

BESTIMMUNG HOCHAUFLÖSENDER GESCHWINDIGKEITSFELDER IN JUNGBIER MITTELS ULTRASCHALL DOPPLER MESSTECHNIK

DETERMINING OF HIGH-RESOLUTION VELOCITY FIELDS IN GREEN BEER BY THE ULTRASONIC DOPPLER MEASURING TECHNOLOGY

Kai Böttcher und Heiko Meironke

Fachhochschule Stralsund
Fachbereich Verfahrenstechnische Grundlagen, Apparate und Anlagenbau
Zur Schwedenschanze 15
18435 Stralsund

UVP, UDV, Ultraschall Doppler Messtechnik, Gärung, Bier, Datenfilterung
Ultrasonic Doppler Velocimetry, Fermentation, Beer, Filtering of data

Zusammenfassung

Geschwindigkeitsmessungen in trüben Medien wie Jungbier stellen die Messtechnik vor große Herausforderungen. In den letzten Jahren hat sich in diesem Zusammenhang die Ultraschall Doppler Messtechnik durchgesetzt und in der Forschung bewährt. Dieses akustische Verfahren ermöglicht die berührungslose Bestimmung von Geschwindigkeitsfeldern in Fluiden, in denen die Verwendung optischer Techniken ausgeschlossen ist.

Bei der Untersuchung von Transportvorgängen während der Phasen der Biergärung spielen sowohl makroskopische, als auch lokale Strömungsphänomene eine entscheidende Rolle. Um Messfelder mit höherer räumlicher Auflösung zu bestimmen, wurde die Anzahl der Ultraschall Sensoren gegenüber früheren Versuchen erhöht. Für die Experimente wurden zwei Messsysteme kombiniert, da die maximale Anzahl an verwendbaren Transducern auf 20 pro Gerät limitiert ist. Die Erweiterung ist messtechnisch sehr anspruchsvoll, da eine gegenseitige Beeinflussung der Sensoren ausgeschlossen werden muss und daraus deutlich komplexere Auswertungsalgorithmen resultieren.

In dieser Arbeit steht neben verschiedenen Aspekten der Messfeldverfeinerung, die Optimierung der Experimente in der Mehrphasenströmung im Vordergrund. So konnte gegenüber früheren Untersuchungen der störende Einfluss aufsteigender CO₂-Blasen auf die Transducer reduziert und die Genauigkeit der Messungen, insbesondere bei kleinen Strömungsgeschwindigkeiten, deutlich erhöht werden. Dazu wurde neben dem Versuchsaufbau auch die Abstimmung der Messparameter signifikant verbessert.

Einleitung

Mit etwa 3500 Brauereien und einer jährlichen Produktion von über 380 Millionen Hektolitern Bier, stellt die Brauindustrie einen wichtigen Bestandteil der europäischen Wirtschaft dar (siehe Brink et al 2011). Insbesondere aufgrund wachsender Konkurrenz untereinander sind die Brauereien bestrebt, ihre Produktionsabläufe zu optimieren um Kosten zu sparen.

Die Fermentation stellt den zentralen Abschnitt bei der Herstellung dar. Sie beginnt, sobald die Hefe zur Bierwürze gegeben wird und damit die Stoffwechselaktivitäten eingeleitet werden. Um die ablaufenden Prozesse zu verstehen, ist die Untersuchung der Temperatur- und Geschwindigkeitsverteilung im Fermenter notwendig. Aufgrund der Trübung des Jungbiers,

sind optische Messungen mit Verfahren wie LDA nur im Randbereich in Messtiefen bis unter 10 mm durchführbar (siehe Böttcher et al 2011). Daher wird die Ultraschall Doppler Messtechnik verwendet, die die Bestimmung von Geschwindigkeitsfeldern in trüben Medien und insbesondere in diesem Kontext nachgewiesen hat (siehe Meironke 2007).

Im Vergleich zu diesen früheren Untersuchungen wurde das Messfeld erweitert, verschiedene Störfaktoren identifiziert und deren Einfluss reduziert. Einen wesentlichen Faktor stellen die CO₂-Blasen dar, die während der Gärung entstehen. Sie lagern sich unterhalb der Ultraschall (US) Transducer an und stören die Messungen durch Reflexionen am Phasenübergang. Zudem wird infolge des Blasenanstiegs der messbare Geschwindigkeitsbereich verlassen, weshalb eine Nachbehandlung der Messwerte notwendig wird. Im Rahmen dieser Arbeit wird eine Vorrichtung vorgestellt, die die festgesetzten Gasblasen entfernt. Darüber hinaus werden verschiedene Konzepte analysiert, die eine adäquate Nachbearbeitung der Daten ermöglichen.

