

## BESTIMMUNG DER BEWEGUNGSVORGÄNGE IN EINEM MODELLTANK UND IN EINEM INDUSTRIELLEN TANK WÄHREND DER GÄRUNG MITTELS ULTRASCHALL DOPPLER MESSUNGEN

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

\* Fachhochschule Stralsund, Fachgebiet für Strömungslehre und Strömungsmaschinen

\*\* Universität Rostock, Lehrstuhl für Strömungsmechanik

### Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit wird der Versuchsaufbau, die Methodik der Messungen sowie die Analyse der Geschwindigkeitsfelder während einer realen Gärung in einem industriellen Gärtank in der Stralsunder Brauerei präsentiert und mit den Messungen im Modelltank des Fachgebietes verglichen. Es werden Aussagen zu der Topologie der Strömungen in dem Gär- und Lagertank getroffen und der Einfluss des von außen vorgegebenen Temperaturfeldes auf die Strömungsvorgänge erläutert.

### 1. Einleitung

Die Untersuchung der Bewegungsvorgänge der Würze in Gär- und Lagertanks ist Gegenstand eines umfangreichen Forschungsprojektes im Fachgebiet für Strömungslehre und Strömungsmaschinen, die in der vorliegenden Arbeit präsentiert wird.

In der Vergangenheit findet man eine Reihe von Publikationen zu experimentellen Arbeiten, die sich mit den strömungsmechanischen Vorgängen innerhalb dieser Tanks beschäftigten [4, 5, 6, 7]. Aufgrund der verfügbaren Messtechniken fundierten die Aussagen zu den Geschwindigkeitsfeldern auf theoretischem Wissen und auf Messungen in Modellflüssigkeiten. Die Fortschritte in der Entwicklung der berührungslosen Messtechniken bieten neue Möglichkeiten, die Bewegungsvorgänge im realen Prozess untersuchen zu können.

Ein wesentliches Ziel dieser Arbeit ist die messtechnische Erfassung und die Analyse der prozessabhängigen Geschwindigkeits- und Temperaturfelder in den zylindrokonischen Tanks. Im Rahmen der Forschungsarbeit wurde ein neuartiges Strömungsdiagnosesystem entwickelt, das für Messungen von Konvektionen im Gärtank auf der Grundlage der zweidimensionalen Ultraschall Doppler Messtechnik eingesetzt wird [3]. Durch die Anwendung dieser in der Brauereitechnik neuen berührungslosen Strömungsmesstechnik wird die Voraussetzung geschaffen, die konvektiven Transportvorgänge während einer realen Gärung und Lagerung in der trüben Flüssigkeit analysieren zu können. Die experimentellen Untersuchungen unterteilen sich einerseits in die Untersuchungen an einer 270 Liter Modelltankanlage (Abb. 1) und andererseits in die Untersuchungen an einem industriellen zylindrokonischen 30.000 Liter Gär- und Lagertank in der Stralsunder Brauerei (Abb. 4).

### 2. Strömungsmesstechnik und Aufbau der Versuchsanlagen

#### 2.1 Ultraschall Doppler Messtechnik

Zur Messung der Geschwindigkeitsfelder während des Gärungs- und Lagerungsprozesses kommt ein Strömungsdiagnosesystem auf der Grundlage der Ultraschall Doppler Messtechnik zum Einsatz, das im Modelltank erprobt und entwickelt wurde. Bei dem Messverfahren

werden zwei Messgrößen, die Schalllaufzeit und die Dopplerfrequenz, ausgewertet. Die Ultraschall Sensoren sind für die Ermittlung der Geschwindigkeitsfelder im Modelltank in verschiedenen Messfeldern angeordnet worden. In der Abbildung 3 ist ein orthogonales Messraster mit 10 x 9 Sensoren dargestellt. Im Brauereitank besteht das Messfeld aus 18 Sensoren (Abb. 6). 10 Sensoren befinden sich auf einem internen Haltearm und strahlen senkrecht in den Tank ein. Aufgrund der Kühlspirale weist das Messfeld in der Mitte der 8 horizontal einstrahlenden Sensoren einen offenen Bereich auf. Die besonderen Strömungsverhältnisse im Gärtank erfordern eine spezielle Behandlung der Messdaten. Es wurde ein komplett neues Auswertungsprogramm geschrieben, das die entsprechende Bewertung der Signale vornimmt. Der Rohdatensatz wird eingelesen und mittels Filterstufen die fehlerhaften Signale entfernt und ein neuer Datensatz berechnet. Es werden die entsprechenden Geschwindigkeitsinformationen des jeweiligen Sensordatensatz ermittelt und dem Messraster zugeordnet.

