

Laseroptische Messungen in einem technischen Behälter mit Naturumlaufverdampfer

A. Baars, T. Herbster, A. Delgado

Lehrstuhl für Fluidmechanik und Prozessautomation, Technische Universität München,
Weihenstephaner Steig 23, 85350 Freising, email: baars@wzw.tum.de

Einleitung

Die Würzekochung stellt einen essentiellen Produktionsschritt bei der Bierherstellung dar. Hierbei finden verfahrenstechnische Operationen statt wie das Eindampfen von Flüssigkeit, das Mischen, der Austausch von Stoffen sowie chemische Reaktionen. So verbinden sich mit der Würzekochung u.a. die Ziele Eindampfung von Wasser (Einstellung der Stammwürze), Inaktivierung von Enzymen, Zumischung und Isomerisierung der Hopfenbitterstoffe, Denaturierung und Koagulation von höhermolekularen Einweißverbindungen sowie der Exsorption von unerwünschten Aromasubstanzen.

Dieser Verfahrensschritt findet in der Praxis u.a. in dem weitverbreiteten System Würzepfanne mit Innenkocher statt, einem zylindrischen Behälter mit innenliegendem, dampfbeheizten Rohrbündel-Wärmeaustauscher, der als Naturumlaufverdampfer fungiert (siehe Abbildung 1). Im industriellen Maßstab liegen die Behälterdurchmesser bei bis zu 6 m sowie die Würzevolumina bei maximal 1100 hl. Während des Prozesses strömt die Würze aus dem Ringraum von unten rohrseitig in den Wärmeaustauscher hinein, verdampft dort teilweise und gelangt dann in eine Düse. Mittels einer Umlenkvorrichtung strömt sie von dort dem Ringraum radial wieder zu.

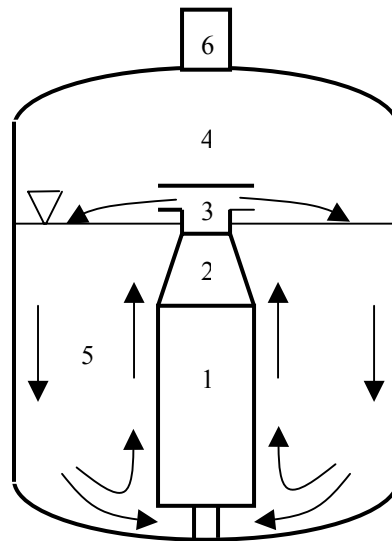


Abbildung 1: Würzepfanne mit Innenkocher (1 Rohrbündel-Wärmeaustauscher, 2 Düse, 3 Strahl-Umlenkung, 4 Brüdenraum, 5 Ringraum, 6 Brüdenabzug)

Der Strömung im Ringraum des Behälters kommt für eine gleichmäßige thermische und mechanische Produktbehandlung und damit für eine homogene Produktqualität eine große Bedeutung zu. Bisherige Untersuchungen zur Würzepfanne mit Innenkocher zielen mit wenigen Ausnahmen auf die Technologie der Kochung ab, z.B. [1,2]. Mitani und Tamaka [3] führen erstmalig experimentelle Strömungsuntersuchung an einer rechteckigen, unbeheizten

Modellwürzepfanne durch. Baars et al. und Delgado et al. [4,5] zeigen durch theoretische Untersuchungen, dass sich der turbulente Strahl ausgehend von der Umlenkvorrichtung an die Innenwand des Behälters anlegt und über Zarge und Klörperboden teilweise in den Wärmeaustauscher direkt wieder hineinströmt. Infolge dessen tritt eine partielle Kurzschlussströmung auf. Durch den Impulsaustausch zwischen Strahl und Behälterflüssigkeit entsteht im Ringraum ein Großraumwirbel.

