

Zuwendungsempfänger: Technische Hochschule Ostwestfalen-Lippe	Förderkennzeichen: 281A512A19
Vorhabenbezeichnung: Smart Yeast Filtration - Selbstoptimierende Prozessautomatisierung einer dynamischen Mikrofiltration mit KI-Unterstützung zur wirtschaftlichen Rückgewinnung von Hefe-Nebenstoffströmungen in Brauereien	
Laufzeit des Vorhabens: 01.10.2020 bis zum 29.02.2024	
Berichtszeitraum: 01.10.2020 bis zum 29.02.2024	

Abschlussbericht Projekt SMARTOPTION

Teil I: Kurze Darstellung	2
I.1 Ursprüngliche Aufgabenstellung sowie wissenschaftlicher und technischer Stand an den angeknüpft wurde	2
I.2 Ablauf des Vorhabens	2
I.3 Wesentliche Ergebnisse	3
Teil II: Eingehende Darstellung	4
II.1 Im Rahmen des Vorhabens durchgeführte Arbeiten	4
II.2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises	15
II.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Projektarbeit	15
II.4 Voraussichtlicher Nutzen	15
II.5 Während der Durchführung des Vorhabens bekannt gewordener Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen	15
II.6 Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen des Ergebnisses	16
Teil III: Erfolgskontrollbericht	17
III.1 Wissenschaftlich-technische Ergebnisse des Vorhabens	17
III.2 Fortgeschriebener Verwertungsplan zum Sachbericht	17
III.3 Arbeiten, die zu keiner Lösung geführt haben	20
III.4 Einhaltung der Ausgaben- und der Zeitplanung	20

Teil I: Kurze Darstellung

I.1 Ursprüngliche Aufgabenstellung sowie wissenschaftlicher und technischer Stand an den angeknüpft wurde

Im Rahmen des Projekts „Smart Yeast Filtration – Selbstoptimierende Prozessautomatisierung einer dynamischen Mikrofiltration mit KI-Unterstützung zur wirtschaftlichen Rückgewinnung von Hefe-Nebenstoffströmungen in Brauereien“ wurde ein innovatives Konzept der dynamischen Cross-Flow Filtration mittels Methoden der Industrie 4.0 für den Betrieb in der Brauerei automatisiert und optimiert. Die ursprüngliche Aufgabenstellung bestand darin, eine Filtrationsanlage des Typs „Rotoramic“ basierend auf rotierenden Keramikscheiben, die aktuell von der Partnerfirma GEA für die Filtration von Überschusshefe in Brauereien entworfen wird, zu optimieren. Die Optimierung sollte sowohl aus verfahrenstechnischer Sicht, als auch aus automatisierungstechnischer Sicht erfolgen. Das Ziel der Optimierung waren eine verbesserte Standzeit der Anlagen, ein erhöhter Filtratdurchfluss, eine verlängerte Lebenszeit der Membranscheiben und eine daraus resultierende Schonung von Ressourcen und erhöhte Wirtschaftlichkeit in der Bierherstellung. Diese Anlagen waren bisher nur für große Brauereien wirtschaftlich und sollten durch die erhöhte Wirtschaftlichkeit ebenso für mittlere und kleine Brauereien, die einen signifikanten Anteil der Brauereilandschaft in Deutschland ausmachen, zugänglich werden.

I.2 Ablauf des Vorhabens

Eine erste Evaluierung des Automatisierungskonzepts der GEA-Rotoramic zeigte, dass die bestehende Regelungsstruktur der Filtrationsanlage erweiterbar ist, um sie für längere Betriebszeiten ohne manuellen Eingriff zu optimieren. Die Betrachtung der technischen Gegebenheiten der GEA-Rotoramic führte zu einer Änderung im Design des geplanten Hochschul-Demonstrators. Die ursprünglich kontinuierlich ausgelegte Anlage wurde modifiziert, um auch eine diskontinuierliche Produktion zu ermöglichen, was die Standzeit verlängern könnte. Auf Basis historischer Daten konnten bereits erste mathematische Modelle entwickelt werden, die das dynamische Verhalten der Anlagenkomponenten abbilden. Aufbauend auf der Analyse wurde ein neuartiges Steuerungs- und Regelungskonzept entwickelt, das sowohl klassische Regelungstechnik als auch künstliche Intelligenz (KI) kombiniert. Dieses Konzept zielt darauf ab, Filtrat-Ausbeute und Membran-Standzeit zu maximieren, sowie den Return on Investment zu minimieren. Für die Analyse der Substrate wurde ein Nah-Infrarot (NIR) Spektrometer beschafft, welches mittels einer Reflexionssonde im Unfiltrat und einer Transflexionssonde im Filtrat misst. Mit der Lieferung der Pilotanlage wurden Versuche sowohl verfahrenstechnischer, als auch regelungstechnischer Natur durchgeführt, die dabei entstandenen Daten wurden für das Training weiterer KI-Modelle