## 2.2 Modelltankanlage

Zur Untersuchung der strömungsmechanischen Probleme während der Gärung und Lagerung in zylindrokonischen Tanks wurde eine Modelltankanlage (270 Liter) entwickelt, die mit entsprechender Mess- und Regelungstechnik sowie einer Reihe von optischen Zugängen ausgerüstet ist [3]. Die Modelltankanlage erlaubt zwei Betriebsweisen. Die eine ist der Gär- und Lagerbetrieb zur Reproduktion des realen Prozesses und die andere ist der Simulationsbetrieb mittels einer Modellflüssigkeit. Bei den simulierten Gärungen wird die Gärungswärme mittels einer externen Konusheizung und in einer zweiten Variante mit einer internen zentralen Rohrschlangenheizung im Konus simuliert. Bei der simulierten Gärung kommen, aufgrund der transparenten Modellflüssigkeit das optische Messverfahren LDA zum Einsatz. Es kann hier ein direkter Vergleich bzw. Abstimmung der UDV mit der präzisen optischen LDA-Messtechnik erfolgen. Mit der Software Agilent-VEE erfolgte die Erstellung eines Steuerungs- und Regelungsalgorithmus und die Programmierung der kontinuierlichen Messdatenerfassung der Temperaturen und Volumenströme in der Modelltankanlage.

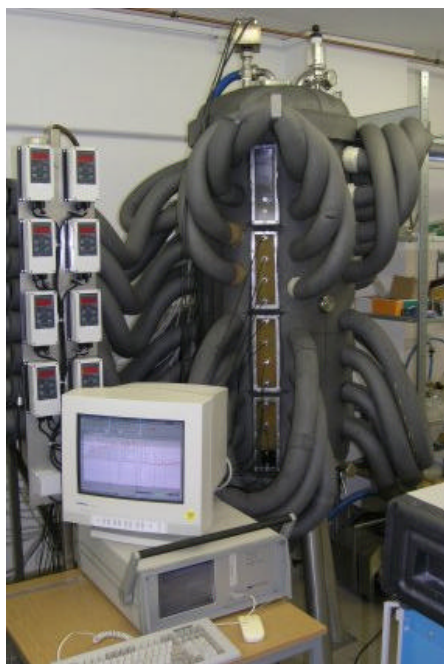


Abb. 1: 270 Liter Modelltankanlage mit UDV – Messtechnik

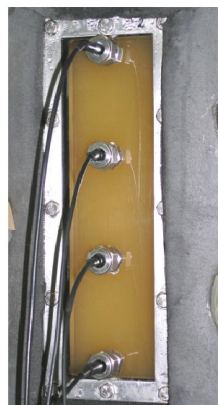


Abb. 2: Horizontale und vertikale Anordnung der Sensoren

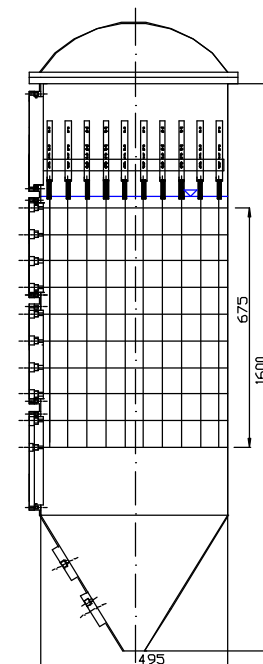


Abb. 3: Messfeld der UDV

### 2.3 Brauereitankanlage

Zur Untersuchung der Bewegungsvorgänge in industriellen Gärungs- und Lagertanks wurde ein Versuchstank entwickelt (Abb. 4), der nach den Erkenntnissen der Modelltankversuche im industriellen Maßstab (30 m<sup>3</sup> Tankvolumen) gefertigt wurde. Die Besonderheiten dieses Tanks bestehen in einer Unterteilung des gesamten Tankmantels mit sechs Kühlzonen und eine Reihe von optischen und messtechnischen Zugängen die den Anforderungen der Untersuchungen gerecht werden. Die runden Öffnungen an der vertikalen Tankwandung, die zwischen den Zu- und Abläufen der Kühlzonen positioniert sind (Abb. 5), dienen zur Aufnahme der Sensorik für die Ultraschall Doppler Velocimetrie (UDV).

Die Steuerung der Prozessmesstechnik erfolgt autark über einen Computer, der die Steuerung der elektrischen Stellventile, die Regelung der Kühlkreisläufe sowie die Erfassung aller messtechnischen Signale übernimmt. Für diese Aufgaben sind entsprechende Softwareprozeduren entwickelt worden.

