

## Optimierung der Fermentation von Bierwürze in den Phasen der Gärung und Reifung durch adaptive Strömungsgestaltung

<b>Koordinierung:</b>	Forschungskreis der Ernährungsindustrie e.V. (FEI), Bonn
<b>Forschungsstelle I:</b>	Universität Erlangen-Nürnberg Department für Chemie- und Bioingenieurwesen, Lehrstuhl für Strömungsmechanik Prof. Dr. Antonio Delgado/Prof. Dr. Cornelia Rauh
<b>Forschungsstelle II:</b>	Fachhochschule Stralsund Fachbereich Maschinenbau FG Strömungslehre und Strömungsmaschinen Prof. Dr. Janusz Szymczyk/Prof. Dr. Heiko Meironke
<b>Forschungsstelle III:</b>	Technische Universität Berlin Institut für Biotechnologie FG Brauwesen Prof. Dr. Frank-Jürgen Methner
<b>Industriegruppe:</b>	Wissenschaftsförderung der Deutschen Brauwirtschaft e. V., Berlin  Projektkoordinator: Dr. Erika Hinzmann Wissenschaftsförderung der Deutschen Brauwirtschaft e. V., Berlin
<b>Laufzeit:</b>	2010 - 2012
<b>Zuwendungssumme:</b>	€ 642.000,-- (Förderung durch BMWi via AiF)

### Ausgangssituation:

Die Fermentation von Bierwürze ist aufgrund ihrer essentiellen Bedeutung für die Produkt- und Prozessqualität, die innere Logistik und die Wirtschaftlichkeit einerseits sowie ihrer Komplexität andererseits ein Schlüsselprozess der Bierproduktion. Sie zeichnet sich durch stark ineinander greifende physikalische, (bio-)chemische und mikrobiologische Wechselwirkungen aus. Zunehmend setzt sich sowohl in der wissenschaftlichen Literatur als auch in der Braupraxis die Erkenntnis durch, dass die Interaktionen von Hefestoffwechsel, Stoff- und Wärmetransport mit dem strömungsbedingten Transport innerhalb des Gärtanks eng verbunden sind. Dies betrifft nicht nur die Gärphase, sondern auch die Reifungs- und Lagerungsphase. Obwohl die deutsche Brauwirtschaft in den weltweit hart umkämpften Biermärkten dringend Innovationen

zum Fermentationsprozess benötigt, liegt aus wissenschaftlich-technischer Sicht bisher eine unzureichende Basis vor, um adaptiv die Strömungen in den Fermentationstanks zu gestalten. Die diesbezüglich vorliegenden Lücken im wissenschaftlich-technischen Wissen liefern einen der Hauptmotivationsmomente dieses Vorhabens, welches auf die Gärung und Reifung fokussiert. Die Lagerungsphase bleibt ausdrücklich außer Betracht.

Aus wirtschaftlicher Sicht motiviert sich das vorliegende Vorhaben darin, die damit verbundenen hohen ökonomischen und technologischen Potentiale für die deutschen Brauereien – die bezüglich ihrer Anzahl überwiegend aus KMU bestehen (2008: 1.319 Betriebe entspricht etwa 93 % der Gesamtbetriebe) – zu nutzen; diese sind sowohl ressourcenhemmend als auch umweltbelastend. Konkret liegen nutzbare ökonomische

mische, ökologische und technologische Optimierungsmöglichkeiten bezüglich einer auf die vorhandenen Kapazitäten und Personalressourcen adaptierten Innenlogistik inkl. der Tankbelegungszeiten, einer gleich bleibenden Produktqualität, längerer Filterstandzeiten, eines verbesserten Hefemanagements und einer verringerten Nutzung von thermischer Energie zur Kühlung vor. Hiermit gehen auch die Vorteile eines gezielteren Einsatzes von Personal und Betriebsmitteln einher. Die wirtschaftlichen Vorteile für Betriebe, insbesondere für KMU, sind daher vielfältig.

Die Bearbeitung des Vorhabens erfolgte branchenübergreifend an drei Forschungsstellen mit brauwissenschaftlicher/prozesstechnischer, thermofluidynamischer und regelungstechnischer Kompetenz, die sich auch in der Zusammensetzung des Projektbegleitenden Ausschusses widerspiegelt. Durch die Mitwirkung von Vertretern aus den zugehörigen Branchen beschränkte sich das Forschungsvorhaben nicht nur auf die Optimierung von Fermentationsprozessen der Brauwirtschaft. Auch KMU aus der Sensor-, Regelungs- und Automatisierungstechnik sowie aus der Bio- und Umwelttechnologie können von den Erkenntnissen profitieren.

