

## **BESTIMMUNG VON CHARAKTERISTISCHEN GESCHWINDIGKEITSFELDERN IN EINEM 30.000 LITER GÄR- UND LAGERTANK MITTELS DER ULTRASCHALL DOPPLER MESSTECHNIK**

### **DETERMINATION OF CHARACTERISTIC FLOWFIELDS IN A 30.000 LITER FERMENTING AND STORAGE TANK WITH ULTRASOUND DOPPLER MEASUREMENT TECHNIQUE**

**H. Meironke \*, J. A. Szymczyk \*, A. Leder \*\***

\* Fachhochschule Stralsund, Fachgebiet für Strömungslehre und Strömungsmaschinen

\*\* Universität Rostock, Lehrstuhl für Strömungsmechanik

Ultraschall Doppler Messtechnik, Konvektionsströmungen, Gärung

Ultrasound Doppler Velocimetry, convection flows, fermentation

#### **Zusammenfassung**

An einer Brauereitankanlage (30.000 Liter), die für die strömungsmechanischen Untersuchungen speziell konstruiert und in der Stralsunder Brauerei installiert wurde, erfolgte ein umfangreiches Monitoring des gesamten realen Gärungs-, Reifungs- und Lagerungsprozesses. Es wurden die prozessabhängigen Geschwindigkeitsfelder in drei Messfeldern ermittelt und der Impuls- und Wärmetransport innerhalb der Prozesse analysiert.

#### **1 Einleitung**

Der gesamte Bierherstellungsprozess setzt sich aus einer Reihe von Teilprozessen zusammen. Ein wichtiger Prozessabschnitt stellt die Gärung, Reifung und Lagerung dar, die in den heutigen europäischen Brauereien bei der Herstellung von untergärigen Bieren hauptsächlich in zylindrokonuschen Tanks durchgeführt wird. Die Würzeherstellung und das Anstellen sind bereits abgeschlossen und es liegt eine vergärbare Würze vor. In dem in der Arbeit betrachteten Eintankverfahren finden die Gärung, Reifung und Lagerung nacheinander in einem Tank statt.

Die Probleme der Vergärung von Bier in Gärtanks waren in der Vergangenheit sehr häufig in wissenschaftlichen Arbeiten diskutiert worden. Dabei setzte sich ein Großteil dieser Arbeiten mehr mit der Technologie des Prozesses und der messtechnischen Erfassung von biologisch/chemischen Größen als mit den Untersuchungen der Konvektionsphänomene während der Gärung, Reifung und Lagerung auseinander [1,2,3,4]. Die Ursachen liegen in der Komplexität der biochemisch/physikalisch beeinflussten Strömungsvorgänge und der in der Vergangenheit fehlenden Messtechniken zur Erfassung dieser Vorgänge.

#### **2 Aufbau und Funktion der Brauereitankanlage**

Für die messtechnische Erfassung der Geschwindigkeitsfelder während der realen Gärung und Lagerung wurde ein spezieller Brauereitank entwickelt und installiert, der mit entsprechender Mess- und Regelungstechnik sowie einer Reihe von optischen Zugängen

## 50.2

ausgerüstet wurde (Abb. 1). Der Tank ist mit sechs voneinander unabhängig steuerbaren Kühlzonen ausgerüstet. Jede Zone besteht aus zwei Wicklungen und wird durch die optischen Zugänge unterbrochen. Das Management der Steuerung, der elektrischen Stellventile, der Regelung der Kühlkreisläufe und die Erfassung aller messtechnischen Signale erfolgen über Softwareprozeduren in einem Zentralrechner. Mit der programmierten Steuerungs- und Messdatenerfassungssoftware ist eine Online-Überwachung des Gärungs- und Lagerungsprozesses in einer hohen zeitlichen Auflösung möglich. Die Aufzeichnung der gesamten Prozess- und Messdaten erfolgt alle zwei Minuten in der ca. vier Wochen umfassenden Prozessdauer.