Zur Messung der Geschwindigkeitsfelder während des Gärungs-, Reifungs- und Lagerungsprozess kommt auch hier das Strömungsdiagnosesystem auf der Grundlage der Ultraschall-Doppler Messtechnik zum Einsatz, welches im Modelltank der FH Stralsund für die Messungen von Konvektionsvorgängen in Gärtanks erprobt und weiterentwickelt wurde. Das Messfeld ist durch die technischen Parameter des Systems auf maximal 700 x 700 mm begrenzt (Abb. 6). Die Vorrichtung für die Befestigung der Ultraschall Sensoren ist in den seitlichen optischen Zugängen eingebracht worden. Für die horizontal einstrahlenden Sensoren sind spezielle Einsätze mit jeweils vier Aufnahmen gefertigt worden. Die vertikal einstrahlenden Sensoren werden an einem höhenverstellbaren Haltearm (Abb. 5) befestigt, um das Absinken des Füllstandes während des Gärungs- und Lagerungsprozesses ausgleichen zu können.



Abb. 4: 30.000 Liter Brauereitank mit seitlichen Messöffnungen

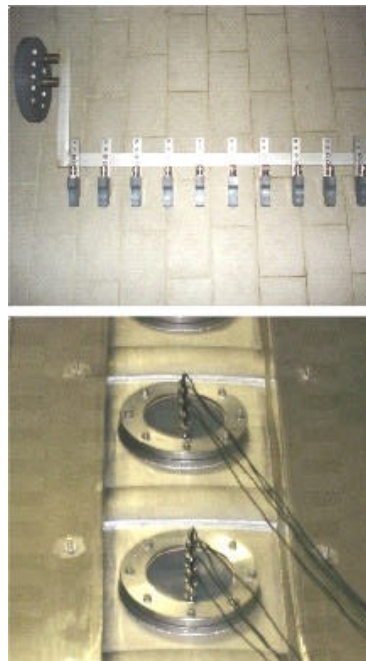


Abb. 5: Orthogonale Anordnung der Ultraschall Sensoren

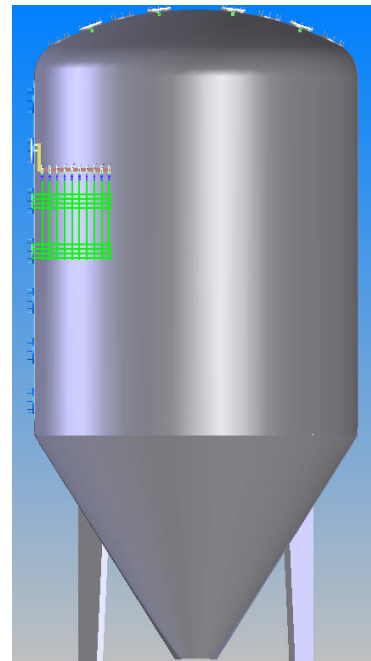


Abb. 6: Messraster der UDV

### 3. Analyse der Ergebnisse und Diskussion

#### 3.1 Geschwindigkeitsfelder im Modelltank

Die Messungen der Geschwindigkeitsfelder mittels der Ultraschall Doppler Messtechnik erfolgten kontinuierlich während mehrerer Gärungs-, Reifungs- und Lagerungsphasen. Die Kühlzonen wurden hierbei mit einer Vorlauftemperatur von 3°C versorgt und der Tankinhalt laut des Gärungsschemas auf 8 °C geregelt. Die Gärungswärmeabfuhr erfolgt mit den oberen vier Kühlzonen. Die Abbildung 7 - 9 zeigen Beispiele von Strömungsverhältnissen, die jeweils am ersten, dritten und am fünften Tag der Gärung gemessen wurden. Parallel zu den Messungen wurden die Strömungsbewegungen hinter den optischen Zugängen mittels einer Video Kamera aufgezeichnet [1, 3].

