

Untersuchung der Strömungsvorgänge in einem Gär- und Lagertank mittels der Ultraschall Doppler Messtechnik

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

* Fachhochschule Stralsund, Fachgebiet Strömungslehre und Strömungsmaschinen

** Universität Rostock, Institut für Maritime Systeme und Strömungstechnik

Zusammenfassung

Diese Arbeit beschreibt die experimentellen Untersuchungen der Strömungsvorgänge in einem Gär- und Lagertank mittels der zweidimensionalen Ultraschall-Doppler-Messtechnik. Durch die Anwendung einer berührungslosen Strömungsmesstechnik wird die Möglichkeit geschaffen, erstmals die konvektiven Transportvorgänge während einer realen Gärungs- und Lagerphase in einem zylindrokonuschen Tank (ZKT) zu analysieren. Es wird die Vorgehensweise bei den Messungen, der Versuchsaufbau und die untersuchten Geschwindigkeitsfelder während einer realen Gärung im Sud präsentiert.

1. Einleitung

Das Vergären und Lagern von Bier wird heute fast ausschließlich in zylindrokonuschen Gärtanks durchgeführt. Die strömungsmechanischen Vorgänge innerhalb dieser Tanks sind wissenschaftlich noch nicht eindeutig belegt worden. In der Literatur sind einige Hinweise zu finden, die diesen Bedarf an Erkenntnissen widerspiegeln. Hier wird die erste Prozessstufe der Biergärung als „Blackbox“ bezeichnet [3] oder „man hofft, dass sich bei der Gärwärmeabfuhr eine ausgebildete Konvektion einstellt, was jedoch, wie Messungen bewiesen haben, nicht der Fall ist“ [2]. Weitergehende Automatisierungen des Prozesses lassen sich ohne Qualitätsverlust nur bei genauer Kenntnis des Ist-Zustandes repräsentativ beschreiben [1]. Die Kenntnis der variierenden Stoffgrößen des gärenden Mediums und ein differenziertes Wissen über die Strömungsvorgänge in den Tanks spielen bei der Produktion eines Bieres mit gleichbleibend hoher Qualität eine entscheidende Rolle, um den Prozessverlauf vorherzusagen, kontrollieren und optimieren zu können.

2. Strömungsmechanische Vorgänge während der Gärung

Für einen optimalen Prozessablauf ist die Beherrschung der Transportvorgänge beim Impuls-, Wärme- und Stoffaustausch eine Voraussetzung zur Schaffung einer homogenen Verteilung, um somit eine Optimierung des Brau- und Lagerprozesses zu erreichen. Die im Tank während der Fermentation entstehende Mehrphasenströmung ist dreidimensional und turbulent. Das Medium „Würze“ besteht aus mehreren Phasen und Komponenten. In der Würze finden Wärme- und Stoffaustauschprozesse statt und es treten Wechselwirkungen zwischen der biologischen Materie und der Trägerflüssigkeit auf. Die durch die Strömungen induzierten Kräfte können zu Strukturveränderungen und sogar zu Beschädigungen der Hefeteilchen führen und damit erhebliche verfahrenstechnische Probleme verursachen, die eine direkte Beeinflussung der Produktqualität nach sich ziehen können. Die biochemische Umsetzung ist des weiteren durch die Entstehung von Kohlendioxid in Form von Blasen charakterisiert, welche im Tank aufsteigen. Ferner bilden die Mikroorganismen an der Tankwand Kolonien sowie in der Nährlösung Agglomerate, die in Abhängigkeit von ihrer Dichte im Behälter sedimentieren oder auftreiben [6].