Abb. 1: 30.000 Liter Brauereitank in der Stralsunder Brauerei

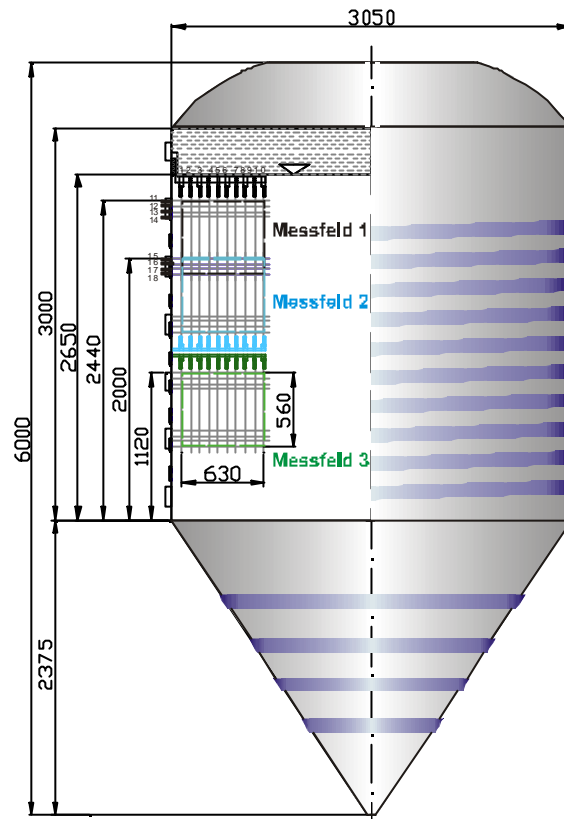


Abb. 2: Anordnung der Messfelder (UDV)

### 3 Strömungsdiagnose mittels der Ultraschall Doppler Messtechnik

Ein wesentliches Ziel dieser Arbeit ist die messtechnische Erfassung und die Analyse der prozessabhängigen Geschwindigkeitsfelder in einem 30.000 Liter zylindrokonischen Gär- und Lagertank während des realen Gärungsprozesses. Aufgrund der sehr starken Trübung der Würze bzw. des Jungbiers eignen sich die laseroptischen Messmethoden, wie die Particle Image Velocimetry oder die Laser-Doppler-Anemometrie, nicht zur Bestimmung der konvektiven Vorgänge während der realen Gärung, Reifung und Lagerung. Im Rahmen der Forschungsarbeit wurde ein neuartiges Strömungsdiagnosesystem entwickelt, das für Messungen von Konvektionen im Gärtank auf der Grundlage eines kommerziellen Ultraschall-Doppler-Messsystems eingesetzt wird [5]. Die Strömungsfelder werden nicht-invasiv erfasst und analysiert. Mit Hilfe des Ultraschall-Doppler-Messverfahrens besteht die Möglichkeit der Messung instationärer Geschwindigkeitsprofile in Strömungen entlang einer Ultraschall-Strahlachse. Das Messprinzip basiert auf einer Auswertung der Laufzeiten der Ultraschallpulse und der orts aufgelösten Dopplerfrequenzen.

Für die Messung der Geschwindigkeitsfelder ist eine zweidimensionale Anordnung der Transducer notwendig. In den Messfeldern ist eine orthogonale Anordnung der Transducer gewählt worden mit jeweils 10 vertikal und 8 horizontal einstrahlenden Transducern, die insgesamt 80 Schnittpunkte bilden (Abb. 2). Aufgrund der konstruktiven Gestaltung der Kühlzonen weist das Messfeld zwischen den oberen vier und unteren vier horizontal einstrahlenden Transducern einen freien Bereich auf, in dem keine Messungen erfolgen können.

## 4 Darstellung und Diskussion der Geschwindigkeitsfelder

### 4.1 Geschwindigkeitsfelder während der Gärung

Bedingt durch die Größe des 30 m<sup>3</sup> - Brauereitanks und der maximal möglichen Dimension des Messfeldes von nur 630 x 560 mm wurden zur Bestimmung des Strömungsfeldes in verschiedenen Bereichen des Tanks mehrere Gärungs-, Reifungs- und Lagerungsprozesse durchgeführt. In drei aufeinander folgenden Gärungen erfolgten im oberen, mittleren und unteren Bereich Messungen von Geschwindigkeitsfeldern bei einem H/D-Verhältnis von 0,87. Während der Gärungsphase werden die Kühlzonen mit einer Vorlauftemperatur von - 3,25 °C versorgt und der Tankinhalt laut des Gärungsschemas auf 8 °C geregelt. Die Gärungswärmeabfuhr erfolgte mit den oberen zwei Kühlzonen.