verwendet. In einer Versuchsreihe wurden die Auswirkungen von Partikelgrößen und Membranabständen auf den Filtrationsprozess untersucht. Eine wichtige Erkenntnis war der rheologische Umschlagspunkt bei einem Trockenmassegehalt von 20-25 %. Darüber hinaus wurden über 50 Filtrationen an der Rotoramic mit unterschiedlichen Prozessparametern durchgeführt, um eine breite Datenbasis zu schaffen. Ziel war es, die optimale Betriebsweise durch Variation von Drehzahlen und Transmembrandrücken zu bestimmen. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen und die entwickelten Modelle wurden in wissenschaftlichen Publikationen veröffentlicht und sind Grundlage für weitere Optimierungen der Filtrationsanlage im industriellen Kontext. Es wurde ein Prozessmonitoringsystem erarbeitet, anhand dessen man den Prozess während der Filtration mittels KI-Modellen überwachen kann. Als Abschluss wurden die KI-Modelle und die Regelung an Bier-Hefe-Suspensionen aus einer realen Brauerei validiert. Auf der Grundlage dieser Ergebnisse wurden unterschiedliche Modelle aus der Literatur miteinander verglichen. Die Resultate dieser Filtrationen zeigten großen Wert sowohl für die verfahrenstechnische Untersuchung der Hefen, als auch für die Untersuchung datengetriebener Modelle.

1.3 Wesentliche Ergebnisse

In diesem Projekt wurde eine Cross-Flow Filtrationsanlage sowohl verfahrenstechnisch, als auch automatisierungstechnisch optimiert, um den Prozess insgesamt wirtschaftlicher zu machen. Dazu wurde eine eigene Pilotanlage entworfen und mit adaptiven Reglern, unterstützt von einem KI-basierten Monitoringsystem, ausgestattet. Die verfahrenstechnischen Versuche lieferten Ergebnisse im Bereich der Rheologie und Filtrierbarkeit sowohl von Hefe-Wasser-, als auch von Hefe-Bier-Suspensionen. Die KI Modelle zeigten zwar Schwierigkeiten, exakte Vorhersagen zu generieren, allerdings ließ sich dies durch zusätzliches Domänenwissen beheben. Dabei stellte sich heraus, dass in diesem Fall hybride Modelle aus Expertenwissen und KI bessere Ergebnisse erzielt als rein KI basierte Modelle.

Teil II: Eingehende Darstellung

II.1 Im Rahmen des Vorhabens durchgeführte Arbeiten

Ist-Stands Analyse

Die drei Arbeitsgruppen der TH OWL (Fachgebiet Mathematik & Datenwissenschaften - MDW, Institut für Energieforschung iFE und das Institut für Lebensmitteltechnologie - ILT.NRW) arbeiteten interdisziplinär zusammen und tauschten sich regelmäßig hinsichtlich der Ergebnisse und des weiteren Vorgehens aus. Aus Sicht des Instituts für Energieforschung wurde das bestehende Automatisierungskonzept der GEA-Rotoramic (Crossflow Filtrationsanlage) evaluiert: Die Sensorik und Aktorik wurde auf Grundlage der technischen Dokumentation gesichtet und zunächst modellbasiert nachgebildet und untersucht. Für die modellbasierte Untersuchung wurde die reale Maschine in Form eines dynamischen Zweitank-Modells abstrahiert. Modellparameter wurden auf Grundlage einer Systemidentifikation mit Hilfe von Messdaten der Fa. GEA abgeleitet. Eine erste Bewertung ergab, dass die Regelungsstruktur wesentlich erweitert werden kann, um die Filtrationsanlage im industriellen Kontext betreiben zu können (lange Betriebszeiten ohne manuellen Eingriff). Hier wurden andere Aktoren im Retentatabfluss vorgeschlagen (Ventile anstatt Pumpe) und die Definition der aktuellen Regel- und Stellgrößen zu hinterfragen.

Die Betrachtung des technischen Ist-Standes der GEA Rotoramic hat zu einer Modifikation der Konstruktion des geplanten Hochschul-Demonstrators geführt. Die bislang eingesetzte Variante der Rotoramic ist für den kontinuierlichen Betrieb ausgelegt. Die Auswertung der zur Verfügung stehenden Daten hat gezeigt, dass bei dieser Verfahrensweise im Besonderen nur kurze Standzeiten erreicht worden sind. Für einen möglichst wirtschaftlichen Betrieb ist neben der Qualität des hergestellten Produktes (Bier) auch eine möglichst lange Standzeit relevant. Die für die Hochschule geplante Anlage sollte nun auch in der Lage sein, eine diskontinuierliche Produktion zu ermöglichen, mit dem Ziel, die Standzeit der Anlage zu verlängern. Darüber hinaus wurde bei der experimentellen Anlage der TH OWL eine Dimensionsreduzierung auf die örtlich verfügbaren technischen Kapazitäten (Platzbedarf Technikum, Kapazitäten technischer Leitungen) durchgeführt. Durch die Verringerung der Anlagengröße im Vergleich zu den bereits bestehenden industriellen Versionen der Rotoramic sind geringfügige dimensionsbedingte Varianzen zu erwarten, die für das Erreichen der Projektziele allerdings nicht relevant sind.

