Sachbericht zum Verwendungsnachweis

Verbundprojekt

DigiFloat – Digitalisierung und datengetriebene Optimierung von Flotationsprozessen

in der Förderinitiative

WIR! – Wandel durch Innovation in der Region

Autor
Frank Gerlach

Kurt-Schwabe-Institut für Mess- und Sensortechnik Meinsberg e.V., 04736 Waldheim, Kurt Schwabe Straße 4, frank.gerlach@ksi-sensors.de

WIR! - rECOmine DigiFloat; TP3: Entwicklung einer miniaturisierten Durchflussmesszelle inklusive Sensorik zur störungsfreien Ankopplung an eine Flotationszelle

FKZ: 03WIR1919C

Projektlaufzeit: 01.09.2023 – 31.08.2025
Erstellungsdatum: 15.12.2025

Projektpartner

Simba n3 GmbH	SN3
Helmholtz-Institut Freiberg für Ressourcentechnologie	HIF
Kurt-Schwabe-Institut für Mess- und Sensortechnik Meinsberg e.V.	KSI
Universität Potsdam	UPPC
SECOPTA analytics GmbH	SEC
Maelgwyn Mineral Services	MMS

Dieses Forschungs- und Entwicklungsprojekt wurde durch das Bundesministerium für Forschung, Technologie und Raumfahrt (BMFTR) gefördert und vom Projektträger Jülich (PTJ) betreut. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autorinnen und Autoren.

Gefördert durch:
Bundesministerium für Forschung, Technologie und Raumfahrt

Inhaltsverzeichnis

I. Teil I Kurzfassung 3

I.1 Aufgabenstellung 3

I.2 Wissenschaftlicher und technischer Stand zu Beginn des Vorhabens 3

I.3 Programmablaufmanagement 4

I.4 Wesentliche Ergebnisse im Überblick 5

Teil II Eingehende Darstellung 7

II.1 Motivation und Aufgabenstellung 7

II.2 Wissenschaftlicher und technischer Stand zu Beginn des Vorhabens 7

II.3 Planung und Ablauf des Vorhabens 8

II.4 Erzielte Ergebnisse 8

II.5 Darstellung des während des Vorhabens bekannt gewordenen Fortschritts auf diesem Gebiet bei anderen Stellen 18

II.6 Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere die Verwertbarkeit der Ergebnisse . 18

II.7 Zusammenarbeit mit anderen Stellen außerhalb des Verbundprojektes.... 18

II.8 Veröffentlichungen, Vorträge Referate, etc. 18

II.9 Literaturverzeichnis 19

Anhang….. 20

I. Teil I Kurzfassung

I.1 Aufgabenstellung

Trotz ihrer Relevanz werden Flotationsprozesse in Forschung und Industrie vielfach weiterhin empirisch optimiert und geregelt. Die komplexen Wechselwirkungen zwischen Flüssigkeit, Feststoffen und Gasblasen sowie die dynamischen Prozessbedingungen erschweren eine durchgängige, prozessnahe Erfassung relevanter Messgrößen und damit eine datenbasierte Optimierung. Viele stoffliche und chemische Parameter sind bislang nur mit erheblichem experimentellem Aufwand und häufig nur im Anschluss, d.h. offline, verfügbar.

Hier setzte das Projekt **DigiFloat** an. Ziel war die Entwicklung eines integrierten digitalen Systems zur durchgängigen Erfassung chemischer und stofflicher Prozessdaten, zur nutzerfreundlichen Visualisierung durch Komplexitätsreduktion mittels KPIs, zur KI-gestützten Analyse der Versuchsdaten – insbesondere der Anomaliedetektion – sowie zur Ableitung prädiktiver Steuerungsansätze. Die Arbeiten fokussierten auf die Flotation von Haldenmaterial aus Ehrenfriedersdorf unter Laborbedingungen im Rahmen einer Kooperation mit dem recomine-Verbundprojekt **Re_pNEU**.

Das übergeordnete Ziel des Teilprojekts bestand in der sensorischen Begleitung der KI-gestützten Optimierung von Flotationsprozessen. Dies erfordert eine robuste sensorisch gestützte Datengewinnung, die als Grundlage für eine verbesserte Entscheidungsfindung, die Steigerung der Prozesseffizienz und letztlich für eine vollständige Automatisierung der Abläufe dient. Die Aufgabenstellung umfasst die Konzeption, Entwicklung und Qualifizierung von Sensoren und Schnittstellen, die den extremen Bedingungen in Flotationsanlagen standhalten und eine kontinuierliche Versorgung mit verlässlichen Prozessdaten gewährleisten können. Darüber hinaus sollen die gewonnenen Daten so aufbereitet werden, dass sie von maschinellen Lernalgorithmen verarbeitet werden können, um Prozessparameter in Echtzeit zu justieren und somit die Ausbeute und Effizienz zu maximieren.

I.2 Wissenschaftlicher und technischer Stand zu Beginn des Vorhabens

Zwar gibt es Systeme zur Automatisierung von Aufbereitungsprozessen, doch sind diese in der Regel nur für die Steuerung einzelner Aufgaben geeignet und ihre Datenstrukturen sehr spezifisch. Gelebte Praxis ist die manuelle Bestimmung einfacher Prozessgrößen und eine simplifizierte Auswertung. Diese Situation führt dazu, dass eine Vielzahl von Sensoren für Flotationstests nicht ausreichend genutzt und erst recht keine Zeitreihen in Verbindung mit weiteren Prozessparametern gespeichert werden. Letztlich werden ihre Daten nicht für das Verständnis und die Optimierung eines Prozesses genutzt, erst recht nicht in Verbindung mit online Elementarcharakterisierung.

Die Flotationsprozesse stellen aufgrund ihrer speziellen Randbedingungen wie dem hohen Anteil an Gasblasen und Feststoffpartikeln eine besondere Herausforderung für den Langzeiteinsatz von Sensoren dar. Herkömmliche Messsysteme sind oft nicht für diese harschen Bedingungen ausgelegt, was zu einem schnellen Verschleiß, einer Sensordrift oder sogar zum Ausfall der Sensoren führen kann. Das Projekt greift auf Erfahrungen aus vorangegangenen Forschungsvorhaben zurück, wie beispielsweise der technologischen Umsetzung von Abdichtungs- und Kontaktierungsproblemen aus geothermalen Anwendungen, die ebenfalls durch aggressive Medien und hohe Drücke gekennzeichnet sind. Dies ermöglicht die Entwicklung von miniaturisierten Sensoren, die nicht nur robust, sondern auch langlebig sind. Ein zentraler technischer Ansatz ist die Realisierung einer Bypass-Messzelle, um die Sensoren vor direkter mechanischer Beanspruchung zu schützen und gleichzeitig eine repräsentative Messung des Prozesses zu ermöglichen. Dieser Ansatz minimiert die Beeinflussung der

Strömungsbedingungen in der Flotationszelle, reduziert die Wartungszyklen und erhöht die Messgenauigkeit erheblich. Es sind derzeitig keine miniaturisierten Sensorsysteme bekannt, die unter den gegebenen Bedingungen von Flotationsanlagen langzeitstabil funktionieren.

I.3 Projektablaufmanagement

Der Allgemeine Projektablauf basierte auf einer klar definierten Struktur und einer koordinierten und engen fachlichen Zusammenarbeit aller Verbundpartner. Zu Projektbeginn wurden organisatorische und technische Grundlagen festgelegt und umgesetzt, insbesondere gemeinsame Datenstrukturen, Kommunikationswege und abgestimmte Schnittstellen zwischen den Arbeitspaketen.

Die Kooperation erfolgte über mehrere institutionalisierte Formate:

- drei Konsortialtreffen zur strategischen Abstimmung und Bewertung des Gesamtfortschritts,
- regelmäßige zweiwöchentliche Status- und Jour-Fixe-Runden zur operativen Steuerung,
- dazu individuell organisierte Fachtermine zur effizienten Klärung technischer Detailfragen.

Diese Struktur sicherte im gesamten Projekt einen konsistenten Informationsstand sowie zwischen den Partnern abgestimmte methodische Entscheidungen.

Das vorliegende Teilprojekt 3 war in mehrere Phasen gegliedert:

Konzeption und Entwicklung: Der Prozess begann mit der Konzeption der Messzellen (AP 1.3), wobei eine Bypass-Lösung für Labor- und Technikumsanlagen ausgearbeitet wurde, die eine genaue und störungsfreie Erfassung der Messmedien gewährleistete. Parallel dazu wurden in der Entwicklungsphase (AP 2.4) miniaturisierte Sensoren für pH, Redoxpotential und elektrische Leitfähigkeit in planarer Dickschichttechnik sowie mit konventionellen Methoden entwickelt. Diese Phase beinhaltete auch die Herstellung und Inbetriebnahme der Messzelle selbst sowie die Integration der Sensorik, um ein funktionierendes, autarkes Messsystem zu den Projektpartnern zur Verfügung zu stellen.

