

Ultraschallbasiertes Messsystem zur Verfolgung von Fouling in Wärmetauschern und zur Validierung des Reinigungserfolges

Koordinierung:	Forschungskreis der Ernährungsindustrie e.V. (FEI), Bonn
Forschungsstelle I:	Technische Universität München Wissenschaftszentrum Weihenstephan WZW Lehrstuhl für Brau- und Getränketechnologie Prof. Dr. Thomas Becker/Dr. Mohammed Hussein
Forschungsstelle II:	Universität Hohenheim Institut für Lebensmittelwissenschaft und Biotechnologie FG Lebensmittel tierischer Herkunft Prof. Dr. Dr. Jörg Hinrichs
Industriegruppe:	Milchindustrie-Verband e.V. (MIV), Berlin
	Projektkoordinator: Michael Rauber Breisgaumilch GmbH, Freiburg i. Br.
Laufzeit:	2010 - 2012
Zuwendungssumme:	€ 354.950,-- (Förderung durch BMWi via AiF/FEI)

Ausgangssituation:

Milch und Milchprodukte werden im Rahmen ihrer Verarbeitung zu den unterschiedlichsten Produkten in Wärmetauschern thermisch behandelt, pasteurisiert oder sterilisiert. Bereits nach kurzer Betriebszeit bilden sich auf produktberührenden Erhitzeroberflächen Beläge (Fouling), die aus kristallisierten Salzen und denaturierten Proteinen bestehen. Fouling stellt ein zentrales Problem für milchverarbeitende Unternehmen und Anlagenhersteller dar, weil dadurch der Wärmedurchgang vermindert wird. Um dennoch eine konstante Erhitzungstemperatur sicherzustellen, wird mit fortschreitendem Fouling die Temperatur des Heizmediums sukzessive erhöht. Damit erhöht sich die Wandtemperatur und der Belag wird einer erhöhten Temperatur ausgesetzt. Enthaltene Proteine können anbrennen. Werden durch die Strömung Belagsbestandteile herausgelöst und gelangen ins Produkt, so resultieren daraus sensorische und optische Qualitätsverluste. Zudem steigt der Druckverlust. Daher müssen Erhitzer in regelmäßigen Abständen aus dem Produktionsprozess herausgenommen und das Fouling mittels CIP-Reinigung (cleaning in place) entfernt werden.

Flexible kleine und mittelständische Unternehmen (KMU) produzieren häufig auch kleinere Chargen, so dass sich nur ein geringer Belag ausbildet. Dennoch ist eine gründliche Reinigung notwendig, um weder Produktreste noch Allergene zu verschleppen. Eine CIP-Reinigung ist so ausgelegt, dass der Reinigungserfolg auch bei starker Verschmutzung garantiert ist. Damit sind CIP-Reinigungsprogramme für die meisten Anwendungsfälle überdimensioniert. Für kleine Produktchargen werden inzwischen auf empirischer Basis Kurzreinigungsprogramme für „geringe Verschmutzung“ programmiert. Wie erfolgreich die Reinigung ist, ist jedoch nicht eindeutig überprüfbar.

Fouling in Erhitzern verursacht jährlich Kosten von mehreren 100 Mio €. Dabei stehen bis zu 80 % der Produktionskosten direkt oder indirekt mit Fouling in Verbindung. Ein Weg, die Reinigungskosten zu minimieren, wäre eine bedarfsgerechte CIP-Reinigung, die an den jeweils vorhandenen Belag angepasst wird.

Bislang steht der Milchindustrie jedoch kein einfaches und kostengünstiges Verfahren zur Verfügung, mit dem während eines Reinigungszyklus in Wärmetauschern der Reinigungsfort-

schritt detektiert und die Reinigungszeit angepasst werden kann. Um dieses Ziel zu erreichen, ist es notwendig, nichtinvasiv und ohne großen Aufwand Messungen auch an bereits bestehenden Anlagen durchführen zu können.

Es existieren zwar verschiedene Ansätze, um Fouling zu detektieren, die meisten sind jedoch nicht geeignet, den Reinigungsfortschritt online in einer Anlage zu überwachen. Eine Lösung könnte ein auf Ultraschall basierender Ansatz sein.