Nach dem Befüllen stellt sich in dem oberen Messfeld ein Strömungsfeld ein, das Geschwindigkeiten bis maximal 2 mm/s aufweist (3 a). Die Strömung ist geprägt durch eine abwärts gerichtete Strömung entlang der Kühlzonen (Abb. 3 a oben). Der mittlere Tankbereich wird durch das Messfeld 2 (Abb. 3 Mitte) dargestellt und weist im oberen Bereich noch eine leicht abwärts gerichtete Strömung auf, die auf eine stärkere aufwärts gerichtete Strömung mit bis zu 15 mm/s trifft und in Richtung Tankmitte umgeleitet wird. Der untere Tankbereich oberhalb des Konus (Abb. 3 a unten) ist geprägt durch eine Konvektionsrolle mit lokalen Geschwindigkeiten bis zu 50 mm/s, die aus dem Konusbereich kommend an der Tankwandung aufwärts strömt und durch den Kontakt mit der Wandung ins Innere umgelenkt und wieder zurück geführt wird.

Am 5. Tag der Gärung nach etwa 100 Stunden hat sich ein stabiles Strömungsbild eingestellt, das geprägt ist von einem flachen Toruswirbel, der sich unterhalb der Oberfläche im wandnahen Bereich gebildet hat. Er besitzt einen horizontalen Durchmesser von 400 mm und weist Geschwindigkeiten von maximal 30 mm/s auf. Dieser Toruswirbel ist relativ stabil und wächst am 6. Gärungstag (Abb. 3) auf einen horizontalen Durchmesser von bis zu 700 mm an und füllt fast das gesamte Messfeld aus (Abb. 3 b oben). Im mittleren Bereich stellt sich zum Ende der Gärung eine abwärts gerichtete Strömung ein, die angetrieben durch die abgekühlte Flüssigkeit aus dem Kühlzonenbereich und der sedimentierenden Hefeteilchen bis in den unteren zylindrischen Bereich des Tanks geführt wird (Abb. 3 b unten). Dort trifft sie auf die wärmere Würze aus dem Konusbereich und wird in eine aufwärts gerichtete Strömung überführt. Der anfangs kleinere Oberflächenwirbel wächst zu einem lang gestreckten Toruswirbel an, der eine vertikale Ausdehnung von bis zu 2000 mm aufweist und in seinem Inneren auch zwei bis drei kleinere Wirbelzentren ausbilden kann. Es treten selbst am Ende der Gärung noch Geschwindigkeiten von bis zu 50 mm/s auf. Diese quasi stabile Strömungstopologie in dem gemessenen Bereich ist kennzeichnend für die letzten Tage der Gärung in den zylindrokonuschen Tanks. Im Gegensatz zu den Untersuchungen in einem 270 Liter-Modelltank [7], in dem dieser Wirbel eine flachere Form aufweist, lassen die Messungen hier auf einen sehr breiten Kernbereich mit aufwärts geführter Strömung infolge der aufsteigenden CO<sub>2</sub> – Blasen schließen.

