mangels an elektr. Bauteilen etc.) Deswegen wurde aus strategischer Sicht ein Simulationsszenarien bei einem PA-Mitglied aufgebaut. Der Aufbau ist in der Abbildung 43

gezeigt. Der Aufbau besteht aus einem biologischen Reaktor, einer Membranfiltrationsanalage und dem Vliesstoff-Filtrationsmodul. Alle Module können einzeln oder als Gesamtkaskade untersucht werden. Die Vliesstofffiltration eignet sich in besonderer Art und Weise für schnelle Aufreinigungsvorgänge des Brauchwassers. Die Wäschwässer wurden nun mit einem praxisnahen Waschmittel eines PA-Mitglieds (Hersteller von Waschmittel für gewerbliche Wäscherei) erzeugt.



Abbildung 45: Aufbau einer praxisnahen Simulation für Wasch- und Abwasserrecyclingversuche bei einem PA-Mitglied.

Der Hauptfokus der Versuche lag auf Akquise der Daten zu verhalten der Tenside im Abwasserrecycling. In einem exemplarischen Versuch über 4 Stunden (siehe Tabelle 10) sieht man, dass gerade nichtionische Tenside deutlich in Konzentration reduziert werden, was auch mit einer Abnahme der Oberflächenspannung einhergeht. Diese Ergebnisse wurde ebenfalls in die Berechnung des Tensidsoftsensors einbezogen. Es wurden auch Spektren (Photometer Fa. Machery Nagel) von den Filtrationsproben für vierschieden Filtrationszeiten aufgenommen, sowie Vergleichsspektren von dem industriellen Waschmittel, der Tensid-haltigen Probe zum Versuchsstart und auch zusätzlichen chem. Mitteln für Betreiben des Biorektors (d.h. war als Verunreinigung im System vorhanden). Die Spektren zeigen zwar deutliches Signal für die Tenside im Waschmittel, aber beim Betrachten der Gesamtproben (d.h. vermischtes Signal) können die Unterschiede durch Abbau/Adsorption des Tensids nicht dargestellt werden.

Bez. Probe	Zeit	рН	LF [mS]	Alk. [g/l]	GH [°dH]	CaH [°dH]	OFS [mN/m]	AT [mg/l]	NT [mg/l]	Trüb. [NTU]	CSB [mg/l]
Wasser	14:00	7.43	0.24	0	14	15	72.5			1.96	0
1	15:45	7.8	0.8	0.2	9	9	43.1	1.15	120	0.2	804
2	08:00	7.66	0.78	0.2	9.5	9.5	49.5	2.43	25	0.3	704
3	13:15	7.42	0.76	0.2	9.5	9.5	51.7	2.7	30	0.57	695
4	13:40	8.35	0.65	0.3	7	8.5	53.6	2.62	<30	0.85	662
5	16:20	7.87	0.75	0.4	9.5	10	51	2.75	<30	0.23	761
6	17:30	8.3	0.57	0.4	11	10.5	52.4	2.16	50	1.37	761

Tabelle 10: Übersicht der Prozesswasserbeschaffenheit in Abwasserrecyclingversuchen.

In den Versuchen wurde ebenfalls nicht mit allen im IMPRESS etablierten Sensorsystemen gearbeitet, da die verfahrenstechnische und elektronische Kopplung nur mit hohem Zeit- und Ressourcenaufwand möglich war. Stattdessen wurden vom PA, spezielle Sensor- und Armatur-Komponenten für die Versuche zur Verfügung gestellt, um eine vergleichende Tensidanalytik betreiben zu können (siehe AP 6.3).

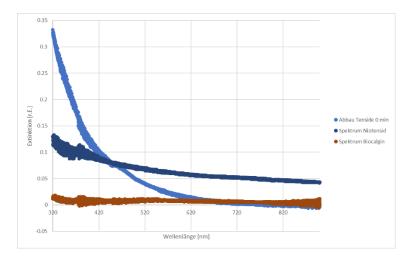


Abbildung 46: Vergleich des Spektrums des Waschmittels mit initialen Filtrationslösungen und Systemverunreinigungen.

