Abschlussbericht – Teilvorhaben SOPAT GmbH im Verbundprojekt „OptiPBR“

Projekt: Optische Softsensorik von Algenkultivierungen in großskaligen Photobioreaktoren – Optimierung durch Prozessführung und Bekämpfung mikrobieller Belastungen (OptiPBR)

Teilvorhaben: Foto-optische Sensorik zur Prozessentwicklung und -optimierung der Algenkultivierung

Förderkennzeichen 13N15851

15.07.2025

Teil I – Kurzbericht

Ausgangslage und Zielsetzung

Das Verbundprojekt OptiPBR adressierte die zentrale Herausforderung, mikrobiologische Kontaminationen in großtechnischen Photobioreaktoren (PBR) frühzeitig zu erkennen und wirksam zu bekämpfen. Ziel war es, durch den Einsatz neuartiger photonischer Messtechnik Produktionsausfälle zu vermeiden und die Ausbeute an hochwertiger Biomasse zu steigern.

Das Teilvorhaben der SOPAT GmbH fokussierte auf die Entwicklung einer Inline-Mikroskopie-Sonde (MM-2) zur Echtzeit-Bildanalyse, kombiniert mit Photonendichtewellen-Spektroskopie (PDW), um ein Frühwarnsystem für mikrobielle Belastungen zu realisieren.

Vorgehensweise

- Weiterentwicklung der MM-2 Inline-Mikroskopie-Sonde für CIP/SIP-fähigen Betrieb.
- Aufbau einer Sensorplattform (MM-2 + PDW) zur Fusion von Bild- und Streulichtdaten.
- Entwicklung einer Datenbank und Klassifikationsmodelle für Zielorganismen und Kontaminanten.
- Vorbereitung der Integration der Messergebnisse in Prozessleitsysteme über Modbus TCP/IP.
- Tests in Labor-, Prozess- und Pilot-PBR.

Wesentliche Ergebnisse

- Die MM-2 Sonde wurde erfolgreich angepasst: modulare Bauweise, prozessferne Schweißnähte, polierte Oberflächen, CIP/SIP-Reinigbarkeit.
- Ein funktionierendes Frühwarnsystem zur Erkennung mikrobieller Belastungen wurde realisiert. Kontaminationen konnten mittels Einzelzellanalyse bereits beim ersten Auftreten erkannt werden.
- Die Sensorplattform wurde im Labor erfolgreich erprobt, in Prozess- und Pilot-PBR getestet und für die Integration in Leitsysteme vorbereitet.
- TRL 6 erreicht: Ein vertriebsfertiger Prototyp wurde aufgebaut, der für Demonstrationen eingesetzt wird.

Kennzahlen:

- Zeitgewinn gegenüber konventioneller Analytik: 2–8 Stunden.
- Detektion einzelner Kontaminationszellen möglich.
- Messergebnisse können in Echtzeit ins Prozessleitsystem übertragen werden.

Bedeutung

Die Technologie erhöht die Prozesssicherheit und Wirtschaftlichkeit in der Algenproduktion und ist auf andere biotechnologische Prozesse (z. B. Fermentation, Lebensmittelproduktion, pharmazeutische Bioprozesse) übertragbar.

Teil II – Eingehende Darstellung

Das Teilvorhaben der SOPAT GmbH war von Beginn an auf die Entwicklung einer inline-fähigen foto-optischen Sensorik zur Prozessentwicklung und -optimierung der Algenkultivierung ausgerichtet. Dabei sollte insbesondere die hauseigene MM-2 Inline-Mikroskopie-Sonde in Kombination mit der Photonendichtewellen-Spektroskopie (PDW) weiterentwickelt werden, um eine neuartige Sensorplattform für Photobioreaktoren zu schaffen. Im Zentrum stand die Fähigkeit, mikrobiologische Kontaminationen frühzeitig zu detektieren und damit die Prozessführung sicherer und wirtschaftlicher zu gestalten.

In der ursprünglichen Planung waren mehrere Teilziele formuliert: der Aufbau eines MM-2 Systems für unverdünnte Messungen hochkonzentrierter Algensuspensionen, die Entwicklung eines neuronalen Netzes für die kontinuierlich anpassbare Objekterkennung im laufenden Anlagenbetrieb, die Kombination von Bildanalyse mit PDW- und weiteren spektroskopischen Verfahren sowie die Konstruktion einer industrietauglichen Messzelle mit Reinigungsmöglichkeiten. Schließlich war die Demonstration robuster Messergebnisse unter Realbedingungen vorgesehen.

Diese Ziele wurden im Verlauf des Projekts weitgehend erreicht. Die MM-2 Sonde wurde mechanisch und optisch so angepasst, dass sie nun den Anforderungen des industriellen Betriebs genügt. Medienberührende Teile können einfach ausgetauscht werden, Schweißnähte wurden prozessfern verlegt, und die Oberflächen sind poliert, sodass eine Reinigung und Sterilisation mittels CIP- und SIP-Verfahren möglich ist. Ergänzend wurde eine neue Durchflussmesszelle konstruiert, die sowohl eine schonende Fluiddynamik als auch die Anbindung der PDW-Messtechnik erlaubt. Damit konnte die Grundlage für einen robusten Dauerbetrieb in Produktionsanlagen gelegt werden.

