

OPTIMIERUNG DER FERMENTATION VON BIERWÜRZE IN DEN PHASEN DER GÄRUNG UND REIFUNG DURCH ADAPTIVE STRÖMUNGSGESTALTUNG

OPTIMIZATION OF BEER FERMENTATION AND MATURING BY THE USE OF ADAPTIVE FLOW DESIGN

E. Batchuluun, I. Mansberger, E. Lopez-Ramirez, C. Rauh, A. Delgado

Lehrstuhl für Strömungsmechanik, Friedrich-Alexander Universität Erlangen-Nürnberg, Cauerstraße 4, D-91058 Erlangen

Numerische Simulation, thermisch induzierte Konvektionen, Laser Doppler Anemometrie LDA

Computational Fluid Dynamics CFD, thermally induced convection, Laser Doppler Anemometry LDA

Zusammenfassung

Die Fermentation und Reifung von Bierwürze erweist sich aufgrund ihrer essentiellen Bedeutung für die Produkt- und Prozessqualität, die innere Logistik und Wirtschaftlichkeit sowie ihrer Komplexität als Schlüsselprozess der Bierproduktion. Sie zeichnet sich durch stark ineinander greifende physikalische, (bio)chemische und mikrobiologische Wechselwirkungen aus. Eine technologische Optimierung führt u.a. zu verkürzten Tankbelegungszeiten, längeren Filterstandzeiten und einer verringerten Nutzung von thermischer Energie zur Kühlung. Der vorliegende Beitrag stellt das Konzept eines adaptiven, hybriden Strömungsführungssystems durch die Verknüpfung von Wissen über Konvektionsprozesse sowie technologische, biochemische und physikalische Vorgänge während der Gärung und Reifung vor.

Durch Untersuchungen von Konvektionsphänomenen einerseits experimentell mittels LDA in Modelllösungen im Labormaßstab und andererseits durch numerische Simulationen (ANSYS CFX) der Mehrphasenströmung (Gas, Feststoff, Flüssigkeit) erfolgt die Generierung einer Datenbasis für das hybride Strömungsführungssystem. Das entstehende hybride Strömungsführungssystem führt zur Erstellung künstlicher neuronaler Netze, die zur online und/oder zur strukturellen Optimierung eingesetzt werden können.

Einleitung

Aus wirtschaftlicher Sicht ist das Interesse groß, ein hohes ökonomisches und technologisches Potenzial für die deutschen Brauereien zu nutzen. Dazu zählen vor allem die Einsparung der Ressourcen, Verbesserung der Produktqualität und des Hefemanagements, Reduzierung der Tankbelegungszeiten und Verlängerung der Filterstandzeiten, verringerte Nutzung von thermischer Energie zur Kühlung, ein gezielter Einsatz von Personal und Betriebsmitteln und Entlastung der Umwelt. Die Gärung, Reifung und Lagerung von Bier stellen den Gegenstand zahlreicher Untersuchungen und Publikationen dar. Demgegenüber liegen bisher kaum Arbeiten vor, die sich ganz spezifisch mit Konvektionsphänomenen in Gärtanks

befassen. Um die Vorgänge soweit wie möglich beschreiben zu können, sollen bei diesem Projekt die Experimente unter definierten physiko-chemischen und mikrobiologischen Bedingungen erfolgen. Mit Hilfe von experimentellen und numerischen Untersuchungen können Erkenntnisse über Interaktionen zwischen dem Hefestoffwechsel und Stoff- und Wärmetransportvorgängen innerhalb des Gärtanks erarbeitet werden. Die Prozessführung und -optimierung macht sich darauf aufbauend diese Kenntnisse zunutze.

Experimenteller Aufbau

Für die experimentellen Arbeiten dient ein zylindrokonischer Laborfermenter aus Edelstahl (Abb. 1). Die Kühlung des Gärtanks erfolgt über einen Doppelmantel mit sechs voneinander getrennten Kühlzonen. Die Höhe des Fermenters beträgt etwa 1 m und das Füllvolumen ungefähr 60 l. Der Konus des spitzkonischen Laborfermenters weist einen Winkel von 60° auf. Dieser Winkelgrad kommt in den heutigen Brauereien häufig vor und erleichtert die Hefesedimentation.