Sensortechnik: NIR Sensorik

Die Untersuchungen des ILT.NRW fokussierten sich auf die Evaluierung passender hochdatenintensiver photonischer Messtechnik für den dynamischen Filtrationsprozess. Bei den untersuchten NIR (Nah-Infrarot)-Sensoren handelte es sich um einen Reflexions- und einen Transflexionsmesskopf mit variierendem Spaltmaß. Die Untersuchungen wurden an Hefe-Bier Suspensionen mit unterschiedlichen Hefekonzentrationen durchgeführt. Variierende Hefekonzentration sind auch bei den Substraten im Feld für die dynamische Hefefiltration zu erwarten.

Die getesteten NIR-Messsonden wurden mit Verfahren aus der multivariaten Statistik und dem Bereich Machine Learning evaluiert. Hierbei hat sich gezeigt, dass die Messung mit Transflexionssonden und Reflexionssonden beide für Messaufgaben in der Rotoramic geeignet sind. Für die Untersuchung von filtriertem Bier (Filtrat-Strom) ist die Analytik mit einer Transflexionssonde der Reflexions-Analytik vorzuziehen, da eine starke Absorption von Licht im NIR Bereich zu einem starken Messrauschen beim Einsatz der Reflexionssonde führt.

Im Bereich des Unfiltrats (rel. hohe Konzentration an Hefezellen) kann die Reflexionssonde bevorzugt nach den vorliegenden Ergebnissen verwendet werden. Aufgrund der Sonden-Bauweise kann die Reflexionssonde ohne Elemente verwendet werden, die in die Leitung hineinragen und damit die Strömung beeinflussen.

Im Zeitraum Mai/Juni 2021 erfolgte die Spezifikation der Ausschreibungs-Formalitäten für das neue NIR-Spektrometer inkl. des Zubehörs auf Grundlage der experimentellen Anlage. Die Veröffentlichung der Ausschreibung erfolgte im Juni. Die Auslieferung des NIR-Spektrometers durch den gewählten Zulieferer erfolgte im Dezember, musste jedoch aufgrund fehlerhafter Auslieferung reklamiert werden, sodass die ersten Versuche mit dem NIR Spektrometer im Mai 2022 gemacht werden konnten.

Datenanalyse

Zusätzlich zu den Arbeiten in Kooperation mit dem ILT.NRW hat die AG MDW weitere Themen bearbeitet. Dabei wurden vorliegende Daten aus bestehenden Rotoramic-Anlagen gesichtet und untersucht. Anhand der Datenanalyse konnten erste Erkenntnisse über die aktuelle Betriebsweise der GEA-Rotoramic gewonnen werden. Außerdem wurden Hinweise über eine bessere Messung/Dokumentation an die Firma GEA weitergegeben. Dabei ist es vor allem essentiell, dass die Daten der Stellgrößen erfasst werden, um deren Auswirkungen auf die Anlage zu identifizieren. Es wurde zusätzlich eine Datenpipeline generiert, die die vorhandenen Daten für Machine Learning Verfahren nutzbar macht. Die weiteren Arbeiten

konzentrierten sich auf die Analyse historischer Anlagendaten zweier Feldanlagen (GEA "Rotoramic"). Alle wesentlichen historischen Datensätze wurden hinsichtlich des Nutzens interdisziplinär analysiert, wobei sich die Datensätze der ersten Feldanlage als nicht gewinnbringend erwiesen, da hier nur ein Teil der Messgrößen aufgenommen wurde. Die Daten der zweiten Feldanlage wurden ebenfalls gesichtet und bewertet: Es hat sich herausgestellt, dass sich drei Filtrations-Tage als gewinnbringend erweisen. Diese Datengrundlage eignet sich jedoch nicht für die Entwicklung datenbasierter KI-Modelle, da die Datenmengen zu gering bzw. nicht das gesamte Anlagenverhalten abbildeten. Allerdings konnten auf dieser Basis erste mathematische Modelle entwickelt werden, die das dynamische Verhalten der Anlagenkomponenten widerspiegeln und in PC-basierten Entwicklungsumgebungen implementiert werden konnten. Im Zuge der Datenanalyse konnten zahlreiche Effekte des verfahrenstechnischen Prozesses (dynamische Cross-Flow-Filtration) erkannt werden die beim neuen Steuerungs- und Regelungskonzept Berücksichtigung finden:

- Hoher Druckanstieg Aufgrund von Instabilität einzelner Regelkreise führt zu einer unmittelbar geringeren Permeat-Durchlässigkeit der keramischen Membranen und somit, im weiteren Filtrationsverlauf, zu niedrigeren Permeat-Volumenströmen bei ansonsten gleichbleibenden Prozessparametern.
- "Reinigungseffekt" durch kurzzeitiges druckloses "frei schleudern" der Membranen. Dieser Effekt wirkt sich positiv auf den Permeat-Volumenstrom aus (Abtrag der Deckschicht)