Die zur Steuerung der Ultraschall Messtechnik verwendeten Ultrasound Velocity Profile (UVP) Monitore verfügen über jeweils 20 Anschlüsse für Transducer. Die Messung wird dabei intern koordiniert und ist über zahlreiche Parameter steuerbar. Kommen bei der Erweiterung des Messfeldes mehr als 20 US Sensoren zum Einsatz, muss die Aufnahme der Messwerte extern koordiniert werden. Bei simultaner Messung mit mehreren aktiven Transducern treten Störungen auf, da eine konstante Frequenz von 4 MHz genutzt wird und somit keine nachträgliche Unterscheidung der Signale möglich ist. Die Störungen stellen bei der Erweiterung des Messfeldes ein wesentliches Problem dar und werden in diesem Zusammenhang analysiert.

Versuchsaufbau und Messprinzip

Der in dieser Form nach bisherigem Wissensstand weltweit einzigartige Versuchsaufbau besteht aus einem 270 l Laborfermenter mit zwei UDV (Ultrasonic Doppler Velocimetry) Messsystemen, 40 Pt100 Widerstandsthermometern und 8 separat steuerbaren Kühlzonen. Die Ultraschall Doppler Messtechnik ist ein akustisches Verfahren zur Bestimmung von Geschwindigkeitsfeldern, das auch Untersuchungen in trüben Medien wie Jungbier erlaubt. Das verwendete Messfeld und die wichtigsten Parameter sind in Abbildung 1 dargestellt.

Wird eine Messung gestartet, emittiert eine Ultraschall Sonde ein Signal der Frequenz f_0 , das sich entlang der x -Achse ausdehnt und schaltet anschließend auf Empfang. Das Signal wird von Partikeln im Fluid reflektiert und nach der Dauer t empfangen, woraus sich der Abstand x zwischen Teilchen und Transducer ergibt. Das empfangene Signal ist um die Frequenz f_D Doppler verschoben. Daraus kann die Geschwindigkeit des Teilchens berechnet werden.

In dieser Arbeit wird das Verfahren verwendet, um Geschwindigkeitsfelder mit festen räumlichen Messpunkten zu ermitteln. Die Messvolumenbreite w auf der jeweiligen Messachse ist durch die Anzahl der Zyklen pro Messimpuls n , die Schallgeschwindigkeit c und f_0 bestimmt und definiert die räumliche Auflösung des Verfahrens.

Da das Produkt von maximaler Messtiefe P_{\max} und maximal messbarem Geschwindigkeitsbereich V_{\max} konstant ist, können hohe Geschwindigkeiten und große Geschwindigkeitsfelder nicht gleichzeitig untersucht werden.

Zur Messung positiver und negativer Strömungsgeschwindigkeiten wird V_{\max} in zwei Teile zerlegt. Es wird mit v_{\min} die negative und mit v_{\max} die positive Schranke durch

$v_{\min} := -\frac{V_{\max}}{2}$ bzw. $v_{\max} = \frac{V_{\max}}{2} - \Delta V$ definiert, wobei ΔV die Geschwindigkeitsauflösung, also die Größe der Geschwindigkeitsschritte darstellt.

Die Verwendung mehrerer US-Sensoren ermöglicht die Untersuchung von zweidimensionalen Geschwindigkeitsfeldern. Im betrachteten Versuchsaufbau werden 12 vertikal und 8 horizontal einstrahlende Transducer bei einer Frequenz f_0 von 4 MHz genutzt. Das führt zum dargestellten Messfeld mit 96 Messpunkten.

