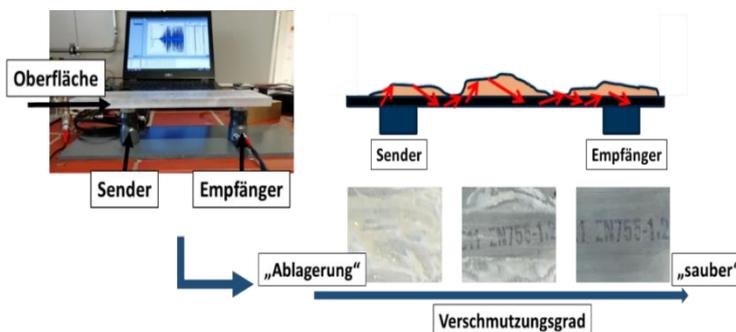


Einsatz von Oberflächenwellenmessungen zur Adaption der Reinigung von Rohrsystemen in der Backwarenproduktion



Koordinierung:	Forschungskreis der Ernährungsindustrie e. V. (FEI), Bonn
Forschungsstelle(n):	Technische Universität München School of Life Sciences Forschungsdepartment Life Science Engineering Lehrstuhl für Brau- und Getränketechnologie Prof. Dr. Thomas Becker/Dipl.-Ing. Dominik Ulrich Geier/M.Sc. Thekla Alpers
Industriegruppe(n):	VDMA-Fachverband Nahrungsmittel- und Verpackungsmaschinen e. V., Frankfurt Weihenstephaner Förderverein für Brau-, Getränke- und Getreideforschung e. V., Freising Weihenstephaner Institut für Getreideforschung e.V. (WIG), Freising
Projektkoordinator:	Dr. Torsten Zense Diosna Dierks & Söhne GmbH
Laufzeit:	2020 – 2023
Zuwendungssumme:	€ 264.105,--

Ausgangssituation

Die fortschreitende Automatisierung von Bäckereianlagen erfordert die Bereitstellung von Reinigungskonzepten, welche mit inline-fähigen Methoden überwacht und geregelt werden können. Bei der Förderung einzelner Teiginhaltsstoffe (Hefe, Wasser etc.), pumpfähiger Teigvorstufen (Vorteige, Sauerteige, Quell- und Brühstücke), Massen sowie finaler Teige bilden sich in Rohrleitungen, insbesondere in Bereichen von Ventilen, Ecken und Bögen, Ablagerungen aus. Mit zunehmender Prozessdauer können Teile dieser Ablagerungen von der Wandung abgetragen werden und ins Produkt übergehen. Dies kann zu einer sensorischen und qualitativen Minderung der Produktqualität führen sowie durch Verschleppung kritischer Komponenten die Produktsicherheit nachfolgender Chargen gefährden. Im Extremfall können sich aus solchen Ablagerungen die Vorstufen von Biofilmen entwickeln.

Um die Ausbildung von Ablagerungen in Rohrleitungen zu reduzieren, wurden kostenintensive, kohlenstoff- und polymerbasierte Beschichtungen der produktberührenden Anlageninnenseiten sowie der Einsatz von Nanopartikeln erforscht. Eine ausreichende Vermeidung von Ablagerungen ist jedoch mit diesen Ansätzen nicht möglich. Daher müssen die Ablagerungen spätestens nach Prozessende durch Reinigungsprogramme entfernt werden. Häufig muss hierfür der Prozess unterbrochen und eine Zwischenreinigung durchgeführt werden, um eine sichere Betriebsweise und hohe Produktqualitäten zu gewährleisten. Neben diesen Qualitätsproblemen sind die, durch Ablagerungen verursachten, Kosten durch Produktionsunterbrechung, Reinigungsmedien und