Im weiteren Projektverlauf wurde das bestehende Steuerungs- und Regelungskonzept der Feldanlagen evaluiert und darauf aufbauend ein neuartiges Konzept erarbeitet, das perspektivisch auf der experimentellen Anlage implementiert werden soll. Dieses Konzept besteht aus Elementen der klassischen Regelungstechnik, die mit Methoden des maschinellen Lernens zusammengeführt werden. Die wichtigsten Prozessgrößen (Drücke, Temperaturen, Behältervolumen, abgeleitete Größen etc.) wurden hinsichtlich ihrer kausalen Zusammenhänge und der Hierarchie zusammengefasst. Das Konzept beinhaltet die methodischen Ansätze (KI-Methoden und klassische Ansätze der physikalischen Modellbildung und Regelungstechnik) auf verschiedenen Ebenen der Betriebsführung, wobei verschiedene Optimierungs-Kostenfunktionen zugrunde gelegt werden können. Neben der Maximierung der "Filtrat-Ausbeute" und der Membran-Standzeit während der Filtration, kann

auch unter Zuhilfenahme monetärer Größen, die Minimierung des Return on Investment (ROI) der Gesamtanlage als sinnvolle Zielgröße zugrunde gelegt werden.

Spezifikation der Versuchsanlage: Pilotanlage

Es fanden zahlreiche Abstimmungsgespräche mit den Projektpartnern statt (sowohl online als auch an den jeweiligen Standorten). Bei dieser Gelegenheit hat u.a. die Fa. GEA eine aktuelle Anlagenkonfiguration vorgestellt, die einem Rezirkulations-Batchprozess entspricht. Dieser wurde bei GEA WS unter Laborbedingungen durchgeführt und getestet. Die dort aktuell verwendete Feldanlage ist für die Implementierung der konzipierten Betriebsführung nicht geeignet, da insbesondere der Automatisierungsgrad der Anlage unzureichend für eine aktive Adaption während des laufenden Anlagenbetriebs ist. Hierbei ist z.B. das analoge Retentatventil zu erwähnen.

Des Weiteren wurden zahlreiche Hardware-Komponenten der experimentellen Anlage abgestimmt, um hier eine reibungslose Kompatibilität, mit den Komponenten der TH OWL nach Auslieferung der Anlage, zu gewährleisten (z.B. Kopplung mit NIR-Spektrometer und favorisierte Kommunikations-Schnittstellen).

Zur Generierung von Daten eines Filtrationsprozesses wurden Filtrationsversuche an einer nicht automatisierten und sehr einfachen dynamischen Cross-Flow-Anlage aus dem TH-Bestand durchgeführt. Der Fokus lag hier auf einer Methode zur Bestimmung der Hefekonzentration im Unfiltrat über die Messung des NIR-Spektrums (Trainieren eines KI-Modells zur Bestimmung der Konzentration). Die Versuche haben gezeigt, dass sich die Hefekonzentration einer Wasser-/Hefe-Suspension im NIR-Spektrum gut bestimmen lässt und mit linearen Modellen abbildbar ist.

Aufbau der Versuchsanlage: Tischanlage

Im Oktober 2021 wurde eine experimentelle Rotoramic-Anlage im verkleinertem Maßstab vom Projektpartner GEA WS zur Verfügung gestellt - im folgendem "Tischanlage" genannt - die als Übergangslösung für die noch ausstehende Lieferung der eigentlichen experimentellen vollautomatisierten Anlage dient. Nach der Einrichtung und der Erstinbetriebnahme konnten ab Oktober erste Versuche mit Leitungswasser unter gleichbleibenden systematischen Bedingungen durchgeführt werden. Die generierten Daten wurden für die Systemidentifikation und die Parametrierung entwickelter mathematisch-physikalischer Modelle und

Regelalgorithmen genutzt. Die Planung im Oktober 2021 sah vor, dass Versuche mit Hefe/Wasser-Suspensionen erst mit der ausstehenden Lieferung des NIR-Spektrometers ab Ende Oktober 2021 sinnvoll sind. Aufgrund von unternehmensinternen Problemen des Spektrometer-Zulieferers wurden erst ab Dezember Versuche mit Hefe/Wasser-Suspensionen durchgeführt, ohne ein integriertes NIR-Spektrometer im Prozess zu implementieren.

Dabei wurde ein standardmäßiger Ablauf erarbeitet, der u. a. aus Wasserwert-Aufnahmen, zur Bestimmung der "Membran-Durchlässigkeit", und einer standardisierten Reinigungsprozedur (Cleaning in Place - CIP) bestand.