3. Versuchsaufbau

3.1 Aufbau der Modellanlage

Zur Untersuchung der strömungsmechanischen Vorgänge innerhalb des Gär- und Lagertanks wurde ein Modelltank entwickelt. Um die Auswirkungen der Kühlzonen zu untersuchen, ist der Zylinder mit acht voneinander unabhängig steuerbaren Kühlzonen ausgerüstet worden. Die Volumenströme in den Zonen lassen sich entsprechend den Versuchsbedingungen und den Prozessanforderungen regulieren. Zur Bereitstellung der Kühlenergie wurde ein 10 kW Kühlaggregat installiert, das die acht Kühlzonen je nach Anforderung mittels eines Glykol/Wasser Gemischs bis zu -7 °C versorgen kann. Weiterhin können die Zonen mittels eines separaten Heizkreislaufes beheizt werden. Hiermit besteht die Möglichkeit unterschiedliche Temperaturniveaus einzustellen, um den realen Prozess mittels einer Modellflüssigkeit zu simulieren. Die Versuchsanlage kann damit in zwei verschiedenen Betriebsarten arbeiten. Es kann ein realer Gär- und Lagerbetrieb sowie ein Simulationsbetrieb mittels einer Modellflüssigkeit realisiert werden.

Die zentrale Steuerung und Regelung der Komponenten sowie das Management aller Prozessparameter wurde mittels der Programmierungssoftware „HP-VEE“ realisiert. Mit diesem Programmierungstool erfolgten die Erstellung der Kommunikationsprozeduren mit den Einsteckkarten, der Aufbau eines Steuer- und Regelalgorithmus und die programmtechnische Einbindung der kontinuierlichen Messdatenerfassung der Temperaturen und Volumenströme während des Gärungs-, Reifungs- und Lagerungsprozesses.