Reinigungsprozess-Parameter von enormer wirtschaftlicher Bedeutung für alle Lebensmittelunternehmen. Um eine gleichbleibende, hohe Produktqualität sowie eine reibungslose Produktion zu gewährleisten, müssen aktuell mangels inline-fähiger Methoden, die den aktuellen Verschmutzungszustand des zu reinigenden Systems bzw. den Reinigungserfolg erfassen, sehr intensive Reinigungsregimes durchgeführt werden. Diese Reinigungsregimes sind aus Sicherheitsgründen sowohl hinsichtlich ihrer Dauer als auch ihrer Intensität überdimensioniert. Eine inline-fähige Reinigungskontrolle hingegen würde eine gezielte, auf den jeweiligen Verschmutzungszustand angepasste Reinigung ermöglichen bei gleichzeitiger Verbesserung der Produktqualität und -sicherheit, kürzeren Anlagenstillstandzeiten und Ressourceneinsparungen.

Ziel des Forschungsvorhabens war es daher, auf der Grundlage von Oberflächenwellenmessungen ein Verfahren zu entwickeln, um den aktuellen Verschmutzungszustand von Rohrleitungssystemen bzw. den Erfolg von Anlagenreinigungen inline zu ermitteln und darauf basierend ein optimiertes Reinigungsregime durchzuführen.

Forschungsergebnis

Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurden Referenzverschmutzungsmatrizes (Real- und Modellmatrix) auf Basis von getreidebasierten Materialien entwickelt und deren Reinigungsverhalten im Labormaßstab untersucht. Diese wurden im Verlauf des Projektes als definierte Verschmutzungsmatrizes verwendet. Weiterhin wurden verschiedene Methoden (gravimetrisch, photometrisch (THONHAUSER)) zur Messung von Restverschmutzungen in Rohrleitungen etabliert und evaluiert. Dabei wurde die Eignung beider Methoden hinsichtlich der zeitlichen Auflösung und Genauigkeit untersucht. Die etablierten Referenzmethoden sind dabei in der Lage, auch sehr geringe Restverschmutzungen zu detektieren, welche nachfolgend mit Ultraschallmessungen korreliert wurden. Ein bestehender Versuchsstand zur Realisierung von CIP-Regimes wurde an die Anforderung des Vorhabens hinsichtlich der Integration des Ultraschallsystems sowie der Ausgabe und Steuerung der CIP-Parameter angepasst. Mittels numerischer Strömungssimulation konnten kritische Zonen der Rohrleitung (die sog. „Cleaning-Unit“, welche aus flexibel einsetzbaren Rohrleistungssegmenten besteht) bezüglich der CIP-Reinigung ermittelt werden. Die Positionierung der Ultraschallsensoren für eine optimierte Ermittlung der verbleibenden Verschmutzung im Rohrleitungssystem wurde dementsprechend vorgenommen.

In einem weiteren Schritt wurden die Ultraschallsensoren zur Messung der Oberflächenwellen im Pitch-Catch-Modus adaptiert und in Laborversuchen getestet. Dabei konnten bereits erste manuell aufgebrachte Verschmutzungen detektiert werden. Nachfolgend wurde das Sensorsystem mit den eingesetzten Schallerzeugern/-empfängern bezüglich Signalqualität, Energieeintrag und Robustheit evaluiert. Zur Detektion von Ablagerungen mittels Oberflächenwellen wurden die Ultraschallsignale durch Merkmalsextraktion („Feature Extraction“) ausgewertet und für die Darstellung des Verschmutzungsgrades etabliert. Durch die Bildung von Korrelationsmodellen, konnte ein Zustandsschätzer, der den aktuellen Verschmutzungszustand der Anlage vor der Reinigung angibt, entwickelt werden. Die Auswertearithmetik wurde dabei über den gesamten Projektverlauf kontinuierlich getestet und verbessert.