AP 6.3 Vergleichsmessungen zur Tensidanalytik durch den PA

Vom PA wurde zwecks Vergleichsmessungen und Generierung zusätzlicher Informationen eine Kombination aus dem OPUS und VIPER-Sensoren (d.h. Abdeckung des gesamten Wellenlängenbereich von 200-720 nm) für die Versuche zur Verfügung gestellt. Auch sinnvolles Zubehör für die Integration in das Abwasserrecyclingkreislauf wurde in Versuche verwendet. Gerade die online-photometrischen Sensorsysteme (trotz signifikanter Kosten) werden als sinnvoll angesehen, um in einem Kompakten Aufbau (d.h. 1-2 Sensoren + Embedded Device) den Tensidsoftsensor in die Praxis etablieren zu können. Die Untersuchgen die von dem PA geleitet wurden, dass tatsächlich Unterschiede in der Tensidadsorption aus Spektren ausgelesen werden können. Allerdings sind diese Unterschiede nur von geringer Natur und entstehen erst nach Filtrationszeit von ca. 12 Stunden (siehe Abbildung 45). Diese Daten sich wichtig, um die

0,9 0,8 0,7 Extinktion [r.E.] 0,6 0,5 0,4 OPUS-VIPER 0 min 0,3 OPUS-VIPER 12 Stunden 0,2 0,1 0 0 100 200 300 800 400 500 600 700 Wellenlänge [nm]

Einsatzfähigkeit der gesamten Prozessanalytik und im speziellen der online-photometrischen Systeme für die Wasch- und Abwasserrecyclingkreisläufe beurteilen zu können.

Abbildung 47: Vergleich der OPUS-Viper Spektren für das Abwasserrecycling nach 0 min und 12 Stunden Filtrationszeit.

AP 6.4 Optimierung des Softsensors

Die Messapparatur des Projekts konnte aufgrund der Aufbaugröße nicht verwendet werden um die Daten in AP 6.2 aufzuzeichnen. Die aufgezeichneten Daten aus dem AP konnten daher nicht verwendet werden um die KI weiterzuentwickeln.

Verwendet wurden folgende Daten aus Tabelle 10: csb, Trübung, pH, Leitfähigkeit sowie Absorption bei 360nm. Es wurden alle 6 Messdaten (ausgenommen Wasser) verwendet um die Merkmale zu berechnen. Bei den nicht verfügbaren Sensoren wurden die Werte auf 0 gesetzt.

	Oberflächen- spannung	Anionische Tenside	Nicht ionische Tenside
Mittelwert aus Tabelle 10	50,2	2,3	Ca. 47,5
Vorhersage KI- Modell	53,2	0,5	629,8
Differenz	3,0	1,8	582,3

Tabelle 11: Vorhersage KI zu den Recycling Daten

In Tabelle 11 sind die Vorhersagen den Mittelwerten Werte aus Tabelle 10 gegenüber gestellt. Deutlich zu sehen, dass die Tenside sehr hohe Abweichungen vorweisen. Dies ist sowohl auf die Abweichungen in den KI-Modellen (siehe Tabelle 6 und Tabelle 7), den fehlenden Sensordaten und den für das KI-Modell unbekannten Prozess zurückzuführen.

Die Oberflächenspannung zeigte auch in Tabelle 6 und Tabelle 7 gute Performance. Die Oberflächenspannung scheint auch mit den reduzierten Daten eine gute vorhersage Qualität zu liefern.

Eine weitere qualitative Untersuchung und Anpassung an das Abwasserrecycling ist vor Verwendbarkeit notwendig.