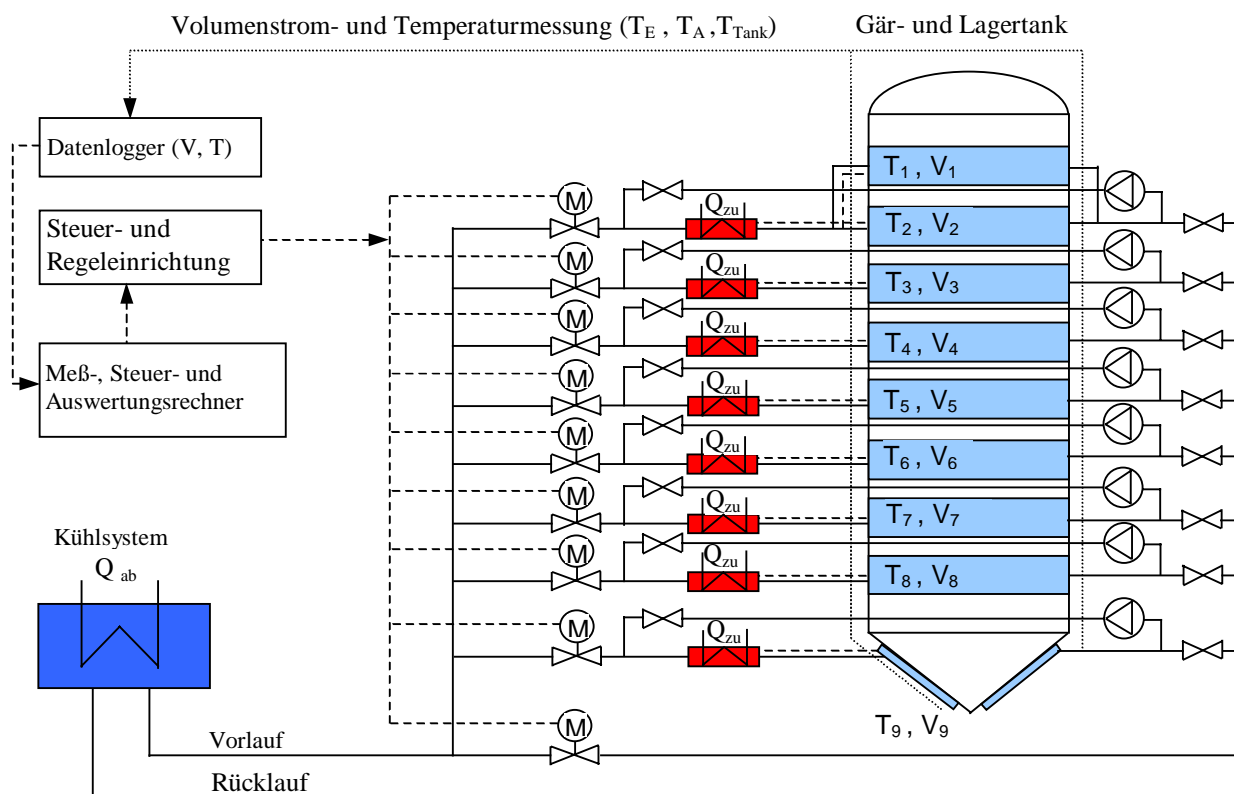


Abb. 1: Schematische Darstellung des Modelltanks und der Peripherie

3.2 Ultraschall-Doppler-Messtechnik (USD)

Zur Messung von Geschwindigkeiten im Gär- und Lagertank wurde ein System eingesetzt, das nach dem Ultraschall Doppler Messverfahren arbeitet. Mit dieser Messtechnik besteht die Möglichkeit innerhalb von trüben Medien eine berührungslose Messung von Geschwindigkeitsprofilen durchzuführen. Das Prinzip des verwendeten Messsystems basiert auf einer Kombination der Schalllaufzeit- und der Dopplerfrequenzmessung. Ein sehr kurzer Ultraschallpuls mit einer bestimmten Frequenz und einer definierten Dauer wird in einem bestimmten Winkel (α) zur Hauptströmungsrichtung in das zu untersuchende Medium eingestrahlt. Dabei bewegt sich dieser Ultraschallpuls entlang der Sensorachse mit der Schallgeschwindigkeit des umgebenden Mediums fort. Nach dem Aussenden des Ultraschallimpulses wird sofort auf Empfang umgeschaltet und die Reflexionssignale der nahe am Sensor gelegenen Partikel nach der Zeit (t_1) empfangen. Das empfangene Echo am Sensor ist in Abhängigkeit der Bewegung der Partikel mehr oder weniger stark in der Frequenz verschoben. Diese Frequenzverschiebung ist proportional zur Strömungsgeschwindigkeit. Je weiter die Streupartikel vom Sensor entfernt sind, um so später (t_2 , t_3) werden auch die zugehörigen Reflexionssignale empfangen. Durch ein definiertes elektronisches Messfenster erfolgt die zeitliche Einordnung der empfangenen Echos und damit auch die geometrische Zuordnung der Daten auf der Messachse zu einem eindimensionalen Geschwindigkeitsprofil.