Qualifizierung und Datenmanagement: Nach der Entwicklung erfolgte die Bewertung der Sensoren (AP 3.4) hinsichtlich Haltbarkeit und Datenqualität. Hierbei wurden Sensorstabilitäten und der Einfluss von Prozessbedingungen wie Temperatur und Strömung auf die Messergebnisse analysiert. Die gewonnenen Daten waren entscheidend, um die Leistungsfähigkeit und Zuverlässigkeit der Sensoren zu bewerten und dienten der Definition notwendiger Reinigungs- und Kalibrierintervalle. Gleichzeitig wurde in der Schnittstellenevaluation (AP 4.2) eine stabile Datenanbindung an die übergeordneten Steuerungseinheiten konzipiert. Diese Schnittstelle überträgt nicht nur die reinen Messwerte, sondern auch wichtige Metadaten wie Sensorkenndaten und Zeitstempel.

Skalierung und Prozessintegration: Die letzte Phase befasst sich mit der Qualifizierung des Sensorkonzeptes für die industrielle Integration (AP 5.5). Basierend auf den gewonnenen Erkenntnissen aus der Labor- und Technikumsphase wird ein Konzept für die direkte Implementierung der Sensoren in die Flotationskammer entwickelt, was eine kontinuierliche Messung in Echtzeit ermöglicht. Ein wesentlicher Bestandteil hierbei ist die Konzeption einer automatisierten Reinigung der Sensoren mittels Druckluft, um Anhaftungen zu entfernen und die Wartungsintervalle signifikant zu verlängern. Dies reduziert die Betriebskosten und legt die Grundlage für eine volle Automation der Prozesssteuerung.

I.4 Wesentliche Ergebnisse im Überblick

Das Projekt DigiFloat hat substantielle Fortschritte für die Digitalisierung, Prozessdiagnostik und potenzielle KI-basierte Steuerung von Flotationen erzielt. Die wichtigsten Ergebnisse sind:

1. Neuartige Sensorik zur umfassenden Prozesscharakterisierung
DigiFloat verknüpft erstmals verschiedene Sensortechnologien zu einem integrierten System:

- miniaturisierte elektrochemische Sensoren,
- LIBS-Systeme für die direkte Erfassung von Elementkonzentrationen in Aufgabegut und Flotationsschaum,
- Kamera- und Bildanalyseverfahren zur Erfassung der Blasencharakteristik (Größe, Form, Stabilität, Farbe, Textur) des Flotationsschaums,
- erweiterte multimodale Sensorfusion zur Ableitung stofflicher und chemischer Kenndaten.

Mit DigiFloat konnte gezeigt werden, dass sich Schaum- und Blasenmorphologie sowie deren mineralogische Zusammensetzung als **Schlüsselindikatoren für Ausbringen und Selektivität** nutzen lassen.

2. Zentrale Dateninfrastruktur (Data Lakehouse) als Basis für datengetriebene Prozessführung
Es wurde ein vollwertiges Data Lakehouse implementiert, das:

- Rohdaten aus Sensorik, Prozessparametern, LIBS-Spektren und Bilddaten integriert,
- standardisierte, hochperformante Schnittstellen bereitstellt,
- für die spätere industrielle Nutzung skalierbar ist.

Damit wird ein Paradigmenwechsel vorbereitet: Daten selbst werden zum produktionskritischen Faktor, vergleichbar mit Energie, Zeit oder Material.

3. KI-gestützte Analyse: Anomaliedetektion, KPI-Generierung und Mustererkennung
Mittels KI-Methoden wurden entwickelt:

- robuste Anomaliedetektion (Sensorausfall, Fehlbedienung, experimentelle Abweichungen) und
- Reduktion komplexer Datenstrukturen zu KPI (als Konzeption), die eine schnelle Prozessbewertung erlauben.

4. Konzept für prädiktive Prozesssteuerung (Flotation 4.0)
Auch wenn eine vollrealisierte dynamische Steuerung im Batch-Betrieb nicht möglich ist, konnte ein **übertragbares Steuerungskonzept** entwickelt werden, das folgende Elemente kombiniert:

- Echtzeit-Sensorik,
- multimodale Datenfusion,
- KPI-basierte Prozessführung,
- prädiktive Modelle zur Optimierung von Reagenzienzugabe, Luftstrom und Schaumeigenschaften.

5. Übertragbarkeit auf industrielle Maßstäbe
Die Einzelerkenntnisse münden in ein Konzept zur Portierung in industrielle Umgebungen, das Wege aufzeigt für:

- Integration in die Leit- und Automatisierungstechnik,
- Skalierung der Sensorik (insbesondere Schaumbildanalyse und LIBS),
- Einsatz in kontinuierlichen Flotationskreisläufen,
- Potenziale zur Ressourceneffizienz und Nachhaltigkeit im Sinne der Rohstoffstrategie Sachsen.

6. Bedeutung für nachhaltige Rohstoffgewinnung und Energiewende
DigiFloat leistet einen Beitrag zur:

- besseren Nutzung von Halden- und Sekundärrohstoffen,
- nachhaltigen Rückgewinnung kritischer Metalle,
- Stärkung regionaler Wertschöpfungsketten,
- Unterstützung systemkritischer Rohstoffe für Solar-, Wind- und Speichertechnologien.

DigiFloat zeigt damit Wege zu einer intelligenten, ressourcenoptimierten Aufbereitung, die sowohl geostrategisch als auch ökologisch relevant ist.

Für das KSI können folgende Ergebnisse adressiert

- **Entwicklung von miniaturisierten Sensoren:** Es wurden robuste und langlebige Sensoren für pH-Wert, Redoxpotential und elektrische Leitfähigkeit entwickelt, die den harschen Bedingungen der Flotation standhalten. Ihre Miniaturisierung erlaubt den Einbau in Messzellen mit minimalem Einfluss auf den Hauptprozessstrom.

- **Konzeption von Messzellen:** Es wurde ein Konzept für eine Bypass-Messzelle für Laboranwendungen sowie eine Lösung für die direkte Implementierung der Sensoren im industriellen Maßstab erarbeitet. Diese duale Strategie ermöglicht eine schrittweise Überführung der Technologie vom Labortest in die industrielle Anwendung.

- **Intelligentes Sensormanagement:** Durch die Bewertung der Sensorleistung wurde die Basis für ein intelligentes Managementsystem geschaffen, das die Datensicherheit durch Plausibilitätstests und historische Datenanalyse maximiert. Dieses System kann Anomalien erkennen und automatische Korrekturmaßnahmen einleiten, bevor es zu einer Fehlfunktion kommt.

- **Definition von Schnittstellen:** Es wurde eine prozesstaugliche Datenschnittstelle zu übergeordneten Steuerungseinheiten konzipiert, die alle verwendeten Sensoren einzeln ansprechen und relevante Sensordaten und Metadaten übertragen kann. Dies ist die Grundlage für die Implementierung von KI-Modellen, die auf diesen Daten aufbauen.

Während der Projektlaufzeit wurde großer Wert auf die enge Kooperation mit externen Partnern gelegt. Die Abstimmung geeigneter Datenschnittstellen war ein wesentlicher Bestandteil der Arbeitspakete (AP 1.3 und AP 4.2) und wurde gemeinsam mit den Projektpartnern entwickelt, um die Kompatibilität und den reibungslosen Datenaustausch sicherzustellen. Die entwickelte Messtechnik kam sowohl im eigenen Institut als auch bei dem Projektpartner zum Einsatz.