AP 6.5 Wirtschaftlichkeitsanalyse

In diesem Teil ist ein Exzerpt der wirtschaftlichen Betrachtungen dargestellt. Detaillierte Preisangaben für die einzelnen Sensoren oder Wartungsdienstleistungen können hier aus datenschutzrechtlichen Gründen nicht betrachtet werden. Die Sensortechnik inkl. dem Embedded Device wurde als mögliche Gesamt- und Praxislösung für den Textilservice auf 20.000 € Investitionskosten kalkuliert. Hinzu kommen Wartungsverträge von ca. 3000 € pro Jahr. Für einen Textilservice ergeben sich jedoch auch weitere Kosten durch ca. 20 % Personalkosten und Weiterbildungen für mind. 1 Person. Dieser Mitarbeiter hat die Aufgabe die Sensortechnik in QMund Datenmanagement des Betriebs einzubinden. Die Validierungsversuche werden mind. auf 10.000 € geschätzt. Nun gibt es drei Einsatzszenarien, die an gewisse Kosten/Vorteile gebunden sind. Trotz der Flexibilität des Tensidsoftsensors wird von einer konservativen Annahme ausgegangen, dass für jedes Einsatzszenario ein Tensidsoftsensor notwendig ist.

1. Sensortechnik zur Prüfung der Dosierung im Hauptwaschprozess:

Hier wird die Sensortechnik an die Vorwäsche, Doppelwaschtrommel und Ende der Klarwäsche geschaltet. Durch virtuelle Berechnung der Werte mittels KI ist eine Erfassung von mehreren Prozesspunkten möglich ohne signifikante Erhöhung der Hardwarekosten. Diese Maßnahme bringt eine maßgeschneiderte Erfassung der Waschmittel und ggbf. Desinfektions-/Bleichmittels mit sich. Dadurch können die Waschprozesse besser auf Schmutzlast und Art des Textils angepasst werden, was eine pauschale Dosierung über der RKI-Vorgabe nicht mehr notwendig macht. Daher kann hier von einer Waschmittel-Einsparung von ca. 10-20 % des Waschmittels ausgegangen werden. Bei einem Wäschereibetrieb das 10 Tonnen Wäsche pro Tag (ca. 1,5 Millionen Gesamtumsatz) bearbeitet entspricht es Kosten von ca. 20.000 €. Hierbei wird von einer Amortisationszeit von mind. 3 Jahren ausgegangen.

2. Sensortechnik zur Kontrolle/Optimierung des Spülprozesses:

Der Spülprozess hat eine immense Bedeutung bei Vermeidung von Prozessfehlern wie Vergilbung, da schlechte Spülprozesse zu Chemikalienrückständen auf der Wäsche führen und damit bei der Trocknung diverse Schadensbilder entstehen. Es wird von der Annahme eines 10 Tonnen-Wäschereibetriebs ausgegangen. Für diesen Betrieb liegt eine Nachwäschequote von 5 % vor. Durch den Einsatz der Messtechnik wird die Nachwäschequote auf 2 % reduziert. In diesem Fall liegt eine Kostenersparnis von ca. 100.000 € vor. Bei einer konservativen Betrachtung werden die Ersparnisse halbiert, d.h. geringere Reduzierung der Nachwäschequote durch Einsatz der Sensortechnik. Auch bei konservativen Annahmen wird von einer Amortisationszeit von 1-2 Jahre ausgegangen.

Tabelle 12: Übersicht der Kostenersparnis durch Reduzierung der Nachwäsche durch den Einsatz der Sensortechnik.