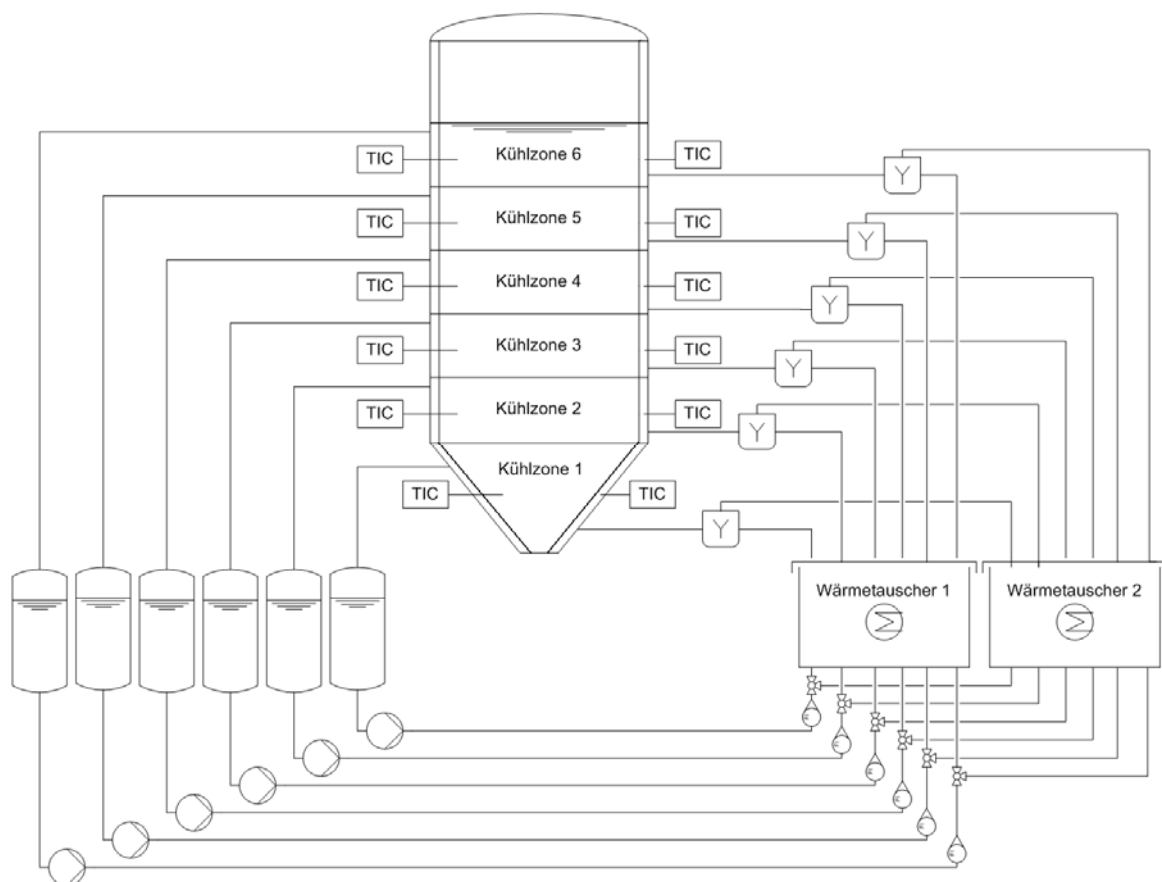


Abb. 1: Versuchsaufbau

Die Regelung der Temperierung der Kühlzonen setzt Regelventile ein, die mit LabView angesteuert werden. Die Temperierung beruht auf dem Prinzip der Einstellung von Mischtemperaturen aus zwei Temperierkreisläufen. Dabei werden die Hauptvolumenströme in jeweils zwei unterschiedliche Teilströme aufgeteilt. Diese Teilströme gehen anschließend in unterschiedlich temperierte Wärmetauscher. Nach dem Durchlauf durch den jeweiligen Wärmetauscher werden die temperierten Ströme wieder mittels eines T-Mischers vermischt. Daraus resultiert durch unterschiedliche mengenmäßige und temperierte Volumenströme eine Mischtemperatur. Dadurch kann jede Kühlzone auf eine bestimmte Temperatur gebracht werden.