#### **Forschungsergebnis:**

Hauptziel des Forschungsvorhabens war es, ein adaptives, hybrides Strömungsführungssystem durch die Verknüpfung von Wissen über die Konvektionsprozesse sowie die technologischen, biochemischen und physikalischen Vorgänge während der Gärung und der Reifung zu entwickeln. Dafür wurde in der Forschungsstelle (FS) 1 ein Laborfermenter konstruiert, ausgelegt und automatisiert. In diesem Reaktor wurden experimentelle Strömungsuntersuchungen von transparenten mehrphasigen Modelllösungen mit asymmetrischer und symmetrischer Kühlung mittels einer Lasermethode gemessen. Außerdem werden numerische Untersuchungen zur Ergänzung und Erweiterung von Kenntnissen der Konvektionsvorgänge im Fermenter, die aufgrund der experimentellen Untersuchungen gewonnen wurden, durchgeführt. Für die numerischen Untersuchungen wurde die Modellierung des realen Prozesses sowie von ein- und mehrphasigen Strömungen mit und ohne Berücksichtigung der mikrobiologischen und biochemischen Effekte durchgeführt. Zur Validierung der numerischen Daten wurden die experimentellen Er-

gebnisse von FS 1, FS 2 und FS 3 herangezogen. Für die experimentelle Charakterisierung der Strömungsvorgänge im realen Prozess wurden in FS 2 ein vorhandener Versuchsaufbau erweitert und Experimente in Modellflüssigkeiten und Jungbier durchgeführt. Daraus resultierten neben einer umfangreichen Datenbasis zahlreiche Erkenntnisse bezüglich der Strömungsvorgänge im Fermenter. Es wurden neben der Untersuchung biochemischer Größen auch Onlinemessungen von Temperatur, Volumenstrom und Geschwindigkeit durchgeführt. Hervorzuheben ist der aufgrund der Trübung notwendige Einsatz von Ultraschallmesstechnik, deren Messfeld im Vergleich zu früheren Versuchen stark erweitert wurde. FS 3 hat, begleitend zur Onlinemessung, den Gärverlauf mit Hilfe von Offline-Proben aufgezeichnet und die biochemischen Vorgänge dokumentiert. Weiterhin wurde an der FS 3 ein Fermentationssystem etabliert, um im kleinen Maßstab zusätzliche Gärungen durchzuführen. FS 1 baute zur Optimierung der Strömungsverläufe einen neuen Rundkonus. Es zeigte sich im Rundkonus ein beschleunigter Extraktabbau als im 30 °Konus. Im oberen Bereich kam es jedoch zu keiner Beschleunigung unter den vorhandenen Randbedingungen. Des Weiteren hat der Rundkonus auf die Homogenität einen größeren Einfluss. Die entstehenden größeren Wirbel bewirken, dass die Partikel länger im Fermenter zirkulieren und deren Sedimentation verzögert wird. Bei den asymmetrischen Versuchen traten signifikante Geschwindigkeitsänderungen nur bei hinreichenden Temperaturunterschieden und bei hinreichend großen Temperaturgradienten eine Umkehrung der Strömungsrichtung an der kalten und warmen Wand deutlich auf. Bei den symmetrischen Fällen nehmen die Strömungsumkehrungen und die Geschwindigkeitswerte eine geringere Größenordnung an. Die zahlreichen experimentellen und numerischen Untersuchungen liefern eine Vielzahl von mehrdimensionalen, zeitabhängigen, teils auch redundanten Datensätzen, welche reduziert wurden, um sie im resultierenden Prozessführungssystem effizient verwenden zu können. Künstliche Neuronale Netze (KNN) wurden mit der reduzierten Datenbasis trainiert, um den funktionalen Zusammenhang der Parameter vorherzusagen. Die KNN wurden zentraler Bestandteil der adaptiven Prozessführungsstrategie. Betriebe erhalten durch die Eingabe bzw. Messung verschiedener Eingangsgrößen, wie Temperatur, pH-Wert und Extraktgehalt, mittels der künstlichen neuronalen Netze eine Ausgangsgröße, die genau die An-

steuerung der Kühlzonen vorgibt, die einen optimalen Prozess zur Folge hat.

#### Wirtschaftliche Bedeutung:

Die Ergebnisse sind für alle Wirtschaftszweige von Interesse, die sich mit Fermentationsprozessen, wie das Brauwesen und die Lebensmittel- und Biotechnologie, beschäftigen. Hierbei spielt sowohl die durch Temperiereinheiten vermittelte/unterstützte adaptive Strömungsführung eine entscheidende Rolle (z.B. Abwasserreinigung) als auch die erzielbare Beeinflussung des Mikroorganismenmetabolismus, z.B. bei der Produktion sekundärer Metaboliten, wie dies in der Herstellung von Pharmazeutika genutzt wird (z.B. bei der Antibiotikaproduktion). Ebenso profitieren Unternehmen der Verfahrenstechnik, der Produktion und Mess-, Regel- und Automatisierungstechnik von der Entwicklung der Optimierungs- und Prozessführungsstrategien. Eine Übertragbarkeit der Methoden auf andere Produktionsprozesse ist hierbei prinzipiell gegeben.

In Deutschland erwirtschafteten im Jahre 2008 1.319 Braustätten mit insgesamt 29.604 Beschäftigten (hiervon sind 93 % kleine und mittelständische Unternehmen) einen Umsatz von 8,2 Mrd. €. Diese Zielgruppe kann die vorliegenden Forschungsergebnisse nutzen, um Produkt- und Prozessqualitäten zu steigern, um die Produktionskosten zu reduzieren sowie um die Umwelt zu schonen. Ein Prozessführungssystem für die Fermentation mit dem Ziel einer technologiegerechten Konvektion im Tank führt zu einer verbesserten Produktqualität bei kürzeren Fermentationszeiten, einem besseren Hefemanagement bei gleichzeitiger Erhöhung der Filterstandzeiten und damit zu einer Reduzierung der Betriebskosten.

Bei der Entwicklung nahm die Nachrüstbarkeit eine zentrale Stellung ein. Der zu erwartende minimale konstruktive Aufwand ermöglicht die Nachrüstung bereits bestehender Systeme bei geringen Investitionskosten.

Die Ergebnisse verbessern die Reproduzierbarkeit des Herstellungsprozesses, was sich sowohl in einer Erhöhung der Qualität, als auch in deutlich niedrigeren Herstellungskosten niederschlagen wird. Bei der Analyse von Marktdaten wird deutlich, dass kleine und mittlere Brauereien insbesondere durch den Preisdruck Marktanteile ein-

büßen. So ist die wirtschaftliche Bedeutung der Ergebnisse evident.

Die entwickelten Prozessführungs- und Regelungsstrategien werden veröffentlicht und stehen damit allen interessierten Unternehmen zur Verfügung. Sie können im Rahmen von z. B. ZIM-Projekten für die speziellen Bedürfnisse von interessierten KMU angepasst und implementiert werden. Die Erprobung der Prozessführungsstrategie unter Labor- wie auch Praxisbedingungen zum Ende des Vorhabens bestätigte und demonstrierte die Funktionsweise und das Potential der Methoden.

#### Publikationen (Auswahl):

1. FEI-Schlussbericht 2012.
2. Meironke, H. und Böttcher, K.: Experimental Investigation of Parameters, Influencing Velocity Fields during Beer Fermentation. *Progr. Mech. Eng. Technol.* 597, 37-44, ISBN 978-3-03785-960-5 (2014).
3. Böttcher, K. und Meironke, H.: Determining of Velocity Fields During Real and Experimental Simulated Beer Fermentations by UDV and LDA. *Proc. App. Math. Mech.* 12 (1), 559-560 (2012).
4. Böttcher, K. und Meironke, H.: Experimental Investigation of beer fermentation by non intrusive velocity measurement methods. *Dev. Mech. Engin.* 5, 17-26 (2012).
5. Böttcher, K. und Meironke, H.: Bestimmung hochauflösender Geschwindigkeitsfelder in Jungbier mittels Ultraschall Doppler Messtechnik“. *Proc. Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik GALA 2012*, Rostock. ISBN 978-3-9805613-8-9, 29/1-29/8 (2012).
6. Batchuluun, E., Mansberger, I., Lopez-Ramirez, E., Rauh, C. und Delgado, A.: Optimierung der Fermentation von Bierwürze in den Phasen der Gärung und Reifung durch adaptive Strömungsgestaltung. *Proc. Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik GALA 2011*, Ilmenau. ISBN 978-3-9805613-7-2, 24/1-24/7 (2011).

**Weiteres Informationsmaterial:**

Universität Erlangen-Nürnberg  
Department für Chemie- und Bioingenieurswesen,  
Lehrstuhl für Strömungsmechanik  
Cauerstrasse 4, 91058 Erlangen  
Tel.: +49 9131 85-29501  
Fax: +49 9131 85-3  
E-Mail: sekretariat@Istm.uni-erlangen.de

Fachhochschule Stralsund  
Fachbereich Maschinenbau,  
FG Strömungslehre und Strömungsmaschinen  
Zur Schwedenschanze 15, 18435 Stralsund  
Tel.: +49 3831 456-541  
Fax: +49 3831 456-567  
E-Mail: info@fh-stralsund.de

Technische Universität Berlin  
Institut für Biotechnologie  
FG Brauwesen  
Seestraße 13, 13353 Berlin  
Tel.: +49 30 314-27504  
Fax: +49 30 314-27503  
E-Mail: frank-juergen.methner@tu-berlin.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:



Das o. g. IGF-Vorhaben der Forschungsvereinigung Forschungskreis der Ernährungsindustrie e. V. (FEI), Godesberger Allee 142-148, 53175 Bonn, wird/wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.