Nachwäsche 2 %		Nachwäsche 5 %
• 10 t Betrieb → 200 kg		• 10 t Betrieb → 500 kg
• Im Monat: x 20 = 4.000 kg		• Im Monat: x 20 = 10.000 kg
• Im Jahr: x 12 = 48.000 kg		• Im Jahr: x 12 = 120.000 kg
• d.h. 5 Tage umsonst		• d.h.12Tageumsonst
• 1€/kg = 48.000€ Verlust		• 1€/kg = 120.000€ Verlust
• 50 Mitarbeiter je 2500 /4		0.000 €
= 31.250€	/	= 62.500€
Gesamt ca. 80.000 € Verlust	*	desamt ca. 180.000 € Verlust

3. Sensortechnik zum effektiven Einsatz des Abwasserrecyclings:

Aktuelle ist der Einsatz von Abwasserrecycling im Textilservice möglich. Dies ist jedoch wie Kogut et al. [Kogut, Igor & Szwast, Maciej & Hussy, Stephan & Polak, Daniel & Gerhardts, Anja & Piątkiewicz, Wojciech. (2021). Evaluation of wastewater reuse in commercial laundries: a pilot field study. DESALINATION AND WATER TREATMENT. 214. 39-48.] gezeigt haben an Amortisationszeiten von > 8 Jahren gekoppelt (bei einem Frischwasserpreis 1,332€/m³ und Abwasserpreis 1,42 €/m³; Angaben für Süddeutschland Region Ravensburg). Dies entspricht jährlichen Einsparungen von ca. 30.000 bis 40.000 € bei gleichzeitigen Betriebskosten von ca. 20.000 €. Durch den Einsatz von Sensortechnik kann die Effizienz/Güte des Recyclings verbessert werden, d.h. Abtrennung von Schutzstoffen und Nutzung des "aufgereinigten" Brauchwassers für diverse Einsatzzwecke. Dies entspricht eine Verbesserung der Einsparungen um ca. 10.000 €. Weiterhin wird eine Absenkung der Betriebskosten um 10.000 € geschätzt. Insgesamt wird also von Einsparung von ca. 20.000 € ausgegangen. Dies korreliert mit einer Amortisationszeit von ca. 3 Jahren

Fazit: Insgesamt ist das Szenario 2 die wirtschaftlich effektivste Methode zum Einsatz des neuentwickelten Tensidsoftsensors. Allerdings auch die Szenarien 1 und 3 führen zu akzeptablen Amortisationszeiten von ca. 3 Jahren. Auch ein Mix der Szenarien kann je nach Bedarf der Wäscherei als sinnvoll erachtet werden, z.B. Monitoring von wasch- und Spülprozessen. Es ist also von einer wirtschaftlich positiven Prognose für den Einsatz der Sensortechnik und des KI-basierten Tensidsoftsensors in der Wäscherei auszugehen. Natürlich können auch weitere Märkte mit ähnlicher Struktur, z.B. Färbereien, Metallreinigung, Papierindustrie erschlossen werden, um den wirtschaftlichen Erfolg der neuentwickelten Technik zu maximieren.