Für die Temperaturregelung des Prozesses erfolgt eine Temperaturbestimmung in jeder Kühlzone und im Fermenterinneren. Dies übernehmen pro Zone zwei PT100 Widerstandsthermometer.

Bei dieser Fermenterkonstruktion lässt sich durch die sechs unterschiedlichen Temperierzonen thermische Konvektion induzieren. Diese Strömungsbilder können mittels Laser-Doppler-Anemometrie und Particle Image Velocimetry untersucht werden, um für die Prozessführung wesentliche Erkenntnisse zu gewinnen. Hierfür erfolgt der Einsatz transparenter Modellmedien und der Einbau von geeigneten Suprasilgläsern Grad B. Diese Gläser befinden sich in jeder Kühlzone, wobei sie im rechten Winkel zueinander angebracht sind.

Zur experimentellen Simulation der Gärblasen, welche die Hefeaktivität im Fermenter widerspiegeln soll, dient eine im Fermenterkonus eingebaute poröse Sinterplatte, über die Pressluft von unten zugeführt wird. Somit können durch online-Temperaturbestimmungen und in-situ Messungen experimentelle Daten zur thermisch induzierten Konvektion von ein- und mehrphasigen Modellsystemen im Laborfermentationstank gesammelt werden.

Des Weiteren soll eine Aufstellung von mathematischen Zuordnungen, welche den Einfluss thermofluidynamischer Effekte auf die mikrobiologischen, physiko-chemischen und technologischen Parameter der Fermentation wiedergeben, erfolgen. Die erarbeiteten Ergebnisse werden für die Erstellung eines hybriden Strömungsführungssystems mittels adaptivem thermischen Eingriff verwendet. Das hybride System vereint dabei experimentelle und numerische Ergebnisse zu einer Datenbasis, die kognitiven Algorithmen zur Vorhersage und Prozessführung dienen soll.

Die Brauerei erhält so nach Eingabe verschiedener Eingangsgrößen, wie zum Beispiel Temperatur, Zeit, pH-Wert, Extraktgehalt in ein künstliches neuronales Netz, Ausgangsgrößen. Diese Ausgangsgrößen geben beispielsweise die optimale Ansteuerung der Kühlzonen wieder. Durch diese optimale Prozesssteuerung der Kühlzonen kann Prozesshomogenität erreicht werden.

Numerische Untersuchungen

Neben den experimentellen Versuchen werden auch numerische Untersuchungen durchgeführt, um die strömungsmechanischen Vorgänge während der Gärungs- und Reifungsphase in einem zylindrokonusischen Tank zu beschreiben. Die numerischen Untersuchungen bedienen sich der kommerziellen Software Ansys CFX. Die numerische Simulation der Strömungsvorgänge findet hier mittels des Finiten-Volumen-Verfahrens statt. Das 3D-Rechengitter des Fermenters wird mit Hilfe von ICEM-CFD erstellt. Dabei erfolgt im wandnahen Bereich eine Verfeinerung des Rechengitters, um die durch den thermischen Aktoreingriff entstehenden Temperatur- und Geschwindigkeitsgradienten abbilden zu können.

Die Numerische Simulation der thermisch induzierten Konvektion von ein- und mehrphasigen Modellsystemen werden vorerst ohne mikroorganismische Aktivität durchgeführt. Für die Turbulenzmodellierung wird ein $k-\epsilon$ -Modell nach Meironke (2007) angewendet.

Für die Modellsysteme wird die thermische Konvektion simuliert, welche durch die Temperierung entsteht. Bei den Simulationsberechnungen werden unterschiedliche Temperaturen der Kühlzonen vorgegeben.