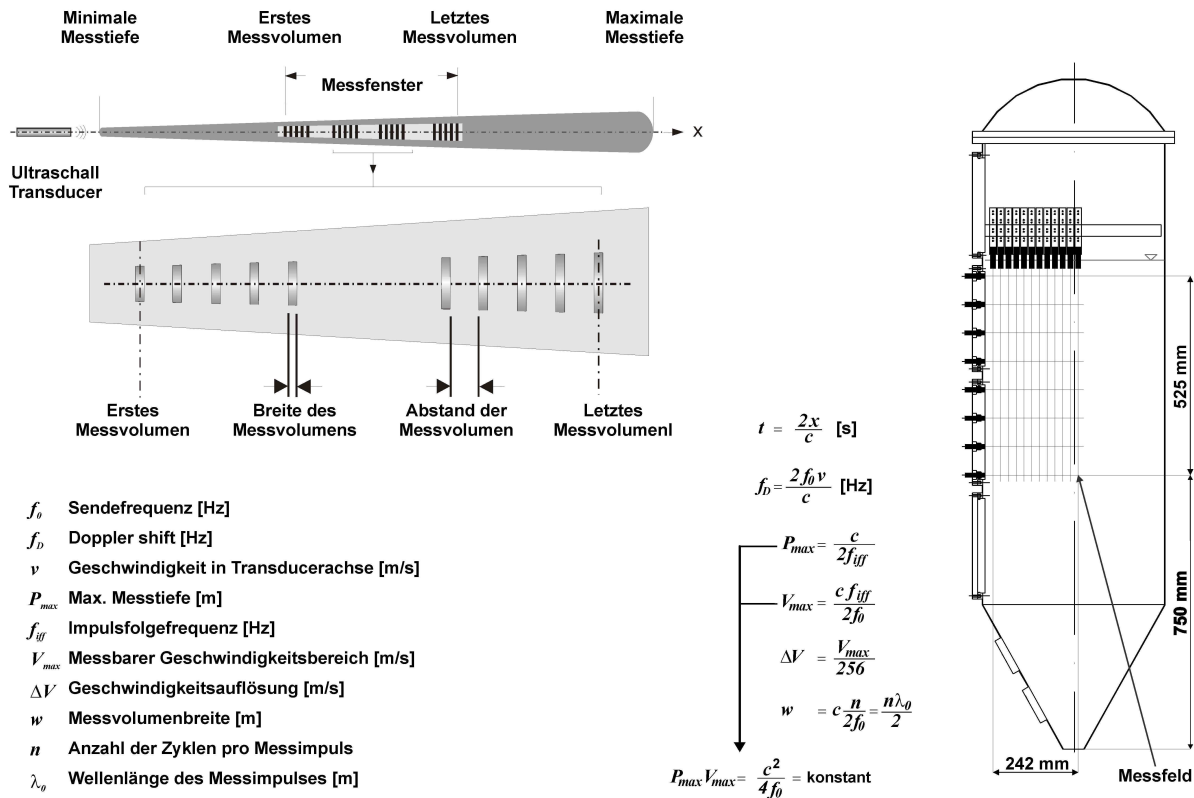


Abb. 1: Schematisch Darstellung des Versuchsaufbaus und der Ultraschall Messtechnik

Während der Gärung entsteht neben Alkohol und zahlreichen andern Stoffen vor allem CO_2 , das in Form von Gasblasen im Tank aufsteigt. Das führt zu einer zentral aufwärts gerichteten Strömung. Die Bewegung von Blasen und enthaltenen Partikeln wird von den vertikal einstrahlenden Transducern als negative Geschwindigkeit erfasst. Wird hierbei V_{\max} überschritten, kommt es zu einem „umklappen“ der Werte in den positiven Geschwindigkeitsbereich. Dieser Effekt ist auf das Nyquist-Theorem zurückzuführen. Es besagt, dass V_{\max} durch die Impulsfolgefrequenz f_{iff} gegeben ist. Zudem lässt sich die Gleichung $f_D = f_{\text{mess}} + k \cdot f_{\text{iff}}$ mit $k = \pm(0,1,2,\dots)$ folgern und damit auch, dass genau eine gemessene Frequenz f_{mess} aus dem Intervall $\left[f_D - \frac{f_{\text{iff}}}{2}, f_D + \frac{f_{\text{iff}}}{2} \right]$ auf unendlich viele Dopplerfrequenzen abgebildet wird. So wird zum Beispiel bei einer Verschiebung um das gesamte Intervall statt der realen Frequenz von $f_D = f_{\text{mess}} + f_{\text{iff}}$ gerade f_D gemessen. Entsprechend ergibt sich mit $v = \frac{c \cdot f_D}{2 \cdot f_0}$ für die Ge-

schwindigkeit, dass statt $\frac{c \cdot (f_{\text{mess}} - f_{\text{iff}})}{2 \cdot f_0}$ gerade $\frac{c \cdot f_{\text{mess}}}{2 \cdot f_0}$ erfasst wird. Die Differenz zwischen

realer und der gemessener Geschwindigkeit beträgt dann $\frac{c \cdot f_{\text{iff}}}{2 \cdot f_0}$, entspricht also dem maxi-

mal messbaren Geschwindigkeitsbereich V_{max} .