3. Zusammenfassung und Ausblick

Das Ziel des Forschungsvorhabens IMPRESS war es über einen Sensorverbund Daten zu erfassen und darauf aufbauend exemplarisch ein indirektes Online-Monitoring der anionischen und nichtionischen Tensidkonzentrationen zu realisieren. Somit wurde in dem Forschungsprojekt (IMPRESS) von Hohenstein Institut für Textilinnovation gGmbH (HIT) erstmalig eine Sensortechnik für alle Prozessschritte (u.a. Waschen, Spülen, Abwasseraufbereitung) in gewerblichen Wäschereien aufgebaut. Diese Sensortechnik wurde an ein maßgeschneidertes laboranalytisches Konzept gekoppelt, um Daten mit hoher Qualität in Labor- und Feldversuchen sammeln zu können. Parallel wurde von dem Forschungspartner Hahn-Schickard Gesellschaft für Angewandte Forschung e.V. (HS) in mehreren Stufen ein sogenanntes Embedded Device mit einem Algorithmus für Künstliche Intelligenz (KI) entwickelt. Dieses Gerät ist in der Lage die Sensor- und Labordaten im gewerblichen Textilservice auf innovative Art und Weise auszuwerten und gleichzeitig den Wert der Oberflächenspannung, sowie Konzentration der anionischen und nichtionischen Tenside vorherzusagen. Die Vorhersagegenauigkeit lag bei 5–15 % und entsprach den Werten für die gängige Prozessanalytik im Bereich des Prozesswassermonitorings. Diese Neuentwicklung ist ein sogenannter Tensidsoftsensor, welcher nach entsprechenden Optimierungs- und Kommerzialisierungsmaßnahmen als innovative Technologie den gewerblichen Wäschereien zur Verfügung gestellt werden kann, um die Prozesseffizienz und Nachhaltigkeit der Branche zu optimieren. Diese Innovation wurde als skalierbare Lösung durch sogenanntes "Federated Learning"-Konzept angedacht, so dass auch Wäscherei-Gruppen wirtschaftlich effizient die KI-Modelle nutzen können. Die wirtschaftliche Analyse zeigte, dass mit Amortisationszeiten von ca. 3 Jahren die Technologie eine technisch optimale und gleichzeitig wirtschaftlich lukrative Lösung für die Brache ist und durch den Transfer in benachbarte Industriebereiche ein hohes technologisches und wirtschaftliches Potential zu entfalten vermag. Im weiteren Verlauf der Markttransfermaßnahmen ist es wichtig die Auswahl an Sensortechnik weiter zu miniaturisieren und die Präzision des Tensidsoftsensors zu erhöhen. Beides erfordert eine längere Testphase unter praxisnahen Bedingungen. Dies kann sowohl im Rahmen von anwendungsbezogenen Forschungsprojekten als auch mit Hilfe von industriellen Stakeholdern (Pilotkunde, Integrator etc.) geschehen. Dieses finale Maßschneidern des Tensidsoftsensors wird helfen sowohl die neuentwickelte Technologie erfolgreich in reale Anwendungen zu implementieren als auch die smarte Messtechnik für Integration in weitere Branchen (z.B. Metallteilereinigung) zu flexibilisieren.

4. Wirtschaftlichkeit, Ergebnistransfer und erzielte Ergebnisse

4.1 Wirtschaftliche Bedeutung und Nutzen der Ergebnisse für KMU

Das Ziel des Projekts wurde erreicht und es wurde ein Monitoringsystem für Tensidkonzentrationen in Wäschereien realisiert. Mit diesem System lassen sich u.a. die Waschperformance erfassen, Spülprozesse optimieren und wirtschaftliche Abwasserrecyclingkonzepte etablieren. Somit führt das entwickelte Monitoringsystem zu einer Erhöhung der Prozessqualität und Ressourceneffizienz in der Textildienstleistung.

Der Projektbegleitende Ausschuss wurde gezielt aus unterschiedlichen Unternehmen entlang der gesamten Wertschöpfungskette zusammengestellt (siehe Abbildung 46). Dies beinhaltet einerseits die "Herstellerseite" mit Unternehmen der Sensortechnik im weitesten Sinne, die notwendig sind, um eine unmittelbare Realisierung des intelligenten Monitoringsystems im Projektanschluss umsetzen zu können. Andererseits ist die "Anwenderseite" mit Wäschereien und Textilleasingunternehmen sowie deren Zulieferer und Dienstleister breit vertreten.

Die Einbindung der Verbände WIRTEX e.V. (mehr als 80 Textilservice-Unternehmen, Zulieferer und Institutionen) und microTEC Südwest e.V. (mehr als 100 Unternehmen und Institutionen der Sensor- und Mikrosystemtechnik) sind wesentliche Multiplikatoren nach Abschluss des Forschungsvorhabens, um den aufgezeigten Nutzen tiefer in die beteiligten und angrenzenden Branchen zu transferieren. microTEC Südwest vertritt dabei gleichzeitig die Allianz Industrie 4.0 Baden-Württemberg, ein Netzwerk das den industriellen Mittelstand in Richtung Industrie 4.0 begleiten soll. Die der Wäschereibranche verwandte Branche der industriellen Teilereinigung wurde durch die MedicalMountains GmbH berücksichtigt, die einerseits knapp 300 Unternehmen der Medizintechnik (davon mehr als 200 KMU) vertritt und andererseits ein Kompetenznetzwerk im Bereich der medizinischen Teilereinigung betreut. Insgesamt gehören dem PA 25 Firmen und 2 Verbände an, davon 17 KMU.