Für eine homogene Produktbehandlung erweist sich ein intensiver Impulsaustausch zwischen Freistrahle und Matrixflüssigkeit von großer Bedeutung, um eine Kurzschlussströmung des Strahls weitestgehend zu vermeiden. Im Rahmen dieser Arbeit gilt es daher, mittels LDA die Strömung an der Behälterinnenwand in einer beheizten Würzepfanne im Technikumsmaßstab für zwei verschiedene geometrische Konfigurationen zu untersuchen. Hierbei strömt zum Einen das Fluid aus der Umlenkung durch die Dampfphase und die Flüssigkeitsoberfläche in die Matrixflüssigkeit hinein (bisher industriell angewandt). Zum Anderen erfolgen Messungen bei horizontaler Strahlauflage unterhalb der Flüssigkeitsoberfläche (Subjet [5]). Hierbei besteht der Strahl zunächst aus einem Flüssigkeits-Dampf-Gemisch, siehe Abbildung 2a.

Material und Methoden

Für die experimentellen Untersuchungen steht eine 18 hl Würzepfanne mit dampfbeheiztem Innenkocher zur Verfügung, siehe Abbildung 2. Der Durchmesser des zylindrischen Behälters liegt bei 1,4 m, der des Rohrbündelwärmeaustauschers bei 0,4 m. Die Zargenhöhe des Behälters beträgt 1,25 m.

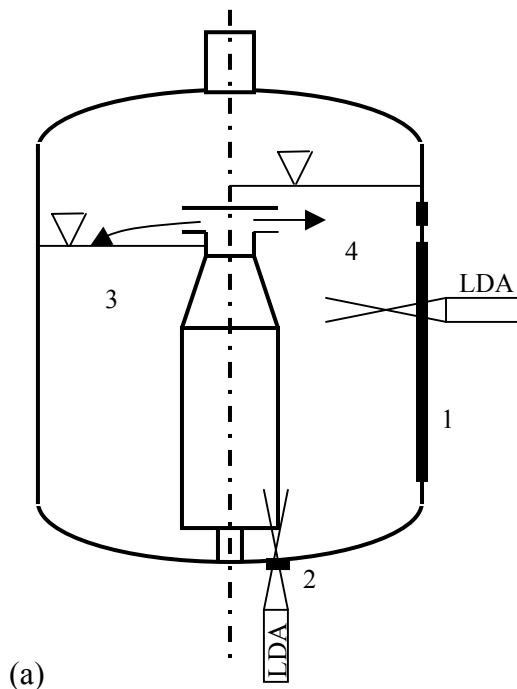


Abbildung 2: (a) Messanordnung (1 Zargenschauglas, 2 Schauglas Klörperboden, 3 überspiegeliges Einströmen, 4 unterspiegeliges Einströmen (Subjet)), (b) Dampfbeheizte Würzepfanne mit Innenkocher im Technikumsmaßstab

Zarge und Klöpperboden weisen zahlreiche Muffen und Schaugläser für die Anwendung von invasiven und nicht-invasiven Messverfahren auf. So befindet sich in der Zarge ein schmales, vertikal positioniertes Schauglas von 0,75 m Länge. Dieses bietet die Möglichkeit axiale und Umfangskomponente der Strömungsgeschwindigkeit in radiale Richtung mittels LDA zu messen. Ein weiteres rundes Schauglas im unteren Klöpperboden dient der Ermittlung des Geschwindigkeitsprofils zwischen Boden und Außenwand des Rohrbündel-Wärmeaustauschers. Zur Messung der Strömungsgeschwindigkeit findet eine 1-Kanal LDA Anlage der Firma TSI Verwendung. Die Brennweite der eingesetzten Sonde mit einem Durchmesser von 25 mm beträgt 100 mm.

Als frei wählbare Prozessparameter des Verdampfersystems dienen Heizdampfdruck, Brüdenraumdruck und Höhe des Flüssigkeitsspiegels im Behälter. Letzterer Parameter bleibt einmal eingestellt trotz permanenter Verdampfung während des Betriebs konstant. Der entstehende Dampf strömt über den Brüdenabzug in einen Plattenwärmeaustauscher, kondensiert dort und gelangt dann über eine Rücklaufleitung in den Behälter zurück.