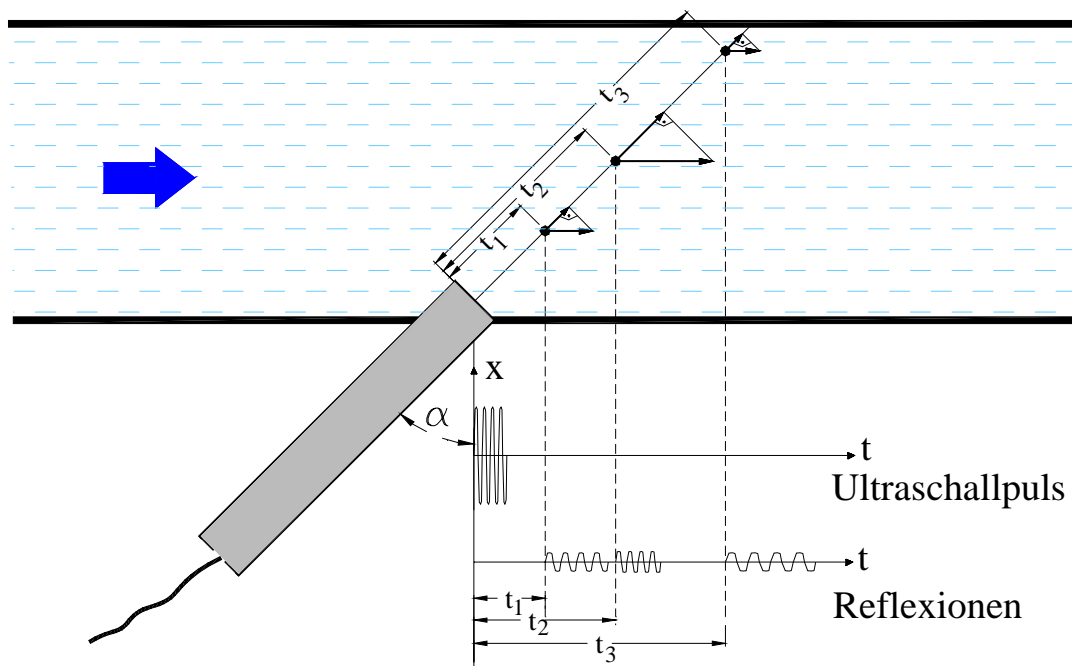


Abb. 2: Prinzip der eingesetzten Ultraschall-Doppler-Messtechnik

Da im Gärtank keine Hauptströmungsrichtung vorgegeben werden kann ist es nicht möglich, aus eindimensionalen Messungen Rückschlüsse auf die tatsächlich in einem Messpunkt vorliegende Strömung zu ziehen. Um eine eindeutige Aussage treffen zu können, ist die Messung der zwei Geschwindigkeits-Komponenten in einem Messpunkt notwendig. Durch die entsprechende Anordnung der 16 Sensoren wurde ein Messfeld mit insgesamt 28 Schnittpunkten gebildet (Abb. 3 und 4). Die Schnittpunkte decken den Tankquerschnitt gleichmäßig ab.



Abb. 3: Gär- und Lagertank mit den optischen Zugängen

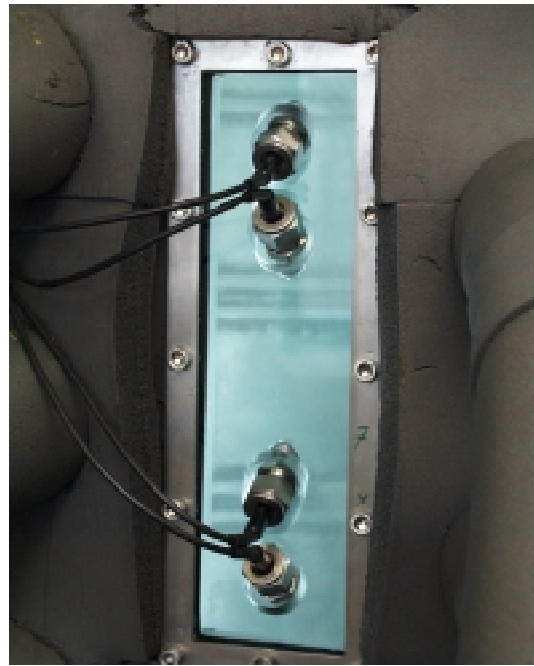


Abb. 4: Positionierung der Ultraschallsensoren

In den Schnittpunkten des Messrasters wurden die Daten der sich kreuzenden Transducer ausgewertet. Mittels der zwei, in einem unterschiedlichen Winkel, gemessenen Komponenten des Geschwindigkeitsvektors in diesem Punkt, kann über trigonometrische Beziehungen der resultierende Vektor ermittelt werden (Abb. 5). Die Aufarbeitung der Rohdaten und die nachfolgende Berechnung der Vektoren erfolgte in speziell angepassten Software-Prozeduren. Das eingesetzte System der Firma Metflow arbeitet mit einer Basisfrequenz von 4 Mhz und besitzt über einen internen Multiplexer die Möglichkeit, bis zu 20 Sensoren einzubinden.

