

Lehrstuhl für Fluidmechanik und
Prozessautomation

Name der Forschungsstelle(n)

13008 N /

AiF-Vorhaben-Nr. / GAG

01.08.01 bis 31.07.03

Bewilligungszeitraum

Schlußbericht für den Zeitraum : 01.08.01 bis 31.07.03

zu dem aus Haushaltsmitteln des BMWi über die



geförderten Forschungsvorhaben

Forschungsthema :

Realisierung einer technologiegerechten Durchströmung der Würzpfanne
mit Innenkocher durch gezielte Modifikation der Geometrie

Freising, den 27.10.03

Ort, Datum

Unterschrift der/des Projektleiter(s)

1	ZUSAMMENFASSUNG	3
2	AUSGANGSSITUATION UND MOTIVATION	4
3	LÖSUNGSKONZEPT	4
3.1	ANGESTREBTE FORSCHUNGSERGEBNISSE.....	6
3.2	METHODISCHER ANSATZ.....	6
3.2.1	<i>Theoretisch-numerisches Verfahren</i>	6
3.2.2	<i>Experimentelle Methoden und Materialien</i>	7
3.3	ERZIELTE FORSCHUNGSERGEBNISSE	12
3.3.1	<i>Numerische Simulation</i>	12
3.3.2	<i>Tracer Verfahren</i>	13
3.3.3	<i>LDA Messungen und Vergleich Experiment – Numerische Simulation</i>	15
3.3.4	<i>Würzpfanne mit Innenkocher – industrieller Maßstab</i>	21
3.3.5	<i>Ausblick</i>	21
4	WIRTSCHAFTLICHE BEDEUTUNG FÜR KLEINE UND MITTLERE UNTERNEHMEN	21
5	VERÖFFENTLICHUNGEN	22
6	FÖRDERUNG	23
7	BIBLIOGRAPHISCHE DATEN	23
7.1	AiF-MITGLIEDSVEREINIGUNG	23
7.2	DURCHFÜHRENDE FORSCHUNGSSTELLEN.....	23
8	LITERATURVERZEICHNIS	24

1 Zusammenfassung

Das Ziel dieses Forschungsprojektes besteht in der Realisierung einer technologiegerechten Durchströmung der Würzepfanne mit Innenkocher durch geometrische Veränderung der Würzeumlenkung am Staukonus. Die technologischen Anforderungen an die Strömung in der Würzepfanne bestehen in der guten Vermischung von zugegebenen Stoffen (Hopfen, Sauergerut) mit dem Pfanneninhalt sowie einer homogenen thermischen und mechanischen Behandlung der Würze während der Kochung. Die Realisierung der letzteren Anforderung führt zu einer effizienteren Austreibung von unerwünschten Aromastoffen und daher zu einer geringeren Verdampfung, einer Reduzierung des Primärenergieeinsatzes sowie einer Einsparung an Betriebskosten. Die Umsetzung dieser Anforderungen erfolgt mit Hilfe des Zwei-Zonen-Modells. Dieses sieht vor, im oberen Pfannenbereich eine Mischzone einzurichten und im unteren Abschnitt eine kolbenförmige Strömung. Durch die realisierte geometrische Veränderung des Würzeaustritts strömt das Flüssigkeits-Dampf-Gemisch als unterspiegeliger Strahl (Submerged Jet, abgekürzt: Subjet) aus dem Innenkocher radial unterhalb der Flüssigkeitsoberfläche aus. Durch die dabei entstehende Sprudelschicht verlängert sich zudem die Kontaktzeit der Dampfblasen mit der umgebenden Flüssigkeit. Dies unterstützt den Transport von unerwünschten Aromastoffen aus der Flüssigkeit in die Dampfphase.

Das besondere Augenmerk des Projektes liegt auf der Strömung in der Würzepfanne. Die Untersuchungen erfolgen mit Hilfe der numerischen Simulation und einer Würzepfanne mit beheizten Innenkocher im Technikummaßstab. Bei den eingesetzten Messmethoden handelt es sich um die Laser Doppler Anemometrie (LDA) und dem Tracer Verfahren. Beide Verfahren werden erstmalig weltweit von der involvierten Forschungsstelle in einer realen Würzepfanne mit Innenkocher eingesetzt

Im Einzelnen wurden folgende besonders wichtige Ergebnisse erzielt:

- Unabhängig der Art der Würzeaufgabe, herkömmlich über den Würzeschirm oder als Subjet, bildet sich in der Würzepfanne ein Großraumwirbel aus, den der jeweilige Freistrah antreibt.
- Bei der herkömmliche Würzeaufgabe liegt eine deutliche Kurzschlussströmung vor, die sich eindeutig mit Hilfe des Tracerverfahrens und der LDA-Messungen nachweisen lässt. Hierbei strömt ein Teil der Strahlflüssigkeit vom Würzeschirm über die Behälterwand der Würzepfanne direkt wieder in den Innenkocher hinein. Diese inhomogene Würzebehandlung wirkt einer gleichmäßigen Würzequalität entgegen und führt zu einer ineffizienten Ausdampfung unerwünschter Aromastoffe.
- Die Einströmung als Subjets lässt mit den eingesetzten Messmethoden keine Kurzschlussströmung in der Würzepfanne erkennen. Durch den längeren Weg des Strahls durch die Flüssigkeit und die zum Teil vorliegende zweiphasige Strömung weitet sich der Strahl bis zum Innenkocher deutlich auf. Dies kommt der Kolbenströmung im Zwei-Zonen-Modell nahe ebenso wie die Mischwirkung in der Sprudelschicht.
- Bei der konstruktiven Gestaltung der Würzeumlenkung für den Subjet erweist sich die Austrittsbreite des Strahls für das Betriebsverhalten des Innenkochers und für die Strömung in der Würzepfanne von großer Bedeutung. Die komplexen Vorgänge im Innenkocher erfordern eine experimentelle Anpassung dieser Größe an die technologiegerechte Durchströmung der Pfanne.

Die realisierte einfache und nachrüstbare geometrische Modifizierung des Würzeaustritts führt zu einer homogenen und damit technologiegerechteren Durchströmung der Würzepfanne. Das Ziel des Vorhabens wurde somit erreicht.

Das entwickelte System besitzt überdies ein hohes Potenzial zur Verringerung des Energieeinsatzes sowie der notwendigen thermischen Behandlungszeit. Bei spezifischer Auslegung und Betrieb bietet das studierte System darüber hinaus die Möglichkeit der aktiven Schaumvermeidung. Die Realisierung adaptiver Prozessführungstrajektorien würde indessen es ermöglichen, die Würzekochung zu einem Minimal Processing Verfahren weiter zu entwickeln, wodurch sich erhebliche Ressourceneinsparungen eröffnen würden.

2 Ausgangssituation und Motivation

Ein zentraler Produktionsschritt bei der Herstellung von Bier ist das Kochen der Würze. Hierfür stehen dem Brauer verschiedene Kochsysteme zur Verfügung. Eines davon ist das in der industriellen Praxis mit großem Abstand am häufigsten eingesetzte System „Würzepfanne mit Innenkocher“. Dieser Apparat besteht aus einem zylindrischen Behälter großer Ausdehnung, in dem ein Rohrbündelwärmetauscher konzentrisch angeordnet ist. In den senkrechten Rohren des Wärmetauschers strömt die Würze durch Naturumlauf von unten nach oben, verdampft teilweise, wird über den Flüssigkeitsspiegel gehoben und mittels des Würzeleitschirms als Freistrahler auf die Würzeoberfläche umgelenkt.

Das Kochen der Würze ist ein energieintensiver und für die Qualität des fertigen Bieres entscheidender Produktionsschritt. Die Brauwirtschaft ist daher interessiert diesen Prozess und seine Kochsysteme permanent zu verbessern, mit dem Ziel der Kosteneinsparung bei gleicher oder verbesserter Produktqualität. Zahlreiche Veröffentlichungen [1-13, 26] auf diesem Gebiet geben darüber Auskunft.

Während des Kochprozesses finden in der Würze zusätzlich zu den Wärmeaustauschprozessen zahlreiche chemische Reaktionen und Stoffaustauschvorgänge statt, die einen nachhaltigen Einfluß auf den Geschmack und die Stabilität des Bieres ausüben [16]. Eine grundlegende Aufgabe eines Kochsystems ist es daher, definierte Randbedingungen einzustellen, damit diese Reaktionen und Vorgänge gezielt ablaufen können. Die strömungs- und wärmetechnischen Vorgänge erweisen sich bei der Würzekochung als entscheidende Randbedingungen für die chemischen Reaktionen und die Stoffaustauschvorgänge. Sie zeigen sich verantwortlich für die Gleichmäßigkeit der Würzebehandlung und die Höhe der thermischen Belastung. Bisher bestanden für das in der Praxis weitverbreitete Kochsystem „Würzepfanne mit Innenkocher“ aber nur wenige Kenntnisse über diese Vorgänge. Im Forschungsvorhaben B49 der Wissenschaftsförderung der Deutschen Brauwirtschaft erfolgte daher eine systematische Untersuchung der Einflüsse von Geometrie- und Prozeßgrößen auf die Strömung in der Würzepfanne und auf die Vorgänge im Innenkocher. Der Abschlußbericht [17] zeigt auf, dass die Art der Würzeaufgabe vom Staukonus aus den größten Einfluss auf die Durchströmung der Würzepfanne ausübt. Durch eine gezielte Modifikation des Würzeaustritts ergibt sich ein erhebliches Potential für verbesserte Produktqualitäten und Energieeinsparung. Als zentrales Ziel dieses Vorhabens lässt sich daher die Entwicklung einer technologiegerechten Strömung in der Würzepfanne mit Innenkocher durch gezielte Geometriemodifikationen des Würzeaustritts definieren.

3 Lösungskonzept

Der Lösungsansatz sieht vor, dass in [17] entwickelte Zwei-Zonen-Modell in der Würzepfanne mit Innenkocher zu realisieren, siehe Abbildung 1. Im oberen Bereich der Pfanne befindet sich hierbei idealerweise die Mischzone, im unteren die Kolbenströmungszone. In der Mischzone mischen sich zugegebene Stoffe (Hopfen, Sauergerut) mit dem Pfanneninhalt durch die heftige Strömungsbewegung. Sie bildet die Voraussetzung für Reaktionen zwischen Eiweißstoffen und Polyphenolen, die zur Bruchbildung führt [14-16]. Die anschließende Zone der Kolbenströmung führt zu einer gleichmäßigen Durchströmung dieses Pfannenabschnitts, so dass eine homogene

Würzebehandlung vorliegt. Je größer die Zone mit der Kolbenströmung ausfällt, desto gleichmäßiger erfolgt die thermische Behandlung der Würze. Es erweist sich als sinnvoll die Mischzone im oberen Pfannenbereich anzuordnen, um dort den Impulsstrom des Freistrahls für das Mischen zu nutzen.