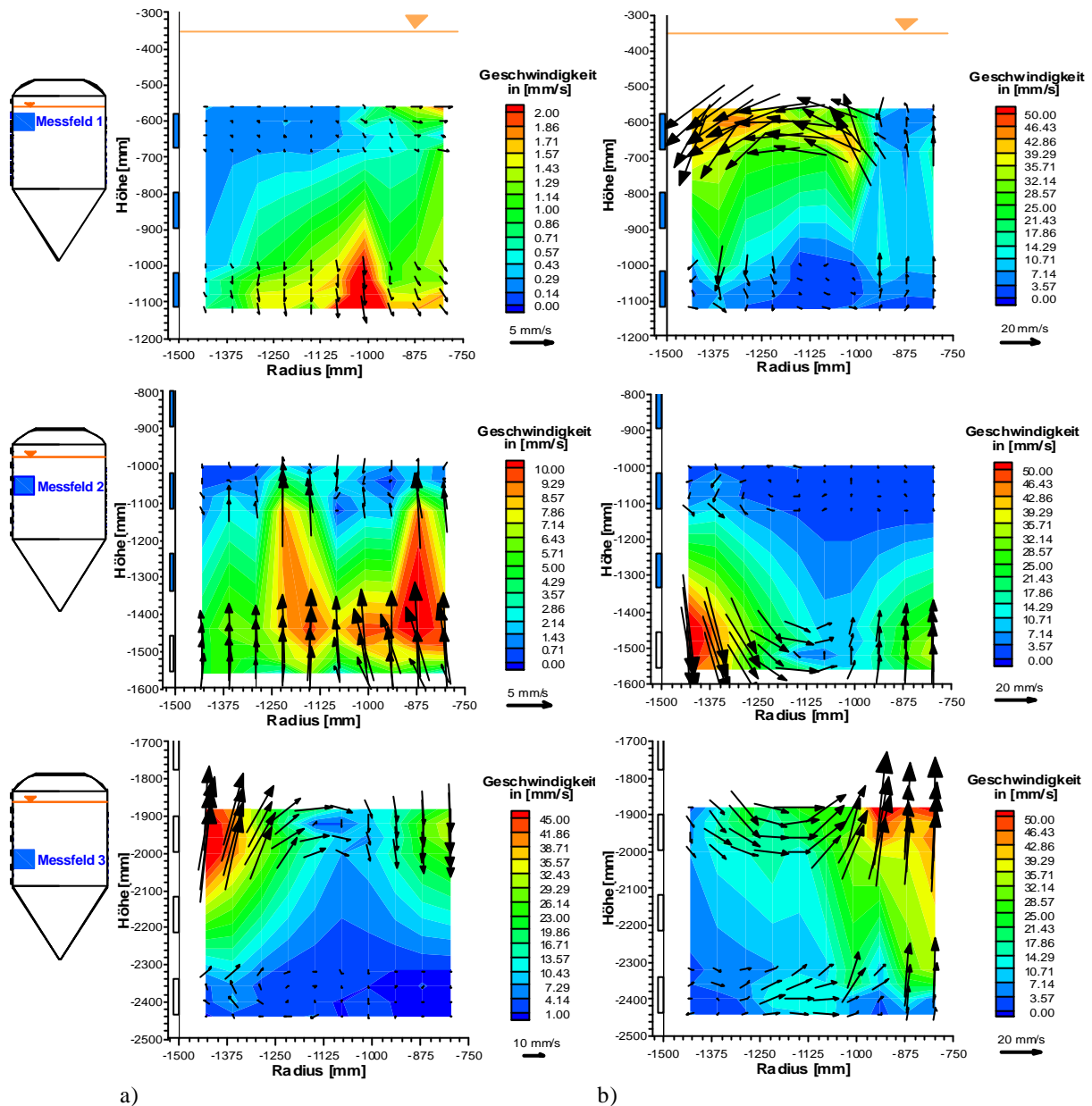


Abb. 3: a) Gemittetes Geschwindigkeitsfeld in den Messfeldern am 1. Tag der Gärung (8 h)  
 b) Gemittetes Geschwindigkeitsfeld in den Messfeldern am 6. Tag der Gärung (130 h)

#### 4.1 Geschwindigkeitsfelder während der Reifung

In der Reifungsphase werden die Kühlzone des Konus und die unteren beiden Kühlzonen des zylindrischen Bereiches aktiviert und die Tanktemperatur auf 5 °C geregelt. Durch diese Beschaltung wird eine gewisse Erwärmung des oberen Tankinhalts zugelassen, die zu einer Erhöhung des konvektiven Wärmetransports und zu einer unterstützenden Wirkung bei der Absetzung der Hefeteilchen führt. In der Abb. 4 a ist der Abkühlungsvorgang bereits abgeschlossen und es tritt eine Abschwächung des dominanten Toruswirbels ein, der maximale Geschwindigkeiten von bis zu 30 mm/s aufweist (Abb. 4 a oben). Der obere Tankbereich wird aber noch durch diesen Wirbel dominiert, der durch die aufwärts strömende wärmere Würze aus dem Tankinnern und einer an der Tankwandung abwärts geführten Strömung angetrieben wird. Dieser Wirbel verkleinert sich in den folgenden Tagen, bis er dann nach der Entfernung der Hefe nicht mehr in seiner bisherigen Form zu

beobachtet ist. Eine Ursache für die starke Abschwächung stellt die fehlende, stabilisierende, abwärts gerichtete Strömung in der Temperaturgrenzschicht im Bereich der oberen Tankwandung dar, in der während der Reifungsphase keine Kühlzonen mehr zugeschaltet sind. In den folgenden Tagen der Reifung reduziert sich die Strömungsintensität weitgehend, da die Intensität der durch die aufsteigenden  $\text{CO}_2$ -Blasen induzierten Strömungen massiv zurückgeht. Die Geschwindigkeiten betragen in den letzten Tagen der Reifung im oberen Bereich im Allgemeinen weniger als 5 mm/s. Im mittleren und unteren Bereich, bedingt durch die Wärme der noch verbliebenen Hefeteilchen, treten Geschwindigkeiten bis zu 15 mm/s auf.