Teil II Eingehende Darstellung

II.1 Motivation und Aufgabenstellung

Die Flotation zählt seit über einem Jahrhundert zu den Schlüsseltechnologien der modernen Aufbereitung metallischer und mineralischer Rohstoffe. In ihr werden feinkörnige Feststoffe aufgrund ihrer unterschiedlichen Oberflächeneigenschaften voneinander getrennt und in Wert- und Reststoffe überführt. Trotz dieser zentralen Rolle erfolgt die Steuerung und Optimierung von Flotationsprozessen in Forschung und Industrie vielfach noch empirisch. Die Komplexität des Prozesses – bedingt durch Wechselwirkungen zwischen Flüssigkeit, Partikeln und Gasblasen sowie durch dynamische Prozessbedingungen – führt dazu, dass viele Einflussgrößen bislang nur indirekt oder mit erheblichem experimentellem Aufwand erfasst werden können. Mit der zunehmenden Verfügbarkeit neuer Sensorik, leistungsfähiger Datenerfassungssysteme, Machine Learning und Methoden der Künstlichen Intelligenz eröffnet sich die Möglichkeit, Flotationsprozesse in bisher nicht erreichter Tiefe zu verstehen und datenbasiert zu steuern. Genau hier setzte das Projekt DigiFloat an: Ziel war die Entwicklung eines integrierten digitalen Systems zur durchgängigen Erfassung chemischer und stofflicher Prozessdaten, zur nutzerfreundlichen Visualisierung durch Komplexitätsreduktion mit Hilfe von KPIs, der Analyse der Versuchsdaten auf Anomalien und der Ableitung einer prädiktiven Steuerung. Die Entwicklungen und Versuche waren auf Flotationsprozesse im Batchbetrieb unter Laborbedingungen ausgerichtet. Ein Konzept für das Upscaling auf reale Prozessgröße bildete den Abschluss des Projektes.

Für das KSI stand insbesondere die Entwicklung einer miniaturisierten Sensorik einschließlich einer Messzelle im Fokus der Arbeiten, welche die fluidischen Prozesse in Laborreaktoren nicht signifikant stören. Zugleich eine hard- und softwarebasierte Schnittstelle zu schaffen, die es zuverlässig gestattet operative Livedaten und Metadaten den übergeordneten Datenerfassungssystemen zur Verfügung zu stellen.

II.2 Wissenschaftlicher und technischer Stand zu Beginn des Vorhabens

Eine umfassende Digitalisierung von Prozessen in der großtechnischen Aufbereitung von metallischen und mineralischen Rohstoffen ist aktuell nicht anzutreffen. Die Gründe sind vielfältig.

Die lückenlose minimalinvasive Erfassung des aktuellen Prozesszustandes über chemische und physikalische Prozessgrößen lässt sich nur mit unverhältnismäßig hohem Aufwand realisieren. Eine spektroskopische Online-Messung der Materialzusammensetzung direkt im Prozess, also in der Flüssigphase, ist zum aktuellen Zeitpunkt undenkbar. Einem Einsatz von möglichen Laborlösungen unter realen Prozessbedingungen fehlt der Zugang zum Markt.

Auch das sinnvolle Handling der großen Datenmengen stellt eine Herausforderung dar, möchte man den Aufwand in Beschaffung und Betrieb minimal halten. Meistens werden die gewonnenen Daten nur kurzzeitig gespeichert, da sie durch eine fehlende Verknüpfung mit weiteren Daten, der sogenannten Fusion der Messdaten, für die weitere Nutzung tatsächlich relativ wertlos sind. Außerdem werden sie durch Anomalien, z.B. händischer Eingriff in den Prozess, Sensorausfall, verfälscht, da es keine Routine oder Algorithmen gibt, die eine konsistente Datenlage sicherstellen. Eine Prozessregelung auf Basis dieser richtigen aktuellen und historischen Datenlage ist daher kein Standard in der Regelung von Prozessen und Anlagen. Aber auch die Visualisierung der Prozessdaten beschränkt sich auf die Ausgabe aktueller Einzelmesswerte, spielt doch aber das Zusammenwirken der Parameter eine übergeordnete Rolle, sodass nur eine kleine sehr erfahrene Personengruppe einen Nutzen aus den Anzeigen ziehen kann.

Die Kombination aus hohem Miniaturisierungsgrad und gleichzeitig hohem Feststoffgehalt des Fluids sowie Blasenbildung waren die Problemkreise mit dem größten Forschungsrisiko. Um dies zu optimieren, waren umfangreiche Untersuchungen zur Durchflusszelle erforderlich.

II.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Das Projekt DigiFloat war in fünf Arbeitspakete unterteilt, siehe Abbildung 1. AP1 umfasste neben der Organisation des Projektes durch den Projektkoordinator SN3 die Kooperation mit dem Projekt Re_pNEU. In AP2 fanden die Entwicklung der Sensoren und spektroskopischen Verfahren für eine zuverlässige und präzise Erfassung des aktuellen Prozesszustandes statt. Außerdem arbeiteten SN3 und HIF an der Struktur für die Datenspeicherung und die Zugänge für Daten als auch Abfragen über zum Teil echtzeitfähige Kommunikationsprotokolle, die in der Industrie weitere Verbreitung gefunden haben. In AP3 befasst sich SN3 mit der Analyse der Daten. Wichtige Arbeiten zur Langzeitstabilität der Informationen waren ebenfalls in das Arbeitspakete eingebettet. Das Thema in AP4 lässt sich verallgemeinern als Flotation4.0. Während UPC die Spektroskopie für bisher unerreichte Messstellen, z.B. dem Flotationsschaum, erweiterte, stellte KSI die Integration der Sensordaten in die industrielle Prozessumgebung sicher. Das HIF bettete die Ideen der prädiktiven Reglung in die neuen Datenstrukturen. In AP5 befasste sich SEC schwerpunktmäßig mit der Konzeption des Einsatzes der gewonnen Erkenntnisse in ein industrielles Umfeld.

Abbildung 1 - Übersicht der Arbeitspakete im Projekt

Im Projekt war das KSI in den Arbeitspaketen 1.3, 2.4, 3.4, 4.2 und 5.5 mit seinen Kompetenzen im Bereich Sensorentwicklung, dualer Messzellenansatz, intelligentes Sensormanagement, der Entwicklung einer prozesstauglichen Datenschnittstelle und der Schaffung einer zukünftigen Automatisierung vertreten.

II.4 Erzielte Ergebnisse

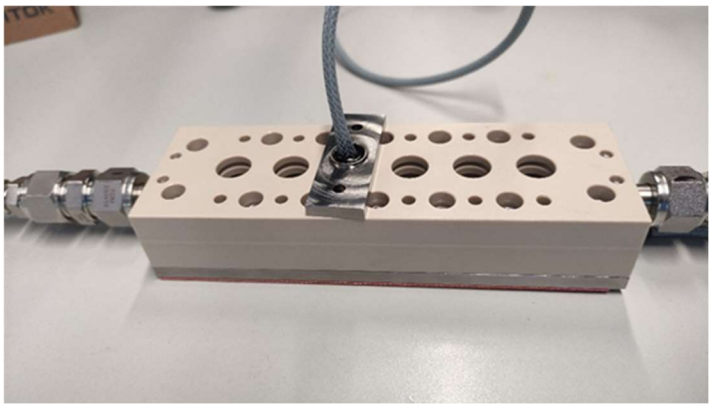
Im Weiteren sind die arbeitspaketbezogenen Ergebnisse im Teilprojekt 3 aufgeführt:

AP 1.3: Konzeption der Messzellen (1,5 PM)

Ziel: Konzeptionelle und konstruktive Ausarbeitung für die sensorisch gestützte Datengewinnung.

Ergebnisse:

Bypass-Lösung: Es wurde ein detailliertes Konzept für eine Bypass-Messzelle (Abbildung 2) entwickelt. Diese Lösung ist von entscheidender Bedeutung, da sie eine kontinuierliche Datenerfassung bei minimaler Störung der Strömungsverhältnisse in der Hauptflotationskammer ermöglicht.



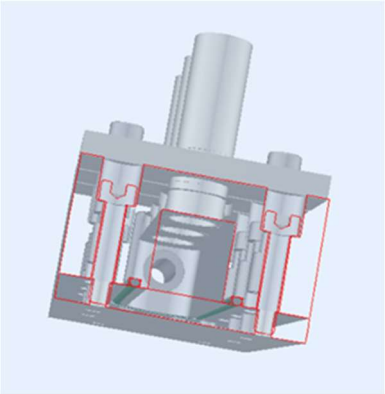


Abb.2: Bypass-Messzelle mit miniaturisiertem Volumen

Die Messzelle (Abbildung 3) wurde derart konstruiert, dass sie einen repräsentativen Teilstrom der Flotationssuspension entnimmt, ohne die Gesamtprozessdynamik zu beeinträchtigen. Dies gestattet die Durchführung präziser Messungen unter stabilen Bedingungen, was für die Kalibrierung und Validierung der Sensoren unerlässlich ist.