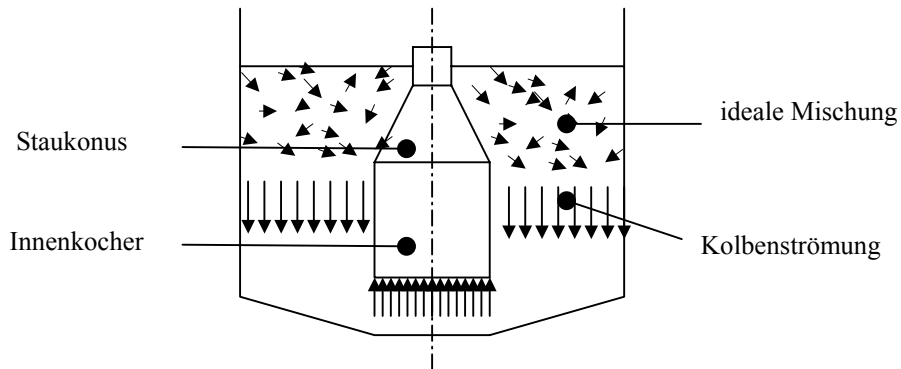


Abbildung 1: Zwei-Zonen-Modell nach [17]

Bei dem konventionellen Kochsystem Würzpfanne mit Innenkocher entsteht im Behälterraum ein Großraumwirbel. Hierbei liegt eine partielle Kurzschlussströmung infolge des über Würzeleitschirm und Flüssigkeitsoberfläche eintretenden Freistrahls vor [17]. Die Minimierung der Kurzschlussströmung und die Einrichtung einer Strömung in der Würzpfanne, die dem Zwei-Zonen-Modell nahe kommt, erfordert einen intensiveren Impulsaustausch zwischen Strahl und Würze im oberen Pfannenbereich. Es ist daher vorgesehen, das aus dem Staukonus austretende Fluid unterhalb des Würzespiegels horizontal in Form eines Freistrahls (Submerged Jet, hier kurz als Subjet bezeichnet) einströmen zu lassen, siehe Abbildung 2a. Durch eine geeignete Konstruktion der Würzeumlenkvorrichtung (Abbildung 2b) kann die Würzeaustrittsfläche gezielt eingestellt werden, um Einfluss auf die Strahlgeschwindigkeiten zu nehmen. Zum Anderen handelt es sich bei dem Freistrahls um eine zweiphasige Strömung. Infolge der geringeren mittleren Dichte wird der Freistrahls in Richtung Flüssigkeitsoberfläche umgelenkt und somit die kinetische Energie umverteilt. Wechselwirkungen zwischen Flüssigkeit und Dampf reduzieren die Eindringtiefe des Strahls gegenüber einem reinen einphasigen Medium und

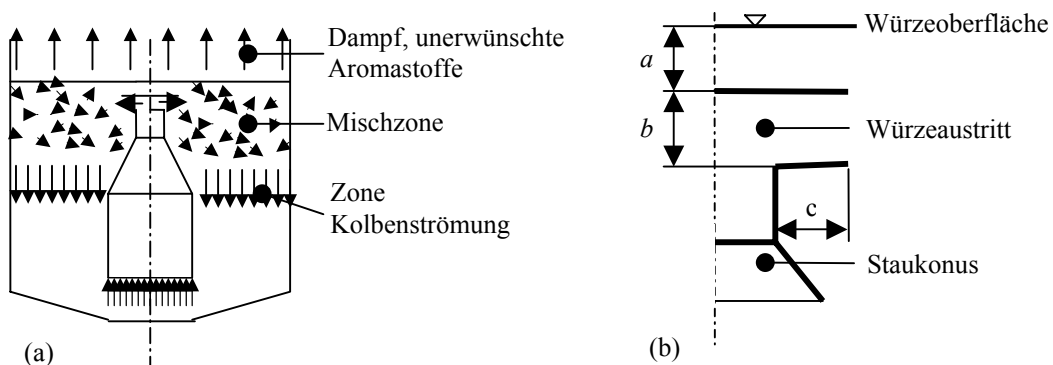


Abbildung 2: (a) Realisierung des Zwei-Zonen-Modells, (b) Würzeumlenkvorrichtung

damit die Kurzschlussströmung.

3.1 Angestrebte Forschungsergebnisse

Das Hauptforschungsziel dieses Projektes lässt sich aus der Fragestellung

„Wie lässt sich eine technologiegerechte Durchströmung der Würzepfanne mit Innenkocher realisieren, um die Produktqualität zu erhöhen und die Ressourcen zu schonen?“ ableiten.

Das angestrebte Forschungsergebnis beinhaltet das Erarbeiten einer geometrischen Modifikation des Würzeaustritts am Innenkocher um eine technologiegerechte Durchströmung der Würzepfanne nach dem Zwei-Zonen-Modell zu realisieren. Dies bedeutet eine Reduzierung der Betriebskosten infolge der Verminderung des Energieeintrags verbunden bei verbesserter Produktqualität. Es ist vorgesehen eine einfache konstruktive Veränderung des Innenkochers zu entwickeln, die kostengünstig und leicht nachrüstbar ist.

Würze stellt ein Vielstoffgemisch dar, dessen Zusammensetzung in Abhängigkeit der eingesetzten Rohstoffe stark schwankt. Zudem finden während der Kochung eine Vielzahl von chemischen Reaktionen und Stoffaustauschvorgängen parallel statt. Das Forschungsvorhaben zielt demgemäß nicht darauf ab, die Reaktions- und Stoffübertragungsmechanismen im Detail zu beschreiben. Sehrwohl aber können Aussagen über strömungstechnische Randbedingungen getroffen werden, die einen verbesserten Stoffaustausch sowie gleichmäßigere Reaktionen nach sich ziehen.

3.2 Methodischer Ansatz

Die Umsetzung der oben formulierten Forschungsziele erfolgt mit

- **theoretischen-numerischen Verfahren:** Entwicklung einer neuen Geometrie des Würzeaustritts am Staukonus mit dem Werkzeug der „Numerischen Simulation“ .
- **experimentellen Methoden:** Realisierung der modifizierten Geometrie des Würzeaustritts am Staukonus in einem Modellversuchsstand.

Der ständige Austausch zwischen Experiment und Theorie und die daraus resultierenden Verbesserungen der Lösungsmethoden schaffen ein tiefes physikalisches Verständnis bezüglich der ablaufenden fluidmechanischen Vorgänge, das zur Erreichung des formulierten Forschungsziels führt.

3.2.1 Theoretisch-numerisches Verfahren

Die Entwicklung einer veränderten Geometrie des Würzeaustritts erfolgt zeitgleich zu der experimentellen Vorgehensweise mit dem Werkzeug der „Numerischen Simulation“. In vielen Bereichen (z.B. Verfahrenstechnik, Automobilindustrie, Luft- und Raumfahrttechnik) ist die Numerik als zeitsparende und kostengünstige Methode voll etabliert, um strömungsmechanische Probleme zu lösen. Für den Bereich des Brauwesens

wurde dieses Werkzeug erstmalig von der involvierten Forschungsstelle im Rahmen des Projektes B49 [17-21] eingesetzt.

Für die Berechnungen findet das kommerzielle Programm CFX 4.2 der Firma AEA Technology Einsatz. Dieses arbeitet nach dem finite Elemente Verfahren. Die Berechnung erfolgt für eine inkompressible, instationäre, zweiphasige und turbulente Strömung. Für die Modellierung der turbulenten Strömung dient das k - ϵ -Modell. Die Berechnung der zweiphasigen Strömung im Würzeaustritt und im oberen Pfannenbereich erfolgt mit dem Multi-Fluid-Modell. Zudem wird eine rotationssymmetrische Strömung im Behälter angenommen. Die Voraussetzung für die Berechnung stellt die Definition der Geometrie der Würzefanne dar sowie die Erstellung eines Berechnungsgitters, siehe Abbildung 3.

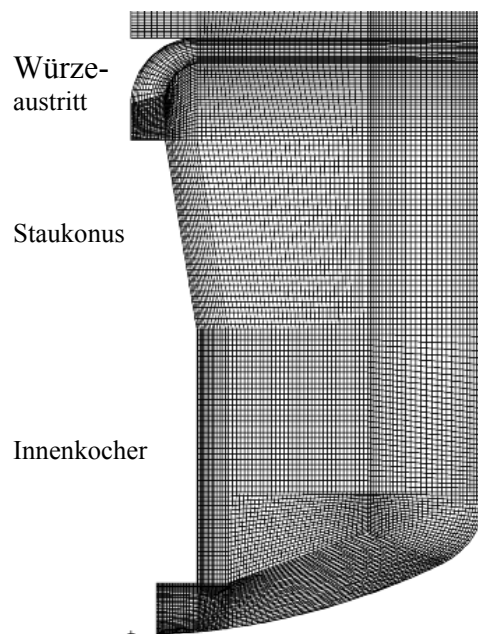


Abbildung 3:
Berechnungsgitter der
Würzefanne mit
Innenkocher im
Technikummaßstab

Die berechnete Würzefanne weist die identischen Abmessungen wie die der Würzefanne im Technikummaßstab (siehe nachfolgendes Kapitel) auf. Die Topologie des Gitters richtet sich nach der Geometrie der Würzefanne und der in ihr herrschenden Strömung. Orte mit höheren Geschwindigkeitsgradienten - wie an Wänden und den Randbereichen des austretenden Strahls - weisen ein verdichtetes Gitter auf mit dem Ziel einer genaueren Berechnung. Der Numeriker gibt den Flüssigkeits- und Gasvolumenstrom im Würzeaustritt vor. Den Flüssigkeitsvolumenstrom erhält er aus Messungen an der Würzefanne im Technikummaßstab, der Gasvolumenstrom wird abgeschätzt.

3.2.2 Experimentelle Methoden und Materialien

Die experimentellen Untersuchungen der Strömung finden in einer im Rahmen des vorliegenden Vorhabens eigens konzipierten Würzefanne mit Innenkocher im Technikummaßstab statt. Die Wahl dieses Maßstabs gegenüber dem kleineren Labormaßstab erweist sich für die Übertragbarkeit der Ergebnisse als erforderlich ebenso wie der Einsatz eines dampfbeheizten Innenkochers. Dieses System wird im Rahmen des

Projektes in enger Zusammenarbeit mit dem Anlagenhersteller (Hrch. Huppmann GmbH, Kitzingen) so ausgeführt, dass die Möglichkeit besteht, verschiedene invasive und nicht-invasive Messtechniken einzusetzen. Zudem ist die Würzpfanne so gestaltet, dass sich die Einbauten (Innenkocher, Staukonus, Würzeumlenkvorrichtung) leicht ersetzen und modifizieren lassen. Als Werkstoff findet hochlegierter Stahl Verwendung.

Abbildung 4 stellt die Versuchsanlage Würzpfanne mit Innenkocher vor. Das System besteht aus der Würzpfanne, Innenkocher, Pfannendunstkondensator sowie der Steuer-, Regel- und Messdatenerfassungseinheit.