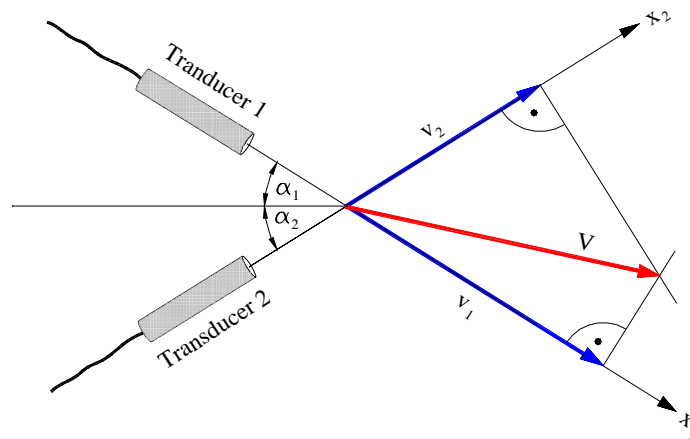


Abb. 5: Berechnung des Strömungsvektors in einem Schnittpunkt

4. Präsentation der Ergebnisse

Es wurden kontinuierlich mehrmals an den sieben Tagen der Gärung Geschwindigkeitsfelder berechnet. Die Kühlzonen wurden während der Gärungsphase mit einer Vorlauftemperatur von 3°C versorgt und der Tankinhalt wurde auf konstante 8°C entsprechend des Gärschemas eingeregelt.

In der Abbildung 6 ist je ein Beispiel eines Geschwindigkeitsfeldes am ersten und am dritten Tag der Gärung dargestellt. Die Gärungswärmeabfuhr in der Gärungsphase erfolgt mit den oberen vier Kühlzonen. Am ersten Tag kann man noch keine ausgebildeten Konvektionsgebiete erkennen. Es werden Geschwindigkeiten von maximal 15 mm/s gemessen. Im unteren Bereich wurde durch die optischen Zugänge eine aufwärtsgerichtete Strömung von ca. 4 mm/s beobachtet. Am dritten Tag hat die Strömungsaktivität aufgrund der zunehmenden Gärung stark zugenommen. Die ausgebildeten Konvektionen sind unsymmetrisch. Am fünften Tag (Abb. 7) wurde im oberen Teil eine radiale Strömung in Richtung der Kühlzonen registriert. Das Strömungsbild ist annähernd symmetrisch. Im zentrumsnahen Bereich ist eine starke aufwärtsgerichtete Strömung zu beobachten mit einer maximalen Geschwindigkeit von 130 mm/s. Die wärmeren Fluidteilchen, aufgrund des Gärungsprozesses, steigen aus dem Konusbereich in Zentrumsnähe auf und werden im oberen Bereich von der Mittelachse in Richtung Tankwand transportiert. Aus Kontinuitätsgründen entsteht eine schwächere abwärtsgerichtete Strömung an der Tankwand. Diese Rückstromzone ist zwar schwächer ausgeprägt, nimmt aber ein größeres Gebiet in Anspruch. Am vorletzten Tag der Gärung (7. Tag) ist ebenfalls eine ausgeprägte Aufwärtsströmung im Tankzentrum gemessen worden, die sich bis in den Bereich der oberen Kühlzonen erstreckt.

Videoaufnahmen zeigen in dem oberen Bereich unterhalb der Schaumdecke starke turbulente dreidimensionale Strömungen, die noch auf eine erhebliche Gärungsaktivität schließen lassen.