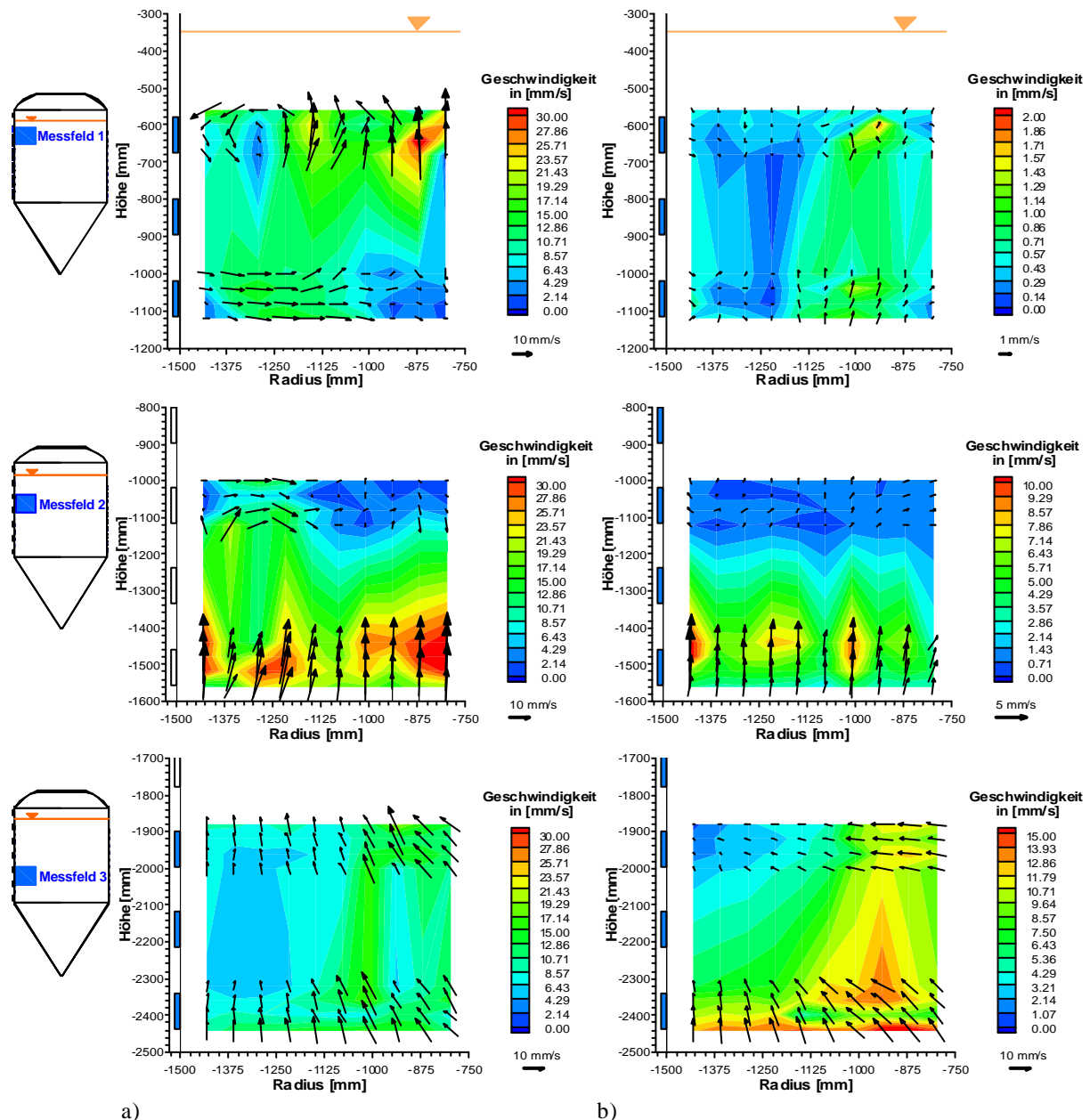


Abb. 4: a) Gemittelttes Geschwindigkeitsfeld in den Messfeldern am 2. Tag der Reifung (40 h)  
b) Gemittelttes Geschwindigkeitsfeld in den Messfeldern am 2. Tag der Lagerung (26 h)