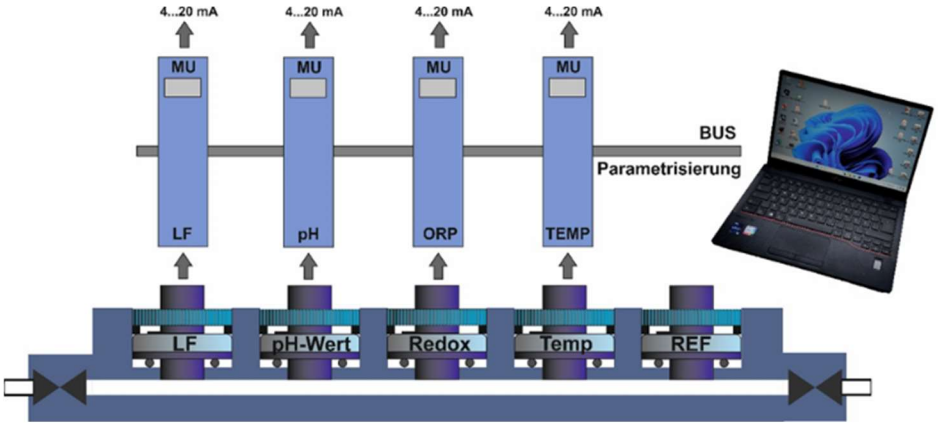


Abb.3: konzeptionelle Aufbau der miniaturisierten Messzelle

Miniaturisierung: Die Konzeption sah die konsequente Integration miniaturisierter Sensoren vor. Deren technologische Umsetzung wurde durch den Einsatz moderner Fertigungstechnologien wie **Schichttechnologien und 3D-Druck** realisiert.

Diese Ansätze ermöglichen die Produktion von Sensoren, die nicht nur eine höhere Kompaktheit aufweisen, sondern auch eine signifikant erhöhte Robustheit gegenüber den chemischen und mechanischen Belastungen in Flotationsanlagen besitzen. Durch die Miniaturisierung konnte zudem das für die Messung benötigte Probenvolumen reduziert werden.

- **Schnittstellen-Abstimmung:** Die frühzeitige und enge Abstimmung der Datenschnittstellen mit allen Projektpartnern stellte die Kompatibilität der verschiedenen Systemkomponenten sicher. Dies umfasste die Festlegung von Kanaladressen, Abtastraten und Datenformaten, um eine nahtlose Integration in übergeordnete Steuerungssysteme zu gewährleisten.

Alle sensorischen Schnittstellen und Parameter wurden fixiert, so dass der Meilenstein 1 (3. PM) „Konzeption des gesamten Datenflusses“ seitens des TP3 als abgerechnet gewertet werden kann.

AP 2.4: Entwicklung miniaturisierter Sensoren (16 PM)

Ziel: Entwicklung und Herstellung geeigneter, miniaturisierter Sensoren für zentrale Prozessparameter.

Ergebnisse:

Entwicklungslinien: Es wurden Sensoren mit erhöhter Robustheit und Langlebigkeit für wichtige Prozessparameter wie den **pH-Wert, das Redoxpotential und die elektrische Leitfähigkeit** entwickelt. Die Sensoren basieren auf der **planaren Dickschichttechnik**, was ihre effiziente Herstellung in großen Stückzahlen ermöglicht. Vorteil dieser Fertigung ist die einfache Kombination verschiedener Edelmetalle auf einem Chip. Diese können beispielsweise als kombinierte Redoxelektrode, wie in Abbildung 4 dargestellt oder als elektrische Hilfserde für sensorische Schaltungen mit zwei hochohmigen Eingängen eingesetzt werden. Ein weiterer Vorteil ist die Morphologie dieser Schicht, insbesondere dieser aus Platin, welche sich durch eine sehr große spezifische Oberfläche auszeichnet. Die somit hergestellten Leitfähigkeitselektroden weisen unter vergleichbaren Strombelastungen geringere Beeinflussung der Elektroden durch Polarisationseffekte auf. Somit kann der mögliche Messbereich auch unter Miniaturisierungsbedingungen für die Prozesse effektiv erweitert werden.

Abb. 4: Sensoren zur Erfassung des Redoxpotentials mit Gold- und Platinelektroden in Siebdrucktechnologie

Parallel dazu wurden auch konventionelle Messmethoden erforscht und adaptiert, um die technologische Vielfalt zu erhöhen und Ausfallsicherheiten zu gewährleisten (Abbildung 5).

Abb. 5: Anwendung verschiedener Technologien zur Herstellung miniaturisierter Sensoren (polymer, klassisch und in Schichttechnologien)

Diese duale Entwicklungsstrategie stellt sicher, dass auch unter schwierigsten Betriebsbedingungen eine verlässliche Datenerfassung möglich ist.

Anpassung an Randbedingungen: Die Sensoren wurden gezielt für die harschen Bedingungen in Flotationszellen konzipiert. Dies umfasst nicht nur die Beständigkeit gegenüber aggressiven Chemikalien, sondern auch die Unempfindlichkeit gegenüber dem hohen **Gas- und Feststoffanteil** der Suspension. Der Ausgangsstoff (Abbildung 6) RepNEU S3-40 für Flotationsprozesse im Rahmen des Projektes ist ein Material der Halde Ehrenfriedersdorf, welches in einem ersten Schritt 40 min gemahlen worden ist.

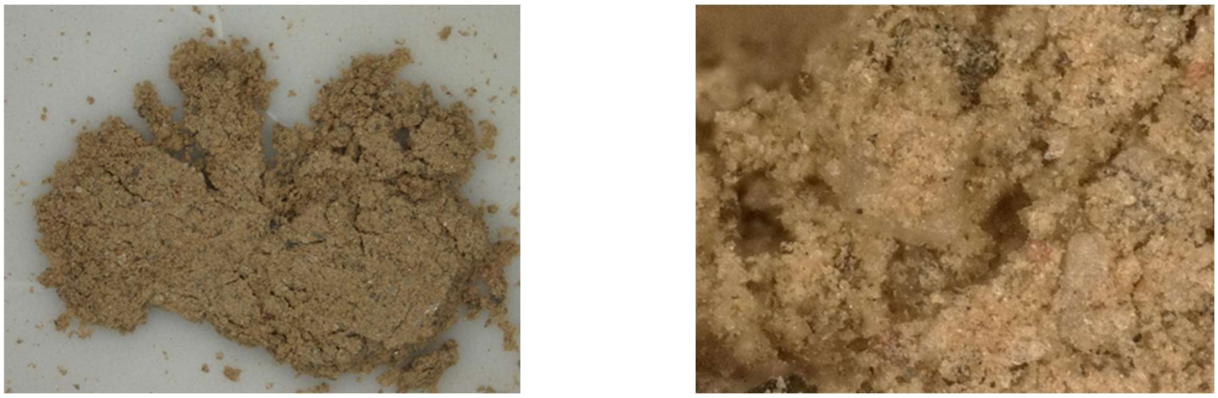


Abb. 6: Feststoffanteil des Ausgangsmaterials RepNEU S3-40

Neben einer Übersichtsanalyse (Abbildung 7) mittels Mikro XRF-Spektrometer M4 Tornado der Fa. Bruker Corporation (Billerica, US) wurde eine Bestimmung der Korngröße (Abbildung 8) mittels eines Partikelgrößenzählers LS230 der Fa. Beckmann Coulter durchgeführt.

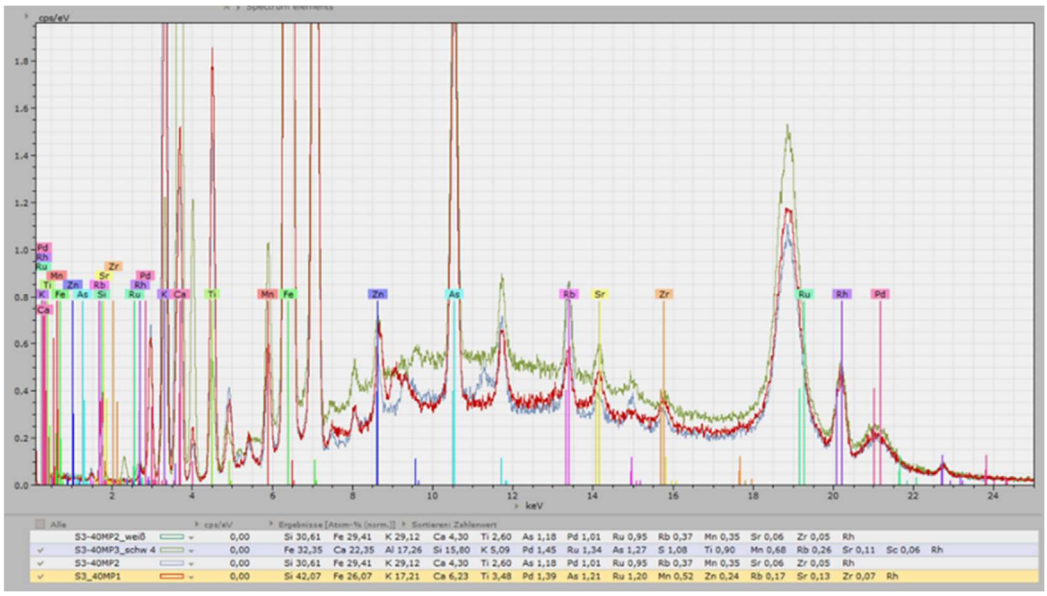


Abb. 7: Übersichtselementanalyse mittels XRF-Spektrometer

Diese ergab nach einem 40-minütigen Mahlvorgang eine zweigeteilte Fraktionierung des Mahlgutes auf Grund von unterschiedlichen Härtegraden der Bestandteile. Damit können u.U. energieeffizient unerwünschte Bestandteile bereits durch Siebung abgetrennt werden. Da die Flotationsprozesse Partikel mit mehreren hundert µm Durchmesser verarbeiten können, ist ein Großteil des Ausgangsmaterials für die Weiterverarbeitung und den Einsatz im Bypass geeignet.