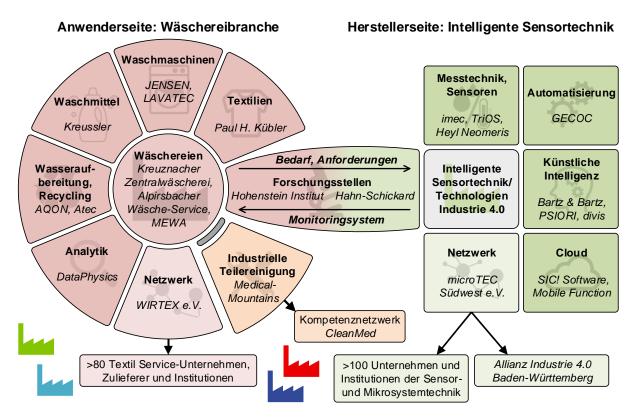


Abbildung 48: Struktur und Zusammensetzung des Projektbegleitenden Ausschusses entlang der Wertschöpfungskette, unterteilt in "Anwenderseite" und "Herstellerseite". (Einige Unternehmen/Stakeholder wurden später in projektbegleitenden Ausschuss aufgenommen und sind daher an dieser Stelle übersichtshalber nicht dargestellt.)

Das geplante Monitoringsystem, d.h. die Verbindung von Sensoren mit KI-Modellen und die Kombination mit "Federated Learning" lässt sich neben der Wäschereibranche für weitere Absatzmärkte maßschneidern, z.B. zum Monitoring von Reinigungsprozessen bei Behältern in der Lebensmittelbranche, zum Überwachen von Prozesswasseraufbereitungen oder zum Entwickeln von CSB- und AOX-Softsensoren für Kläranlagen.

Die Wäschereibranche ist als Endanwender zu betrachten und kann bei erfolgreicher Verwertung der Ergebnisse von einem Umsatzwachstum profitieren. Der unmittelbare Nutzen ergibt sich zunächst durch Anpassung der intelligenten Datenerfassung an die jeweiligen spezifischen Anforderungen der diversen Wäschereistrukturen sowie erste Praxistests bei unterschiedlichen Bedingungen. Der grundsätzliche Nachweis der Anwendbarkeit des intelligenten Datenerfassungssystems innerhalb der Wäschereibranche sollte an möglichst unterschiedlichen Maschinentypen und in diversen Prozessen erfolgen. Dies beinhaltet z. B. die Aufbereitung von Wischtextilien aus dem Gesundheitswesen oder den Einsatz der Spülbaddesinfektion beim Waschen von Berufsbekleidung aus Lebensmittelbetrieben.

Basierend auf den Ergebnissen könnte langfristig eine intelligente Regelung in der Wäschereibranche implementiert werden. Solch eine Vollautomatisierung der

Wäschereiprozesse wäre vor dem Hintergrund der globalen Herausforderungen wie Fachkräftemangel dringend erforderlich.

Natürlich profitieren die Hersteller der Wäscherei- und Abwasserrecyclingtechnik ebenfalls von den Projektergebnissen. Es können nämlich neue Anlagen in Verbund mit Sensortechnik und künstlicher Intelligenz angeboten werden. Im Falle des Abwasserrecyclings könnte die Wirtschaftlichkeit der Systeme erhöht werden, da durch Erfassung der Beschaffenheit des Abwassers rechtzeitig Schäden an den Membranen vermieden werden können.

Die Hersteller der Waschchemie und Textilien bzw. Bekleidung für Leasingzwecke profitieren durch kontinuierliche Qualitätssicherung in Wäschereien und damit durch Transparenz der Prozesse. Somit können Kosten für langwierige Reklamationen beim Einkauf der Leasingware und umständliche Einstellung der Waschprozesse durch Waschmitteltechniker reduziert werden.