Um diesen Effekt schon vor der Messung einzuschränken, kann P_{max} reduziert werden. Das führt direkt zur Erhöhung von V_{max} und damit f_{iff} , womit höhere Geschwindigkeiten messbar wären, bevor die Werte „umklappen“. Da jedoch ein möglichst großes Messfeld untersucht werden soll, stellt dieses Vorgehen keine Option dar. Im folgenden Abschnitt werden drei Alternativen betrachtet, die bei der Auswertung ansetzen.

Auswertung der experimentellen Daten

Die verwendete MET-FLOW Software Version 3 ermöglicht die automatische Auswertung der gemessenen Daten sowie die Darstellung der Geschwindigkeitsfelder. Leider stehen keine Filter zur Verfügung, die eine direkte Nachbehandlung der Messwerte ermöglichen würden. Die Struktur der Rohdaten ist zusammen mit ihrer Aufbereitung schematisch in Abbildung 2 dargestellt.

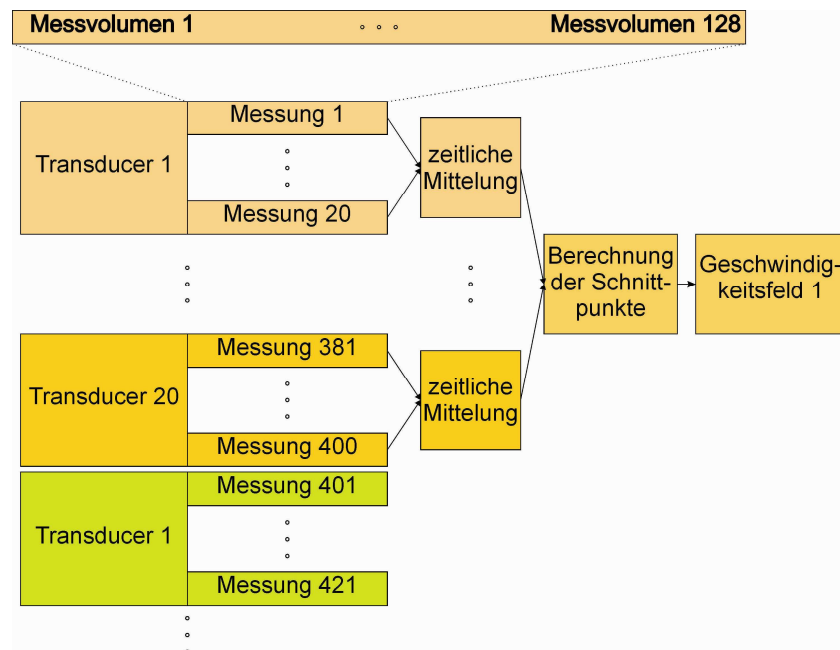


Abb. 2: Schematisch Darstellung der Rohdaten und ihrer Aufbereitung

Es wurde eine eigene Software entwickelt, die die Rohdaten aufbereitet und auf Grundlage gefilterter Daten, adäquate Geschwindigkeitsfelder berechnet. Gefiltert werden sollen all jene Daten, die den messbaren Geschwindigkeitsbereich überschritten haben. Ein aus diesem Grund positiver Messwert wird als „umgeklappt“ definiert, sobald er die zulässige Geschwindigkeit v_{zul} überschreitet. Dieser Parameter muss groß genug gewählt werden um alle abwärts gerichteten Geschwindigkeiten zu erfassen, aber klein genug um alle fehlerhaften Werte herauszufiltern.

Es werden Algorithmen verwendet, die die Daten schon vor der zeitlichen Mittelung, also immer lokal für jeden Transducer, im aktuellen Messzyklus bearbeitet. Dazu stehen verschiedene Optionen zur Verfügung.