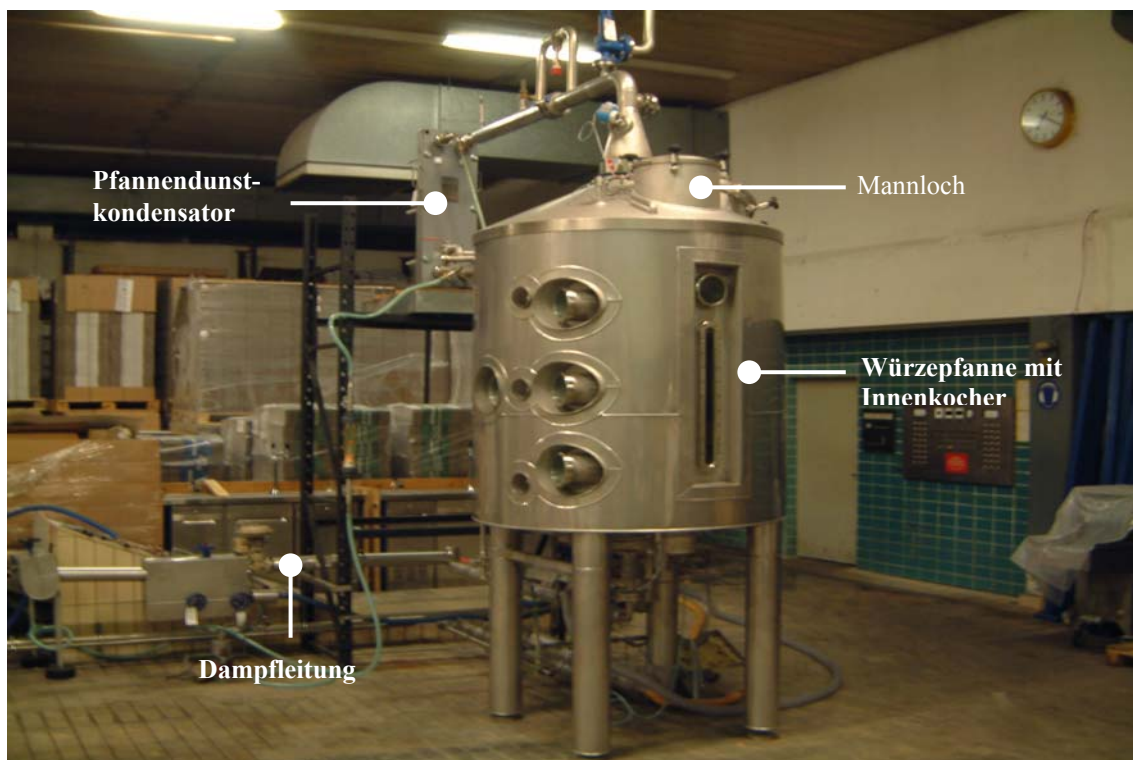


Abbildung 4: Würzpfanne mit Innenkocher im Technikummaßstab in der Staatsbrauerei Weihenstephan

Würzpfanne. Die Würzpfanne fasst ein Volumen von 18 hl. Der Durchmesser der Zarge beträgt 1,4 m und ihre Höhe 1,25 m. Zarge sowie die Klöpperböden der Pfanne verfügen über Schaugläser unterschiedlicher Ausführungen für den Einsatz insbesondere optischer Messmethoden wie LDA, PIV, Lichtschnitt. Zudem ermöglichen zahlreiche Muffen auf verschiedenen Höhen die Anwendung invasiver Verfahren. Zwei runde Mannlöcher im oberen Klöpperboden dienen der Zugänglichkeit des Innenraums und dem Austausch von Komponenten, der Einbringung von Sensoren sowie der Reinigung. Die Auslegung des Behälters lässt einen maximalen Druck im Brüdenraum von 1,5 bar bei einer Temperatur von 112 °C zu. Die Isolierung der Pfanne reduziert die Wärmeabgabe an die Umgebung und wirkt der Ausbildung von Temperaturgradienten an der Behälterinnenwand sowie der damit verbundenen überlagerten freien Konvektion im Behälter entgegen.

Innenkocher, Staukonus, Würzeumlenkung. Zentrisch in der Pfanne angeordnet befindet sich der modular aufgebaute Innenkocher mit Staukonus und Würzeumlenkung. Der Innenkocher ist ein dampfbeheizter Rohrbündelwärmeaustauscher, in dem rohrseitig Würze strömt. Der Apparat verfügt über 30 Rohre mit einem Innendurchmesser von 29 mm und einer Länge von 0,5 m. Durch die Flanschverbindung der Dampfzuführung am unteren Klörperboden lässt sich der Innkocher ausbauen. Die Verbindung vom Staukonus zum Innenkocher und der Würzeumlenkung erfolgt durch Klemmringe, was die Möglichkeit eröffnet einzelne Komponenten auszutauschen. Die Würzeumlenkung zeigt Abbildung 5.

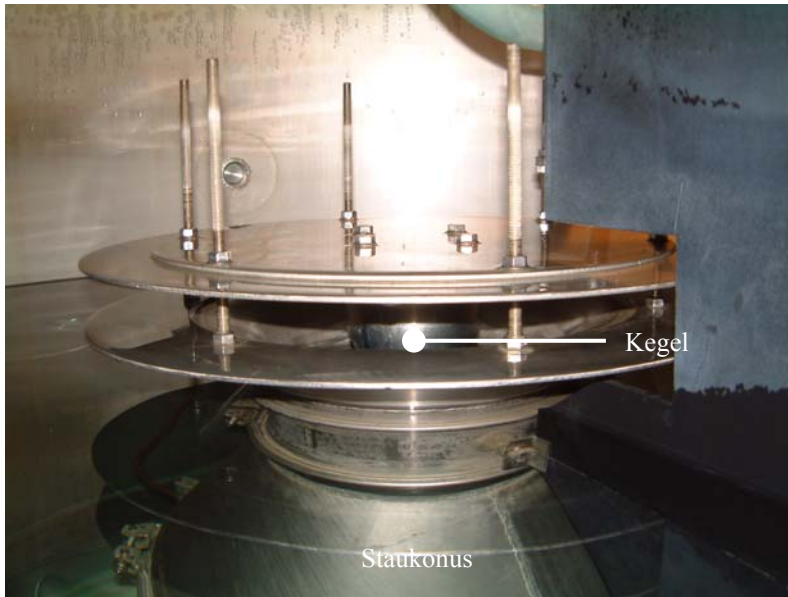


Abbildung 5:
Würzeumlenkung

Der abgerundete Kegel und die bogenförmige Umlenkung der Berandung vermindern Strömungsablösungen, was die mechanische Belastung der Würze herabsetzt. Durch vier Gewindestangen lässt sich die Austrittshöhe b der Umlenkung einstellen.

Pfannendunstkondensator. Dieser ist als Plattenwärmeaustauscher ausgeführt. Die Brüden aus der Würzepfanne kondensieren dort und fließen dann wahlweise wieder der Würzepfanne zu oder verlassen das Würzekochsystem. Erstere Möglichkeit findet bei der Versuchsdurchführung Anwendung, um über längere Zeiträume konstante Versuchsbedingungen (konstanter Flüssigkeitsspiegel in der Würzepfanne) zu erzielen. Wasser dient als Kühlmedium.

Sensoren, Messdatenerfassung, Regelung. Die Anlage verfügt über folgende Sensoren:

Physikalische Größe	Messort
Temperatur	Eintritt Innenkocher
Druck	Brüdenraum
	Heizdampfzuleitung
Differenzdruck	Klörperböden
Elektrische Leitfähigkeit	Zarge

Eine Messkarte erfasst die Messsignale aller Sensoren. Mittels eines Rechners findet die Speicherung und Aufbereitung der Daten statt. Die Anlage verfügt über zwei Regelkreisläufe. Die Regelung des Drucks im Brüdenraum erfolgt über den Zufluss des Kühlwassers im Pfannendunstkondensator und der des Heizdampfes über ein Drosselventil in der Dampfleitung. Die Regelung selbst übernehmen Softwareregler.

Versuchsdurchführung. Alle Versuche beginnen, nach dem im Brüdenraum reine Sattdampf Atmosphäre vorliegt, und die Temperatur am Innenkochereintritt sowie die Drücke im Brüdenraum und des Heizdampf nach Einstellung der Parameter über 20 min annähernd konstante Werte aufweisen. Tabelle 1 gibt die Parameter mit den jeweiligen untersuchten Einstellbereichen an.

Tabelle 1: Untersuchte Parametereinstellungen

Parameter		Einstellbereich
Brüdenraumdruck	p_B	1 bar
Heizdampfdruck	p_{HD}	1,6...2,4 bar
Höhe Flüssigkeitsspiegel	L_S / L_Z	0,666; 0,824
Austrittshöhe Würzeumlenkung	b	20; 40; 60 mm

Die Drücke sind als Absolutwerte angegeben, bei der Höhe des Flüssigkeitsspiegel L_S handelt es sich um den Abstand vom Beginn der Zarge (unterer Klörperboden) bis zur Flüssigkeitsoberfläche. Die Größe L_Z bezeichnet die Zargenlänge. Mit Hilfe des niedrigeren Flüssigkeitsstands lässt sich die herkömmliche Würzezuströmung darstellen, mit dem höheren die unterspiegelige Einströmung, den Subjet (siehe Abbildung 6).

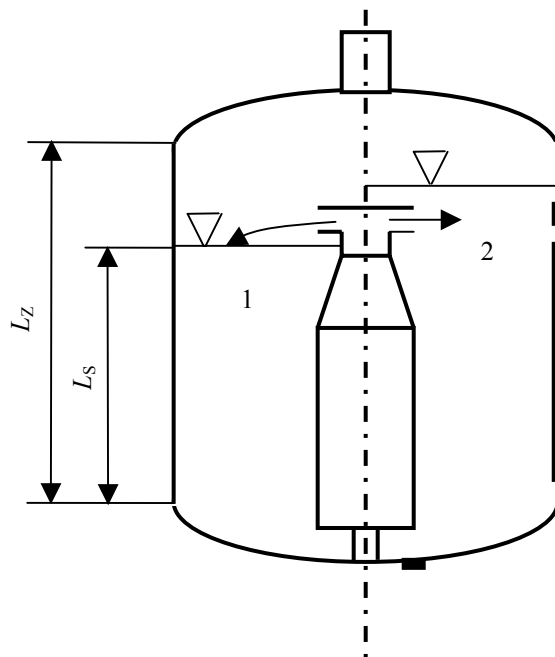


Abbildung 6: Herkömmliche Einströmung oberhalb des Flüssigkeitsspiegels (1), unterspiegelige Einströmung als Subjet (2)

Tracer Verfahren. Mit Hilfe dieses Verfahrens lässt sich die Ausbreitung eines Stoffes in der Würzpfanne untersuchen. Dazu führt der Experimentator zum Zeitpunkt t_0 ein definiertes Volumen einer gesättigten NaCl-Lösung der zweiphasigen Strömung im Staukonus zu. Ein Sensors zur Bestimmung der elektrischen Leitfähigkeit (InPro 7010, Mettler-Toledo) detektiert am Einbauort die vorbeiströmende Salzlösung. Der Sensor befindet sich in der Zarge bei $z/L_Z=0,44$, siehe Abbildung 7.

Als Ergebnis erhält man den zeitlichen Verlauf der Leitfähigkeit $\sigma(t)$. Zum besseren Verständnis erfolgt die Darstellung der Ergebnisse in dimensionsloser Form $\sigma^*(t^*)$.

$$\sigma^* = \frac{\sigma(t) - \sigma_0}{\sigma_\infty - \sigma_0} \quad ; \quad t^* = \frac{t \dot{V}}{V}$$

Die Größe σ_0 bezeichnet die elektrische Leitfähigkeit der Flüssigkeit in der Pfanne vor Beginn der Aufgabe der Lösung und σ_∞ die nach unendlicher Zeit nach Aufgabe der Lösung. Dementsprechend bewegt sich die Größe $\sigma(t)$ vom Wert 0 asymptotisch auf den Wert 1 zu. Den Flüssigkeitsvolumenstrom in der Pfanne symbolisiert \dot{V} und das Flüssigkeitsvolumen V . Der Quotient dieser beiden Größen V/\dot{V} stellt die Zeit für die vollständige Umwälzung der Würze in der Pfanne bei Kolbenströmung dar.