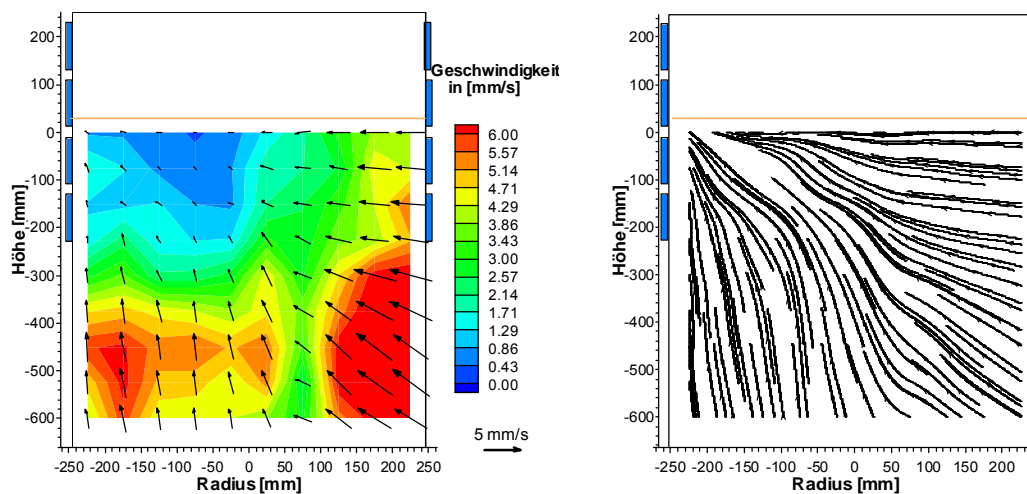


Abb. 7: Geschwindigkeitsfeld und Strömungsbild am 1. Tag der Gärung im Modelltank (270 Liter)

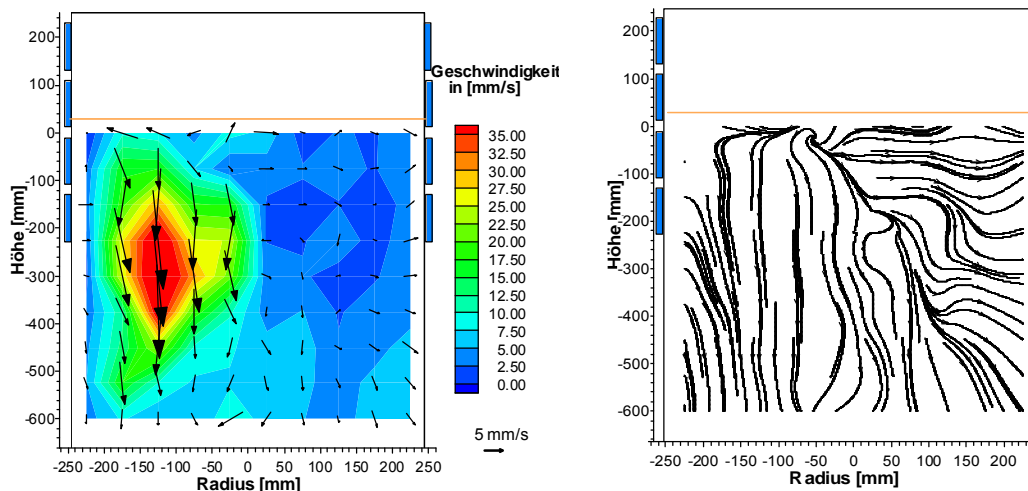


Abb. 8: Geschwindigkeitsfeld und Strömungsbild am 3. Tag der Gärung im Modelltank (270 Liter)

Nach dem Befüllen stellt sich in dem Messfeld ein Strömungsfeld ein, das Geschwindigkeiten im Bereich von 2 - 6 mm/s aufweist (Abb. 7). In den nachfolgenden Stunden beruhigt sich die Strömung und es beginnt die Angärphase. Die Würze ist klar strukturiert und es bilden sich Hefe-Agglomerate die sich im oberen Bereich des Tanks (oberes Fenster) in einer Aufwärtsströmung mit ca. 0,3 mm/s bewegen. Die Entwicklung von CO<sub>2</sub>-Blasen ist aufgrund der erst einsetzenden Gärung noch nicht zu beobachten.

Am 3. Tag der Gärung (Abb. 8) ist die Strömung geprägt durch eine abwärts gerichtete Strömung im Bereich der Tankwandung. Im unteren Bereich des Messfeldes wird die entfernt liegende Flüssigkeit durch die Reibung der abwärts gerichteten Strömung an der Tankwandung in Richtung Konus mitgezogen.

Am fünften Tag (Abb. 9) wurde im oberen Teil des Modelltanks eine radiale Strömung in Richtung der Kühlzonen registriert. Das Strömungsbild ist annähernd symmetrisch. Im zentrumsnahen Bereich ist eine starke aufwärts gerichtete Strömung zu beobachten mit einer maximalen Geschwindigkeit von 35 mm/s. Es bildet sich im oberen Teil des Tanks unterhalb der Schaumdecke ein torusförmiger Wirbel aus, der das Strömungsbild stark dominiert. Das Zentrum dieses Torus-Wirbels ist geringfügig ortsveränderlich und die Geschwindigkeiten des Wirbels schwanken ebenfalls in der Intensität.