Eine Möglichkeit stellt die Berechnung über umliegende Messvolumina dar, wie sie bereits in früheren Untersuchungen eingesetzt wurde (siehe Meironke 2007). Hierzu wird der „umgeklappte“ Messwert durch den Mittelwert aus der Summe einer Geschwindigkeitsgrenze v_{gren} und den umliegenden Werten ersetzt. Die Ränder des Messbereichs müssen separat betrachtet werden. Sei $m_{i,j}$ das Ergebnis der i -ten Messung im j -ten Messvolumen, dann ergibt sich der neue Wert $\tilde{m}_{i,j}$ durch:

$$\tilde{m}_{i,j} := \begin{cases} \frac{v_{\text{gren}} + m_{i,j+1} + m_{i,j+2}}{3} & \text{für } j = 1 \\ \frac{m_{i,j-1} + v_{\text{gren}} + m_{i,j+1}}{3} & \text{für } j \in \{2, \dots, 127\} \\ \frac{m_{i,j-2} + m_{i,j-1} + v_{\text{gren}}}{3} & \text{für } j = 128 \end{cases}$$

Dieses Verfahren ist wesentlich von der Wahl von v_{gren} abhängig. So können für einen symmetrischen Filter positive und negative Werte über $\pm v_{\text{zul}}$ identifiziert und mit $\pm v_{\text{gren}}$ berechnet werden. Alternativ kann man die umgeklappten Werte direkt mit v_{zul} bestimmen und die positiven mit Hilfe von $v_{\text{gren}} = -v_{\text{zul}}$ ersetzen.

Eine weitere Option stellt die direkte Verwendung des Nyquist Theorems dar. Hierzu werden Messwerte, die als „umgeklappt“ identifiziert wurden, durch ihr wahrscheinlichstes Pendant im nächsten Frequenzzyklus ersetzt, also $\hat{m}_{i,j} := v_{\text{min}} + m_{i,j} - v_{\text{max}}$ gesetzt. Dieses Vorgehen ist bis auf Messfehler exakt, solange $m_{i,j}$ tatsächlich „umgeklappt“ ist. Für falsch identifizierte Messwerte tritt der Fehler $e = v_{\text{max}} - v_{\text{min}} = V_{\text{max}} - \Delta V$ auf. Dieses Verfahren sollte also nur dann verwendet werden, wenn eine adäquate Einordnung der Messwerte gewährleistet ist. Die dritte betrachtete Möglichkeit wurde von Wiklund et al 2004 vorgeschlagen. Hierzu wird für die betrachteten Messvolumen des Transducers der Median bestimmt. In die Berechnung des Mittelwerts gehen dann alle die Daten ein, deren Differenz zum Median höchstens zwei Standardabweichungen beträgt. Dadurch werden mit hoher Wahrscheinlichkeit alle fehlerhaften Werte herausgefiltert.

Optimierung des Versuchsaufbaus zur Reduktion des Blaseneinflusses

Die aufsteigenden Gasblasen haben neben dem betrachteten Phänomen noch einen weiteren Effekt auf die Messungen. Sie setzen sich unterhalb der Transducer fest und bilden damit eine zusätzliche gasförmige Phase. Diese führt zur Brechung der Ultraschallwellen und damit zu einem veränderten Wellenverlauf. Das Messfeld wird also unkontrolliert verformt. Darüber hinaus wird die Intensität der Welle reduziert, woraus eine geringere Validität der Messdaten resultiert.

Um diesen Effekt zu reduzieren, wurde eine Vorrichtung zum Entfernen der Blasen konstruiert. Hierzu wurde ein Röhrchen mit einer Bohrung pro Sensor angebracht. Es befindet sich versetzt unterhalb der Transducer und wird mit CO_2 bei einem Druck von etwa 2,5 bar versorgt. Haben sich Blasen abgesetzt, kann ein Ventil geöffnet werden, um sie mit Hilfe des ausströmenden Gases zu entfernen.

Dieser Apparat hat sich in der Praxis bewährt und ist in Abbildung 3 zusammen mit den montierten Transducern dargestellt.