Ziel des Forschungsvorhabens war es deshalb, ein kostengünstiges ultraschallbasiertes Detektionssystem zu entwickeln, das mittels verschiedener Mustererkennungsmethoden Fouling detektieren und den Reinigungsfortschritt überwachen soll. Dabei lag das Hauptaugenmerk auf einer Kombination von Ultraschallsignalen und Klassifikationsmethoden. Ultraschall wurde ausgewählt, da es bereits in vielen unterschiedlichen Anwendungen als nichtinvasive und nichtdestruktive Methode verwendet wird und große Erfahrungen auf diesem Gebiet existieren. Für die digitale Signalanalyse wurde das Reflexionsecho an der Grenzfläche Edelstahlwand-Fouling ausgewählt und ausgewertet. Es wurden verschiedene Merkmale bestimmt, die vorher aufwändig auf die Sensitivität in Bezug auf Fouling bzw. Nicht-Fouling („sauber“) getestet wurden. Um die Entscheidung zu treffen, ob ein verschmutzter oder ein sauberer Wärmetauscher vorliegt, wurden verschiedene Mustererkennungsmethoden getestet. Dabei zeigten insbesondere künstliche neuronale Netze (KNN) und Stützvektormaschinen (support vector machine, SVM) gute Sensitivität auf Fouling und wurden für die weitere Verwendung ausgewählt.

Forschungsergebnis:

Für die Überwachung von Reinigungszyklen wurde ein ultraschallbasiertes Detektionssystem entwickelt, das in Kombination mit verschiedenen Mustererkennungsmethoden arbeitet. Dieses Detektionssystem wurde zuerst an einem selbstentwickelten, planaren Aufbau getestet und verbessert. Dafür wurde eine Methode entwickelt, mit der Milchproteinfouling zuverlässig und reproduzierbar aufgebracht und wieder abgereinigt werden kann. Der Foulingaufbau konnte dabei nicht mit dem Ultraschallmesssystem beobachtet werden, die Reinigung hingegen schon, indem das Ultraschallmesssystem an der zu reinigenden Platte angebracht wurde.

Für die Signalanalyse des Reflexionsechos an der Grenzfläche Edelstahlwand-Fouling wurden aus dem Ultraschallsignal verschiedene (bis zu sieben) Merkmale extrahiert und über Klassifikationsmethoden, wie KNN und SVM, getestet und nach Fouling bzw. kein Fouling (sauber) klassifiziert. Der offline in Matlab® entwickelte Code wurde in einen online-fähigen C++-Code implementiert und kann für die Online-Beobachtung des Reinigungsfortschritts verwendet werden.

Die verschiedenen Methoden zeigten unterschiedlich gute Detektionsgenauigkeiten (80 - 98 %) und die ermittelte durchschnittliche Reinigungszeit für den entwickelten planaren Aufbau betrug 22 ± 3 min. Diese Zeit entspricht etwa der experimentell bestimmten Reinigungszeit, bei der verschiedenen lange Reinigungen durchgeführt wurden. Dabei konnte nachgewiesen werden, dass nach ca. 20 min ein Großteil des aufgetragenen Foulings an der Stelle abgetragen wurde, an der der Ultraschalltransducer sitzt. Die zurückgebliebene Schicht betrug im Schnitt unter 50 μ m. Der Detektion kann ein Sicherheitsfaktor von 2 - 3 min hinzugefügt werden, um die Detektion als Nachweis „sauber“ sicherer zu machen. Dieser Sicherheitsfaktor liegt innerhalb der Reaktionszeit der Anlage.

Im Ergebnis des Vorhabens ist es gelungen, ein Detektionssystem zu entwickeln, das Ultraschallsignale mit Klassifikationsmethoden (KNN, SVM) kombiniert. Dieses System kann dafür verwendet werden, online den Reinigungsfortschritt zu überwachen und die Reinigungszeit an das tatsächlich vorhandene Fouling anzupassen. Die Ultraschalldetektionseinheit wurde bislang nur mit einem planaren Wärmetauscher getestet, erste Versuche mit einer Monotube sind jedoch vielversprechend. Die Anpassung der Detektionseinheit und der Auswertesoftware an ein rundes Rohr kann dabei schnell und einfach erfolgen. Neben der Überwachung der Reinigung kann bei dem Monotubeaufbau prinzipiell zusätzlich auch der Aufbau von Fouling beobachtet werden.