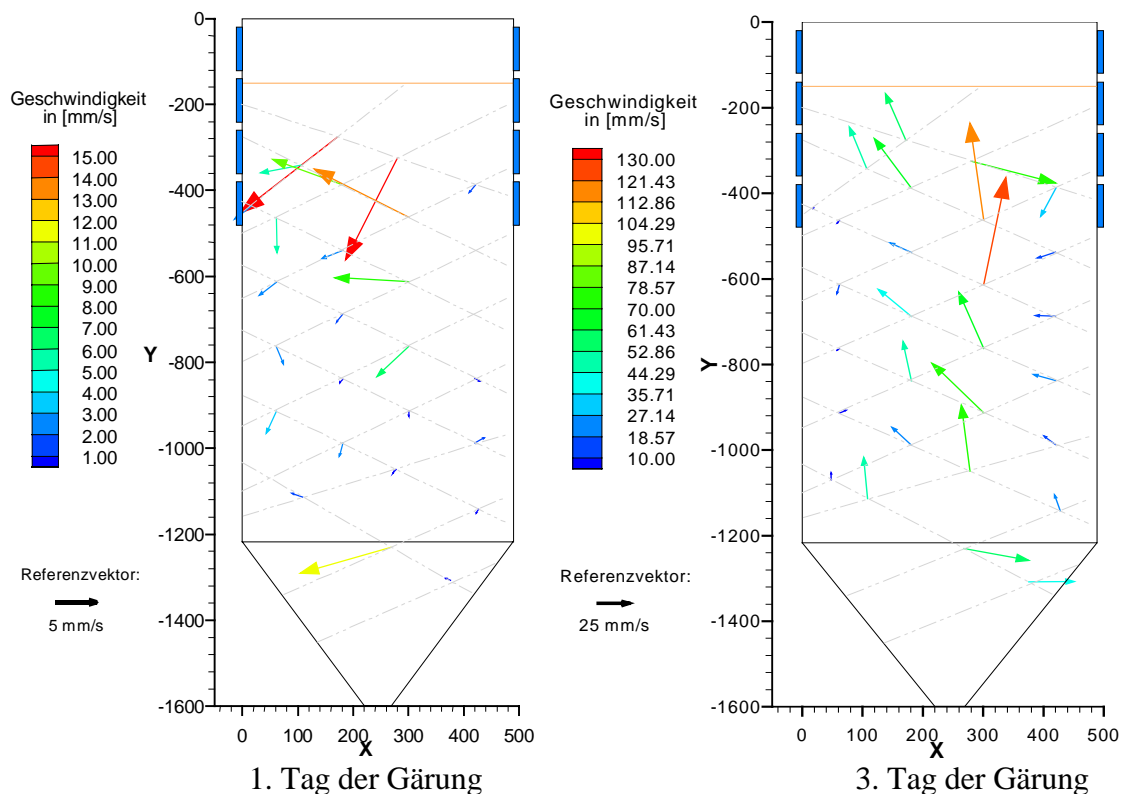


Abb. 6: Geschwindigkeitsfelder während der Gärungsphase am 1. und 3. Tag

Im unteren Teil in der Nähe der Tankwandung dagegen, wurde eine konstante ruhige abwärtsgerichtete Strömung registriert, mit ca. 4 mm/s, in der sichtbar die Hefepartikel zu Boden sinken.

Im weiteren Verlauf der Untersuchungen wird eine Verfeinerung der Untersuchungen, in Bezug auf die Messdatendichte sowie die Simulation der Konvektionserscheinungen der Gärungsprozesse mittels einer Modellflüssigkeit erfolgen, um den Einflusses der aufsteigenden CO₂-Blasen auf die Konvektionsströmungen und die Messgenauigkeit des USD-Messsystems mit optischen Messtechniken, wie PIV und LDA, vergleichen zu können.