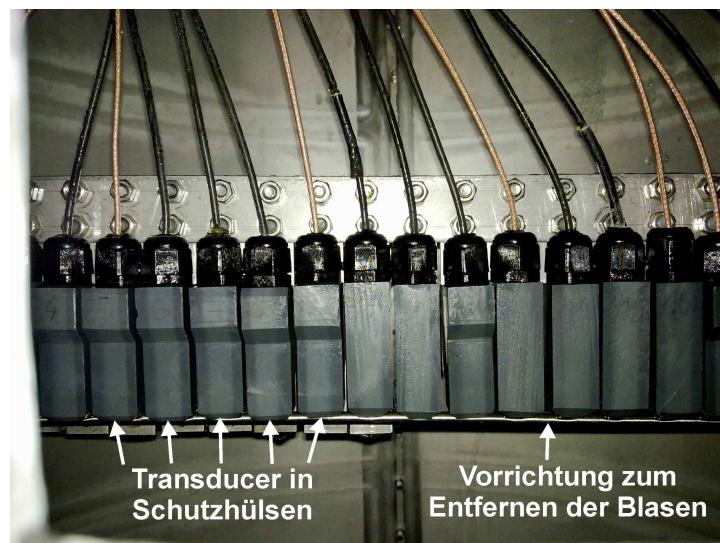


Abb. 3: Transducer im Inneren des Fermenters mit montierter Vorrichtung zur Blasenentfernung

Erweiterung des Messfeldes

Die Messung mit bis zu 20 Transducern lässt sich mit den verwendeten UVP-Monitoren ohne größere Steuerungsprobleme durchführen. Wird das Messfeld darüber hinaus erweitert, ergeben sich jedoch erhebliche Schwierigkeiten, die auf Störungen der Transducer untereinander zurückzuführen sind. Diese Effekte sind in Abbildung 4 am Beispiel einer Fermentationsphase mit vergleichsweise geringen Strömungsgeschwindigkeiten zu erkennen.

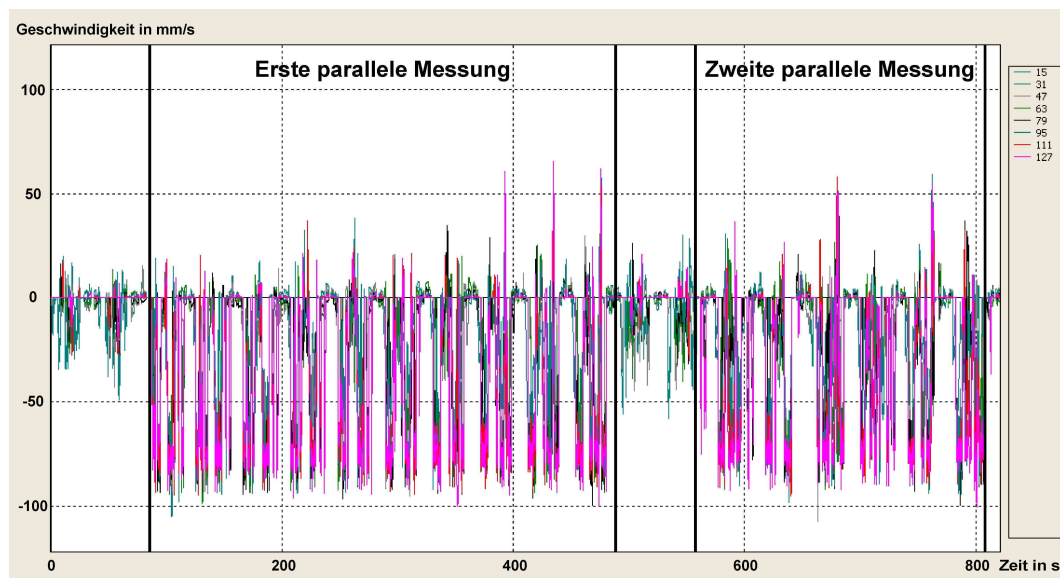


Abb. Gemessene Geschwindigkeit des UVP-XW, bei Störung durch einen zweiten UVP Monitor
Für die Darstellung wurden die Daten von acht Messvolumen über die Dauer von 828 s aufgetragen. Sie wurden mit dem UVP-XW System erfasst und mit der zugehörigen Software ausgewertet. Hierbei ist zu beachten, dass nicht zwischen einzelnen Sensoren unterschied-

den wird, da sie zeitlich nacheinander angesteuert werden. Mit dem Gerät werden 20 Geschwindigkeitsfelder aufgenommen. Für den Zeitraum von 85 s bis 492 s und von 562 s bis 810 s wurde zusätzlich das UVP-DUO System aktiviert um das Messfeld um 8 weitere vertikal einstrahlende Transducer zu erweitern.