Laser Doppler Anemometrie. Dieses Verfahren wird im Brauwesen weltweit erstmalig eingesetzt. Es ermöglicht auf optischem Wege mit Hilfe zweier gekreuzter Laserstrahlen und eines Tracers im Fluid Strömungsgeschwindigkeiten zu messen. Daraus erwächst der Vorteil, dass bis auf den Tracer keine Störung der Strömung durch das Messverfahren vorliegt. Bei dem eingesetzten Messsystem handelt es sich um eine 1-Kanal Anlage der Firma TSI. Die Geschwindigkeitsmessung erfolgt auf drei verschiedenen Höhen z/L_Z (0,2; 0,32; 0,44) in der Zarge und im unteren Klöpperboden zwischen Boden und der Außenwand des Innenkochers, siehe Abbildungen 7 und 8. Die Messungen finden nur im rein flüssigkeitsdurchströmten Bereich der Würzpfanne statt.

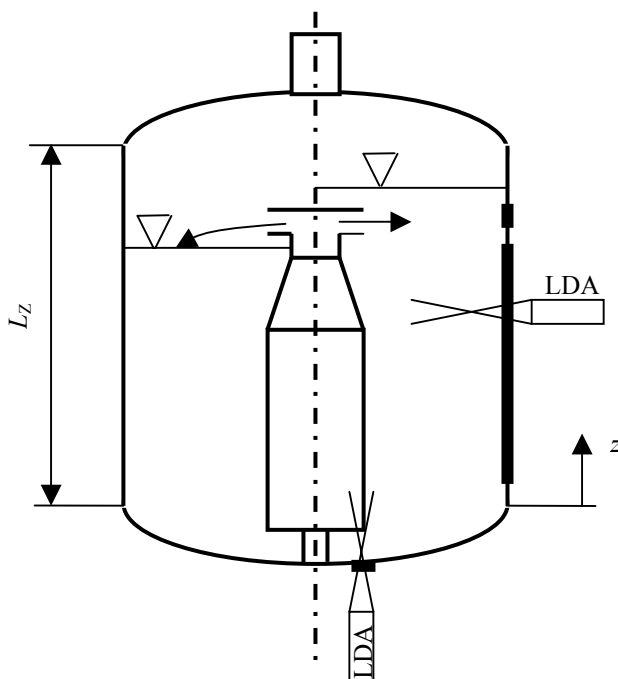


Abbildung 7: Messorte in der Zarge und im Klöpperboden für das Tracer-Verfahren und für LDA

In der Zarge erfolgt die Ermittlung des axialen Geschwindigkeitsprofils und im im Boden die des radialen (siehe Pfeile in Abbildung 7). Die Messtiefe von den Außenwänden in Richtung Behältermitte beträgt 100 mm aufgeteilt auf 10 Messorte. In der Zarge wird über einem Zeitraum von 600 s an jedem Messpunkt die Geschwindigkeiten aufgenommen und im Boden jeweils 1000 Messwerte. Aus den Daten lassen sich die zeitlich gemittelte Geschwindigkeit berechnen

$$u = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} \Delta t_i u_i}{\sum_{i=1}^{i=n} \Delta t_i} .$$

Die Größen u_i und Δt_i bezeichnen den einzelnen Messwert der Geschwindigkeit bzw. den Abstand zwischen zwei Messwerten und n ihre Anzahl.

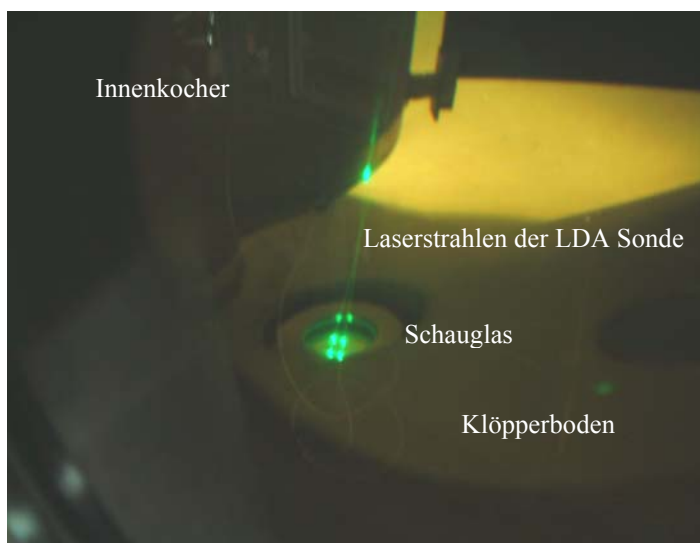


Abbildung 8: Messort im Klöpperboden mit Laserstrahlen der LDA-Sonde

3.3 Erzielte Forschungsergebnisse

3.3.1 Numerische Simulation

Um zunächst einen Überblick über die Strömung in der betrachteten Würzepfanne mit Innenkocher zu geben, zeigt Abbildung 9 das numerisch berechnete Strömungsfeld in einem radialen Schnitt. Die Pfeile in der Darstellung kennzeichnen Größe und Richtung der Strömungsgeschwindigkeit in Flüssig- und Dampfphase, die farbige Unterlegung den Volumenanteil der beiden Phasen (rot – reine Flüssigphase, blau – reine Dampfphase).

Das Würze-Dampf-Gemisch strömt aus der Würzeumlenkvorrichtung im Vergleich zur Flüssigkeit in der Pfanne mit hoher Geschwindigkeit. Während sich die Strahlflüssigkeit in radiale Richtung auf die Behälteraußenwand bewegt, erfährt sie zudem zunächst eine axiale Richtungsänderung zum Brüdenraum hin. Als Ursachen lassen sich die Auftriebskraft infolge der geringeren Strahldichte im Vergleich zur umgebenden Flüssigkeit sowie die am Innkocher axial zuströmende Flüssigkeit anführen. Bis zur Behälteraußenwand scheiden sich die Blasen von der Strahlflüssigkeit weitestgehend ab,

die dann in axiale Richtung umgelenkt wird und als nahezu einphasiger Strahl an der Behälterwand in Richtung Eintritt Innenkocher strömt. Infolge des Impulsaustausches zwischen dem Strahl und der angrenzenden Flüssigkeit bewegt sich auf den Eintritt des Innenkochers ein größerer Volumenstrom zu als der, der in ihn hineinströmt. Daher fließt ein Teil des Volumenstroms in den Wärmeaustauscher und ein Teil außen am Innenkocher zurück in Richtung Brüdenraum. Es entsteht ein Großraumwirbel.

Zunächst ergeben sich qualitativ im Vergleich zum herkömmlichen Würzekochsystem mit überspiegeliger Einströmung keine Unterschiede des Strömungsbildes, da bei beiden Systemen der Großraumwirbel vorliegt. Die nachfolgend vorgestellten experimentellen Ergebnisse zeigen auf, dass erhebliche Veränderungen durch die Verlegung des Würzeaustritts unter die Flüssigkeitsoberfläche (Subjet) auftreten.

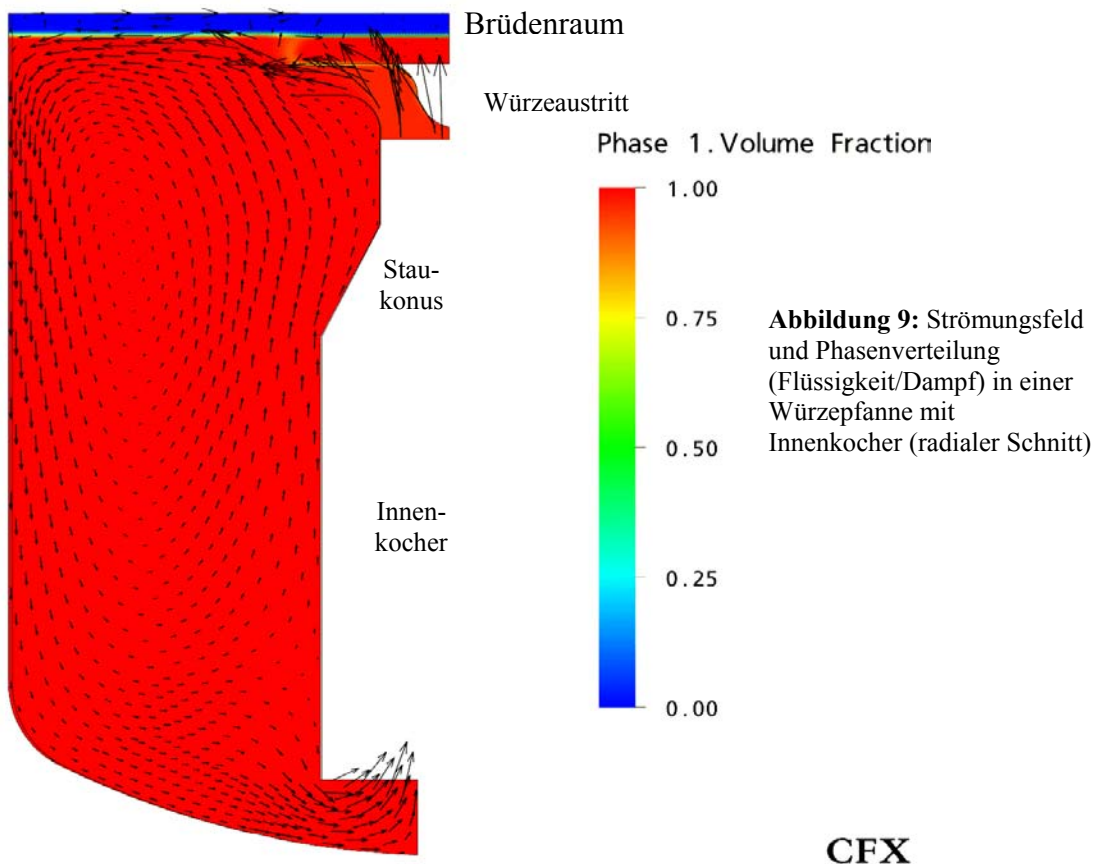


Abbildung 9: Strömungsfeld und Phasenverteilung (Flüssigkeit/Dampf) in einer Würzpfanne mit Innenkocher (radialer Schnitt)

3.3.2 Tracer Verfahren

Abbildung 10 illustriert das Verhalten der elektrischen Leitfähigkeit und somit die Ausbreitung eines im Staukonus aufgegebenen Stoffes in der Würzpfanne in Abhängigkeit der Zeit für die Fälle überspiegelige Würzeaufgabe und Subjet. Die Kurve der ersten Parameterkonstellation (herkömmliche Würzeaufgabe) weist ein periodisches Verhalten auf. Deutlich lassen sich drei regelmäßig nacheinander auftretende Maxima erkennen. Die Amplituden der Maxima nehmen mit fortschreitender Zeit überproportional ab. Die Kurve bewegt sich dabei asymptotisch auf den Wert Eins zu, der bei der Zeit $t^* = 0,35$ annähernd vorliegt.