Bei zweiphasigen Modellmedien (Wasser-Gasblasen) wird das Dispergieren von Gärblasen im Tank nach Ishii Zuber (1979) beschrieben. Die Wirkung der teilcheninduzierten Turbulenz wird durch das Sato Enhanced Eddy Viscosity Modell nach Sato und Sekoguchi (1975) berücksichtigt. Dabei hat Meironke (2007) beobachtet, dass die entstehenden Gärblasengrößen im Bereich zwischen 50 μm und 1 mm liegen und der Gärblasendurchmesser während der Gärung auf 3 - 4 mm ansteigt. Des Weiteren hängt die Geschwindigkeit der aufsteigenden Gärblasen von der Blasengröße ab und liegt zwischen 50 mm/s und 300 mm/s.

Ergebnisse der numerischen Untersuchungen

Die Ergebnisse der numerischen Simulation werden für ein- und zweiphasige Medien miteinander verglichen. Die eingestellten Temperaturen der sieben Kühlzonen sind in beiden Fällen identisch. Abbildung 2 stellt die Temperatureinstellungen der thermischen Aktoren dar. Bei der einphasigen Simulation bestehen der Boden und der Deckel aus adiabaten Wänden.

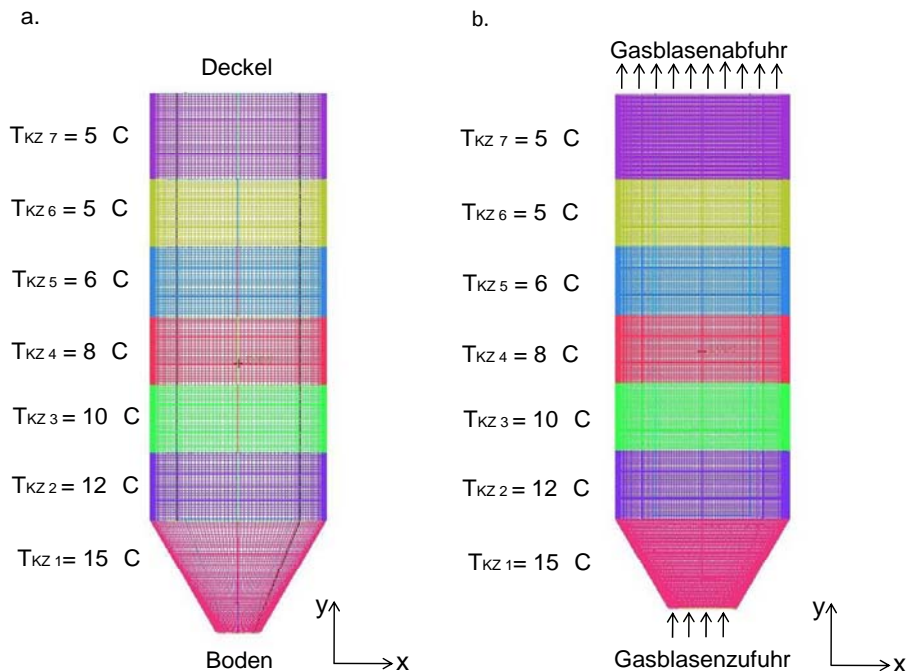


Abb. 2: Temperatureinstellungen der Kühlzonen: a. einphasiges Medium b. zweiphasiges Medium

Abbildung 3 zeigt die Geschwindigkeits- und Temperaturverteilung bei einem einphasigen Medium mit einer Anfangstemperatur von 25 °C. Aufgrund der unterschiedlichen Temperaturen der Kühlzonen entsteht in der Wandnähe thermische Konvektion. Die kühlere Flüssigkeit sinkt durch die Temperatur- und Dichtedifferenz ab und führt zu einer aufwärts gerichteten Strömung im Zentralbereich des Tanks. Aus den numerischen Strömungsberechnungen können Strömungen beobachtet werden wie von Ishiguro (1995) beschrieben.

Abbildung 4 stellt die Geschwindigkeitsverteilungen bei einphasiger Simulation mit einer Anfangstemperatur von 8 °C dar.

Dies wirkt sich in der Kühlzone 4 deutlich aus. Die Temperaturen in den unteren Kühlzonen 1, 2 und 3 weisen eine höhere Temperatur als 8 °C auf und die oberen Kühlzonen 5, 6 und 7 eine niedrigere. Bei dieser Simulation bewegt sich die obere kühlere Flüssigkeit zunächst im wandnahen Bereich abwärts bis zur Kühlzone 4 und die wärmere untere Flüssigkeit steigt an der Wand ebenfalls bis zur Zone 4 auf. Dadurch bilden sich Zirkulationsströmungen im oberen und unteren Bereich des Tanks. Im Bereich der Kühlzone 4 treffen diese aufeinander. Dadurch entsteht eine instationäre Strömung im gesamten Tank. Mit zunehmender Zeit des Prozesses nähert sich die Temperaturverteilung der in Abbildung 3 an.