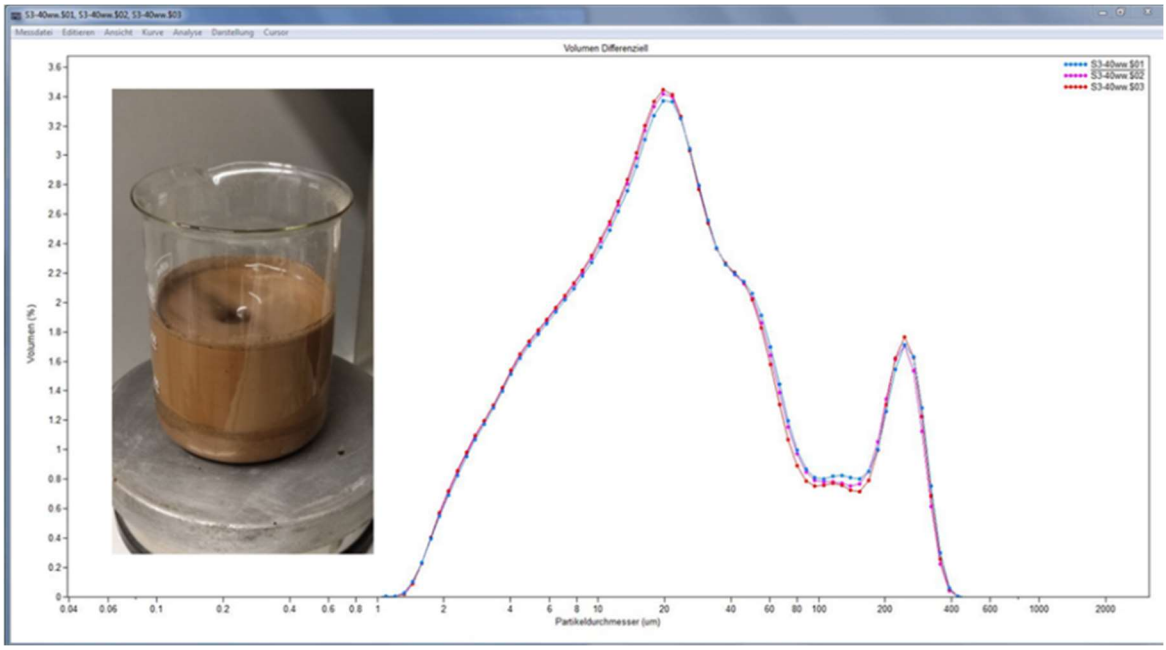


Abb. 8: Korngrößenanalyse Probe RepNEU S3-40 mittels LS230 der Fa. Beckmann Coulter

Das Design der Messzellen wurde derart optimiert, um Anhaftungen zu minimieren und eine stabile Messung zu gewährleisten.

Automatisierte Reinigung: Für den Langzeiteinsatz im Industriemaßstab wurde ein **automatisiertes Reinigungs- und Kalibrierregime** konzipiert. Dieses System zielt darauf ab, die Sensoren periodisch von Anhaftungen zu befreien, die deren Funktionalität beeinträchtigen könnten. Durch die Integration einer automatischen Reinigungsprozedur könnten die Wartungsintervalle, aus der Erfahrung anderer Sensorapplikationen in der Prozesstechnik, signifikant verlängert werden, was die Attraktivität der Technologie für industrielle Anwendungen erheblich steigert.

AP 3.4: Bewertung der Sensoren (6 PM)

Ziel: Qualifizierung der Sensoren und der Messtechnik für den Praxiseinsatz.

Ergebnisse:

Abb. 9: Fluidikschema der Anordnung einer Messzelle an der Flotations-Laboranlage (HIF)

Datensicherheit: Durch intensive Tests unter realen Prozessbedingungen (Abbildung 9) wurde die Grundlage für ein **intelligentes Sensormanagement** geschaffen. Die Referenzierung erfolgt durch turnusmäßige Sensorkalibrierungen (Abbildung 10).

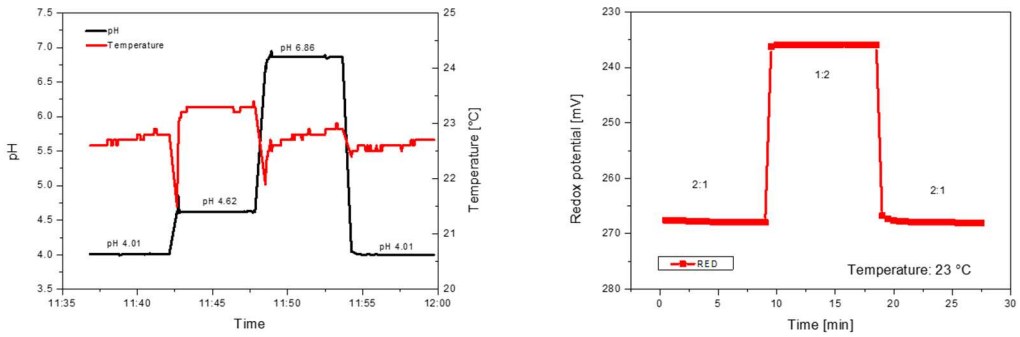


Abb. 10: Kalibrierfunktionen für pH-Wert (pH 4,01 und pH 6,86) und Redoxpotential
2:1/1:2 = 0.1 M $K_3[Fe(CN)_6]$ (rot)] **:** 0.1 M $K_4[Fe(CN)_6]$ (gelb)

Die Auswertung der Sensorparameter zeigte, dass trotz der Irritationen durch den Einfluss von Gasblasen mit Hilfe einer gleitenden Mittelwertbildung über 20 Sekunden (Abbildung 11), Signale aller Sensorparameter generiert werden können, die für die Regelung von Flotationsprozessen geeignet sind.

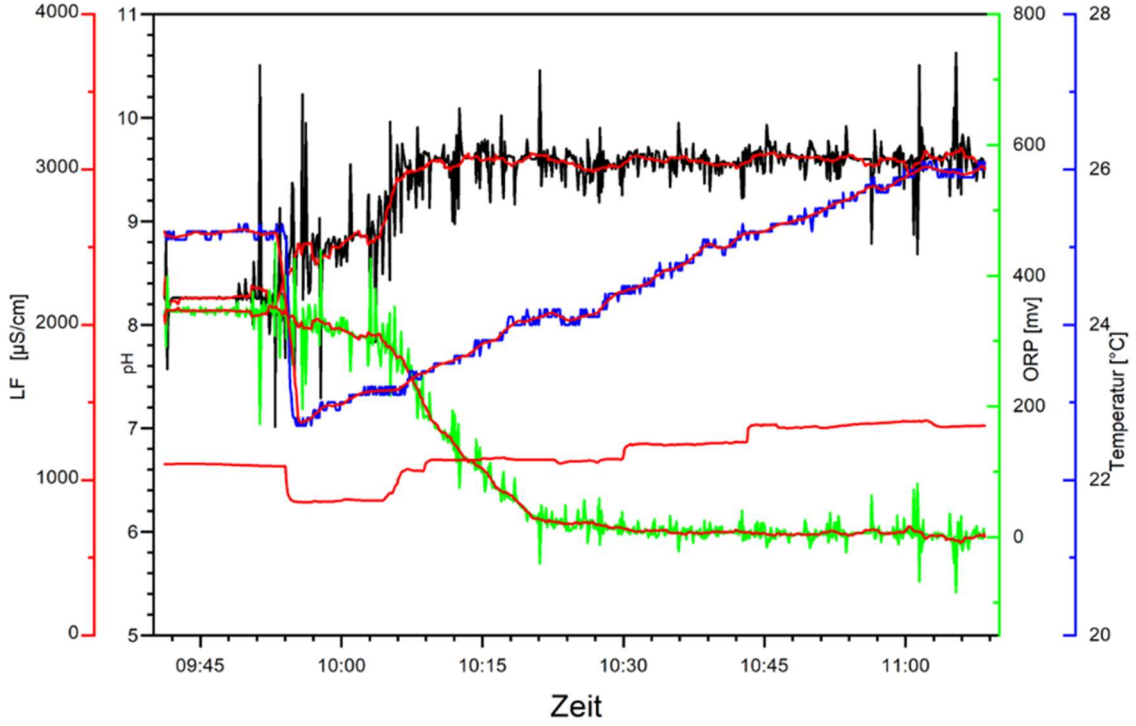


Abb. 11: Datenqualifizierung mittels gleitender Mittelwertbildung (20 s)