Der beschriebene Kurvenverlauf resultiert vorwiegend aus dem konvektiven Stofftransport in der Würzepfanne. Die zum Zeitpunkt $t^* = 0$ im Staukonus aufgegebene Markierflüssigkeit gelangt über die Würzeumlenkung in den Brüdenraum, tritt dann nahe der Behälterwand in die Flüssigkeit ein und legt sich als Strahl an diese an. Sie strömt dort in Richtung Eintritt Innenkocher und passiert dabei erstmalig den Leitfähigkeitssensor. Da der Sensor direkt in der Wand liegt, lässt sich davon ausgehen, dass dieser fast ausschließlich die Leitfähigkeit der Strahlflüssigkeit detektiert. Infolge dessen erscheint bei $t^* = 0,04$ das erste und absolute Maximum. Die Tracerflüssigkeit bewegt sich weiter, frische Flüssigkeit ohne Tracer kommt am Messort nach, so dass σ^* wieder absinkt und bei $t^* = 0,095$ ein lokales Minimum erreicht. Über den weiteren Weg der Tracerflüssigkeit in den Innenkocher, durch ihn hindurch bis zum Sensor vermischt sich diese mit der Matrixflüssigkeit in der Würzepfanne. Die Höhe des zweiten Maximums wie auch die des dritten Maximums fällt dadurch jeweils deutlich geringer aus, da die Salzkonzentration abnimmt. Nach der Zeit $t^* = 0,35$ hat sich die zugegebene Tracerflüssigkeit fast vollständig mit dem Pfanneninhalt vermischt.

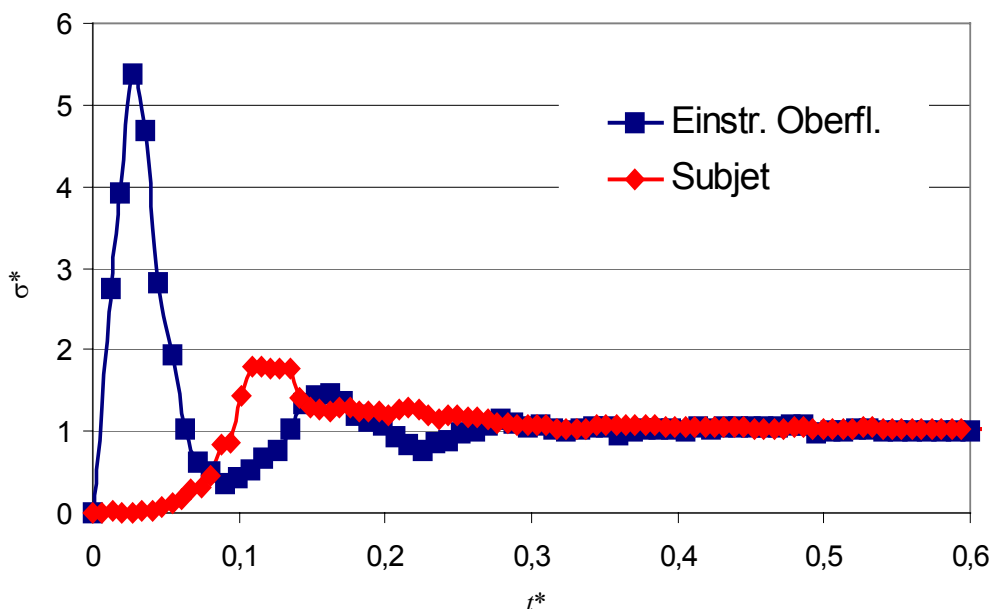


Abbildung 10: Zeitlicher Verlauf der elektrischen Leitfähigkeit für überspiegelige Einstromung und Subjet in dimensionsloser Form ($p_{HD} = 2,2$ bar, $b = 40$ mm)

Technologisch betrachtet lässt der Kurvenverlauf der überspiegeligen Einstromung auf eine ungleichmäßige thermische und mechanische Behandlung der Würze schließen. Die drei Maxima treten bei Zeiten $t^* < 1$, daher bevor die Würze in der Pfanne bei homogener Durchströmung (Kolbenströmung) eine vollständige Umwälzung erfährt. Dementsprechend gibt es Würzelemente, die mehrmals den Innenkocher passieren, während andere ausschließlich im Ringraum der Würzepfanne verbleiben. Als Ursache erweist sich eine partielle Kurzschlussströmung in der Pfanne: Ein Teil des Strahls aus der Würzeumlenkung gelangt über die Innenwand der Würzepfanne direkt wieder in den Innenkocher hinein.

Im Vergleich zur überspiegeligen Einstromung zeigt der Subjet einen deutlich veränderten Kurvenverlauf, siehe Abbildung 10. Die Leitfähigkeit σ^* verbleibt zunächst unverändert

beim Ausgangswert bis sie dann überproportional ansteigt und das absolute Maximum mit der Form eines Plateaus erreicht. Von dort aus bewegt sie sich von oben kommend asymptotisch auf den Wert Eins zu, den sie ebenfalls bei $t^* = 0,35$ annähernd erreicht.

Das absolute Maximum des Subjets tritt deutlich später und mit einer geringeren Höhe im Vergleich zur überspiegeligen Einströmung auf. Als Ursache lässt sich einerseits der längere Weg des Subjets durch die Flüssigkeit von der Würzeumlenkung bis zum Sensor nennen. Hierdurch liegt zwischen Strahl und umgebender Flüssigkeit eine längere Kontaktzeit für Impuls- und Stoffaustausch vor. Zum Anderen führt die zweiphasige Strömung beim Subjet zu einer Intensivierung dieses Austauschs. Das ausgeprägt flache Maximum des Subjets weist auf einen Stoffaustausch längs der Hauptströmungsrichtung hin.

Beim Subjet lässt sich im Vergleich zur herkömmlichen Einströmung keine Kurzschlussströmung mit Hilfe dieses Messverfahrens detektieren. Technologisch führt der Subjet demnach zu einer gleichmäßigeren thermischen und mechanischen Behandlung der Würze. Da nur bei der Würze die Austreibung unerwünschter Aromastoffe erfolgt, die durch den Innkocher hindurchströmt, lässt sich mit dem Subjet eine effizientere Abtrennung und somit über eine niedrigere Verdampfung eine Reduzierung des Energieeintrags realisieren. Bei den Zeiten zur Mischung des Tracers mit dem Pfanneninhalt liegen keine signifikanten Unterschiede zwischen den Aufgabeformen der Würze vor.

Die Ursache des unterschiedlichen Stofftransports in der Würzefanne je nach Würzaufgabe liegt im Strömungsfeld in der Würzefanne. Das nachfolgende Kapitel beleuchtet dies.

3.3.3 LDA Messungen und Vergleich Experiment – Numerische Simulation

Abbildung 11 zeigt das zeitliche Verhalten der Strömungsgeschwindigkeit in der Würzefanne, gemessen vom Zargenschauglas aus.

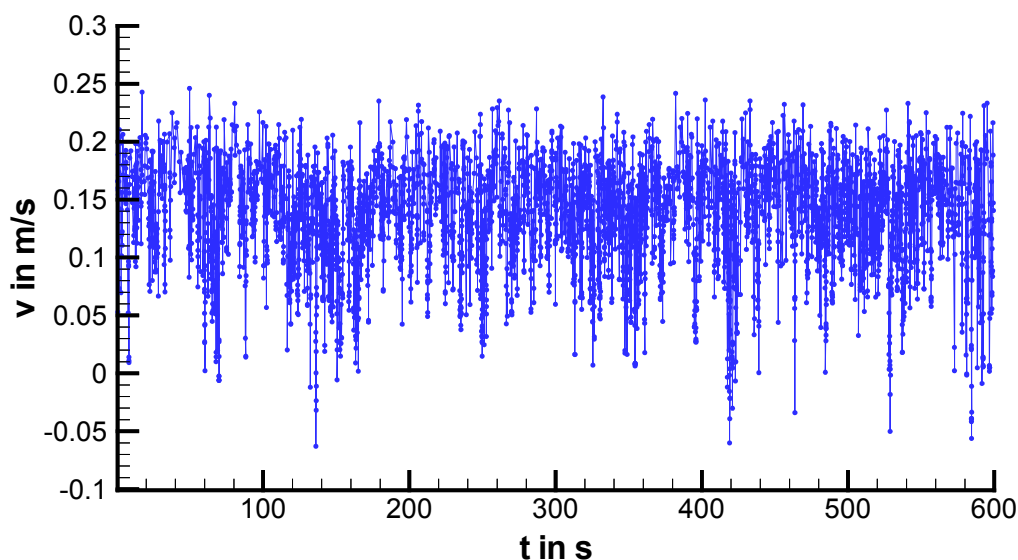


Abbildung 11: Zeitlicher Verlauf der Strömungsgeschwindigkeit in der Würzefanne gemessen vom Zargenschauglas aus (Subjet, $z/L_z = 0,44$, $p_{HD} = 2$ bar)

Das Diagramm verdeutlicht die Größenordnung der Geschwindigkeit, die in der Würzpfanne vorliegt. Zudem lassen sich größere Geschwindigkeitsschwankungen auf erkennen, wie sie aus Strömungen in großen Räumen z.B. in der Klimatechnik bekannt sind. Die ausgeprägten Schwankungen ergeben sich hier u.a. aus dem thermodynamischen Zustand des Fluids in der Pfanne in Verbindung mit Störungen des Druckes im Brüdenraum: Die Flüssigkeit in Wandnähe des Innenkochers, an der Flüssigkeitsoberfläche und in Teilen des Innkochers/Staukonus befindet sich im Siedezustand. Kleine Druckschwankungen im Brüdenraum durch Störeinflüsse von außen (Volumenstrom des Kühlwassers, Heizdampfdruck) führen zur Blasengenerierung oder dem Kollabieren. Das beeinflusst einerseits über das Betriebsverhalten des Innenkochers und andererseits über die Störung durch Blasenbildung und Kondensation im Ringraum die dort auftretende Strömung. Die Geschwindigkeitsschwankungen selbst fördern den Impuls- und Stofftransport zwischen Strahl und angrenzender Flüssigkeit.

Betrachtet man nun die axialen Geschwindigkeitsprofile des Freistrahls an der Innenwand der Würzpfanne und trägt diese für beide Einströmarten sowie unterschiedliche Messorte z/L_Z und Austrittsbreiten b dimensionslos auf, so ergibt sich die in Abbildung 12 dargestellte Kurve.