Für die vorgestellten Ergebnisse dient deionisiertes Wasser als Arbeitsmedium, der Brüdenraumdruck beträgt 0,1 MPa, der Flüssigkeitsstand im Behälter liegt bei 1,0 m (Einströmung unterhalb des Flüssigkeitsspiegels) bzw. 0,7 m (Einströmung oberhalb des Flüssigkeitsspiegels) und der Heizdampfdruck bei 0,2 MPa. Die Messungen der Strömungsgeschwindigkeit in der Zarge finden bei den Höhen $H_1 = 0,55$ m, $H_2 = 0,30$ m und $H_3 = 0,25$ m statt sowie zwischen Klöpperboden und dem Boden des Wärmeaustauschers. Die Messorte in der Zarge sind so gewählt, dass dort in der Regel nur einphasige Strömung vorliegt. Die Höhenangaben beziehen sich auf die tiefste Stelle der Zarge.

Ergebnisse

Die vorgestellten Ergebnisse beschränken sich im Rahmen dieser Arbeit auf die zeitlichen Mittelwerte der axiale Geschwindigkeitskomponente bei Messungen in der Zarge und die der radialen Komponente bei Messungen im Klöpperboden. Die Abbildungen 3 und 4 stellen die Ergebnisse der Geschwindigkeitsmessungen an der Zarge in dimensionsloser Form vor. Hierbei bezeichnet v die zeitlich gemittelte, axiale Geschwindigkeitskomponente, v_B die flächengemittelte, axiale Strömungsgeschwindigkeit im Ringraum, D den Durchmesser des Behälters, d den Durchmesser des Wärmeaustauschers sowie r den radialen Abstand von der Zarge. Bei $2r/(D-d)=0$ befindet sich die Behälterinnenwand, bei dem Wert eins der Wärmeaustauscher.

Den Diagrammen lässt sich entnehmen, dass die axialen Strömungsgeschwindigkeiten an der Behälterinnenwand mit wachsender axialen und radialen Eindringtiefe in die Flüssigkeit grundsätzlich abnehmen, und die Strömungsprofile abflachen.

Bei der überspiegeligen Fluidaufgabe nimmt die Geschwindigkeit in radiale Richtung im Vergleich stärker ab, während sie in axiale Richtung eine deutlich geringere Reduktion zeigt. Dies weist auf einen intensiveren Impulsaustausch des Subjet mit der Matrixflüssigkeit hin. Mögliche Ursachen finden sich einerseits in der oberhalb der Messorte auftretenden zweiphasigen Strömung. Zudem legt der Subjet von der Ausströmung bis zu den Messstellen einen längeren Weg durch die Matrixflüssigkeit zurück.

Beim Fall der Einströmung durch die Flüssigkeitsoberfläche trägt der Strahl Dampf aus dem Brüdenraum in Form von Blasen in die Matrixflüssigkeit ein, deren Anzahl im Vergleich zum Subjet nach visuellen Beobachtungen jedoch deutlich geringer ausfällt. Zudem wächst der

27.4

Impuls des Freistahls bei überspiegeliger Einströmung während der Durchströmung der Gasphase aufgrund der Gravitationswirkung zunächst noch an.