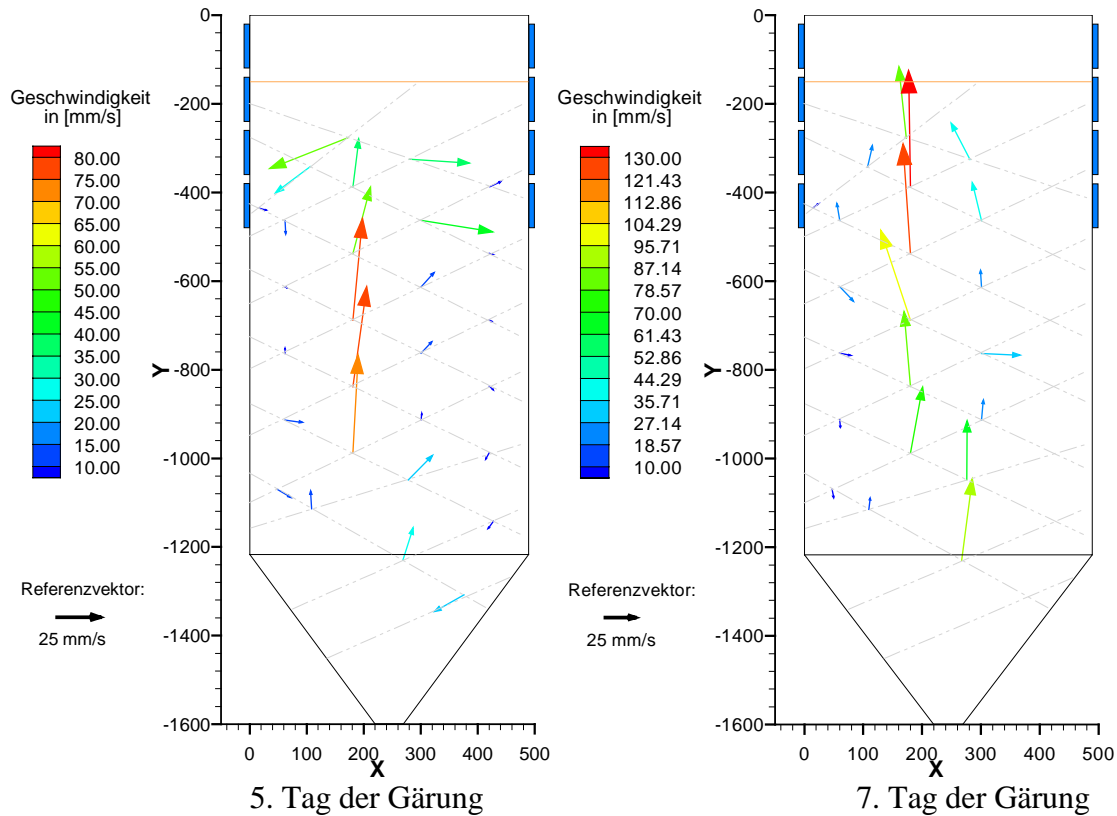


Abb. 7: Geschwindigkeitsfelder während der Gärungsphase am 5. und 7. Tag

Danksagung

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] Schuch, C: Bewegungsvorgänge in zylindrokonischen Tanks während Gärung und Reifung, Fortschrittberichte VDI, Reihe 17, Nr. 146, 1996
- [2] Felgentraeger, W. : Programmierbares Computergesteuertes Tank-Regelungssystem, Brauwelt Nr. 21/22, 1997
- [3] Annemüller, G.: Die Anstell- und Angärphase eines ZKG's muß keine Blackbox sein!, Brauwelt Nr. 39/40, 1997
- [4] Denk, V., Enders, T., Peters, U., Hege, U., Schuch, C. : Entwicklung eines Verfahrens zur Regelung und Optimierung der Gärung und Reifung von Bier, Brauwelt Nr. 36, 1995
- [5] Daoud, J., Dyson, R., Irvine, J., Cuthbertson, R.: Practical experience of online monitoring of evolved CO₂ from production fermenters, Proc. EBC Congress, 1989
- [6] Meironke, H., Szymczyk, J. A., Borchert, U., Berberich, M.: Zwischenbericht ProInno-Projekt „Entwicklung eines neuen Verfahrens und technologische Optimierung von Lagerungs- und Fermentationsprozessen von Bier“, 2002