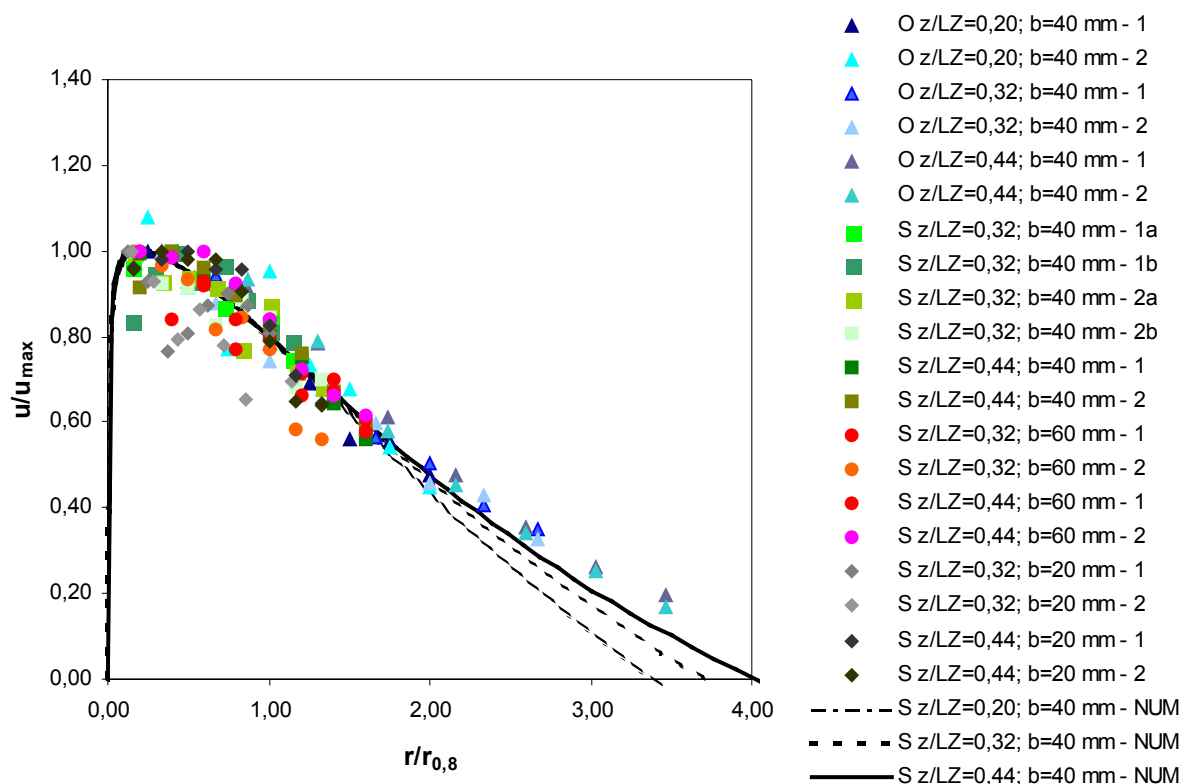


Abbildung 12: Geschwindigkeitsprofil des Freistrahls an der Innenwand der Würzpfanne (Zarge) dimensionslos dargestellt bei $p_{HD} = 2$ bar für verschiedene Messhöhen z/L_Z , Austrittsbreiten b und Einströmarten (S...Subjet, O...herkömmliche Einströmung über die Oberfläche, NUM...Numerische Simulation)

Die Größe u bezeichnet die axiale Strömungsgeschwindigkeit, d.h. die Geschwindigkeitskomponente, die parallel zur Innenwand der Würzpfanne verläuft und senkrecht auf der Flüssigkeitsoberfläche steht. Die Koordinate r steht senkrecht auf der Innenwand der Würzpfanne und zeigt in Richtung des Innkochers. Bei $r = 0$ befindet sich

die Innenwand. Die Geschwindigkeit u ist auf die jeweils maximale Geschwindigkeit eines gemessenen bzw. berechneten Profils u_{\max} bezogen und der Ort r auf den Abstand von der Innenwand $r_{0,8}$, an dem 80 % der jeweiligen maximalen Geschwindigkeit u_{\max} vorliegt. Dieser Art der Auftragung bedient man sich in der Strömungsmechanik bei Grenzschichtströmungen, siehe [22].

Zunächst fällt auf, dass sich die dargestellten Messpunkte unabhängig von der Art der Einströmung, der Messhöhe in der Zarge sowie der Austrittsbreite der Würzeumlenkung für $r/r_{0,8} < 1,5$ um eine einzige Kurve gruppieren. Diese Selbstähnlichkeit zeigen ebenfalls Geschwindigkeitsprofile von Plattengrenzschichten oder von Freistrahlen, die in eine ruhende Flüssigkeit bzw. entlang einer Platte strömen. Die Kurve weist bei $r/r_{0,8} = 0$ aufgrund der Haftbedingung die Geschwindigkeit Null auf. Mit wachsender Koordinate steigt u zunächst an, erreicht ein Maximum, um dann wieder abzufallen.

Die berechneten Geschwindigkeitsprofile (Numerische Simulation) und die experimentell ermittelten Daten zeigen eine gute Übereinstimmung. Die Kurven der numerischen Simulation verdeutlichen, dass die Selbstähnlichkeit der Geschwindigkeitsprofile nur über einem bestimmten Bereich von $r/r_{0,8}$ vorliegt. Für $r/r_{0,8} > 1,5$ divergieren sie. Eine mögliche Erklärung dafür liegt im dort einsetzenden Übergang vom Freistrahls zum Großraumwirbel, da bei diesen keine Selbstähnlichkeit vorliegt.

Der Vergleich zwischen gemessenen Geschwindigkeitsprofilen eines ebenen Wandstrahls von Swamy et al. [23] und Eriksson et al. [24], der in eine ruhende Flüssigkeit einströmt mit den eigenen Ergebnissen präsentiert Abbildung 13.

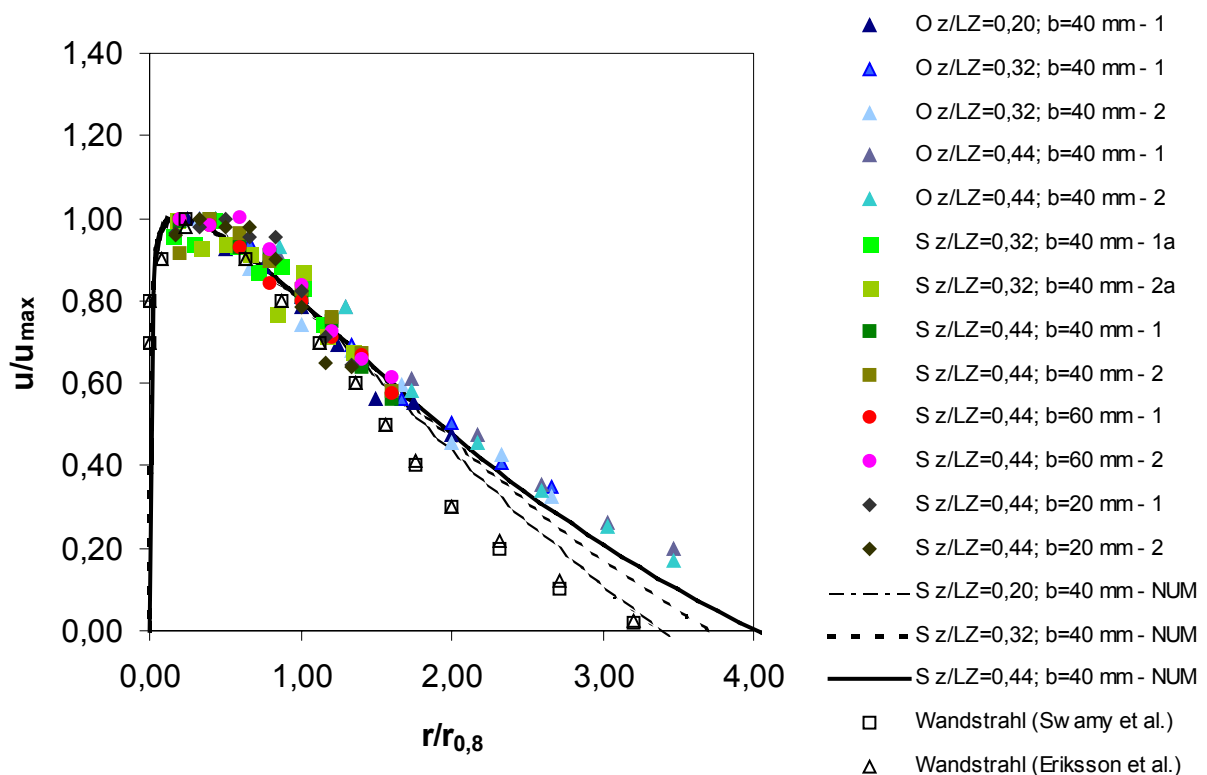


Abbildung 13: Vergleich der Geschwindigkeitsprofile von ebenen Wandstrahlen in eine ruhende Flüssigkeit (Swamy et al. [23], Eriksson et al. [24]) mit denen in der Würzepfanne mit Innenkocher

Die Kurven des ebenen Wandstrahls unterscheiden sich erkennbar ab $r/r_{0,8} = 1,5$ von denen des Strahls in der Würzepfanne. Der Geschwindigkeitsverlauf des ebenen Wandstrahls weist teilweise eine deutlich größere negative Steigung auf, so dass die Werte von u/u_{\max} im Vergleich niedriger liegen. Dies lässt sich auf die unterschiedlichen Randbedingungen der Strahlen zurückführen. Während die ebenen Wandstrahlen aus [23, 24] in eine ruhende Flüssigkeit einströmen, grenzt der Strahl in der Würzepfanne von einer Seite an einen Großraumwirbel, dessen Geschwindigkeitskomponente im Berührungsbereich weitestgehend in Richtung des Strahls zeigen. Zudem handelt es sich strenggenommen um keinen ebenen Strahl. So geht der Freistrah in der Würzepfanne nahtlos in den Wirbel über. Das Geschwindigkeitsprofil lässt sich daher grundsätzlich in zwei Bereiche aufteilen, den des Freistrahls und den des Großraumwirbels. Freistrah und Wirbel interagieren miteinander. Der Freistrah wechselwirkt mit dem Wirbel und erhält ihn aufrecht. Die Existenz des Wirbels führt dazu, dass der Strahl im Vergleich zur ruhenden Flüssigkeit weniger kinetische Energie an die umgebende Flüssigkeit abgibt. Daher weitet sich der Strahl mit wachsender Einströmtiefe weniger stark auf und dringt tiefer in den Behälter ein, was die Kurzschlussströmung und damit eine inhomogene Behandlung der Würze fördert.

Die Aufweitung des Strahls in Abhängigkeiten der Einströmlänge stellt ein Maß für den Impuls- und Stoffaustausch zwischen Strahl und umgebender Flüssigkeit dar. Je größer die Aufweitung ausfällt, desto größer ist der Austausch und je geringer fällt die Kurzschlussströmung aus. Abbildung 14 gibt die Strahlbreite bei 80 % der maximalen Geschwindigkeit $r_{0,8}$ in Abhängigkeit der Einströmlänge x in dimensionsloser Form wieder. Die Größe x bezeichnet den axialen Abstand zwischen Flüssigkeitsoberfläche und Messort in der Zarge.