In der Lagerungsphase wird der Tankinhalt auf  $-1,5\text{ °C}$  abgekühlt und die Strömung wird hauptsächlich durch den konvektiven Transport der Wärme dominiert. Ein weiterer Aspekt stellt die Anomalie des Tankinhalts dar, die bei ca.  $2\text{ °C}$  einsetzt und eine Umschichtung des Tankinhalts nach sich zieht. Die gemessenen Geschwindigkeiten in der Lagerphase bewegen sich in dem Bereich von  $0 - 1,5\text{ mm/s}$ .

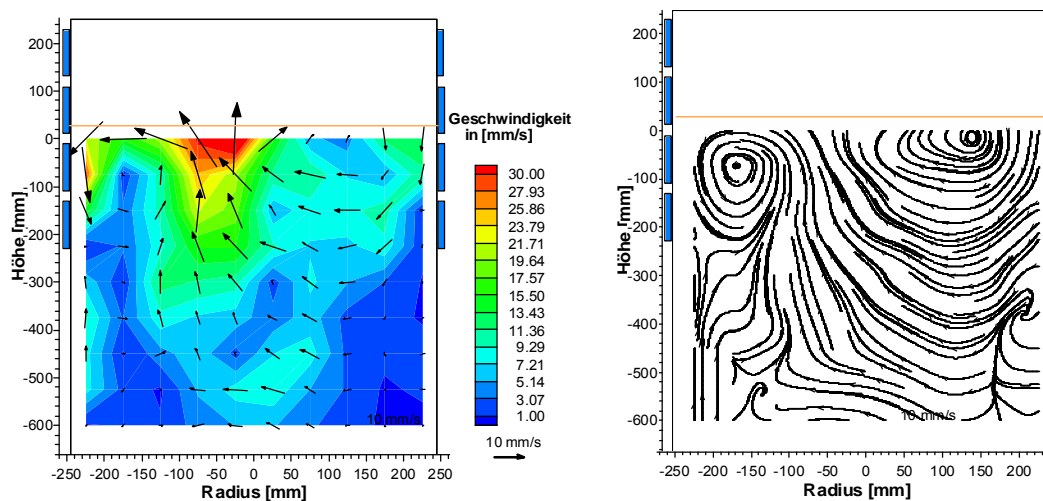


Abb. 9: Geschwindigkeitsfeld und Strömungsbild am 5. Tag der Gärung im Modelltank (270 Liter)

### 3.2 Geschwindigkeitsfelder im Brauerei-Tank

Die Messungen der Geschwindigkeitsfelder erfolgten mittels einer angepassten Sensormatrix mit 18 Sensoren. Die Sensoren sind in einer Matrix von  $10 \times 8$  Sensoren angeordnet (Abb. 5). Die Messdatenaufnahme erfolgte kontinuierlich während der gesamten Gärungs-, Reifungs- und Lagerungsphase. Während der Gärungsphase werden die Kühlzonen mit einer Vorlaufemperatur von  $-3\text{ °C}$  versorgt und der Tankinhalt laut des Gärungsschemas auf  $8\text{ °C}$  geregelt. Die Gärungswärmeabfuhr erfolgte mit den oberen zwei Kühlzonen. Die Abbildung 10 zeigt ein Beispiel der Strömungsverhältnisse mit Geschwindigkeiten bis maximal  $2\text{ mm/s}$ , das jeweils in den ersten Stunden während der Angärphase gemessen wurden.

Nach 2 Tagen, bedingt durch die Zunahme der Gärungsaktivität, verstärkt sich die Intensität der Strömung. Es werden Geschwindigkeiten bis zu  $30\text{ mm/s}$  gemessen. Nach ca. 60 Stunden erfolgt die erste Kühltrubentfernung. Dieser notwendige Vorgang hat aber aus strömungsmechanischer Sicht einen starken Einfluss auf die Gärungsaktivität. Es kommt bei der Entfernung zu einer Minimierung der Strömungsaktivität und damit zu einer Reduzierung des Stoffaustausches. Im industriellen Brauereitank hat sich am 4. Tag der Gärung nach ca. 83 Stunden (Abb. 11) ein stabiles Strömungsbild eingestellt. Die Stabilität des Strömungsfeldes wird durch das gemessene stabile Temperaturfeld gestützt. Die Temperaturdifferenzen im