Anschließend wurde das entwickelte Oberflächenwellensystem in den adaptierten Versuchsstand zur Durchführung von CIP-Regimes integriert. Dabei wurden die Schallerzeuger/-empfänger in definierter Position an die „Cleaning-Unit“ angekoppelt. Zur Umsetzung der Abreinigungsversuche im Technikumsmaßstab wurde zudem ein Verfahren entwickelt und etabliert, um reproduzierbar Verschmutzungsmatrizes in die Rohrleistungssegmente der „Cleaning-Unit“ auftragen zu können. Die Abreinigung wurde dabei für unterschiedliche Teigmatrices getestet (Weizensauerteig TA 200 und Brühstück TA 350). Der Reinigungserfolg wurde dabei durch die Kenntnis der nach der Reinigung im Rohr verbliebenen Verschmutzungsmenge bestimmt. Dafür wurden als Referenzmethoden sowohl Gravimetrie als auch die THONHAUSER-Methode eingesetzt, um die Ablagerungen im Rohr vor und nach der Reinigung zu bestimmen.

Über datengetriebene Modelle konnten die extrahierten Merkmale der Ultraschallsignale mit den Referenzmethoden korreliert werden. Dabei wurden drei Modelle entwickelt und für komplexe Realverschmutzungen getestet. Das erste Modell ermittelte den Zustand der Rohrleitungen vor der eigentlichen Reinigung, während

das zweite Modell für die Reinigung selbst entwickelt wurde. Aus dem aktuellen Verschmutzungszustand der Anlage (Modell 1, $R^2 > 0,9$) und der Abreinigungskinetik (Modell 2, $R^2 > 0,9$) liefert das dritte Modell optimierte CIP-Parameter, welche genutzt werden, um die Reinigung zu adaptieren. Bei Kenntnis der verbleibenden Verschmutzung in der Rohrleitung gibt es zahlreiche unterschiedliche CIP-Strategien, welche eine anschließende, vollständige Reinigung erlauben. Zur Selektierung einer optimalen Lösung aus dieser Gruppe von CIP-Strategien wurden zusätzliche Bedingungen (neben der erfolgreichen Reinigung) eingeführt. Hierbei handelte es sich um die Minimierung der Reinigungsdauer bei einer gleichzeitigen Minimierung der Reinigungskosten. Um iterativ dieses Optimum zu finden, wurde ein Approximationsverfahren basierend auf „Simulated Annealing“ verwendet. Durch die direkte Messung der Verschmutzung mittels Ultraschall und der Vorhersage und Optimierung der Reinigung durch „Simulated Annealing“ konnten optimierte CIP-Regimes auch in konsekutiver Weise (Vorspülschritt, Laugenreinigung etc.) realisiert werden.

Weiterhin wurde das oberflächenwellenbasierte Sensorsystem auch für Verschmutzungen durch Feststoffablagerungen (Sojamehl) getestet. Dabei wurde eine veränderte Abreinigungskinetik (lokal stark anhaftend) gegenüber den zuvor getesteten Verschmutzungsmatrizes festgestellt.

Die Überwachung von komplexen Rohrleitungssystemen bzw. ganzen Anlagen kann durch den abgestimmten Einsatz von mehreren Oberflächenwellensystemen erfolgen. Hierzu ist auch das Verhalten des Systems in gekrümmten Rohren interessant. Um die Übertragbarkeit zu eruieren, wurde es nach der Entwicklung des Ultraschallsystems an geraden Rohren abschließend auf gekrümmte Rohre übertragen. Dazu wurde eine Krümmung in die „Cleaning Unit“ eingebaut und die Positionierung der Schallsensoren angepasst. Bei anschließenden Reinigungsversuchen wurden besonders die Ultraschallwellen, die einen helikalen Weg nehmen, als am sensitivsten zur Detektion von Ablagerungen identifiziert. Die Ergebnisse belegen, dass das Ultraschallsystem zur Detektion des Grades der Ablagerungen nicht nur für gerade Rohre, sondern auch bei gekrümmten Rohren eingesetzt werden kann.