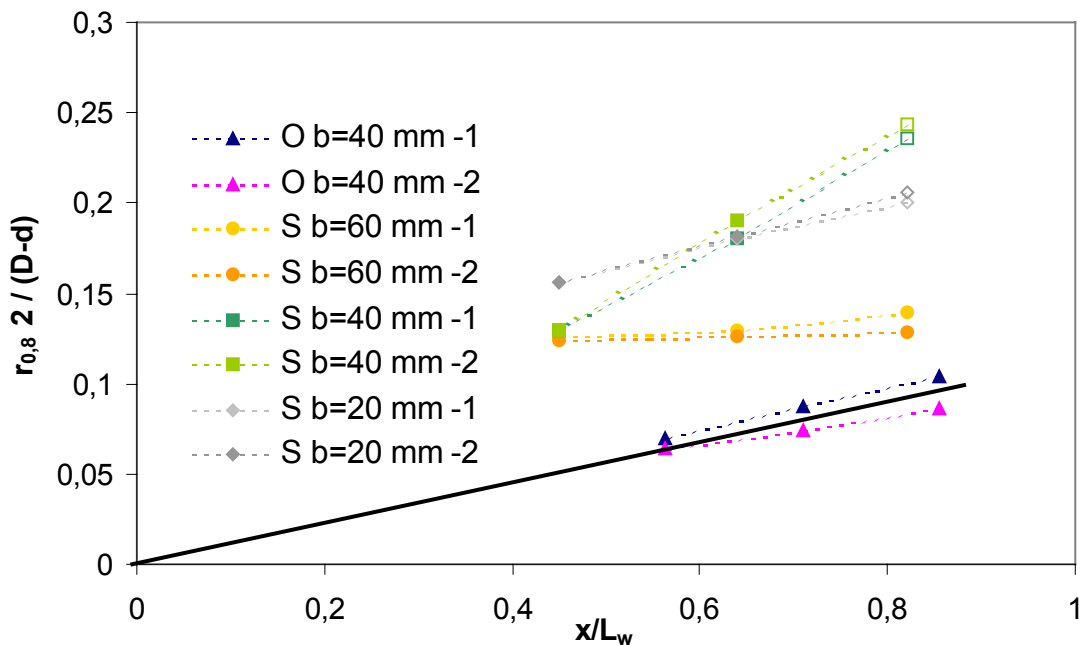


Abbildung 14: Breite des Freistrahls bei 80 % der maximalen Geschwindigkeit $r_{0,8}$ in Abhängigkeit der Einströmlänge x in dimensionsloser Darstellung bei $p_{HD} = 2$ bar für die herkömmliche Einströmung (O) und den Subjet (S) (D ...Durchmesser Würzepfanne, d ... Durchmesser Innenkocher, L_w ...Höhe Flüssigkeitsspiegel)

Während die Parameter Art der Einströmung und Austrittsbreite keine erkennbaren Unterschiede bei den dimensionslos dargestellten Geschwindigkeitsprofilen hervorrufen, so ändert sich dies deutlich bei der Betrachtung der Strahlbreite. Wie auch bei den Geschwindigkeitsprofilen, lassen sich auch bei dieser Größe die Messungen mit guter Genauigkeit reproduzieren. Bei der herkömmlichen überspiegeligen Einströmung nimmt mit zunehmender Einströmlänge x die Breite des Strahls linear zu und schneidet bei Extrapolation den Nullpunkt. Das steht in guter Übereinstimmung mit der Literatur [22], die bei einem ebenen Wandstrahl jedoch für die Einströmung in eine ruhende Flüssigkeit eine lineare Zunahme der Strahlbreite angibt.

Die Datenpunkte des Subjets bei $x/L_W = 0,83$ sind linear extrapoliert, da dort die Messtiefe der LDA Sonde in radiale Richtung nicht ausreichte, um einen Geschwindigkeitsabfall von 80 % der maximalen Strömungsgeschwindigkeit zu detektieren. Im Vergleich zur herkömmlichen Einströmung liegt $r_{0,8}$ beim Subjet sichtbar höher, die Steigung der Kurven fällt jedoch in Abhängigkeit der Austrittsbreite der Würzeumlenkung b unterschiedlich aus. Bei $b = 0,4$ ergibt sich die maximale, bei $b = 0,6$ die geringste Steigung.

Die größere Strahlbreite des Subjets im Vergleich zur herkömmlichen Einströmung bei gleichem x lässt sich mehreren Ursachen zuschreiben. Zum Einen legt der Subjet eine längere Wegstrecke von der Würzeumlenkvorrichtung bis zum Ort x zurück, wodurch sich eine längere Kontaktzeit für Impuls- und Stoffaustausch zwischen Strahl und umgebende Flüssigkeit ergibt. Zudem liegt auf dem Weg teilweise eine zweiphasige Strömung vor, die zu einer Intensivierung der Austauschvorgänge beiträgt.

Die Interpretation des Einflusses der Austrittsbreite b auf $r_{0,8}$ erfordert die Berücksichtigung des Betriebsverhalten des Innenkochers. Mit abnehmenden Werten für b steigt der Druckverlust am Austritt des Kochers an. Dementsprechend nimmt in dem eingestellten Parameterbereich der in den Innenkocher eintretende Massenstrom ab, die Verweilzeit des Flüssigkeit im Kocher und der verdampfte Massenstrom zu. An der Würzeumlenkung liegen höhere Strömungsgeschwindigkeiten des Flüssigkeits-Dampf-Gemisch, ein größerer Massenanteil an Dampf und ein geringerer Volumenstrom an Flüssigkeit vor. So zeigen visuelle Beobachtungen, dass bei $b = 20$ mm das zweiphasige Gemisch bis nahe der Behälterwand strömt während bei $b = 60$ mm die Abscheidung der Dampfblasen noch in der Würzeumlenkvorrichtung erfolgt.

Technologisch erweist sich im untersuchten Parameterbereich die Austrittsbreite von $b = 40$ mm beim Subjet am geeignetsten um einer Kurzschlussströmung entgegenzuwirken, da die Strahlbreite pro Weglänge im Vergleich am meisten zunimmt und an der untersten Messstelle in der Zarge ($z/L_Z = 0,20$) die im Vergleich größte Breite aufweist. Je mehr sich der Strahl aufweitet desto flacher ist sein Geschwindigkeitsprofil, und je mehr nähert sich die Strömung im unteren Bereich der Würzepfanne der Kolbenströmung an. So nähert sich im oberen Bereich der Würzepfanne die Strömung der Mischströmung und im unteren der Kolbenströmung an, was dem Zwei-Zonen-Modell entspricht. Die Mischzone im oberen Bereich der Würzepfanne fördert neben dem Impulsaustausch den Stoffaustausch insbesondere von unerwünschten Aromastoffen von der Flüssigphase in die Gasphase infolge einer längeren Verweilzeit der Blasen in der Flüssigkeit.

Der Strahl strömt entlang der Zarge und erfährt dann am Klöpperboden eine Richtungsänderung um einen Winkel von 90° . Er bewegt sich dann nahezu radial auf den Innenkochereintritt zu. Abbildung 15 präsentiert die Geschwindigkeitsprofile für die herkömmliche Einströmung und den Subjet. Die Auftragung erfolgt dimensionslos. Bei $h/L_K = 0$ befindet sich der Innenkocher, bei $h/L_K = 1$ der Klöpperboden.

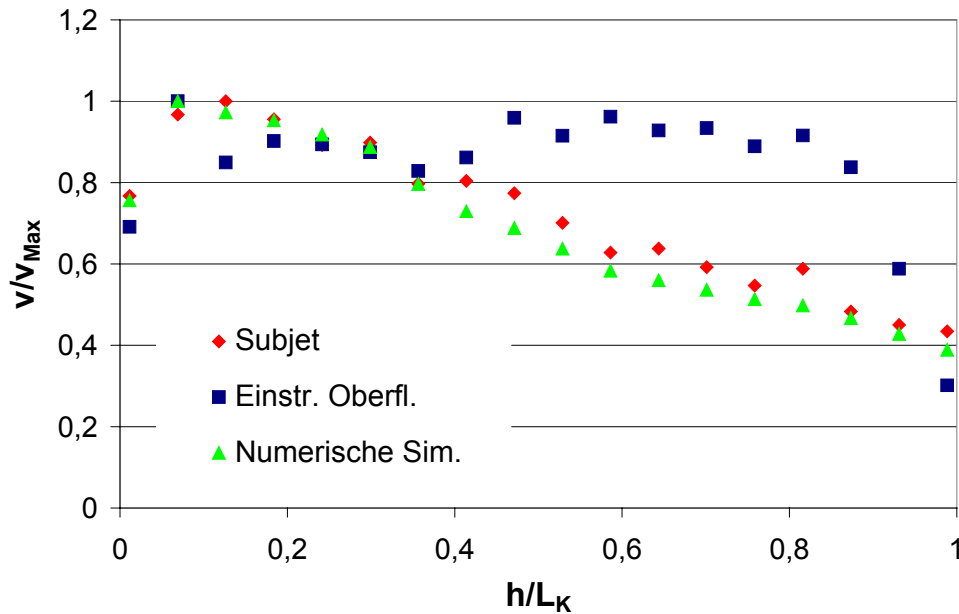


Abbildung 15: Geschwindigkeitsprofil der radialen Geschwindigkeitskomponente zwischen Innenkocher und Klöpperboden bei $p_{HD} = 2$ bar und $b = 40$ mm (L_K ...Abstand Innenkocher – Klöpperboden)

Die vorgestellten Kurvenverläufe weichen signifikant voneinander ab. Beim Subjet bildet sich zwischen Klöpperboden und Wärmeaustauscher ein Geschwindigkeitsprofil aus, wie es qualitativ in ähnlicher Form bei 180° Krümmern auftritt, siehe auch [27]. 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. Der Vergleich von numerisch Berechneten und experimentell ermittelten Daten zeigt eine gute Übereinstimmung.

Bei der herkömmlichen Einströmung zeigt sich ein kolbenförmiges Geschwindigkeitsprofil. Als Ursache dafür erweist sich der Feistrahls an der Behälterinnenwand, dieser überlagert die Einlaufströmung des Innenkochers. Die Geschwindigkeitsabnahme an den Rändern entsteht wie bei der unterspiegeligen Fluidaufgabe durch den Druckgradienten über dem betrachteten Querschnitt bzw. aufgrund der Strömungablösung. Während nun der Eintritt des Innenkochers bei der Fluidaufgabe unterhalb des Flüssigkeitsspiegels nahezu als Senke fungiert, so wird er bei der herkömmlichen Würzeaufgabe infolge des durchschlagenden Freistrahls angeströmt. Bei der herkömmlichen Anströmung liegt daher eine ausgeprägte Kurzschlussströmung vor, was die Ergebnisse des Tracer-Verfahrens bestätigen.

Die Würzeaufgabe mit Hilfe des Subjets lässt mit den eingesetzten Messmethoden keine Kurzschlussströmung erkennen und führt im Vergleich zum herkömmlichen System zu

einer homogeneren thermischen und mechanischen Würzebehandlung. Daraus lässt sich eine effektivere Austreibung unerwünschter Aromastoffe bei einer geringeren Eindampfung von Wasser ableiten. Dementsprechend ergibt sich eine Einsparung an Primärenergie und die Reduzierung der Betriebskosten.

3.3.4 Würzefanne mit Innenkocher – industrieller Maßstab

Die Simulation der einphasigen Strömung in einer Würzefanne mit Innenkocher industriellen Maßstabs bestätigt die Erkenntnisse aus den experimentellen Untersuchungen. Mittels eines Tracers, der dem Fluid aus dem Innenkocher zugegeben wird, zeigt sich beim Subjet im Vergleich zur herkömmlichen Einströmung eine deutlich reduzierte Kurzschlussströmung und damit eine homogenere Würzebehandlung, siehe [17]. Eine detailliertere konstruktive Gestaltung der Würzeumlenkung durch das eingesetzte numerische Werkzeug erweist sich jedoch nach den Erkenntnissen aus den experimentellen Untersuchungen als nicht möglich. Wie die Versuche bei unterschiedlichen Austrittsbreiten b der Würzeumlenkung zeigen, reagiert der geförderte Massenstrom ebenso wie der Massenstromdampfanteil am Austritt des Innenkochers zum Teil sehr deutlich auf Veränderungen der Größe b . Dies erfordert die Simulation des Betriebsverhaltens des Innenkochers, was jedoch dieses Projekt nicht vorsieht. Eine orts- und zeitaufgelöste numerische Simulation der zweiphasigen Strömung mit Phasenänderung in Wärmeaustauschern ist zur Zeit noch Gegenstand intensiver Forschung. Die bisherigen Erkenntnisse vermitteln jedoch, dass sich der Subjet mit den genannten Vorteilen für den Prozessschritt der Würzekochung im industriellen Maßstab einsetzen lässt. Die Geometrie des Würzeaustritts, insbesondere die Austrittsbreite, ist entsprechend experimentell anzupassen, was jedoch zur Zeit auch bei der herkömmlichen Einströmung üblich ist.