Modellbildung / Innovative Regelung

Da hinsichtlich des Filtrationsprozesses ein konstanter Transmembran-Druck gefordert wird, wurde die Tischanlage um eine eigens entwickelte Druckregelung erweitert. Diese besteht im Wesentlichen aus einem elektromechanischen Retentatventil, das über eine PC-Echtzeitumgebung angesteuert bzw. positioniert werden kann. Des Weiteren wurde für die Realisierung der Regelung die vorhandene MODBUS-Schnittstelle der Tischanlage genutzt, um den aktuellen Transmembrandruck und weitere Messgrößen (Feed-Volumenstrom) der PC-Echtzeitumgebung bzw. der Regelung zuzuführen. Erst nach der mechanischen Nachrüstung der Tischanlage konnten Filtrationsversuche mit kontinuierlich geregelten TMP durchgeführt werden bzw. eine Regelung implementiert werden. Hinsichtlich des Reglerentwurfs wurden mathematisch-physikalische Modelle entwickelt und mit Hilfe von Messdaten der Anlage validiert. Auf dieser Basis erfolgte zunächst die modellbasierte Reglersynthese und Untersuchungen verschiedener Regler-Topologien (Zustandsregelung, Störgrößenaufschaltung, Gain-Scheduling-Topologie) in Form von Simulationen, was in der Regelungstechnik einen typischen ersten Schritt, hin zu einer funktionsfähigen Regelung darstellt. Im Rahmen einer Studien- und Bachelorarbeit wurden zahlreiche Parameterstudien, Topologien und regelungstechnische Dynamikuntersuchungen durchgeführt, um anschließend die vielversprechendsten Topologien und Parameter auf ein PC-Echtzeitsystem zu überführen (MATLAB Toolbox "Simulink Desktop Real-Time"). Hiermit wurde die entwickelte Regelung mit der Aktorik und Sensorik der Tischanlage gekoppelt, sodass eine Regelung des Transmembrandrucks über das PC-Echtzeitsystem als "Regler" inkl. Datenverarbeitung und Retentat-Positionsvorgabe erfolgen konnte. Alle im folgenden erwähnten Konzentrationsversuche nutzen die hier beschriebene TMP-Regelung. Die Modelle und Regler-Topologien, die auf Basis der Tischanlagen-Daten entwickelt wurden,

konnten ebenfalls auf die Pilotanlage (ab August 2022) überführt werden. Wobei das bisher eingesetzte PC-Echtzeitsystem nicht mehr benötigt wird, da die Pilotanlage eine leistungsstarke SPS verfügt, auf der die Regelung in diskretisierter Form implementiert wurde.

Verfahrenstechnische Versuche

Im Zeitraum Februar – April 2022 wurde eine Reihe von Rezirkulationsversuchen mit der Tischanlage durchgeführt. Die Ergebnisse bestätigten die Annahme, dass für die Membranen in der Anlage eine deutliche Permeatvolumenstrom-Abnahme über einen langen Filtrationszeitraum zu beobachten ist, was auf die fortlaufende Verschlechterung bzw. Deckschichtbildung der keramischen Membranen zurückzuführen ist. Im Verlauf dieses Zeitraums konnte die langfristige Verschmutzung der Membran durch ein standardisiertes Reinigungsprotokoll mit erhitzten Laugen und Säuren nur mittelfristig verbessert werden, sodass die Membranen im Juni 2022 beim Projektpartner GEA in speziellen Hochtemperaturöfen "freigebrannt" werden mussten.

Bei zahlreichen Konzentrationsversuchen (Juni bis August) wurde die oben beschriebene TMP-Regelung genutzt, um das Verhalten bei unterschiedlich konstanten TMP (0,5 bis 2 bar) zu studieren. Hierbei zeigten sich verschiedenste Effekte die sich auf die Filtrationsdauer und den Permeat-Volumenstrom beziehen. Eine wichtige Erkenntnis ist das stochastische Verhalten des Permeat-Volumenstroms nach standardisierter Reinigungsprozedur. Es konnte eine schleichende Verschlechterung der Durchlässigkeit bzw. der Höhe des Permeatvolumenstroms beobachtet werden, bis zu einem Volumenstrom 1 dm³/h (unmittelbar nach Reinigung), sodass die Membranen wieder in Zusammenarbeit mit dem Projektpartner "freigebrannt" wurden (s. o.). Des Weiteren wurde die Filtrationsleistung unter Einfluss verschiedener Drehzahlen untersucht, wobei hier keine wesentlichen Permeat-Volumenstromsteigerungen zu höheren Drehzahlen beobachtet wurden, wie eigentlich theoretisch zu erwarten war, was vor allem auf die kleine Überschneidung der "kämmenden" Membranwellen zurückzuführen ist.

Es wurden Filtrationsversuche mit Hefen unterschiedlicher Partikelgrößen durchgeführt. Ziel der Untersuchung war es herauszufinden, welchen Einfluss die Partikelgröße auf die Filtration hat. Die Versuche wurden zunächst an der Tischanlage durchgeführt. Aufgrund der Reproduzierbarkeit der Ergebnisse wurden die Versuche erneut an der Pilotanlage ab August durchgeführt.

Datenanalyse: NIR Spektrometrie

Ab Januar 2022 konnte ein NIR-Spektrometer inkl. zweier Messsonden installiert werden. NIR-Messungen an der Tischanlage sind nicht mit Messungen bzw. Spektren an der Pilotanlage vergleichbar, da u. a. die Rohre der Tischanlage einen deutlich kleineren Durchmesser besitzen, sodass ungewollte Spiegelungen der Rohrrückwand die Ergebnisse verfälschen. Dieses Phänomen trat in der Pilotanlage nicht auf.

In der Folge wurden vorläufige datenbasierte Modelle zur Trockensubstanzbestimmung des Unfiltrats generiert, welche nur bedingt auf unterschiedliche Versuchstage verallgemeinerbar waren.