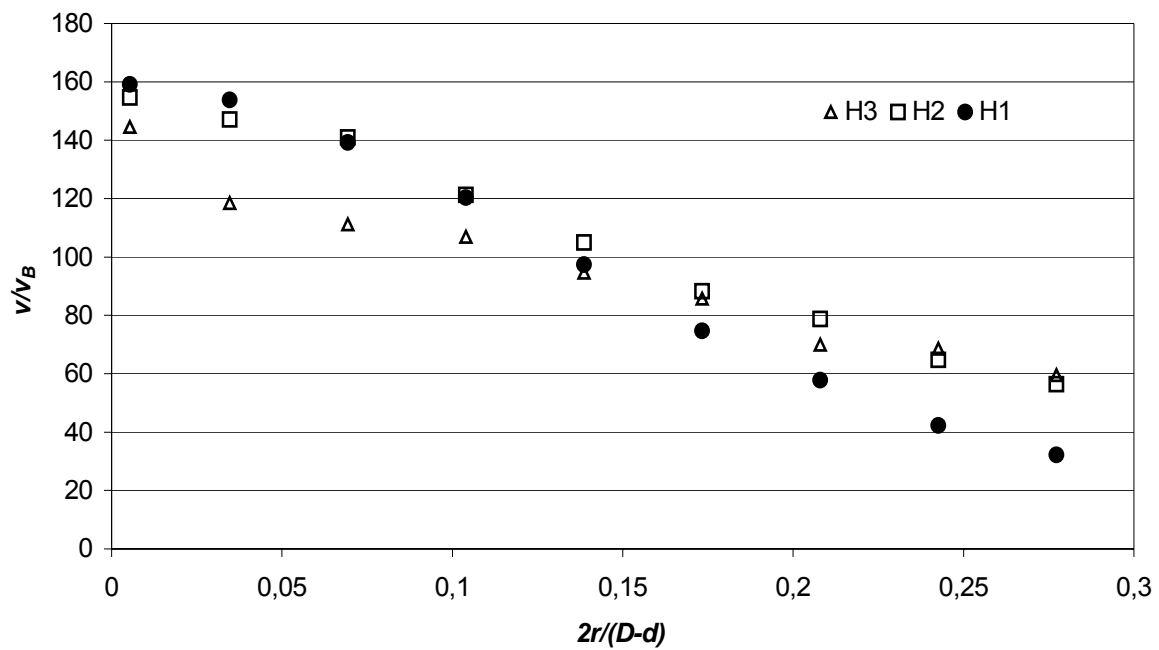


Abbildung 3: Radialer Verlauf der axialen Geschwindigkeitskomponente an der Innenwand der Zarge bei überspiegeliger Einströmung

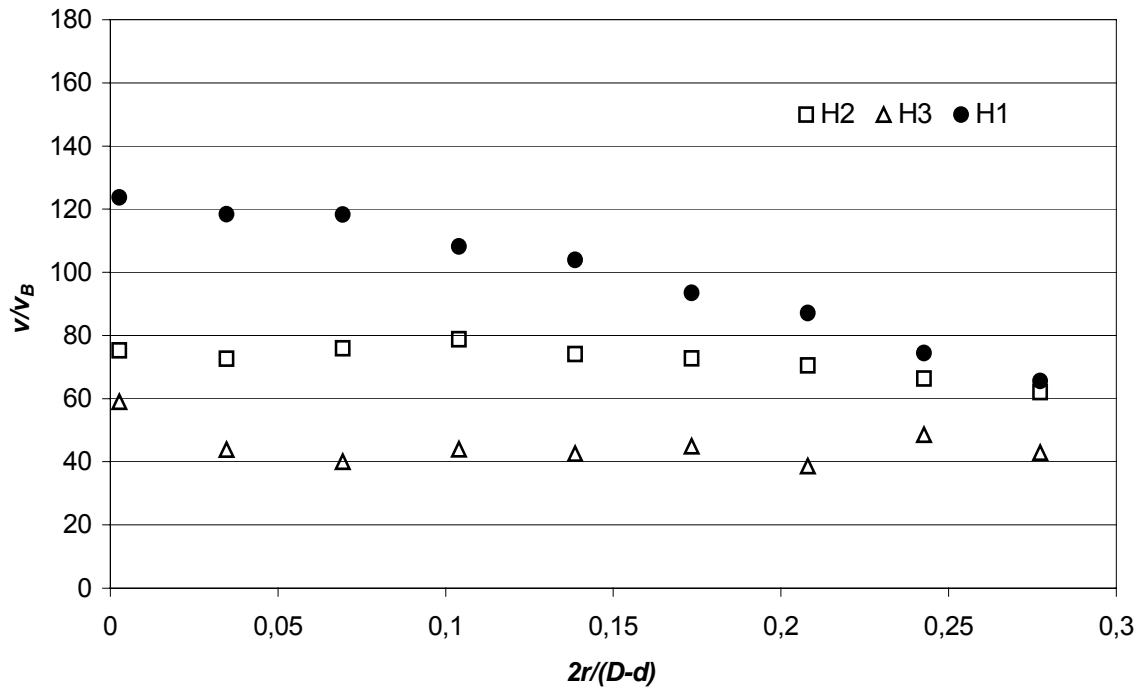


Abbildung 4: Radialer Verlauf der axialen Geschwindigkeitskomponente an der Innenwand der Zarge beim Subjet

Abbildung 5 zeigt die dimensionslos dargestellten Verläufe der radialen Geschwindigkeitskomponente v zwischen dem unteren Klöpperboden und dem Rohrbündelwärmeaustauscher. Die Größe x bezeichnet den Messort ausgehend vom Boden des Wärmeaustauschers sowie h den Abstand zwischen Klöpperboden und Wärmeaustauscher, siehe auch Abbildung 2a.