gesamten gemessenen Tankquerschnitt betragen nur ca. 0,15 K, wenn man die Temperaturen in dem direkten Einflussbereich der Kühlzonen an der Tankwandung von ca. 150 mm nicht berücksichtigt. Diese äußerst geringen Temperaturdifferenzen sind auf die sehr gute Durchmischung des Tankinhaltes aufgrund der starken wirbelbehafteten Strömung im größten Teil des Tanks zurückzuführen. Dieses wird durch Aussagen in den Arbeiten von Denk et al. [5], Miedaner [6] und Schuch [4] bestätigt, die bei Temperaturmessungen außerhalb der Einwirkzone der Kühlung sehr geringe Differenzen des Tankinhaltes feststellten. Das Strömungsbild ist geprägt von einem Toruswirbel, der sich unterhalb der Oberfläche im wandnahen Bereich gebildet hat. Er besitzt einen Durchmesser von ca. 400 mm und weist Geschwindigkeiten von maximal 20 mm/s auf. Dieser Wirbel ist relativ stabil und wächst am 5. Tag der Gärung auf einen Durchmesser von bis zu 500 – 600 mm an und füllt fast das gesamte Messfeld aus (Abb. 12). Das Zentrum dieses Torus-Wirbels ist geringfügig ortsveränderlich und die größten Geschwindigkeiten in diesem Wirbel werden in der oberen Hälfte in radialer Richtung mit ca. 40 mm/s gemessen. Dieser Toruswirbel dominiert das Strömungsbild in den letzten Tagen der Gärung im oberen wandnahen Tankbereich.

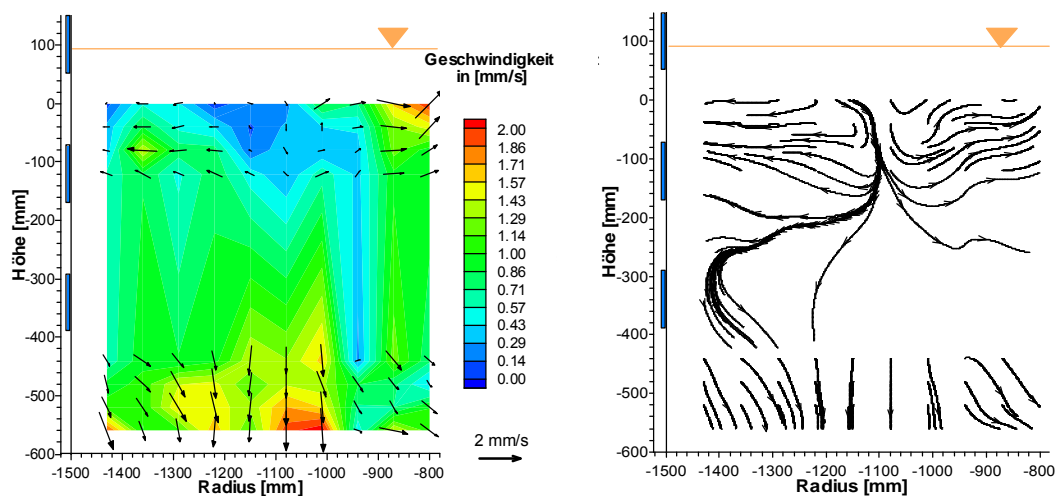


Abb. 10: Geschwindigkeitsfeld und Strömungsbild am 1. Tag der Gärung im Brauereitank

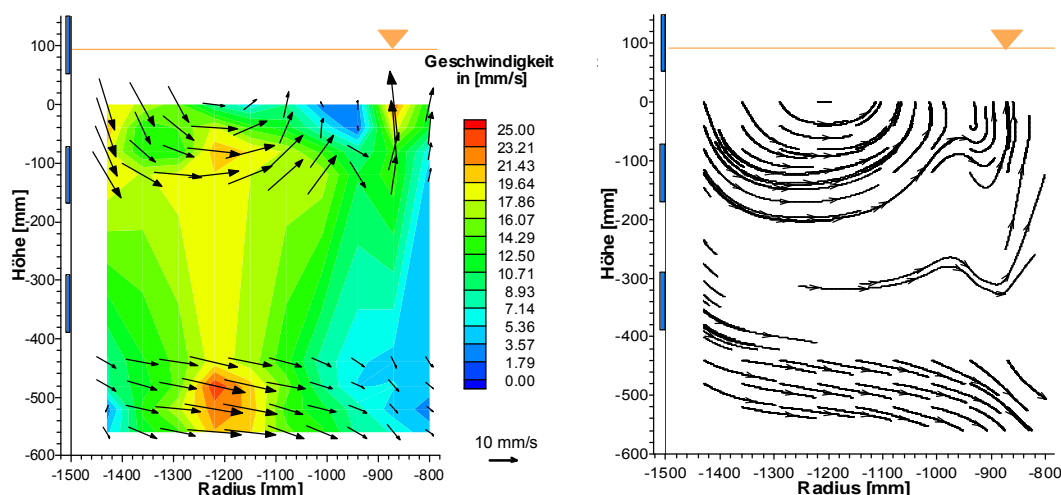


Abb. 11: Geschwindigkeitsfeld und Strömungsbild am 4. Tag der Gärung im Brauereitank

Im Gegensatz zu den Untersuchungen im Modelltank, in dem dieser Wirbel sich von der Tankwandung bis zur Mittelachse ausbreitete, lassen die Messungen hier auf mehrere solcher großräumigen Wirbelgebiete im oberen Bereich schließen.