Spezifikation und Aufbau der Versuchsanlage: Pilotanlage

Im Vorfeld der Bereitstellung der Pilotanlage fanden zahlreiche Gespräche mit dem Projektpartner GEA WS im Berichtszeitraum statt. U. a. genaue Standort-Randbedingungen der Anlage (Platzbedarf, vorhandene Raumhöhen etc.), örtliche Infrastruktur (Heißwasser, DE-Wasser, Heißdampf, IT-Anbindung etc.). Im Nachgang der Anlagelieferung wurde die Anlage in das IT-Netzwerk der Hochschule eingebunden, um den Projektpartnern (GEA und Weidmüller) externen Zugang auf die Prozessdaten zu erlauben. Seitens GEA wurden mehrere Workshops durchgeführt, die sowohl die Anlagenbedienung, als auch die Softwarestruktur der Anlage adressierten. Des Weiteren wurden seitens der TH weitere Messgrößen für die Datenspeicherung festgelegt, die zu Beginn seitens GEA WS implementiert wurden (Ventilpositionen, Drehzahlen, Drehmomente, Anlagenzustände)

Zusätzlich wurden zahlreiche Hardware-Komponenten der experimentellen Anlage abgestimmt, um hier eine reibungslose Kompatibilität mit den Komponenten der TH OWL nach Auslieferung der Anlage zu gewährleisten (z.B. Kopplung mit NIR-Spektrometer und favorisierte Kommunikations-Schnittstellen).

Modellbildung: CFD Simulation

Im Projekt wurde die Geometrie der Filtrationsanlage (Anordnung der keramischen Membranen, Wellen und Wellengehäuse) im Rahmen einer Strömungssimulation mit COMSOL modelliert und untersucht. Die Idee war hierbei, ein verbessertes Verständnis der Strömungsverhältnisse innerhalb des Scherspalt zu erhalten, da diese nicht direkt messbar

ist. Dabei wurden die realen Scheibendruckmesser, Wellenlängen und Spaltabstände der Scheiben zugrunde gelegt. Grundsätzlich konnte gezeigt werden, dass der hauptsächliche Schereffekt durch die Scheibenrotation beeinflusst wird und der Effekt der Einströmung in das Wellengehäuse keinen nennenswerten Beitrag zum Fließverhalten im Scherspalt hat. Des Weiteren wurden die verschiedenen Relativgeschwindigkeiten innerhalb des Scherspalts bei unterschiedlichen Radien gegenübergestellt.

Labor- und Technikumsversuche

Versuche, die zuerst auf der Tischanlage durchgeführt wurden, wurden auf der Pilotanlage wiederholt. Es wurden 3 verschiedene Partikelgrößen an Hefe untersucht. Es wurden dabei diverse Unterschiede zwischen den einzelnen Suspensionen erkannt. Eines der Ergebnisse ist, dass je kleiner die Partikelgröße der Hefe ist, desto höher lässt sich diese durch die Filtration bei gleichem Drehmoment des Filtermotors aufkonzentrieren. Außerdem wurde bei Aufkonzentrierung der Hefen ein Umschlagspunkt erkannt. Dieser bezieht sich auf das rheologische Verhalten der Suspensionen, welches bei einem Trockenmassegehalt von ca. 20-25 % von einem strukturviskosen Verhalten auf ein dilatantes Verhalten umschwingt. Es wurde beobachtet, dass je kleiner die Partikelgröße der Hefe ist, desto höher muss der Trockenmassegehalt sein, um diesen Umschwung zu erzeugen. Darüber hinaus wurde Begleitanalytik durchgeführt, bei welcher unter anderem ermittelt wurde, dass die Vitalität der Hefe durch die Scherung während der Filtration nicht beeinträchtigt wird.

In einer Versuchsreihe wurden sowohl die Drehzahl der Membranen als auch der Abstand der Membranen zueinander untersucht. Das Ziel war es herauszufinden, welche Anlagenkonfiguration sich für den Betrieb am besten eignet und das optimale Ergebnis liefert. Dabei hat sich herausgestellt, dass ein Filtrationsverlauf grob in 3 Phasen unterteilt werden kann. Die erste Phase beschreibt das „Einschwingen“ des Prozesses. Hier kommt es zu einer für den Verlauf der Filtration irreversiblen Deckschichtbildung. Die zweite Phase ist der „quasi steady state“ hier kommt es abgesehen vom Trockenmassegehalt der Suspension zu keinen weiteren Änderungen von Prozessgrößen. Durch einen „Abknickpunkt“ wird die dritte Phase des Prozesses eingeleitet. Hierbei sinkt der Durchfluss stark ab und das Drehmoment des Filtrationsmotors steigt an. In den Versuchen wurde herausgefunden, dass bei gleichbleibendem Membranabstand und unterschiedlichen Membrandrehzahlen der Durchfluss in der zweiten Phase des Prozesses mit steigender Drehzahl ebenfalls steigt. Der Abknickpunkt wird durch höhere Drehzahl hinausgezögert und tritt erst später im Prozess auf, der Durchfluss sinkt dann jedoch schneller als bei geringen Drehzahlen. Durch die Erhöhung

des Scheibenabstandes wird zudem der Durchfluss verringert und es kommt früher zu einem Abknickpunkt.