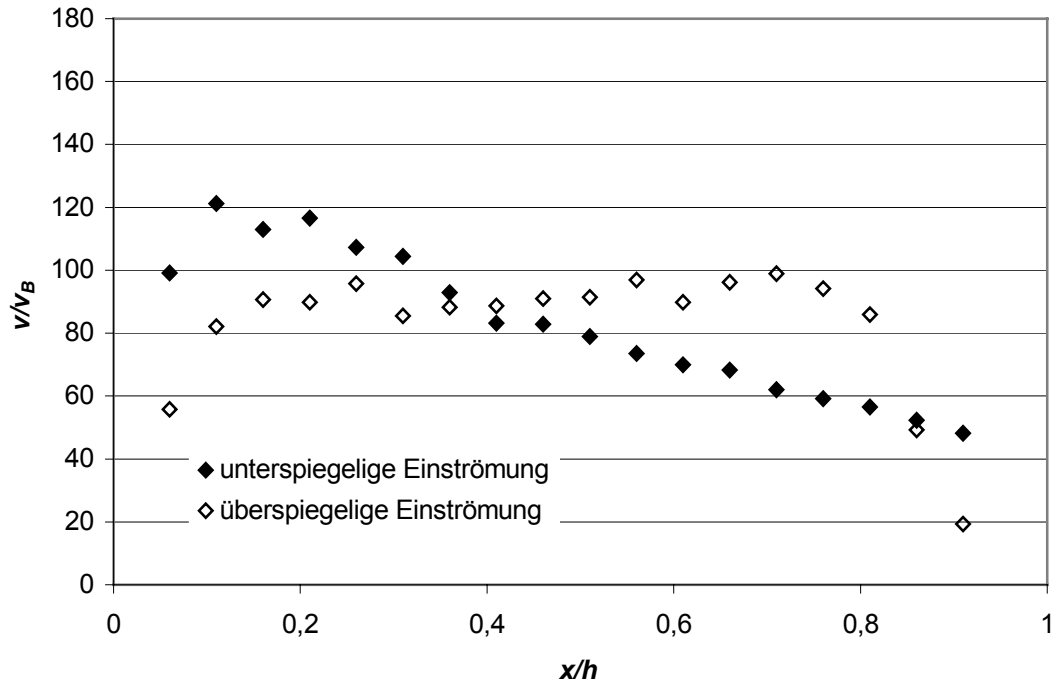


Abbildung 5: Axialer Verlauf der radialen Geschwindigkeitskomponente zwischen Wärmeaustauscher ($x/h=0$) und Klöpperboden ($x/h=1$)

Die vorgestellten Kurvenverläufe weichen signifikant voneinander ab. Bei der Fluidaufgabe unterhalb des Flüssigkeitsspiegels bildet sich zwischen Klöpperboden und Wärmeaustauscher ein Geschwindigkeitsprofil aus, wie es qualitativ in ähnlicher Form bei 180° Krümmern auftritt, siehe auch [6]. Vom Boden in Richtung Wärmeaustauscher steigt die Strömungsgeschwindigkeit aufgrund des negativen Druckgradientens an und erreicht dann ein Maximum. Die anschließende Abnahme von v lässt sich auf die beginnende Ablösung der Strömung in radiale Richtung zurückführen.

Beim überspiegeligen Einströmen zeigt sich ein kolbenförmiges Geschwindigkeitsprofil. Als Ursache dafür erweist sich der Feistral an der Behälterinnenwand, dieser überlagert die Einlaufströmung des Wärmeaustauschers. Die Geschwindigkeitsabnahme an den Rändern entsteht wie bei der unterspiegeligen Fluidaufgabe durch den Druckgradienten über dem betrachteten Querschnitt bzw. aufgrund der Strömungsbilösung. Während nun der Wärmeaustauschereintritt bei der Fluidaufgabe unterhalb des Flüssigkeitsspiegels nahezu als Senke fungiert, so wird er bei der alternativen Variante angeströmt. Bei der letzteren Konfiguration liegt eine ausgeprägte partielle Kurzschlussströmung vor, wie sich dies auch mit Hilfe des Tracer-Verfahrens zeigen lässt.