Das vorliegende Datenmanagementsystem (Abbildung 12), bestehend aus der Erfassung chemischer Prozessparameter mittels elektrochemischer Sensoren, der Bestimmung von Materialzusammensetzungen mittels Laserinduzierter Plasmaspektroskopie (LIPS) und der umfänglichen Datenaquise greift auf eine Kombination aus **Plausibilitätsprüfungen** auf Basis definierter Grenzwerte und der **Auswertung der Sensorhistorie** zurück, um fehlerhafte Messwerte und Anomalien frühzeitig zu detektieren. Im Falle einer erkannten Anomalie ist das System in der Lage, Warnungen auszugeben oder alternative Datenquellen heranzuziehen, um die Verlässlichkeit der Datengrundlage für die nachfolgende KI-gestützte Optimierung zu maximieren.

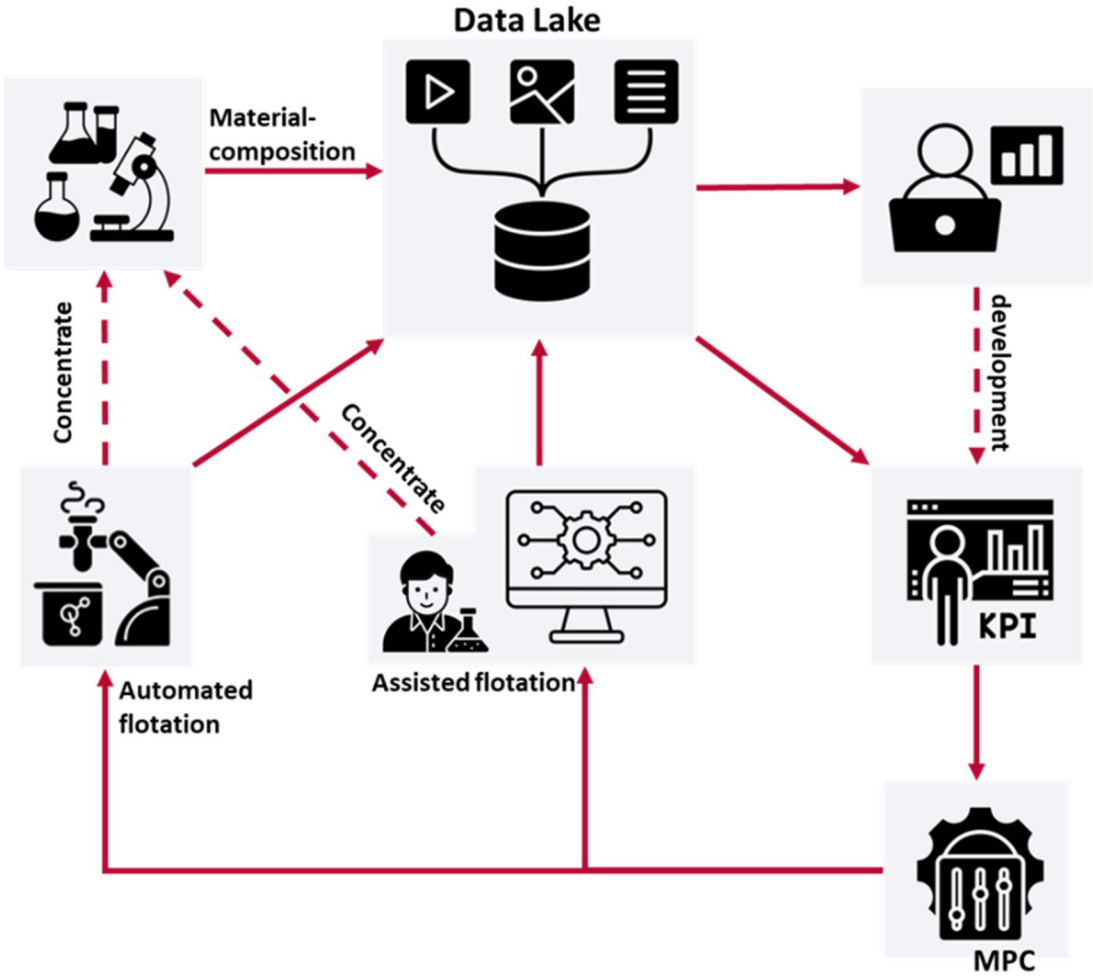


Abb. 12: Datenmanagementsystem einer KI-unterstützten Modellprädiktiven Regelung (MPC)

Wartungsintervalle: Es wurden optimale Reinigungs-, Wartungs- und Kalibrierungsintervalle definiert, die auf den spezifischen Einsatzbedingungen basieren. Diese Intervalle wurden durch Langzeittests unter variierenden Bedingungen ermittelt, um die **langfristige Zuverlässigkeit und Datenqualität** zu gewährleisten. Für den Laborbetrieb wurde folgendes festgelegt: nach 2 Batchvorgängen ist eine Nullpunktkalibrierung erforderlich, weicht diese mehr als 10 % von der letzten Kalibrierung ab, ist eine Zweipunktkalibrierung durchzuführen. Mit ihr ist zu prüfen, ob die sensorspezifischen Metadaten in einem plausiblen Bereich sind. Falls dies nicht der Fall ist, sollte eine Reinigung erfolgen. Danach eine Zweipunktkalibrierung durchgeführt werden. Da alle Metadaten im DataLake abgespeichert werden, ist so eine lückenlose Sensorhistorie gegeben. So kann ein detaillierter Wartungsplan erstellt werden, der die Effizienz der Anlage maximiert und unerwartete Ausfälle minimiert.

Drift-Überprüfung: Die kontinuierliche Überprüfung von prozessspezifischen **Drifterscheinungen** und der Steilheit der Sensorkennlinien war für die parameterspezifische Bewertung von entscheidender Bedeutung. Sensordrift, d. h. die Veränderung der Sensorkennlinie über die Zeit, ist ein häufiges Problem in rauen Umgebungen. Die Fähigkeit, diese Drift gegenüber prozesstypischen Veränderungen zu erkennen und zu kompensieren, stellt ein Schlüsselmerkmal des entwickelten Systems dar und sichert die Präzision der gewonnenen Daten auch über längere Zeiträume hinweg. Hierzu hat der Projektpartner Simba n^3 GmbH wesentliche Beiträge geliefert.

AP 4.2: Schnittstellenevaluation (1 PM)

Ziel: Konzeptioneller Ansatz zur Schaffung einer Schnittstelle für den Datentransfer und die automatisierte Steuerung.

Ergebnisse:

Stabile Datenanbindung: Es wurde eine Sensorelektronik mit einer prozesstauglichen und flexiblen Schnittstelle (Abbildung 13) konzipiert, die eine stabile Datenanbindung an übergeordnete Steuerungseinheiten wie speicherprogrammierbare Steuerungen (SPS) sicherstellt.