Letztendlich können die Ergebnisse branchenübergreifend transferiert werden und stärken somit langfristig die Position von KMU durch Erhöhung der Prozessqualität

4.2 Verwendung der Zuwendung

 Gemäß den durchgeführten Projektarbeiten wurden die folgenden Personalmittel abgerufen:

Personaleinsatz	Hohenstein Institut für Textilinnovation gGmbH	Hahn-Schickard- Gesellschaft für angewandte Forschung e.V.
HPA A	17,0 PM	15,8 PM
HPA B	9,0 PM	20,2 PM
Gesamt	26,0 PM	36,0 PM

- Angeschaffte Geräte sind im Sachmittelbericht dokumentiert
- Leistungen dritter sind im Sachmittelbericht dokumentiert

4.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die im Berichtszeitraum durchgeführten Arbeiten entsprechen den im Forschungsantrag vorgesehenen Arbeitszielen und dem Ablauf des Arbeitsplanes. Sie sind für die Erreichung des Forschungsziels angemessen und notwendig.

Das wissenschaftliche Personal wurde entsprechend der im Antrag vorgesehenen Arbeitsschritten eingesetzt und war zur Durchführung des bewilligten Vorhabens angemessen und notwendig.

Aufgrund der Corona-Pandemie und daraus resultierenden personellen Engpässen wurde eine kostenneutrale Verlängerung von 5 Monaten beantragt. Dies ermöglichte das Projekt im vorgesehenen Umfang erfolgreich abzuschließen.

4.4 Durchgeführte Transfermaßnahmen

Die erfolgreiche Realisierung des Forschungsprojektes wurde durch die enge Zusammenarbeit der Forschungsstellen mit den Industrievertretern des projektbegleitenden Ausschusses ermöglicht. Die überwiegenden klein- und mittelständischen Unternehmen stellten im Rahmen der Projektarbeiten Textilien, Ausrüstungskomponenten, umfassende Informationen, Daten, Geräte sowie ihr Engagement zur Verfügung.

Nachfolgend sind alle durchgeführten sowie die nach Projektabschluss weiteren geplanten Transfermaßnahmen tabellarisch zusammengefasst.

Maßnahme	Ziel	Ort/Rahmen	Zeitangabe
	Vorstellung des Projekts; Diskussion der geplanten Arbeiten	Kick-off-PA-Treffen	21.01.20
Tagungen des Projektbegleitende n Ausschusses (PA)	Vorstellung der erzielten Ergebnisse; Diskussion weiteres Vorgehen	PA-Treffen im Abstand von ca. 10 Monaten	15.10.20, 16.09.21
	Abschlusspräsentati on; Diskussion der erzielten Ergebnisse	Abschluss-PA-Treffen	05.07.2022
Vorträge und Messeauftritte	Präsentation von aktuellen Projektergebnissen vor akademischem und industriellem Publikum	Fachmessen: SEPAWA, Jahrestagung der Gütegemeinschaft sachgemäße Wäschepflege, Sensor+Test, Hannover Messe, ACHEMA Fachkonferenzen: International Detergency Conference, MST- Kongress, NIPS-Konferenz, ICML-Konferenz Lokale Informationsveranstaltungen: Seminare zur Wäschereitechnik an Hohenstein Instituten, Innovationsforum Smarte Technologien & Systeme, Clusterkonferenz microTEC Südwest Forschungsgesellschaften: Mitgliederversammlung in Hohenstein Instituten und	Einbindung in die Vorlesung "Prozessanalytik und Eigenkotrollen für Wäscherei- branche" (I. Kogut) in Jahren 2020/2021