Zusammenfassung

Während der Würzekochung, einem essentiellen Produktionsschritt bei der Herstellung von Bier, treten eine Vielzahl von chemischen Reaktionen und Stoffaustauschvorgängen statt. Diese finden unter anderem in der Würzpfanne mit Innenkocher statt, einem zylindrischen Behälter mit einem zentrisch angeordneten Rohrbündelwärmeaustauscher, der im Naturumlauf arbeitet. Für eine homogene, thermische und mechanische Behandlung des Produktes und der damit verbundenen Stoffkonversionen erweist sich die Strömung im Behälter von überaus großer Bedeutung.

Im Rahmen dieser Arbeit erfolgt erstmalig die experimentelle Untersuchung eines Freistrahls in einer Würzpfanne mit Innenkocher im Technikummaßstab durch den Einsatz von LDA. Der Strahl strömt bei der ersten Aufgabeveriante vom Wärmeaustauscher und einer Umlenkung radial als zweiphasiges Dampf-Flüssigkeitsgemisch in die Matrixflüssigkeit ein. Bei der zweiten Aufgabeform gelangt der Strahl von der Umlenkvorrichtung zunächst in den Brüdenraum, um dann nahezu einphasig in die Matrixflüssigkeit einzutreten. Nach durchgeführten numerischen Strömungsberechnungen legt sich der Strahl bei beiden Varianten nach dem Auftreffen auf die Behälterinnenwand an diese an und strömt in Richtung Eintritt Wärmeaustauscher.

Die Geschwindigkeitsmessungen an der Innenwand des Behälters weisen beim unterspiegeligen Einströmen (Subjet) auf einen verbesserten Impulsaustausch mit der Matrixflüssigkeit hin. Dies äußert sich in einem deutlich stärker abfächenden Geschwindigkeitsprofil mit zunehmender Einströmlänge an der Wand. Während sich der Subjet am Eintritt des Wärmeaustauscher nicht mehr detektieren lässt, ist dieser bei überspiegeliger Aufgabe deutlich zu erkennen. Technologisch erweist sich die letztere Konfiguration als nachteilig, da vom Austritt zum Eintritt des Wärmeaustauschers eine partielle Kurzschlussströmung vorliegt, welche eine inhomogene thermische und mechanische Behandlung des Produktes fördert. Die Ermittlung der genaueren Ursachen des unterschiedlichen Strahlverhaltens erfordern zusätzliche Messungen der radialen und tangentialen Geschwindigkeitskomponenten sowie die Auswertung der zeitabhängigen Geschwindigkeitswerte.

Literatur

- [1] Michel, R.A., Vollhals, B.: Dynamic Wort Boiling. MBAA TQ 40 (2003) 1, 25/29.
- [2] Mezger, R., Krottenthaler, M., Back, W.: Moderne Würzekochsysteme- ein Überblick. Brauwelt (2003) 4/5, 93/99.
- [3] Mitani, Y., Tamaka, T.: Estimation of hydrodynamic behavior in a wort boiling kettle with an internal boiler. MBAA TQ 34 (1997) 2, S. 85/90.
- [4] Baars, A., Werner, F., Delgado, A.: Numerische Untersuchung der Strömung in einer Würzpfanne während der thermischen Würzebehandlung. LVT 45 (2000) 4, 203/206.
- [5] Delgado, A., Baars, A., Herbster, T.: Improvement of wort treatment in a kettle with an internal natural boiler. Proc. 29th EBC Congress. Dublin 2003.
- [6] Sudo, K., Sumida, M., Hibara, H.: Experimental investigation on turbulent flow through a circular-sectioned 180 degrees bend. Experiments in Fluids 28 (2000), 51/57.

Ganz herzlich danken wir der Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen „Otto von Guericke“ e.V. (AiF) und der Wissenschaftsförderung der Deutschen Brauwirtschaft e.V. für die finanzielle Förderung dieses Forschungsvorhabens.