#### 4.1 Geschwindigkeitsfelder während der Lagerung

In der Lagerungsphase wird der Tankinhalt auf  $-1,5\text{ °C}$  abgekühlt und verbleibt in diesem Zustand ca. zwei Wochen. Bei der Abkühlung werden bis zu einer Temperatur von  $0\text{ °C}$  alle Kühlzonen aktiviert, um eine schnelle Abkühlung zu erreichen. Nach Erreichung dieses Zustandes bleiben nur die Konuskühlung und die unteren drei Kühlzonen des zylindrischen Teils aktiviert, um Vereisungen an der Tankinnenfläche zu vermeiden. Die Gärung ist bereits vollständig abgeschlossen und die Produktion von interner Wärme ist vernachlässigbar gering und beschränkt sich auf verbliebene Resthefe im Konusbereich. In der Abkühlphase erfolgen ausgleichende Strömungen zwischen den kälteren Flüssigkeitsmassen an der Tankwandung sowie im Konusbereich und den wärmeren Bereichen im zentralen Teil des Tanks. Bei der Abkühlung des Jungbieres, wird die Dichteinversion bei  $2,55\text{ °C}$  erreicht, die Schwelle der maximalen Dichte. Unterhalb dieser Temperatur bewegt sich die kältere Flüssigkeit aus dem zentralen Konusbereich und dem Bereich der Tankwandung in Richtung der Oberfläche und die wärmeren Flüssigkeitsteilchen sammeln sich im Konusbereich.

In der Abb. 4 b ist das Strömungsbild 26 Stunden nach dem Umstellen auf Lagerungsbedingungen und während der Inversionsphase dargestellt. Im Bereich der stark abgekühlten Tankwandung, dessen Bereich schon unterhalb der Inversionstemperatur liegt, strömt die kalte Flüssigkeit in Richtung der Oberfläche mit Geschwindigkeiten von bis zu  $15\text{ mm/s}$  im unteren Bereich und  $2\text{ mm/s}$  im oberen Bereich des Tanks. Der Inversionsprozess startet lokal ausgehend von dem Bereich der aktiven Kühlzonen - mit der stark abgekühlten Temperaturgrenzschicht - und von dem kühlen Konusbereich. Dabei beträgt die Dauer des gesamten Inversionsprozesses mehrere Stunden.

Nach der Abkühlphase reduzieren sich die Geschwindigkeiten bis auf maximal  $1,5\text{ mm/s}$  und es finden geringe Ausgleichsströmungen statt, die eher eine horizontale Vorzugsrichtung aufweisen. Es werden Strömungen hauptsächlich nur noch durch den konvektiven Transport der Wärme im Wandbereich infolge der aktiven Kühlzonen verursacht. Die Geschwindigkeiten sind sehr gering und betragen bis maximal  $2\text{ mm/s}$ .

### 5 Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit wurden die messtechnische Erfassung mittels der Ultraschall Doppler Messtechnik und die Analyse der prozessabhängigen Geschwindigkeitsfelder in einem zylindrokonischen Brauereitank (30.000 Liter) während eines realen Gärungs-, Reifungs-, und Lagerungsprozesse realisiert. Die Tankanlage wurde für die experimentellen Untersuchungen speziell konstruiert und in der Stralsunder Brauerei installiert. Nach der Installation und Inbetriebnahme in der Brauerei konnte mit dieser Tankanlage ein umfangreiches Monitoring des gesamten realen Gärungs-, Reifungs- und Lagerungsprozesses durchgeführt werden und insbesondere die fehlenden experimentellen Daten während der Gärungsphase, die zum Teil als „Black Box“ galt, ermittelt und der Impuls- und Wärmetransport innerhalb der Prozesse analysiert werden.