Transfer

Die bis Februar 2023 erarbeiteten Projektergebnisse wurden in einer wissenschaftlichen Publikation im Rahmen der "International Conference on Industrial Informatics - INDIN23" veröffentlicht. Auf der finalen Konferenz im Juli 2023 wurden die Pilotanlage und die erarbeiteten Ergebnisse zusätzlich einem breiten wissenschaftlichen Publikum präsentiert. Die Endergebnisse des Projekts wurden im Mai 2024 auf dem EBC Kongress in Lille in Form eines Posters vorgestellt.

Darüber hinaus wurden die Projektergebnisse im Rahmen diverser Netzwerkveranstaltungen mit dem Projekt DigiFood vorgestellt. Dabei gab es, durch die Nähe des Projekts zu einem weiteren Projekt der gleichen Förderlinie, intensive Gespräche, sowie einen konstruktiven wissenschaftlichen Austausch bezüglich Methodik, Zielsetzung und Ergebnissen.

Integration des Prozessmonitoringsystems

Eine erste Versuchsreihe im Januar 2023 lieferte vielversprechende Ergebnisse für die Modellierung des Trockensubstanzgehalts der Hefe im Retentat. Ergebnisse wurden im Rahmen einer wiss. Publikation auf der INDIN 2023 veröffentlicht. Dieses Modell wurde ebenfalls mittels Laborrechner echtzeitfähig implementiert.

Im weiteren Verlauf des Jahres wurden Inkonsistenzen bei der Spektrometrie entdeckt. Dadurch kam es trotz identischer Konfiguration der Hard- und Software zu einem vermutlichen Unterschied der Integrationszeiten. Dieser Effekt konnte durch bestimmte Vorverarbeitungsmethoden der Spektren reduziert, jedoch nicht vollständig eliminiert werden. Darüber hinaus wiesen die Spektren teilweise schlagartige Veränderungen auf, deren Grund nicht identifiziert werden konnte. Wir bewerten daher die NIR-Spektrometrie in ihrer aktuellen Spezifikation als nicht zielführend für die sichere Bestimmung des Trockensubstanzgehalts innerhalb der Rohrleitung.

Es gibt darüber hinaus weitere Ansätze den Trockensubstanzgehalt lediglich anhand der Prozessparameter zu schätzen. Dies ist möglich, allerdings insbesondere zu Beginn der Filtration, wenn diese Information am meisten Wert hat, ist diese Vorhersage sehr ungenau. Dies hat hauptsächlich mit dem nahezu konstanten Verhalten des Drehmoments bei niedrigen

Trockensubstanzgehalten zu tun, während dieses bei hohen Trockensubstanzgehalten eine exponentielle Steigung aufweist.

Im Zeitraum März bis Oktober 2023 wurde an der Rotoramic eine aus 45 Filtrationen bestehende Versuchsreihe durchgeführt. Die Versuchsreihe diente dazu, eine möglichst diverse Datenmenge aufzunehmen. Es wurden dabei sowohl der Transmembrandruck (in einem Bereich von 0,5 bis 1,5 bar) als auch die Drehzahl (in einem Bereich von 200 bis 400 U/min) variiert. Jede Kombination wurde außerdem als 3-fach Bestimmung durchgeführt. Die hierdurch aufgenommenen Daten dienen als Grundlage für aufbauende Modellierungen.

Integration der Versuchsanlage zum CPPS

Anhand der Versuchsdaten wurden mittels Machine-Learning Methoden unterschiedliche Modelle generiert, die den Verlauf der Filtration vorhersagen sollen.

Restlicher Verlauf der Filtration: Anhand der aktuellen Prozessdaten wird eine Schätzung über die Restdauer des Versuchs abgegeben. Als Endkriterium wurde hier ein Peak im Feedvolumenstrom verwendet, welcher die maximale Fließfähigkeit der Suspension darstellt. Da dieser Peak einfach zu detektieren ist, läuft die Datengenerierung für ein klassisches Problem der Restlaufzeitschätzung hier sinnvoll ab. Es zeigt sich, dass der restliche Verlauf am Anfang der Filtration sehr unzuverlässig vorhersehbar ist. Dies hängt mit einer schwierigen Schätzung der Dynamik des Filterwiderstands zusammen.

Aktueller Trockensubstanzgehalt: Anhand der aktuellen Prozessdaten wird eine Schätzung des aktuellen Trockensubstanzgehalts der Suspension abgegeben. Dabei werden von diesem Modell keine NIR Daten verwendet. Diese Schätzung zeigt sich insbesondere am Anfang der Filtration als eher unzuverlässig. Mit zunehmender Dauer der Filtration wird diese Vorhersage genauer, da unter anderem das Drehmoment in diesen Bereichen eine deutlich höhere Varianz hat und nahezu monoton mit dem Trockensubstanzgehalt ansteigt.