Die numerischen Untersuchungen eines zweiphasigen Mediums betrachten eine Anfangstemperatur von 25 °C. Die Gasblasengröße (Luft) liegt bei 1 mm und die Gasblasen werden mit einer Geschwindigkeit von 2 mm/s im unteren Bereich des Konus zugeführt. Die Gasblasentemperatur beträgt 25 °C.

Die zweiphasige Simulation zeigt eine Überlagerung der thermisch induzierten Konvektion und der Konvektion aufgrund der aufsteigenden Gasblasen. Abbildung 5 zeigt die Geschwindigkeits- und die Temperaturverteilung dieser zweiphasigen Strömung. Hier lässt sich erkennen, dass die Gasblasensäule im Zentralbereich des Tanks aufsteigt und die kühl-

lere Flüssigkeit im wandnahen Bereich aufgrund von Temperatur- und Dichteunterschieden, wie bei der einphasigen Simulation, absinkt. Es bildet sich aufgrund dieser Dichtedifferenzen eine Zirkulationsströmung aus. Im oberen Bereich entsteht ein unregelmäßiger torusförmiger Wirbel.

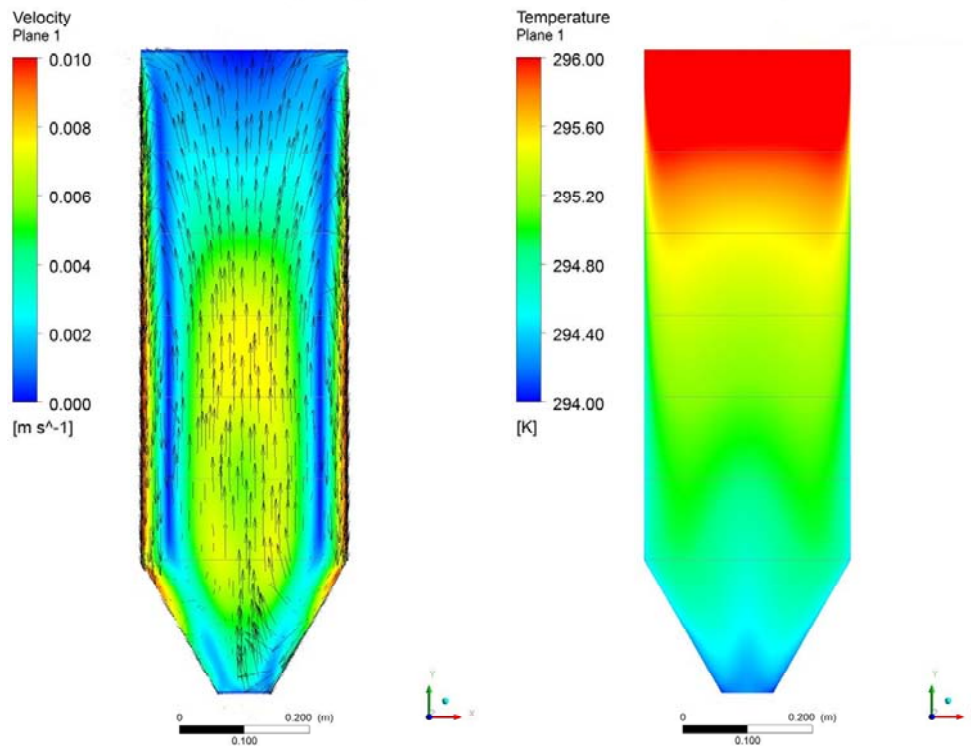


Abb. 3: Geschwindigkeits- und Temperaturverteilung bei einem einphasigen Medium

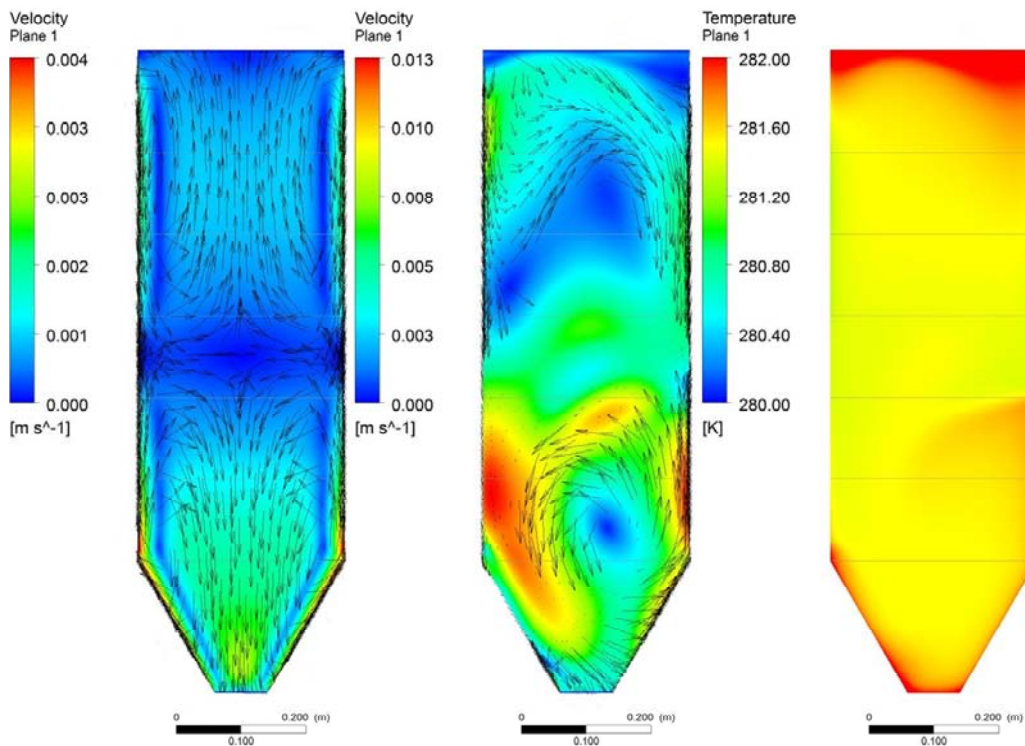


Abb. 4: Geschwindigkeits- und Temperaturverteilung bei einem einphasigen Medium

Das Temperaturfeld ähnelt mit zunehmender Zeit des Prozesses der einphasigen Simulation. Der Abkühlvorgang erfährt durch die aufsteigenden Gasblasen eine Beschleunigung.