Wirtschaftliche Bedeutung

Die Backbranche in Deutschland erzielte im Jahr 2022 einen Gesamtumsatz von 16,27 Mrd. € und ist mit durchschnittlich 25 Mitarbeitern pro Betrieb und einem Jahresumsatz von 1,7 Mio. € pro Betrieb mittelständisch geprägt. Gerade kleine und mittelgroße Bäckereien (KMU) sind einem zunehmenden Preisdruck und starken Konzentrationsprozessen ausgesetzt. So sank die Anzahl an Bäckereien in den letzten 60 Jahren von rund 55.000 (altes Bundesgebiet) auf etwa 9.600 im Jahr 2022.

Viele Bäckereien versuchen, den hohen Wettbewerbsdruck durch eine Optimierung ihrer internen Abläufe zu kompensieren; auch wird bei der Neuanschaffung von Anlagen auf einen hohen Automatisierungsgrad geachtet, da der anhaltende Fachkräftemangel die Branche zum Einsatz automatisierter Systeme zwingt. Zudem ergibt sich aus dem gesellschaftlichen Megatrend der Individualisierung eine steigende Heterogenität von Kundenbedürfnissen, die in einer zunehmenden Produktvielfalt bei gleichzeitig steigendem Qualitätsbewusstsein der Konsumenten resultiert.

Insbesondere KMU können aufgrund kleinerer Produktionschargen im Vergleich zu industriellen Wettbewerbern schneller und flexibler auf Nachfrageveränderungen reagieren. Jedoch bedingt die Herstellung vieler unterschiedlicher Produkte auf den gleichen Anlagen hohe Anforderungen an die Reinigung. Durch den Einsatz von Oberflächenwellenmessungen zur Adaption der Reinigung von Rohrsystemen in der Backwarenproduktion können Einsparungen sowohl im operativen Betrieb (weniger Reinigungsmittel) als auch durch die Reduktion von Reinigungszeiten und -intervallen erreicht werden. Zudem wird durch die Adaption der Reinigung die Produktqualität sowie Chargenreinheit erhöht, wodurch das Risiko, dass Produkte von minderer Qualität in den Verkauf gelangen, reduziert wird.

Von den Ergebnissen werden auch Unternehmen des Maschinen- und Anlagenbaus profitieren, da im Rahmen des Vorhabens Ansätze entwickelt wurden, die die Basis für eine schnelle, kostengünstige und inline-fähige Überwachung der Reinigung von Anlagen darstellen.

Publikationen (Auswahl)

1. FEI-Schlussbericht 2023.
2. Sharma, Y., Metzenmacher, M., Vogt, U., Alpers, T., Geier, D., Becker, T.: Reinigungsüberwachung von Rohrleitungen mit Ultraschall. Brot+Backwaren (1), 42-45, (2024).
3. Metzenmacher, M., Beugholt, A., Geier, D. & Becker, T.: Combined Longitudinal and Surface Acoustic Wave Analysis for Determining Small Filling Levels in Curved Steel Containers. Sensors, <https://doi.org/10.3390/s22093476> (2022).

Weiteres Informationsmaterial

Technische Universität München
School of Life Sciences
Forschungsdepartment Life Science Engineering
Lehrstuhl für Brau- und Getränketechnologie
Tel.: +49 8161 71-3669
Fax: +49 8161 71-3883
E-Mail: dominik.geier@tum.de, thekla.alpers@tum.de

Forschungskreis der Ernährungsindustrie e.V. (FEI)
Godesberger Allee 125, 53175 Bonn
Tel.: +49 228 3079699-0
Fax: +49 228 3079699-9
E-Mail: fei@fei-bonn.de

Förderhinweis

... ein Projekt der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF)

Gefördert durch:



Das o. g. IGF-Vorhaben der Forschungsvereinigung Forschungskreis der Ernährungsindustrie e. V. (FEI), Godesberger Allee 125, 53175 Bonn, wird/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.

Bildnachweis - Seite 1: © Technische Universität München; WZW, Lehrstuhl für Brau- und Getränketechnologie

Stand: 19. März 2025