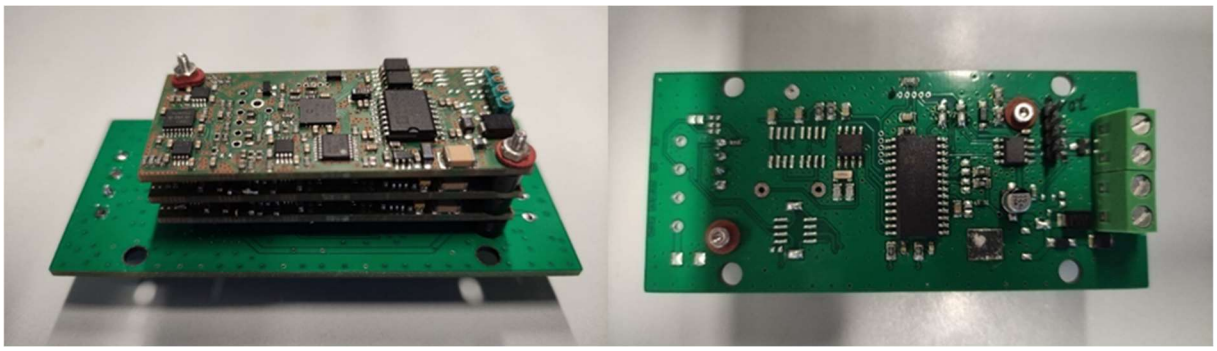


Abb. 13: Elektronikmodule mit galvanisch getrennten Sensorkanälen

Die Schnittstelle wurde auf Basis standardisierter industrieller Kommunikationsprotokolle entwickelt, um die Kompatibilität mit bestehenden Anlagensystemen zu gewährleisten.

Lückenlose Nachvollziehbarkeit: Die Schnittstelle wurde derart ausgelegt, dass sie nicht nur die reinen Messwerte, sondern auch wichtige Metadaten wie **Sensorkennziffern (Steilheit, Nullpunkt) und Zeitstempel** abspeichert und vom Host-System ausgelesen werden können. Dies ist für die Datenvalidierung und die korrekte Sensorkompensation von entscheidender Bedeutung und ermöglicht eine lückenlose Nachvollziehbarkeit des Prozessgeschehens, was für Audits und die Optimierung unerlässlich ist.

Grundlage für Automatisierung: Die entwickelte Schnittstelle bildet die unverzichtbare Grundlage für die **Teilautomation der Flotationsprozesse**. Sie gewährleistet eine zuverlässige und konsistente Datenversorgung und ermöglicht es dadurch Algorithmen der künstlichen Intelligenz, in Echtzeit auf Prozessveränderungen zu reagieren und Parameter automatisch anzupassen.

AP 5.5: Qualifizierung des Sensorkonzeptes für industrielle Prozessintegration (1 PM)

Ziel: Qualifizierung des Sensorkonzeptes und Erstellung der Konzeption für den Upscaling-Prozess.
Ergebnisse:

Direkte Implementierung: Anders als in der Laborphase (Abbildung 14), in der eine Bypass-Lösung bevorzugt wurde, wird beim Upscaling ein Konzept zur direkten Implementierung kommerzieller Sensoren in die Flotationskammer angewendet. In Verbindung mit einer automatisierten Reinigung ermöglicht dies eine kontinuierliche Messung der wichtigsten Parameter in Echtzeit und direkt im Kern des Prozesses. Die direktere Platzierung reduziert Messverzögerungen und stellt sicher, dass die KI auf die aktuellsten Prozessdaten zugreifen kann.

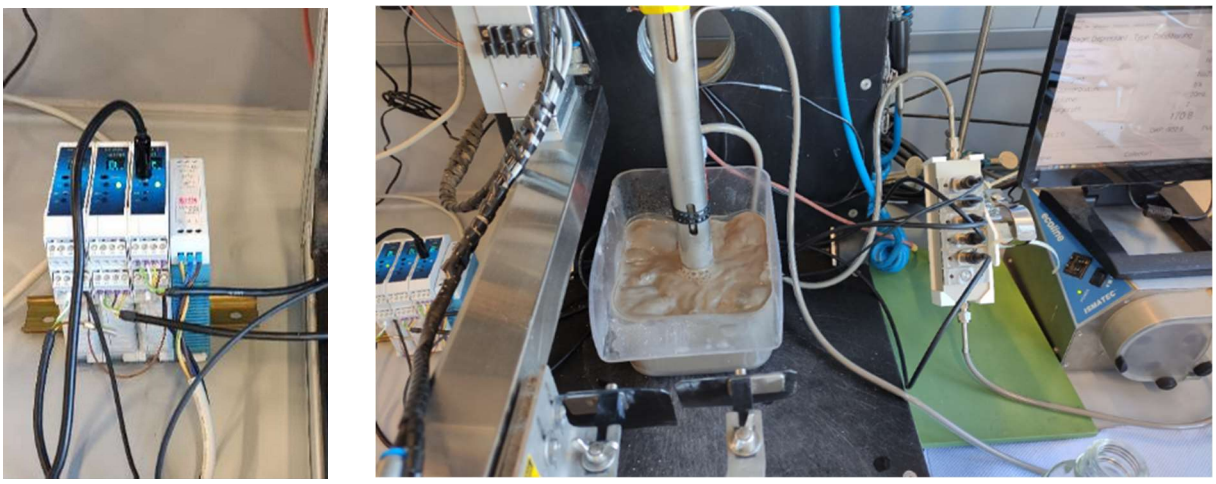


Abb. 14: Aufbau, der für den Upscalingprozess vorbereiteten Messtechnik

Automatisierte Reinigung: Das Konzept sieht eine **periodische Reinigung mittels Druckluft** vor, um die Sensoren von anhaftenden Partikeln zu befreien. Diese Automatisierung der Sensorwartung ist ein Schlüsselelement, das die Kalibrationsabstände signifikant vergrößert und den manuellen Wartungsaufwand minimiert. Die Effizienz und Zuverlässigkeit des Gesamtsystems wird dadurch massiv erhöht, was für den durchgängigen industriellen Betrieb unerlässlich ist.

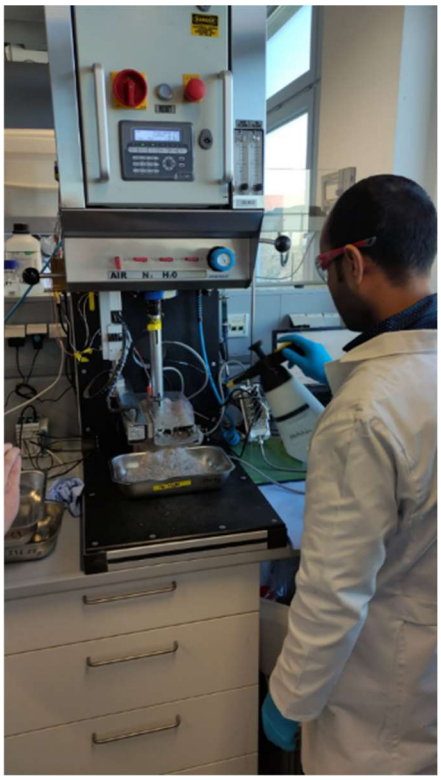


Abb. 15: Implementierung der miniaturisierten Sensorik in einer Technikumsanlage (HIF)

Vorbereitung für Scale-Up: Für die Darstellung der Prozesstauglichkeit wurden die Sensorikkomponenten auch an anderen Flotationsanlagen im Technikumsmasstab appliziert (Abbildung 15). Diese Ergebnisse des Arbeitspakets ebnen den Weg für eine zuverlässige und effiziente **Prozesssteuerung im industriellen Umfeld**. Das qualifizierte Konzept ist derart skalierbar, dass es

auf größere Anlagen und verschiedene Flotationsprozesse übertragen werden kann, was eine breite Anwendung der entwickelten Technologie ermöglicht.

II.5 Darstellung des während des Vorhabens bekannt gewordenen Fortschritts auf diesem Gebiet bei anderen Stellen

keine

II.6 Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere die Verwertbarkeit der Ergebnisse

Das Projekt DigiFloat hat auf allen Teilgebieten der Datengenerierung neue Impulse setzen können, von der neuartigen robusten Datenerfassung über eine vollumfängliche performante Datenspeicherung bis hin zur datengetriebenen KI-gestützten Auswertung. Dabei stehen die Entwicklungen nicht nur einzeln zur Verfügung: Neben dem Einsatz einzelner Verbesserungen ist durch die Interaktion im Projekt die Vernetzung bereits Teil der Entwicklungen gewesen, sodass z.B. die Analyse zur Anomaliedetektion direkt mit dem Data Lake aus dem Projekt gekoppelt werden kann.