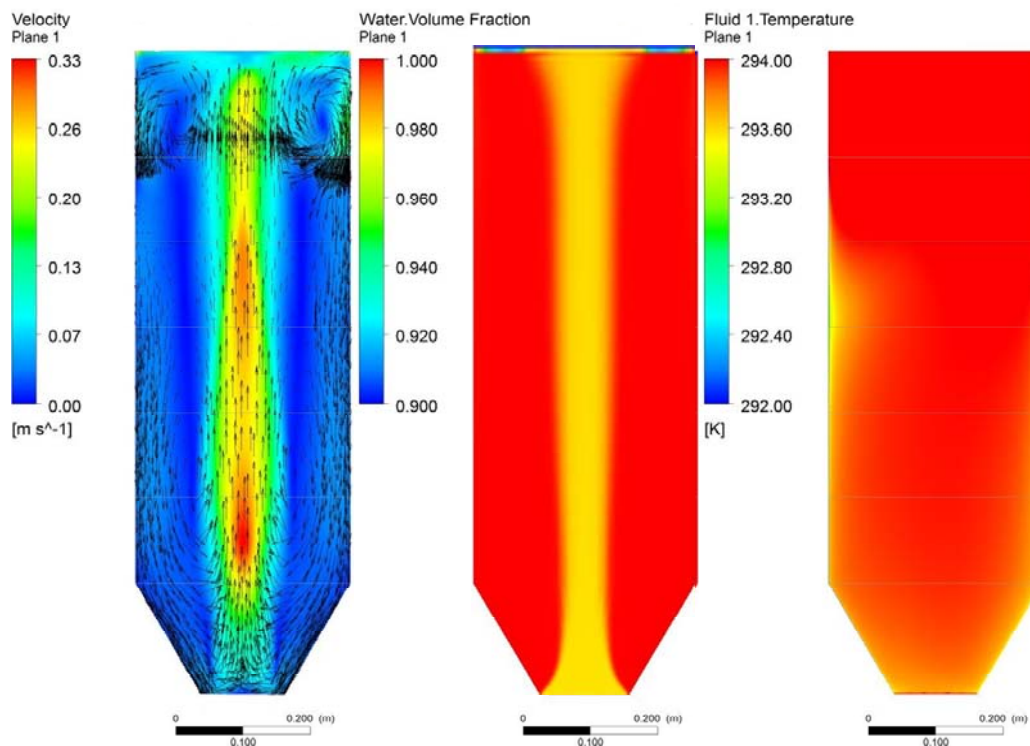


Abb. 5: Geschwindigkeits- und Temperaturverteilung und Volumenanteil von Wasser bei zweiphasiger Simulation

Schlussfolgerung und Ausblick

Erste numerische Untersuchungen ergeben, dass thermische Konvektion im Tank charakteristische Strömungen induziert, die mit der Strömung aufgrund aufsteigender Gärungsgasblasen überlagert wird. Im Fall einer zweiphasigen Strömung erfolgt eine Beschleunigung der Wärmetransportvorgänge.

Zukünftige experimentelle und numerische Untersuchungen befassen sich mit der detaillierten Aufklärung der auftretenden thermofluidodynamischen Phänomene und deren Einfluss auf den Hefestoffwechsel. Modelle zur Beschreibung des Hefestoffwechsels und der Wärmeentwicklung, welche während der Gärung durch die Hefe abgegeben wird, werden erstellt und in die Untersuchungen implementiert. Somit ermöglicht die Kombination experimenteller und numerischer Arbeiten die Erstellung eines Datenpools, der eine detaillierte Beschreibung der realen Gärungsprozesse in einen Fermentationstank ermöglicht.

Mit Hilfe kognitiver Algorithmen sollen dem Brauer nach Eingabe verschiedener Parameter fundierte Vorschläge zur online und/oder zur strukturellen Optimierung unterbreitet werden. Mit diesen Ausgangsgrößen kann der Brauer individuell die Aktoren steuern und die Fermentation homogen regeln. Es ist ersichtlich, dass die Optimierung der Bierfermentationsprozesse gerade für die Deutsche Brauwirtschaft von großem wirtschaftlichem Interesse ist. Zudem trägt das Forschungsvorhaben auch dazu bei, dass KMU aus der Sensor-, Regelungs- und Automatisierungstechnik sowie aus der Bio- und Umwelttechnologie von diesen neuartigen, praxisbezogenen Erkenntnissen profitieren können.

Dankesworte

Diese Untersuchungen wurden mithilfe der finanzieller Unterstützung des AiF/FEI (Forschungskreis der Ernährungsindustrie e.V.) und des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie innerhalb des Projektes (AiF 16754) durchgeführt.

Literatur

Ishiguro, T., Mizutani, S., Kuwahara, K., 1995: „Numerical analysis of cooling mechanisms in cylindrical lager tanks“, MBAA Technical Quarterly, Vol. 34, No. 3, pp. 164-170

Ishii, M., Zuber, N., 1979: “Drag Coefficient and Relative Velocity in Bubbly, Droplet or Particulate Flows”, AIChE J., 25, pp. 843-855

Meironke, H., 2007: “Charakterisierung des Impuls- und Wärmetransports in zylindrokonischen Tanks während der Gärung, Reifung und Lagerung mittels laseroptischer und Ultraschall-Messtechniken”, Dissertation, Fakultät für Maschinenbau und Schiffstechnik der Universität Rostock

Sato, Y., Sekoguchi, K., 1975: “Liquid velocity distribution in two-phase bubbly flow”, International Journal Multiphase Flow 2, pp. 79