Die Auswertung hat gezeigt, dass einige Zusammenhänge nicht anhand der gemessenen Daten erklärbar sind. Es zeigt sich außerdem eine hohe Varianz im Ausgangszustand der Membran. Dies konnte erst im späteren Verlauf der Messkampagne behoben werden, sodass die Daten teilweise schwierig zu vergleichen sind.

Felderprobung

Ab Juli wurden Anfragen an benachbarte Brauereien herausgegeben, um Bierhefe aus einer realen Brauerei zu organisieren. Dies gestaltete sich mit einer Partnerbrauerei der TH OWL sehr schwierig, woraufhin der Projektpartner GEA Mitte August den Kontakt mit einer alternativen Brauerei herstellte. Der Kontakt stellte sich hier als unkompliziert heraus, sodass Ende August die ersten Filtrationen mit Bierhefe durchgeführt werden konnten. Die Filtration mit Backhefe stellte sich in vielerlei Hinsicht als gutartig heraus. Erste Versuche mit Bierhefe aus dem realen Brauprozess stellten Unterschiede in Fließfähigkeit und Filtrierbarkeit heraus. Dabei musste die Filtration in mehreren Fällen abgebrochen werden, da die Fließfähigkeit der Suspension innerhalb der Anlage nicht mehr gewährleistet war.

Cyber-System

Im Berichtszeitraum wurde die entwickelte Transmembrandruck-Zustandsregelung auf die industrielle Anlage implementiert. Hierbei wurde nochmal besonders auf die zyklische Arbeitsweise der Maschinensteuerung (SPS) mit wechselnden Zykluszeiten eingegangen, indem dies bei der diskreten Implementierung berücksichtigt wurde.

Die Regelung wurde im Verlauf der Filtrationsversuche laufend optimiert. Insbesondere ist hier noch im Nachgang der wechselnde Trockensubstanzgehalt der Suspension in den Reglerentwurf eingegangen. Insgesamt wurde im Projektverlauf die vorher genutzte TMP-Regelung (Standard-PI-Regelung) maßgeblich um eine Zustandsregelung erweitert die hier mehr Einstellmöglichkeiten bietet (Parameter) und auch weitere Prozessgrößen direkt innerhalb der Regelung integriert (Durch Zustands- und Störgrößenaufschaltung).

Im Verlauf der Reglererweiterung wurden zahlreiche gesonderte Filtrationsversuche zur Validierung der Regelung durchgeführt. Hierbei wurden u. a. die Änderung von Zeitkonstanten in Abhängigkeit des Trockensubstanzgehalts betrachtet: Es zeigte sich eine starke Veränderung der Druckdynamik (Druck-Zeitkonstante) bei erhöhten Trockensubstanzgehalt im Vergleich zum Anfangs-Trockensubstanzgehalt der Filtration. Die entwickelte modellbasierte Regelung und die Validierung wurden im Rahmen einer Veröffentlichung dokumentiert (INDIN-Konferenz 2023).

Im Rahmen der zahlreichen Messungen in verschiedenen Betriebspunkten konnte ein Kennfeld der Maschine erstellt werden. Aus diesem lässt sich die Verbindung von Tankdruck

und Feedvolumenstrom in Abhängigkeit von verschiedenen Retentatventilpositionen darstellen.

II.2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Die wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises decken die Personalkosten, sowie die Beschaffung des NIR-Spektrometers ab. Diese Ausgaben waren zentraler Bestandteil der Forschungsleistung und absolut notwendig.

II.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Projektarbeit

Die geleistete Projektarbeit war notwendig und angemessen um die Projektziele zu erreichen. Insbesondere die kostenneutrale Projektverlängerung war notwendig, um die generierten Modelle im Feld zu erproben und zu evaluieren.

II.4 Voraussichtlicher Nutzen

Das Projekt unterstützt die Entwicklung eines deutschen Produkts auf dem Markt, das speziell mittelständischen Brauereien ein weiteres Geschäftsfeld eröffnen soll. Damit dient es sowohl der Wirtschaftlichkeit, als auch dem Ressourcenschutz. Darüber hinaus dienen die Projektergebnisse als Best-Practice für die Digitalisierung und Automation in der Lebensmittelindustrie.

II.5 Während der Durchführung des Vorhabens bekannt gewordener Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Hier sind vor allem die aktuell stetig wachsenden Anwendungsfelder der NIR Spektrometrie zu nennen. Diese verwenden allerdings häufig die gleiche Methodik wie der Stand der Technik und spezialisieren sich lediglich auf neue Lebensmittelgruppen. Hier geht es meistens eher um die Klassifizierung, als in unserem Fall um Regression.

II.6 Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen des Ergebnisses

1. Tebbe, J., Pawlik, T., Trilling, M., Löbner, J., Lange-Hegermann, M., & Schneider, J. (2023, July). Holistic optimization of a dynamic cross-flow filtration process towards a cyber-physical system. In *2023 IEEE 21st International Conference on Industrial Informatics (INDIN)* (pp. 1-7). IEEE.
2. Trilling-Haasler, M., Tebbe, J., Löbner, J., Lange-Hegermann, M., & Schneider, J. (2024, May). Yeast filtration with rotating membrane filtration – a new approach for an economical recovery of beer from surplus yeast. In: 39th EBC Congress.