Die experimentellen Ergebnisse zeigen, dass das Strömungsbild während des Gärungs-, Reifungs- und Lagerungsprozesses verschiedene Ausbildungsformen aufweist. Bei der Entstehung und Ausrichtung der Strömungen spielen die thermische Konvektion und die induzierte Konvektion infolge der  $\text{CO}_2$  - Blasen eine entscheidende Rolle. Während der Angärung wird die Strömung anfänglich nur durch eine reine thermische Konvektion angefacht. Nach Einsetzen der Gärungsaktivität werden durch lokale Wärmequellen, bedingt durch die exotherme Reaktion, weitere lokale Dichteunterschiede erzeugt, die ihrerseits Strömungen induzieren. Die Verteilung dieser Quellen ist abhängig von der Verteilung der

Hefeteilchen im Volumen. Zusätzlich erfolgt eine starke Beeinflussung der Konvektionen durch die fermentative Produktion von CO<sub>2</sub>.

Mit Hilfe der gemessenen Geschwindigkeitsfelder lässt sich der zylindrokonusche Modelltank in den einzelnen Prozessabschnitten in fünf Bereiche aufteilen, die einer dominanten Konvektionsart bzw. einer Überlagerung von bestimmten Konvektionsarten zugeordnet werden können. Diese Bereiche sind der Kernbereich, der obere und mittlere Bereich, der Konusbereich sowie der Wandbereich in der jeweiligen Höhe der aktiven Kühlzonen. Die Arten der Konvektionen und die Bereiche im Tank in denen sie auftreten, variieren in Abhängigkeit vom Prozessabschnitt, der Gäraktivität und der Kühlungsrandbedingungen. Die starke Kopplung des Temperaturfeldes mit dem Geschwindigkeitsfeld erschwert eine generelle Angabe der Strömungsrichtung in den Bereichen. Es kommt demzufolge zur Verschiebung und Größenänderung der Bereiche. Die Größe der Bereiche ist weiterhin abhängig von dem Schlankheitsgrad des Tanks und vom jeweiligen Prozessfortschritt.

### Dankesworte

Die Autoren bedanken sich für die Förderung des Projektes durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Arbeit FKZ: KF 0242801 KRF1 und bei dem Projektträger AiF Geschäftsstelle Berlin.

### Literatur

- [1] Delente J., Akin, C., Krabbe, E., Ladenburg, K.: Fluid Dynamics in Aerobic Fermentation, *Biotechnology and Bioengineering* 11, Vol. 4, (1969) S. 631-640
- [2] Miedaner, H.: Betriebserfahrungen mit zylindrokonuschen Gärtanks. *Brauwelt* 110, 93/94, (1970) S. 1775-1779
- [3] Denk, V., Stern, R.: Beitrag zur Kenntnis der Bewegungsvorgänge während der Gärung in zylindrokonuschen Gärtanks. *Brauwissenschaft* 32, Vol. 9, (1979) S. 254-289
- [4] Kojima, K., Suga, S., Oka, K., Moriwaki, S., Nagami, K.: Fluidization and foam separation in brewing: Quantitative analysis of CO<sub>2</sub> bubble behaviour and its influence on fluidization and froth formation in fermentation tank - part I, *MBAA Technical Quarterly*, Vol. 29, (1992) pp. 122-126
- [5] Meironke, H., Szymczyk, J. A., Leder, A.: Untersuchung der Strömungsvorgänge in einem Gär- und Lagertank mittels der Ultraschall Doppler Messtechnik, *Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik*, 11. Fachtagung der Deutschen Gesellschaft für Laser - Anemometrie, Shaker Verlag, Aachen, (2003) S. 25.1 – 6
- [6] Meironke, H., Szymczyk, J. A.: Experimental and numerical studies of convection flow in a cylindrical-conical fermenting tank, *21<sup>st</sup> International Congress of Theoretical and Applied Mechanics*, Warsaw, Poland (2004), ISBN 83-89697-01-1
- [7] Meironke, H., Szymczyk, J. A., Leder, A.: Bestimmung der Bewegungsvorgänge in einem Modelltank und in einem industriellen Tank während der Gärung mittels Ultraschall Doppler Messungen, in: Egbers, C., Jehring, L., von Larcher, Th., Ruck, B., Leder, A., Dopheide, D. (Hrsg.), *Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik - 13. Fachtagung der GALA e.V., BTU Cottbus*, (2005) S. 30.1-30.8
- [8] Meironke, H., Szymczyk, J. A., Leder, A.: Thermofluidynamics inside industrial cylindrical-conical fermenting tank, *36th AIAA Fluid Dynamics Conference and Exhibit*, San Francisco, USA, No. AIAA-2006-3520, (2006)