In der UVP Software ist eine Verzögerungsfunktion integriert, die nach Ermittlung jedes Geschwindigkeitsfeldes einen Ruhemodus mit vom Nutzer einzustellender Dauer aktiviert. Wird die Ruhephase zwischen den Geräten abgestimmt, ist es möglich dass immer nur eines der Geräte aktiv ist. Während der zweiten parallelen Messung wurde mit einer Ruhephase von 10 s gearbeitet. Es ist leicht zu erkennen, dass dieser Ansatz zu keiner Reduktion der Störung führt, was aus einer nicht deaktivierbaren Funktion resultiert. Durch sie werden auch im Ruhemodus weiter Impulse zur Anpassung interner Parameter ausgesendet.

Resultierende Geschwindigkeitsfelder

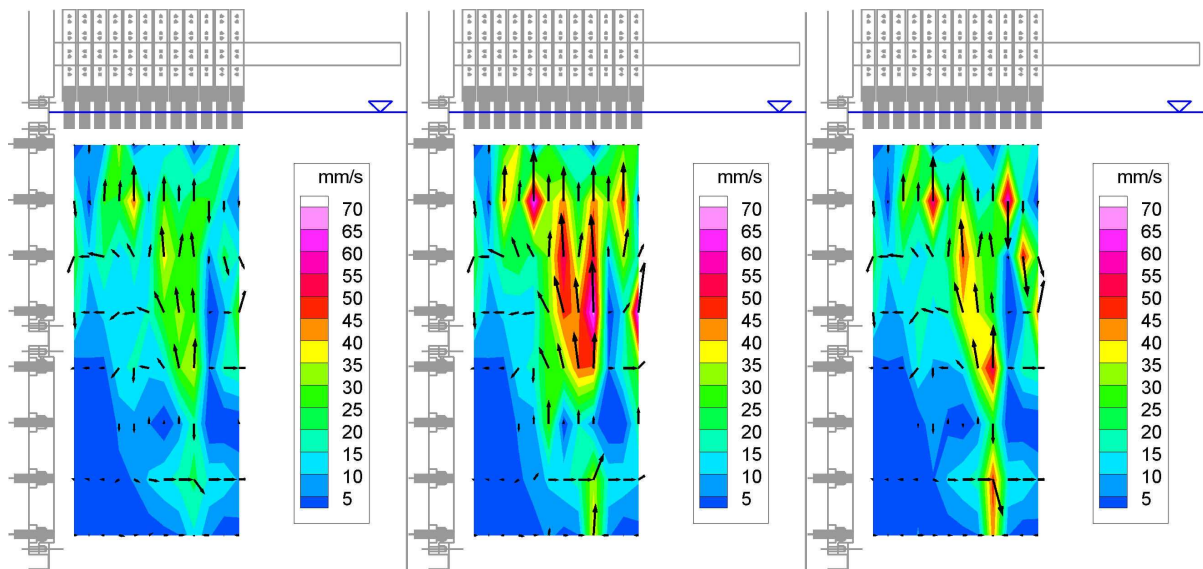


Abb. 5: Resultierende Geschwindigkeitsfelder nach Bearbeitung durch Verfahren 1, 2 und 3 (v.l.n.r.)