Wirtschaftliche Bedeutung:

Die deutsche Milchindustrie ist mit etwa 240 Betriebsstätten und 37.000 Beschäftigten eine der leistungsstärksten Branchen innerhalb der Lebensmittelindustrie (21 Mrd. € Umsatz). Bedingt durch die komplexe Zusammensetzung der Milch ist erhitzenbedingtes Fouling bei der Verarbeitung zu unterschiedlichen Produkten unvermeidbar. Neben Qualitätsproblemen im fer-

tigen Produkt sind die durch Fouling verursachten Kosten für die Produktionsunterbrechung und die Reinigung von großer wirtschaftlicher Bedeutung. Eine gründliche Reinigung ist auch bei geringer Verschmutzung notwendig, die gerade bei kleineren Betrieben durch die Produktion kleiner Chargen häufig vorkommt, um keine Produktreste oder Allergene zu verschleppen.

Mit dem entwickelten, kostengünstigen (einschließlich Software unter € 500,- teuren) Ultraschallmesssystem ergibt sich insbesondere für kleine und mittlere Unternehmen eine Möglichkeit, die Reinigungskosten zu minimieren, indem die meisten starren CIP-Reinigungen an den Verschmutzungsgrad einer Anlage angepasst werden. Dadurch lassen sich Reinigungszeiten verkürzen und der Ressourcenverbrauch (Wasser, Reinigungsmittel) minimieren. Je nach Sortiment und Chargengröße erscheint eine Reduktion reinigungstechnischer Produktionsunterbrechungen um 20 - 50 % realistisch. Der Reinigungserfolg kann ohne Öffnen der Anlage oder aufwändige Analyse validiert werden; der Fokus liegt auf der Reinigung.

Publikationen (Auswahl):

1. FEI-Schlussbericht 2012.
2. Sprunk, M., Nöbel, S. und Hinrichs, J.: Versuchsaufbau zur beschleunigten Bildung von Fouling aus Magermilchkonzentrat. CIT 86, 1223 - 1229 (2014).
3. Wallhäußer, E., Sayed, A., Nöbel, S., Hussein, M. A., Hinrichs, J. und Becker, T.: Determination of cleaning end of dairy protein fouling using an online system combining ultrasonic and classification methods. Food Bioproc. Technol. 7, 506 - 512 (2014).
4. Wallhäußer, E., Hussein, W. B., Hussein, M. A., Hinrichs, J. und Becker, T.: Detection of dairy fouling: Combining ultrasonic measurements and classification methods. Eng. Life Sci. 13, 292 - 301 (2013).
5. Wallhäußer, E., Nöbel, S., Sayed, A., Sprunk, M., Hussein, M.A., Hinrichs, J. und Becker, T.: Kontinuierliche Detektion von Milchfouling mittels einer Kombination von Ultraschall und

Klassifizierungsmethoden. CIT 85, 1589 - 1596, (2013).

6. Wallhäußer, E., Hussein, M. A. und Becker, T.: Detection methods of fouling in heat exchangers in the food industry. Food Control 27, 1 - 10, (2012).
7. Wallhäußer, E. Hussein, M.A. und Becker, T.: Investigating and understanding fouling in a planar setup using ultrasonic methods. Rev. Sci. Instr. 83, 094904-1-094904-10 (2012).
8. Wallhäußer, E., Hussein, W.B., Hussein, M.A., Hinrichs, J. und Becker, T.: On the usage of acoustic properties combined with an artificial neural network – A new approach of determining presence of dairy fouling. J. Food Engin. 103, 449 - 456 (2011).
9. Becker, T.: Ultraschallsensorik in der Prozessanalytik von getreidebasierten Lebensmitteln. Tagungsband 68. FEI-Jahrestagung 2010, 73 - 90 (2010).

Weiteres Informationsmaterial:

Technische Universität München
Wissenschaftszentrum Weihenstephan WZW
Lehrstuhl für Brau- und Getränketechnologie
Weihenstephaner Steig 20,
85354 Freising-Weihenstephan
Tel.: +49 8161 71-0
Fax: +49 8161 71-3883
E-Mail: thomas.becker@wzw.tum.de

Universität Hohenheim
Institut für Lebensmittelwissenschaft
und Biotechnologie
FG Lebensmittel tierischer Herkunft
Garbenstraße 21, 70599 Stuttgart
Tel.: +49 711 459-23792
Fax: +49 711 459-23617
E-Mail: jh-lth@uni-hohenheim.de

Forschungskreis der Ernährungsindustrie e.V. (FEI)
Godesberger Allee 142-148, 53175 Bonn
Tel.: +49 228 3079699-0
Fax: +49 228 3079699-9
E-Mail: fei@fei-bonn.de

... ein Projekt der **Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF)**

gefördert durch/via:

