

Verkettetes Stoff- und Energiemanagement in Wassersystemen der Brauereien mittels informationstechnologischer Hybride auf der Grundlage von Referenz-Petri-Netzen

Koordinierung:	Forschungskreis der Ernährungsindustrie e.V. (FEI), Bonn
Forschungsstelle I:	Universität Erlangen-Nürnberg Department für Chemie- und Bioingenieurwesen Lehrstuhl für Strömungsmechanik Prof. Dr. Antonio Delgado/Dr. Frauke Groß
Forschungsstelle II:	Universität Bremen Institut für Umweltverfahrenstechnik Prof. Dr. Norbert Rübiger/Dr. Holger Wessolowski
Industriegruppe:	Wissenschaftsförderung der Deutschen Brauwirtschaft e.V. (WiFö), Berlin Projektkoordinator: Dr. Patrick Engelhardt Krones AG, Neutraubling
Laufzeit:	2013 - 2015
Zuwendungssumme:	€ 464.950,-- (Förderung durch BMWi via AiF/FEI)

Ausgangssituation:

Das Management der Wasser-, Abwasser- und Energieströme in der sekundären Lebensmittelproduktion ist überaus anspruchsvoll. Dabei gehört ein nachhaltiges Management der eingesetzten Stoff- und Energieströme aus ökologischen und ökonomischen Aspekten unbestreitbar zu einer modernen Produktionsführung. Die Festlegung von Benchmarks, wie der Global-Reporting-Initiative (GRI), EU-Regularien, dem Kyoto-Protokoll, Umweltmanagementsystemen (EMS) und Audit-Schemata (EMAS), dokumentieren die Notwendigkeit, weltweit umwelt- und ressourcenschonende Konzepte zu entwickeln.

In der lebensmittelverarbeitenden Industrie ist durch den Umgang mit der lebenswichtigen Ressource Wasser und des großen Energieeinsatzes bei der Veredelung der Ausgangsstoffe zum fertigen Produkt eine Betrachtung der eingesetzten Stoffe unabdingbar. Dies gilt insbesondere für die Exportnation Deutschland, wo Frischwasser (FW) und Abwasser (AW) regional

bis zu 3,50 - 4,50 €/m³ kosten können, und wo durch die wasserintensive Produktion von Lebensmitteln bzw. Getränken ein hoher Kostendruck für die Lebensmittelproduzenten entsteht. Ein effizientes Stoff- und Energiemanagement hat sich insbesondere in kleinen und mittelständischen Betrieben bislang noch nicht flächendeckend durchgesetzt. Eine vielversprechende Möglichkeit, ein solches Ressourcen- und Energiemanagement zu implementieren, bietet die virtuelle Darstellung mittels Modellierung und Simulation.

Ziel des Forschungsvorhabens war die Entwicklung einer hybriden Simulationsumgebung, mit der es möglich ist, Brauereien ganzheitlich virtuell zu betrachten und über ein verkettetes Stoff- und Energiemanagement Aussagen über wirtschaftliche und technische Fragen zu treffen. Besonderes Augenmerk lag dabei auf den vorhandenen Wassersystemen und -kreisläufen mit einem Schwerpunkt auf dem chemischen Sauerstoffbedarf (CSB) als abwassertechnische und juristisch relevanter Kenngröße. Die Bestimmung des CSB auf Basis einer Kombination

verschiedener prozesstauglicher Messtechniken mit der Unterstützung maschinellen Lernens war ein weiteres Ziel des Vorhabens.

Forschungsergebnis:

Im Rahmen des Vorhabens wurde ein Software-tool zur Abbildung der Energie- und Wassersysteme (FW und AW) in Brauereien basierend auf einer Kombination verschiedener quelloffener Softwarebibliotheken entwickelt, das wesentliche Einblicke in die Energie- und Stoffstromführung von Brauereien verschafft. Eine Besonderheit der Forschungsarbeiten war dabei, dass ein Gesamtmodell des Wassersystems abgebildet werden konnte, um Einzelströme und deren Qualität durch den gesamten Brauprozess verfolgen zu können. Hierbei wird das Gesamtmodell aus Sequenzen und Einzelprozessen (Prozessabschnitte, wie Maischen, Würzekühlen etc.) sowie beteiligten Geräten zusammengesetzt.

Die Simulationsumgebung kann dynamische, deterministische und stochastische Systeme abbilden. Strukturell basiert das entwickelte Konzept auf der Darstellung von insgesamt vier Entitäten: Geräten, Rezepten, Prozessen und Materialien. Geräte spiegeln das physikalische Modell der Brauereiumgebung, wie Pumpen und Bottiche, wider. Rezepte stellen eine Sammlung von mehreren Prozessen dar, die das Geschehen innerhalb der Geräte beschreiben. Materialien werden während der Prozesse als Einsatzstoffe benötigt und sind vom Typ abhängig durch verschiedene Charakteristika dargestellt. Gemeinsam ergeben die vier Entitäten das Modell, das durch einen Dispositionsplan ergänzt wird, der aus einer definierten Folge an durchzuführenden Rezepten, teils sequentiell, aber auch nebenläufig, besteht. Eine holistische Betrachtung bedingt die Modellierung einer Vielzahl dieser Entitäten, was durch eine objektorientierte Modellierung basierend auf einer Kombination von Referenznetzen, Java-Programmiersprache und relationalen Datenbanken realisiert wurde. Darüber hinaus wurde das Tool um eine empirisch abgeleitete, thermodynamisch und physikalisch basierte Modellierung der Nebenaggregate erweitert. Zwei KMU-Brauereien wurden erfolgreich virtualisiert; die Simulationsumgebung kann sowohl zur Analyse als auch zur Prognose von Energie- und Wasserbedarfsmengen verwendet werden.

Dazu wurde eine Ist-Zustandsanalyse zweier KMU-Brauereien mit Schwerpunkt auf der Grundausstattung der Brauereien durchgeführt. Hierbei wurden die relevanten Stoff- und Energieströme zunächst qualitativ bestimmt und in Voruntersuchungen die Zusammensetzung der im Produktionsprozess auftretenden Abwässer untersucht. Aufbauend auf diesen Erkenntnissen wurde ein dreigeteilter Ansatz gewählt, um die Prozessdatenerfassung zu vervollständigen. Hierfür wurde eine mobile Prozessmesstechnik entwickelt, die relevante Parameter messen und speichern kann. Neben der Erfassung der Stoff- und Energieströme des Abwassers wurden die Produktwege durch die vorhandene Prozessleittechnik analysiert. Wo keine Volumenstromerfassung vorhanden war, wurden mittels nicht-invasiver Clamp-On-Messtechnik die Stoff- und Energieströme bestimmt.

Parallel zu der Ausarbeitung eines ganzheitlichen Simulationstools erfolgte im Rahmen des Forschungsprojekts die Entwicklung eines CSB-Schätzers auf Basis von Verfahren maschinellen Lernens. Dieser kann auch als ein eigenständiges Werkzeug eingesetzt werden und ermöglicht Schätzungen je nach gewählter Messtechnik im Millisekundenbereich. Die für den CSB-Schätzer gewählten Methoden benötigen nur in der Entwicklungsphase Expertenwissen und können laufend nachtrainiert und in ihrer Performance verbessert werden.

Zu diesem Zweck wurden, zusätzlich zu den erfassten Online-Prozessdaten, laboranalytisch der chemische Sauerstoffbedarf (CSB) sowie die UV-Vis-Spektren der untersuchten Ströme in realen Prozessen bestimmt und zu einer Erfahrungsdatenbank zusammengefasst. Aufbauend auf dieser Datenbank wurde für jede Messstelle ein Satz lokaler Schätzer trainiert, die an ihrer Messstelle eine hohe Schätzgüte erreichen. In einem zweiten Schritt wurden die lokalen Schätzer zu einem globalen Gesamtschätzer zusammengefügt, der mit angepasster Schätzgüte an allen Messstellen ohne Nachjustierung betrieben werden kann. Insbesondere wird durch diese sogenannten kognitiven Schätzer die Bestimmung des CSB mit einer höheren Frequenz ermöglicht, womit eine weitere Verbesserung des Prozesswissens einhergeht.

Wirtschaftliche Bedeutung:

In Lebensmittelbetrieben, insbesondere in Brauereien, ist Wasser ein Basisrohstoff. Es kommt zu einem großen Teil im Produkt selbst vor und dient darüber hinaus zur Reinigung oder als Kühlmittel. Für 1 Liter Verkaufsbier sind 3 bis 11 Liter eingesetztes Frischwasser nötig. Der Brausektor produziert jährlich weltweit 1,34 Mrd. hl Bier. Über 60 % des für die Produktionsprozesse vorgesehenen Wassers müssen Trinkwasserqualität aufweisen. Dabei besitzt Deutschland den zweithöchsten Strom- und den höchsten Gaspreis in der EU. Gerade kleine und mittelständische Unternehmen, die über 95 % der Brauwirtschaft darstellen, haben selten die Möglichkeit, ihren Standort ins Ausland zu verlagern oder auf kostenintensive Lösungen zurückzugreifen und sind deshalb auf neuartige und übergeordnete Management- und Ressourcenkonzepte angewiesen.

Durch das entwickelte Tool können erstmals die bereits bekannten Einsparpotentiale und Optimierungsmöglichkeiten bezüglich des Abwassers (z.B. Biogasherstellung durch anaerobe Vergärung), des Prozesswassers (z.B. Reinigung mittels Membrantechnik) sowie der Energieströme (z.B. Kraft-Wärme-Kopplung) in verketteter Form berücksichtigt werden. Das im Rahmen des Vorhabens entwickelte Konzept zum Energie- und Stoffstrommanagement wurde so angelegt, dass es prinzipiell auch auf andere Bereiche der Lebensmittelindustrie übertragen werden kann.

Durch den sequenziellen und modularen Aufbau ist es auch möglich, Elemente individuell zu einer Bibliothek hinzuzufügen und den Prozess virtuell zu verändern. So können verschiedenste Varianten hinsichtlich ihres Optimierungspotentials analysiert werden und das Tool u.a. auch als Entscheidungshilfe für bzw. gegen eine geplante Neuinvestition in Brauereien dienen. Dabei kann das Tool auch verdeckte Einsparungen oder Folgekosten ermitteln (Primärenergieebene, Bedarfe von Versorgungsaggregaten), um Reboundeffekte zu vermeiden und Amortisationszeiten genauer zu bestimmen.

Basierend auf der modularen Gestaltung der Simulationsumgebung erlaubt das hybride Tool so die virtuelle Abbildung verschiedenster KMU-Brauereien, wodurch der wirtschaftliche und praktische Nutzen für diese Zielgruppe als

besonders hoch einzuschätzen ist. Insbesondere gegenüber Großbrauereien kann das Tool die Innovationsstärke von KMU-Brauereien bei der Umsetzung neuer Ansätze verbessern.

Die Integration eines entwickelten Schätzers mit einer an die Messtechnik angepassten lokalen Kalibrierung kann eine Online-Ermittlung des CSB, beispielsweise für die Fragen nach der Wiederverwendbarkeit von Abwässern oder der Durchführung einer Gesamtfachbilanzierung, ermöglichen. In der Anwendung ermöglicht das erstellte Modell Schätzungen im Millisekundenbereich. Für die Auswertung der Messungen durch den Endbenutzer ist keine Kenntnis über die zugrundeliegenden Systematiken erforderlich.

Durch eine zeitnahe Überwachung des geschätzten CSB können ferner Fehlfunktionen von Anlagen anhand stark veränderter Abwasserparameter identifiziert werden. In Form einer globalen Kalibrierung kann der Schätzer im Vorlaufbereich einer prozessintegrierten Abwasseraufbereitung eingesetzt werden, um die auftretenden Lasten zu erkennen und geeignete Prozessfolgeschritte einzuleiten (Stapeln von Abwässern, Anpassen der Verweilzeit). Außer den entwickelten Algorithmen und bei Basierung auf bereits vorhandene Prozessmesstechnik ist dann nach erfolgtem maschinellem Lernen keine Messtechnikerweiterung mehr notwendig.

Publikationen (Auswahl):

1. FEI-Schlussbericht 2015.
2. Hubert, S., Helmers, T., Groß, F. & Delgado, A.: Data driven stochastic modelling and simulation of cooling demand within breweries. *J. Food Eng.* 176, 97-109 [DOI: 10.1016/j.jfoodeng.2015.06.032] (2016).
3. Hubert, S., Rückert, T. D. & Delgado, A.: Hybrid plant-wide Simulation and Modelling using Reference nets and Java. In: Kravanja, Z. & Bogataj, M., *Comp. Aid. Chem. Eng.* 38, ISBN 9780444634283 Elsevier B.V, 853-858 (2016).
4. Hubert, S., Helmers, T., Baur, F., Delgado, A. & Rübiger, N.: Simulation Modeling of Bottling Line Water Demand Levels using Reference Nets and Stochastic Models. *Proc. 2015 Winter Simul. Conf.*, IEEE Press, ISBN 978-1-4673-9741-4, 2272-2282. [DOI: [10.1109/WSC.2015.7408339](https://doi.org/10.1109/WSC.2015.7408339)] (2015).
5. Hubert, S., Helmers, T., Mießner, U., Groß, F.

und Delgado, A.: Save water and energy! Holistic material and energy flow management of water and wastewater cycles in the food and beverage industry using the example of breweries. eFOOD-Lab. Intern. 2, 20-23 (2015).

6. Hubert, S., Pettigrew, L., Helmers, T., Mießner, U., Groß, F., Rübiger, N. und Delgado, A.: Simulation-based optimisation of wastewater flow and composition for on-site treatment in the food and beverage industry utilising reference nets in combination with genetic algorithms. Proc. Appl. Math. Mech., 14 (1), 811–812 DOI: 10.1002/pamm.201410386 (2014).

Weiteres Informationsmaterial:

Universität Erlangen-Nürnberg
Department für Chemie- und Bioingenieurwesen, Lehrstuhl für Strömungsmechanik
Cauerstrasse 4, 91058 Erlangen
Tel.: +49 9131 85-29501
Fax: +49 9131 85-29503
E-Mail: antonio.delgado@fau.de

Universität Bremen
Institut für Umweltverfahrenstechnik
Leobener Straße, 28359 Bremen
Tel.: +49 421 218-63330
Fax: +49 421 218-4947
E-Mail: wessolowski@iuv.uni-bremen.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

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

gefördert durch/via



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 Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.