Ein Schwerpunkt lag auf der automatisierten Bildanalyse. Gemeinsam mit den Projektpartnern wurden große Mengen Bilddaten aufgenommen und annotiert, um daraus eine Analysebibliothek zu erstellen. Auf dieser Basis entwickelte SOPAT neuronale Netze, die in der Lage sind, Zielorganismen und Kontaminationen zuverlässig zu unterscheiden. Erste Trainings mit Modellorganismen wie *Micrococcus luteus* oder Protozoen verliefen erfolgreich. Auch Zellcluster des Zielorganismus Spirulina konnten als störende Einflussgröße berücksichtigt werden. Die Ergebnisse zeigten, dass die Zellen segmentiert und in Klassen prädiziert werden konnten. Besonders wichtig war, dass bereits beim Auftreten einzelner Zellen eine Warnung generiert werden konnte, was eine deutliche Verbesserung gegenüber der bisherigen Praxis darstellt.

Die Sensorplattform wurde zunächst im Labor erprobt und zeigte dort robuste Ergebnisse. Im weiteren Verlauf wurde sie in Prozess- und Pilot-Photobioreaktoren eingesetzt. Dabei bestätigte sich, dass die MM-2 Sonde mikrobielle Belastungen deutlich früher erkennt als die PDW-Spektroskopie, die vor allem bei stärker ausgeprägten Belastungen wertvolle zusätzliche Informationen liefert. Die Integration der Messergebnisse in Prozessleitsysteme über Modbus

TCP/IP konnte demonstriert werden. Damit ist der Schritt von einer reinen Messlösung hin zu einem echten Softsensor gelungen, der die Prozessführung unmittelbar unterstützt.

Mit dem Projektabschluss konnte ein vertriebsfertiger Prototyp auf TRL 6 vorgestellt werden. Dieser ist bereits für Demonstrationen im Einsatz und dient als Grundlage für die geplante Pilotserie. Der Zeitgewinn gegenüber konventioneller Analytik liegt je nach Prozess zwischen zwei und acht Stunden. Da die Bildanalyse auf Einzelzellebene erfolgt, kann das System bereits beim Nachweis der ersten Kontaminationszellen reagieren.

Die Arbeiten erwiesen sich sowohl in ihrer Notwendigkeit als auch in ihrem Umfang als angemessen. Nur durch die technische Anpassung der Sonde, die Entwicklung geeigneter Bildanalyseverfahren und die systematische Erprobung unter realistischen Bedingungen konnte die notwendige Praxistauglichkeit erreicht werden. Die Ergebnisse sind von hohem Nutzen: Für die Industrie eröffnet sich die Möglichkeit, Prozesse sicherer und effizienter zu gestalten und Kulturverluste zu vermeiden. Für die Wissenschaft wurden neue Erkenntnisse zur Inline-Bildanalyse gewonnen, insbesondere zur Robustheit neuronaler Netze, zu den Grenzen bei hohen Zelldichten und zu den Anforderungen an Beleuchtung und Datenmengen.

Während des Projektverlaufs wurde auch der Stand der Technik bei anderen Einrichtungen beobachtet. Es zeigte sich, dass internationale Forschungsansätze zwar in Teilaspekten ähnliche Fragestellungen bearbeiten, jedoch meist nicht inline-fähig oder für industrielle Maßstäbe geeignet sind. Insofern nimmt das Projekt OptiPBR mit der entwickelten Lösung eine Vorreiterrolle ein.

Eine vollständige wirtschaftliche Quantifizierung, etwa durch den Nachweis höherer Ausbeuten oder vermiedener Stillstände, war im Rahmen des SOPAT-Teilvorhabens nicht möglich und soll durch die Projektpartner ergänzt werden. Ebenso konnte die Validierung der CIP/SIP-Reinigung nicht vollständig durchgeführt werden. Dennoch bildet das Projekt die Grundlage für eine klare Verwertungsstrategie: Kurzfristig wird der Prototyp in Demonstrationen eingesetzt, mittelfristig ist die Umsetzung einer Pilotserie vorgesehen, und langfristig soll die Technologie auch in anderen biotechnologischen Prozessen wie Fermentation oder in der Lebensmittel- und Pharmaindustrie Anwendung finden.

Schließlich ist die Veröffentlichung der Ergebnisse vorgesehen. Ein White Paper zur Prozessoptimierung in der Algenkultivierung wird vorbereitet. Erste Ergebnisse wurden bereits im Rahmen von Projekttreffen vorgestellt, weitere Veröffentlichungen in Fachzeitschriften und auf Konferenzen wie ECCE/ECAB sind geplant. Als nächstes werden einzelne Ergebnisse auf der Themenkonferenz: Berlin Brandenburg Food Technology - TU Berlin am 13.11.2025 in einem Impulsvortrag zum Thema „Daten & Qualität – Datengestützte Qualitätssicherung, Messtechnik & KI“ vorgestellt