Die Synergie der Arbeitspakete führte zu den folgenden wesentlichen Ergebnissen:

- Entwicklung robuster Sensoren: Es wurden robuste und langlebige Sensoren für die rauen Bedingungen der Flotation entwickelt, die sowohl chemischen als auch mechanischen Belastungen standhalten.
- Dualer Messzellenansatz: Die Konzeption einer Bypass-Messzelle für den Labor- und einer Direktimplementierung für den Industriemaßstab ermöglicht eine schrittweise und risikominimierte Überführung der Technologie vom Labor in die industrielle Praxis.
- Intelligentes Sensormanagement: Ein hochentwickeltes System zur Maximierung der Datensicherheit durch Plausibilitätsprüfungen und historische Datenanalyse wurde geschaffen, das eine zuverlässige Datenbasis für die KI-Optimierung bietet.
- Prozesstaugliche Schnittstelle: Die entwickelte Schnittstelle ermöglicht die lückenlose, stabile und nachvollziehbare Übertragung von Mess- und Metadaten.
- Grundlage für Automatisierung: Das Gesamtkonzept legt den Grundstein für eine KI-basierte Prozessoptimierung und die zukünftige vollständige Automation der Flotationsprozesse, indem es die notwendige sensorische Infrastruktur bereitstellt.

Die gewonnenen Daten zur Analyse des Flotationsprozesses und zur chemischen Prozessführung dienen als Grundlage für ein geplantes Folgeprojekt zur Entwicklung modellprädiktiver Regelungsalgorithmen (MPC), welche die hier geschaffene Datenbasis nutzen.

II.7 Zusammenarbeit mit anderen Stellen außerhalb des Verbundprojektes

Mit dem recomine-Projekt *Re_pNEU* wurden Messdaten und Probenmaterial ausgetauscht. Eine Einbindung in die jeweiligen Projektgeschehnisse wurde durch die Eingliederung in die regelmäßigen Meetings gewährleistet.

II.8 Veröffentlichungen, Vorträge Referate, etc.

Die zum Zeitpunkt des Abschlussberichtes eingereichten Veröffentlichungen und Konferenzbeiträge sind:

(1) Rau, F., Schmidt, C., Nagel, M., Gerlach F. (2024): Miniaturisierung, Data Lakehouse und KPI als Schlüssel für die Digitalisierung im Bereich Rohstoffgewinnung. 17. Dresdner Sensor-Symposium. Dresden.

(2) Pereira, L., Ben Said, B., Hassan, A., Rau, F., Hoang, D.H., Rudolph, M. (2023): An open-source laboratory assistant tailored for flotation test work. Flotation '23. Kapstadt, Südafrika.

(3) Nagel, M., Rau, F., Pereira, L. (2023): Datengestützte Intralogistik zur Optimierung von Aufbereitungs- & Recyclingprozessen. Konferenz: Finden statt Suchen – agieren statt reagieren. Chemnitz.

II.9 Literaturverzeichnis

Dem Projekt liegen folgende Arbeiten zugrunde:

[1] Positionspapier: Sensorik für die Digitalisierung chemischer Produktionsanlagen. Herausgegeben von der Initiative Wanted Technologies der ProcessNet sowie AMA Verband für Sensorik und Messtechnik e.V., Frankfurt a. M., 2020

[2] S. Herrmann; W. Vonau; F. Gerlach; H. Kaden: Miniaturized sensor module for in-situ control of waters. Fresenius J. Anal. Chem. 362 (1998) 215-217

[3] F. Gerlach, S. Herrmann, R. Lange, H. Jahn, W. Vonau: Messsystem für Kleinfermentoren, In: G. Gerlach, H. Kaden (Hg.): Dresdner Beiträge zur Sensorik, Band 24: 7. Dresdner Sensor-Symposium – Neue Herausforderungen und Anwendungen in der Sensortechnik. Dresden, TUDpress 2005, S. 245-248

[4] W. Vonau, F. Gerlach, K. Ahlborn: Glass-based redox sensor
J. Solid State Electrochem. 17 (2013) 4, 969-976

[5] F. Gerlach, M. Berthold, W. Vonau: Chemosensorik für die Erkundung von Tiefenbohrungen, Geothermiekongress, ISBN-13-978- 932570-69-8, Essen, 11.-13.11.2014

[6] D. Seitz, F. Gerlach, S. Herrmann, H. Mayr, W. Vonau, G. Ziegler: A biocompatible sensor-array instrument with rapid coupling mechanism for online measurement of physiological data cell cultures. Regenerative Medicine 2 (2007) 5, 686

[7] W. Vonau, S. Herrmann, F. Berthold, F. Gerlach, U. Enseleit, W. Mayer, W. Bieger: Sensorsignale aus dem Blut – Multiparameter-Messsystem. Chemie Ingenieur Technik 79 (2007) 9, 1385

Anhang: Ergebnisbewertung

Aufgrund von Flotation im Labormaßstab im Batch-Modus und eines Bedarfs von ausreichend vielen Daten für ML-und KI-Modelle in kompletten Prozessketten war von vornherein bei der Antragstellung klar, dass neben Lösungen für den Labormaßtab einige Themen lediglich konzeptionell abgearbeitet werden können. Anderseits wurden im Forschungsprojekt bereits Ergebnisse erzielt, die generisch für dynamische kontinuierliche Flotationsprozesse nutzbar sind.

Deshalb wird mit Tabelle 1 das Forschungsprojekt DigiFloat (abweichend von den Arbeitspaketen des Antrages) thematisch gegliedert und der ursprüngliche Arbeitsplan mit den im Vorhaben erreichten Ergebnissen durch die Projektpartner verglichen.

Dazu wird für die Tabelle folgende Symbolik verwendet:

Konzeption	<	Labormodell	<	generisch: operativ nutzbar
	<		<	

Die Tabelle 1 auf folgender Seite zeigt, dass alle Verbundpartner die im Vorhaben geplanten Ergebnisse erreicht und sogar teilweise übertroffen haben

Zur Tabelle gibt es außerdem folgende Erläuterungen:

❶ Konzeption und Fertigung angepasster Laborflotationszelle für Projektpartner

❷ Wichtigsten Parameter für die Flotation abgedeckt

❸ Mehrere Exemplare gefertigt, validiert und den Partnern zur Verfügung gestellt

❹ Mehrere Versuche unter realen Flotationsversuchen erfolgreich durchgeführt

❺ Entwicklung situativer Dashboards

❻ Berücksichtigung von Bildinformationen aus Flotationsschaum

❼ Uni- und multivariate Anomalieerkennung mittels KI

Tabelle 1 Vergleich von Zielereichungt (Ist) mit den geoplanten Ergebnissen (Soll) der Partner von DigiFloat

Kriterium	Projektziel	Bearbeiter	Soll	Ist	Bemerkung
1. Aufbereitungsprozess					
1.1 Betriebsart	Batchbetrieb	alle			
Zielanwendung	Fortschrittsüberwachung				
Skalierung	Labormaßstab				
1.2 Technologische Reife	TRL 2...5	alle			
1.3 Flotationszelle	Eigenentwicklung	HIF			❶
2. Physikalische und chemische Sensorik					
2.1 Sensoren	Sensorik für 3 chem. Parameter	KSI			❷
Sensortyp	miniaturisierte Sensoren	KSI			
Sensorfertigung	Planare Dickschichttechnik mit teilw. additiver Fertigungstechnik	KSI			❸
2.2 Robustheit	Laborversuche	KSI			❹
2.3 Datenformat	Analoge und digitale Schnittstellen	KSI			
3. Sensorik für Elementcharakterisiserung					
3.1 Gemessene Phasen	Pulver, Schaum	UPC			
3.2 Zielprobe	Kontinuum (Durchschnitt)	UPC			
3.3 Konzentrationsbereich	signalintensive Hauptkomponenten	UPC			
3.4 Genauigkeit	Qualitative Aussage	UPC			
3.5 Messdynamik	Optimiert für Laborversuche	UPC			
3.6 Kalibrierverfahren	Manuell, extern	UPC			
3.7 Referenzdaten	Einmalig, manuell eingepflegt	UPC			
3.8 Datenauswertung	Maschinelles Lernen	UPC			
3.9 Datenformat	Tabellen	UPC			
4. Datenerfassung, -verarbeitung und -regelung					
4.1 DAQ	RasPI	HIF			
4.2 Daten- & Analyseplattform	Data Lake	SN3, HIF			
4.3 Datenspeicherung	Virtualisierte Umgebung	SN3, HIF			
4.4 Echtzeitdatenhaltung	mehrere Versuchsreihen	SN3, HIF			
4.5 Visualisierung	aktuelle Messwerte und KPIs	SN3, HIF			❺
4.6 Sensorfusion		SN3, HIF			
4.7 Bildauswertung	Datenkompression	SN3			❻
4.8 DOE		SN3			
4.9 Prädiktive Regelung		SN3, HIF			
4.10 Anomaliedetektion		SN3			❼
5. Konzeption Scale-Up für industrielle Prozessintegration					
5.1 Technisches Konzept für LIBS		SEC			
5.2 Qualifizierung Sensorsystem		SEC			
5.3 Transfer in dynamische Prozesse		alle			