3.3.5 Ausblick

Das entwickelte System verfügt über ein hohes Potenzial zur Verringerung des Energieeinsatzes sowie der notwendigen thermischen Behandlungszeit. Bei spezifischer Auslegung und Betrieb bietet das studierte System darüber hinaus die Möglichkeit der aktiven Schaumvermeidung. Die Realisierung adaptiver Prozessführungstrajektorien würden es indessen ermöglichen, die Würzekochung zu einem Minimal Processing Verfahren weiter zu entwickeln, wodurch sich erhebliche Ressourceneinsparungen eröffnen würden. Die konsequente Weiterführung des Projektes besteht daher in der gezielten Untersuchung von Reaktionen und Stoffaustauschvorgängen während der Würzekochung zur Ermittlung von geeigneten Prozessführungstrajektorien.

4 Wirtschaftliche Bedeutung für kleine und mittlere Unternehmen

In Deutschland sind 93 % der Brauereien kleine und mittelständische Unternehmen. Für diese Zielgruppe wird durch das vorliegende Forschungsvorhaben eine Entwicklung betrieben, die sich dadurch auszeichnet, dass die Produktqualität gesteigert und die

Herstellungskosten reduziert werden. Eine technologiegerechte Durchströmung der Würzpfanne führt zu einer verbesserten Produktqualität bei kürzerer Kochzeit und gleichzeitiger Reduzierung der Verdampfungsziffer. Dies drückt sich in einem verminderten Energieeinsatz aus, der eine Reduzierung der Kosten nach sich zieht.

Bei der geplanten Entwicklung nimmt die Nachrüstbarkeit bei geringen Investitionskosten eine zentrale Stellung ein. Die geometrischen Modifikationen des weit verbreiteten Kochsystems „Würzpfanne mit Innenkocher“ (zu 80 % in der Brauwirtschaft eingesetzt) bezieht sich nur auf die gezielte Veränderung des Würzeaustritts des Innenkochers. Der hieraus resultierende geringe konstruktive Aufwand ermöglicht die Nachrüstung bereits bestehender Systeme bei geringen Investitionskosten.

Die durchgeführte Entwicklung erhöht die Produktqualität in Verbindung mit niedrigeren Betriebskosten. Bei der Analyse von Marktdaten wird deutlich, dass kleine und mittlere Brauereien, die den kmU's zuzurechnen sind, insbesondere durch den Preisdruck Marktanteile einbüßen. So ist die wirtschaftliche Bedeutung der vorgesehenen Entwicklung evident.

5 Veröffentlichungen

Die Vorstellung dieses Projektes vor Fachpublikum erfolgt/e bei verschiedenen Konferenzen und Tagungen und einer Fachmesse:

- 35. Technologisches Seminar, Weihenstephan 2002
- 36. Technologisches Seminar, Weihenstephan 2003
- EBC-Congress, Dublin (12.-22.05.2003)
- GALA, Braunschweig (9.-11.09.2003)
- Brau, Nürnberg (12.-14.11.2003)

Das Technologische Seminar, organisiert vom Lehrstuhl für Technologie der Brauerei I der TU München, wird jedes Jahr von mehreren hundert Teilnehmern besucht, die insbesondere kleinen und mittelständischen Unternehmen angehören. Die rege Diskussion im Anschluss an die Vorträge belegt das große Interesse an der Thematik der Würzekochung.

Die EBC (European Brewery Convention) stellt die bedeutendste gesamteuropäische brauwissenschaftliche Vereinigung dar und hält zweijährlich einen technologischen Kongress ab. Damit ließen sich große Teile der europäischen und vor allem aber auch der deutschen Zielgruppe erreichen.

Die GALA, die Deutsche Gesellschaft für Laser-Anemometrie e.V., veranstaltet jedes Jahr die Fachtagung „Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik“. In der dort etablierten Sitzung über Strömungen in Bio/Food/Life Science wurden die Ergebnisse neben weiteren Vorträgen aus dem Brauwesen (Strömungen in Gärtanks) präsentiert.

Im November diesen Jahres erfolgt die Vorstellung der Forschungsergebnisse auf der Brau in Nürnberg, der Fachmesse für Getränkewirtschaft. Zusammen mit anderen Lehrstühlen

des Forschungsdepartments für Lebensmittel und Ernährung ermöglicht ein Gemeinschaftsstand als Aussteller aufzutreten.

Für die nahe Zukunft ist es geplant einen umfassenden Beitrag in der Fachzeitschrift Brauwelt einzureichen.

6 Förderung

Das Forschungsvorhaben wurde aus Haushaltsmitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft über die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen „Otto von Guericke“ e.V. (AiF) gefördert.

7 Bibliographische Daten

7.1 AiF-Mitgliedsvereinigung

Wissenschaftsförderung der Deutschen Brauwirtschaft e.V.
Annaberger Str. 28
D-53175 Bonn

7.2 Durchführende Forschungsstellen

Technische Universität München
Lehrstuhl für Fluidmechanik und Prozessautomation
Weihenstephaner Steig 23
D-85350 Freising-Weihenstephan
Leiter der Forschungsstelle: Univ.-Prof. Dr.-Ing. A. Delgado
Projektleiter: Dr.-Ing. A. Baars

8 Literaturverzeichnis

- [1] Delgado, A., Nirschl, H., Denk, V.: Der Innenkocher – ein heißes Thema. In: Brauwelt Nr. 7/8 (1997), S. 232 - 236
- [2] Nirschl, H., Delgado, A., Denk, V.: Strömungstechnische Vorgänge im Innenkocher. In: Handbuch zum 30. Technologischen Seminar Weihenstephan. Weihenstephan 1997, S. 16/1 – 16/3
- [3] Bucher, H.: Thermofluidmechanik an einem Innenkocher. In: Der Weihenstephaner Nr. 2 (1997), S. 117 -118
- [4] Narziß, L.: Würzekochen und Würzekühlen – ein immer noch kritischer Punkt in etlichen Brauereien. In: Handbuch zum Technologischen Seminar. Weihenstephan 1998, S. 12/1 – 12/4
- [5] Fohr, M.: Weiterentwicklung der thermischen Brüdenverdichtung bei der Würzekochung in der Brauerei. VDI Fortschritt-Berichte. Reihe 14: Landtechnik / Lebensmitteltechnik. Nr. 87. VDI Verlag. Düsseldorf 1998
- [6] Wasmuth, K., Gattermeyer, P.: Details eines neuen phasenoptimierten Kochsystems. In: Brauwelt Nr. 12 (1998), S. 473
- [7] Weinzierl, M. et al.: Ein neues Würzekochsystem. Teil I: Erste Ergebnisse aus Pilotversuchen. In: Brauwelt Nr. 5 (1999), S. 189
- [8] Weinzierl, M. et al.: Ein neues Würzekochsystem. Teil II: Ergebnisse aus den ersten 200 Praxissuden mit Merlin. In: Brauwelt Nr. 13/14 (1999), S. 600
- [9] Walk, U.: Numerische Simulation der Strömung und der Wärmeübertragung in einem Behälter am Beispiel der Würzepfanne mit Innenkocher. Diplomarbeit (1999). Lehrstuhl für Fluidmechanik und Prozeßautomation. Technische Universität München
- [10] Schwill-Miedaner, A., Krottenthaler, M.: Neue Kochsysteme im Überblick - technologische und energietechnische Aspekte. In: Der Weihenstephaner. Nr. 1. 1999, S 71 – 73
- [11] Krottenthaler, M.: Verfahrenstechnische Neuerungen im Sudhaus, belegbare Vorteile / Nachteile. In: Handbuch zum Seminar der Oetker Brauereigruppe. Weihenstephan 1999, S. 17/1 – 17/2
- [12] Narziß, L.: Forschungsergebnisse und ihre Anwendung in der Praxis. In: Handbuch zum Technologischen Seminar. Weihenstephan 1999, S. 26/1 – 26/19
- [13] Baars, A., Werner, F., Delgado, A.: Investigation on the maximum inner wall temperature in a steam heated tube with natural circulation for the use in biotechnology. 3rd Baltic Heat Transfer Conference. Danzig September 1999
- [14] Kunze, W.: Technologie Brauer und Mälzer. 8. Aufl. VLB. Berlin 1998
- [15] Heyse, K.-U. (Hrsg.): Handbuch der Brauerei-Praxis. 3. Aufl. Getränke-Fachverlag Hans Carl. Nürnberg 1995
- [16] Narziß, L.: Abriß der Bierbrauerei. 5. Aufl. Ferdinand Enke Verlag. Stuttgart 1986
- [17] Baars, A., Werner, F., Delgado, A.: Erarbeitung von Auslegungskriterien für industrielle Innenkocher. Abschlußbericht des Forschungsvorhabens B49 der Wissenschaftsförderung der Deutschen Brauwirtschaft e.V.. Bonn 2000
- [18] Baars, A., Werner, F., Delgado, A.: Untersuchung der Strömung in einer Würzepfanne mit Innenkocher. In: Handbuch zum Technologischen Seminar. Weihenstephan 2000, S. 24/1 – 24/6
- [19] Baars, A., Walk, U., Werner, F., Delgado, A.: Untersuchung der Strömung in einer Würzepfanne mit Innenkocher. In: Der Weihenstephaner. Nr. 1. 2000, S 16 – 19
- [20] Baars, A., Walk, U., Werner, F., Delgado, A.: Numerische Untersuchung der Strömung in einer Würzepfanne während der Würzekochung. GVC-Fachausschuss CFD-Computational Fluid Dynamics. 28.2.-1.3. 2000 Bamberg
- [21] Baars, A., Werner, F., Delgado, A.: Numerische Untersuchung der Strömung in einer Würzepfanne während der thermischen Würzebehandlung. LVT 45 (2000) 1, S. 203/206
- [22] Schlichtung, H.: Grenzschicht Theorie. 8. Aufl., G. Braun, Karlsruhe 1982
- [23] Swamy, N.V.C., Bandyopadhyay, P.: Mean and turbulence characteristics of three-dimensional wall jets. J. Fluid Mech. 71 (1975), S. 541/562
- [24] Eriksson, J.G., Karlsson, R.I., Persson, J.: An experimental study of a two-dimensional plane turbulent wall jet. Experiments in Fluids 25 (1998), S. 50/60
- [25] Baars, A., Walk, U., Werner, F., Delgado, A.: Untersuchung der Strömung in einer Würzepfanne mit Innenkocher. In: Der Weihenstephaner. Nr. 1. 2000, S. 16/19
- [26] Mezger, R., Krottenthaler, M., Back, W.: Moderne Würzekochsysteme- ein Überblick. Brauwelt (2003) 4/5, S. 93/99.
- [27] Sudo, K., Sumida, M., Hibara, H.: Experimental investigation on turbulent flow through a circular-sectioned 180 degrees bend. Experiments in Fluids 28 (2000), S. 51/57.