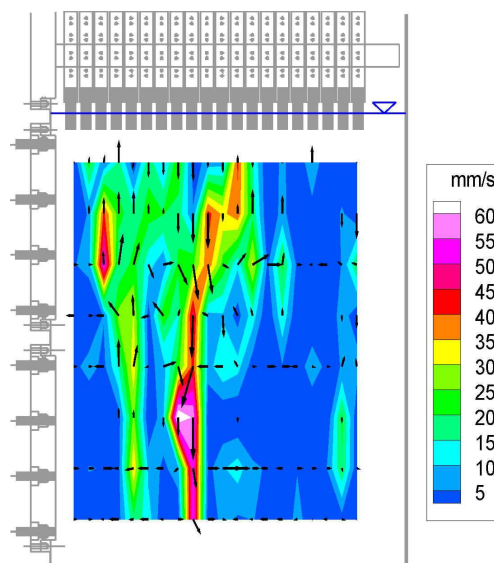


Abb. 6: Erweitertes Geschwindigkeitsfeld nach Bearbeitung durch Verfahren 1

Um die unterschiedlichen Verfahren zur Auswertung der Messdaten zu vergleichen, werden sie auf dieselben Rohdaten angewendet. Sie wurden am 3. Tag der Gärung aufgenommen, wenn die Hefeaktivität ihr Maximum erreicht und damit viele aufsteigende CO₂ Blasen vorhanden sind. Die Gasblasen erreichen in dieser Phase Geschwindigkeiten von 50 mm/s bis 300 mm/s, während die abwärts gerichtete Strömung etwa 30 mm/s erreicht (siehe Meironke 2007). Es werden die Parameter $v_{zul} = 50 \text{ mm/s}$ und $v_{gren} = -50 \text{ mm/s}$ gesetzt. Zudem ergeben sich $v_{min} = -122.7 \text{ mm/s}$ und $v_{max} = 121.8 \text{ mm/s}$. Die resultierenden Geschwindigkeitsfelder sind in Abbildung 5 dargestellt.

Die Erweiterung des Messfeldes über 20 Transducer hinaus, kann neben der Verwendung mehrerer Geräte auch durch einen separaten UVP Monitor realisiert werden. Dazu können zunächst Messungen mit horizontal und anschließend mit vertikal einstrahlenden Sensoren vorgenommen werden. Als Resultat liegt ein verfeinertes Geschwindigkeitsfeld vor, wie es in Abbildung 6 dargestellt ist. Hier wurde das erste Verfahren mit o.g. Parametern verwendet.

Diskussion

Durch die Entwicklung eines Apparats zum Entfernen der gasförmigen Phase unterhalb der Transducer, konnte der Einfluss festgesetzter Gasblasen nahezu eliminiert werden.

Die Messung von Geschwindigkeitsfeldern bei aufsteigenden Blasen wurde durch verschiedene Verfahren realisiert. Die betrachteten Algorithmen zur Filterung der „umgeklappten“ Messwerte liefern qualitativ ähnliche Ergebnisse. In allen drei Fällen ist eine zentral aufwärts gerichtete Strömung und ein Wirbel im linken Feldbereich zu erkennen. Die quantitativen Unterschiede sind aufgrund der unterschiedlichen Verfahren nachvollziehbar und müssen auch unterschiedlich interpretiert werden. So wird mit dem ersten Verfahren ausschließlich die Geschwindigkeit des Fluids gemessen und die gasförmige Phase herausgefiltert, während bei dem zweiten Verfahren die Geschwindigkeit der Gasblasen in die Berechnung mit einbezogen wird. Das dritte Verfahren bezieht beides mit ein, filtert jedoch deutlich mehr Werte heraus als das Zweite.

Die Erweiterung des Messfeldes ist nach aktuellem Kenntnisstand nicht mit mehreren parallel arbeitenden MET-FLOW UVP Monitoren realisierbar. Die gegenseitige Störung der Transducer dominiert die Messwerte und kann über die verfügbaren Parameter nicht reduziert werden. In diesem Zusammenhang werden weitere Untersuchungen durchgeführt.

Dankesworte

Die Autoren bedanken sich für die Förderung des Projektes beim Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie, dem Forschungsbereich der Ernährungsindustrie E.V. (FEI), der Störtebeker Braumanufaktur und der Allianz Industrie Forschung (AiF), Projekt 16754 BG.

Literatur

- Böttcher, K., Meironke, H., 2011: "Experimentelle Untersuchungen mittels PIV, LDA und Ultraschall-Doppler-Messtechnik zu berührungslosen Geschwindigkeitsmessung bei der Bierfermentation", XX. internationale Tagung Forschung, Praxis und Didaktik im modernen Maschinenbau
- Brink, M., Gosepa, S., Kruis, G., 2011: "The Contribution made by Beer to the European Economy", The Brewers of Europe
- Meironke, H., 2007: "Charakterisierung des Impuls- und Wärmetransports in zylindronischen Tanks während der Gärung, Reifung und Lagerung mittels laseroptischer und Ultraschall-Messtechniken", Dissertation
- Wiklund, J., Pettersson, J., Rasmuson, A., Stading, M., 2004: "A Comparative Study between UVP and LDA Techniques for Highly Concentrated Pulp Suspensions in Pipe Flow", ISUD, Vol. 4, pp. 69-75