In der Reifungsphase werden die Kühlzone des Konus und die untere Kühlzone des zylindrischen Bereiches aktiviert und die Tanktemperatur auf 5°C geregelt. In der Abbildung 13 ist der Abkühlungsvorgang auf 5 °C schon abgeschlossen und es tritt eine erhebliche Abschwächung des Toruswirbels ein, mit maximalen Geschwindigkeiten bis zu 15 mm/s. Dieser Wirbel verkleinert sich in den folgenden Tagen, bis er dann nach drei Tagen Reifung nicht mehr in seiner bisherigen Form zu beobachten ist. Ursache für die starke Abschwächung stellt die fehlende stabilisierende abwärtsgerichtete Strömung in der Wandzone im oberen Tankbereich dar, da während der Reifungsphase keine oberen Kühlzonen mehr zugeschaltet sind. In den folgenden Tagen der Reifung reduziert sich die Strömungsintensität weitgehend, da auch die Intensität, der durch die aufsteigenden CO<sub>2</sub>-Blasen induzierten Strömung massiv zurückgeht. Die Geschwindigkeiten betragen in den letzten Tagen der Reifung nur maximal 7 mm/s in dem gemessenen Ausschnitt.

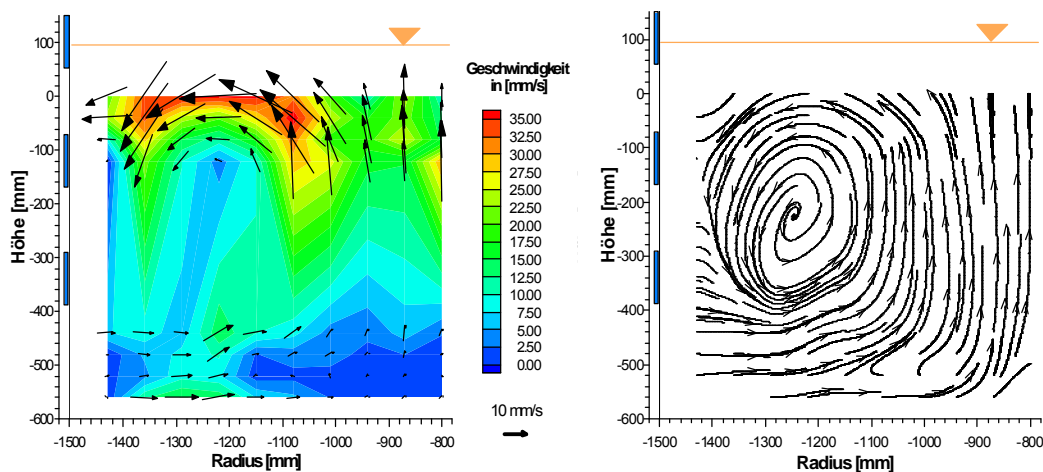


Abb. 12: Geschwindigkeitsfeld und Strömungsbild am 5. Tag der Gärung im Brauereitank