			Es wurde über
Veröffentlichungen	Informationen an Interessenten und Kunden über aktuelle Projektergebnisse	Homepage/Social Media: Hahn-Schickard, Hohenstein Institute	Social-Media-Kanäle von HIT über den Start des Projekts berichtet; es wurden weitere Publikationen auf der Seite www.future-of-laundries.com dargestellt. Dies fand statt in Jahren 2020/2021 2021 wurde das Projekt auf der KI-Landkarte vermerkt. https://www.plattform-lernende-systeme.de/ki-landkarte.html Mit dem Namen Softsensor zur Messung der Tensidkonzentrat ion
		Newsletter: Hahn-Schickard, Hohenstein Institute	nach MS4
		Netzwerke und Verbände: DTV, WIRTEX, microTEC Südwest, Technology bzw. Medical Mountains	Die Ergebnisse rund um Sensortechnik wurden der Gütegemeinscha ft sachgemäße Wäschepflege e.V. präsentiert. Dies fand statt in Jahren 2020/2021
		Publikation auf Webseite von Firma Heyl-Neomeris (PA- Mitglied) https://neomeris.de/wasseraufb ereitung-gewerbliche- waeschereien.html	2021

Information und Beratung interessierter Unternehmen	Direkter Know-how- Transfer zu Unternehmen, vornehmlich KMU; Entwicklung von Folgeprojekten	Gezieltes Ansprechen und Informieren von Unternehmen außer- und innerhalb des PA	Während der gesamten Projektlaufzeit
Transfer in die Ausbildung	Ergebnistransfer an akademische Nachwuchskräfte	Vergabe von Praktika, Studien- und Abschlussarbeiten	Es wurden folgende studentische Arbeiten durchgeführt: Sandeep Kaur (HS Mannheim), Monique Somme (HS Konstanz) und Hema Ahmed (HS Mannheim). Dies fand statt in Jahren 2020/2021

4.5 Abschließend geplante Transfermaßnahmen

Maßnahme	Ziel	Ort/Rahmen	Status
Veröffent- lichungen	Informationen an Interessenten und Kunden über die Projektergebnisse	Abschlussberichts über Webseiten von Hahn-Schickard und Hohenstein Institute https://www.hohenstein.de/de/wissen/f orschung/forschungsprojekte/detail/imp ress	Q.2 2023
		Im Jahresbericht von Hahn-Schickard und Hohenstein Institut	Nächstmöglicher Jahresbericht (2022 / 2023)
	Transfer der Ergebnisse zu den Multiplikatoren/Sta keholdern: Netzwerke und Verbände: DTV, WIRTEX, microTEC Südwest, Technology bzw. Medical Mountains	Einbinden von Ergebnissen bei Workshops und Präsentationen zur Jahrestagung der Gütegemeinschaft sachgemäße Wäschepflege e.V.	2023 / 2024
	Transfer der Ergebnisse in die akademischen Fachkreise	Publikation in Fachzeitschriften und - plattformen wie ArchiveX, GitHub oder z.B. Sensors (https://www.mdpi.com/journal/sensors)	Geplant für 2023
Information und Beratung interessierter Unternehmen		Beratung der Unternehmen im Bereich der Machine Learning für Prozesswasseranalytik; Generieren von Nachfolgeprojekten, z.B. ZIM, BMBF, EUREKA	Nachfolgeprojekt in Planung, Einreichung für 2023 geplant
Transfer in die Ausbildung	Ergebnistransfer an Nachwuchsfach- kräfte in der Textil- und Textilservice- industrie	Einbindung in die Vorlesung "Prozessanalytik und Eigenkontrollen für Wäscherei-branche" (I. Kogut) in Jahren 2023/2024	2023 / 2024

Hohenstein Institut für Textilinnovation gGmbH

Schlosssteige 1

74357 Bönnigheim

Deutschland

info@hohenstein.com

www.hohenstein.de

Hahn-Schickard Gesellschaft für angewandte Forschung e.V.

Wilhelm-Schickard-Str. 10

78052 Villingen-Schwenningen

Info@Hahn-Schickard.de

www.hahn-schickard.de