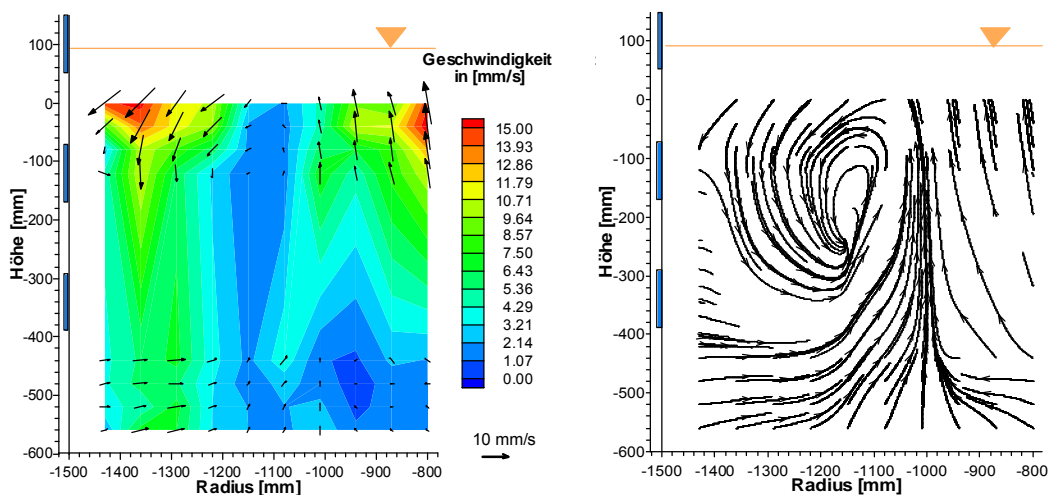


Abb. 13: Geschwindigkeitsfeld und Strömungsbild am 1. Tag der Reifung ca. 176 h nach der Befüllung im Brauereitank

#### 4. Zusammenfassung

Bis jetzt galt die Gärungsphase aus experimenteller strömungsmechanischer Sicht als „Black Box“. Mit beiden Tankanlagen konnte ein umfangreiches Monitoring des gesamten Gärungs-, Reifungs- und Lagerungsprozesses durchgeführt werden und damit insbesondere die fehlenden experimentellen Daten, der Geschwindigkeitsfelder während der Gärungsphase ermittelt und der Prozess transparenter gemacht werden. Die Untersuchung der Strö-

mungsvorgänge erfolgte mittels eines weiterentwickelten neuartigen Strömungsdiagnosesystems auf der Grundlage der berührungslos arbeitenden Ultraschall Doppler Messtechnik, mit der Geschwindigkeitsfelder während eines realen Gärungs-, Reifungs- und Lagerprozesses in beiden zylindrokonischen Tanks in einem Messfeld in einer Fläche von max. 700 x 700 mm kontinuierlich gemessen worden sind.

Die experimentellen Ergebnisse dokumentieren, dass das Strömungsbild während des Gärungs- und Lagerungsprozesses verschiedene Ausbildungsformen aufweist. Die Messungen im Modelltank und im industriellen Brauereitank weisen bezüglich der Intensität der Geschwindigkeiten und der Ausbildung von Wirbelformationen Ähnlichkeiten auf.

Nach Einsetzen der Gärungsaktivität werden durch lokale Wärmequellen, bedingt durch die exotherme Reaktion 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 gärungsbedingte Produktion von CO<sub>2</sub>. Die Messungen haben gezeigt, dass ein Aufsteigen der Würze hauptsächlich im zentralen Bereich des Tanks erfolgt und aufgrund der Wirkung der Kühlzonen ein Absinken der Würze mehr im äußeren Mantelbereich des Tanks registriert wurde. Im oberen Tankbereich des Modelltanks entwickelt sich ein relativ dominanter Toruswirbel, der die Charakteristik der Strömung während der Gärungsphase in diesem Bereich bestimmt. Im großen Brauereitank existiert neben dem gemessenen Toruswirbel mindestens ein weiteres großräumiges Wirbelsystem in radialer Richtung. Durch das schwallartige Aufsteigen der Würze erfolgt eine beobachtete oszillierende Änderung der Größe dieser Wirbel. Während des Reifungsvorgangs lösen sich diese Wirbelformationen, bedingt durch das Fehlen der bestimmenden Antriebsmechanismen, der Kühlung in diesem oberen Tankbereich und der nachlassenden aufsteigenden CO<sub>2</sub>-Blasensäule, sukzessive auf.

## 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] 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
- [2] Delgado, A., Hartmann, C., Baars, A., Meironke, H., Szymczyk, J. A.: Bewegung im Gärtank: Messtechnische Diagnose und Simulation, Tagungsband Brautechnologisches Seminar, Freising, 2004
- [3] 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
- [4] Schuch, C.: Bewegungsvorgänge in zylindrokonischen Tanks während Gärung und Reifung, Fortschrittberichte VDI, Reihe 17, Nr. 146, 1996
- [5] Denk, V., Stern, R.: Beitrag zur Kenntnis der Bewegungsvorgänge während der Gärung in zylindrokonischen Gärtanks. Brauwissenschaft 32, Vol. 9, S. 254-289, 1979
- [6] Miedaner, H.: Betriebserfahrungen mit zylindrokonischen Gärtanks. Brauwelt 110, 93/94, S. 1775-1779, 1970
- [7] Delente J., Akin, C., Krabbe, E., Ladenburg, K.: Fluid Dynamics in Aerobic Fermentation, Biotechnology and Bioengineering 11, Vol. 4, S. 631-640, 1969