

Hydrodynamische Kavitation - Innovation im Brauwesen: Effizienz, Qualität und die zentrale Rolle des CDR BeerLab®

Dr. Francesca Bruni – Forscherin im CDR Chemielabor “Francesco Bonicolini”

P2604

1. Einleitung: Der Paradigmenwechsel in der Bierherstellung

Die moderne Brauindustrie befindet sich in einem grundlegenden Wandel, der sich von traditionellen Praktiken hin zu einem hochmodernen Ansatz für hochpräzise Verfahrenstechniken entwickelt. Die Brauereien von heute stehen vor einer doppelten Herausforderung: Sie müssen den Energiebedarf der Prozesse reduzieren und die Rückhaltung temperaturempfindlicher bioaktiver Substanzen maximieren, ohne dabei die organoleptische Integrität des Endprodukts zu beeinträchtigen.

In diesem Szenario hat sich die hydrodynamische Kavitation (HC) als technologischer Wegbereiter erwiesen. Es handelt sich dabei nicht um eine inkrementelle Optimierung, sondern um einen Paradigmenwechsel, der kritische Phasen wie Maischen und Kochen integrieren und ersetzen kann, und der auf Mikro- und Nanometerskala funktioniert. Die industrielle Übernahme dieser Technologien erfordert jedoch eine strenge analytische Validierung. Das **CDR BeerLab®**-System stellt einen zentralen Braustein für die Prozesskontrolle dar und liefert die erforderlichen Daten, um komplexe fluiddynamische Prozesse in zertifizierte operative Exzellenz sowie in die gewünschte Qualität des Endprodukts umzusetzen.

2. Technologische Grundlagen der hydrodynamischen Kavitation (HC)

Hydrodynamische Kavitation ist ein physikalisches Phänomen, das durch die Bildung, das Wachstum und die anschließende Implosion von Dampfblasen in einer Flüssigkeit gekennzeichnet ist, ausgelöst durch einen lokalen Druckabfall unter den Dampfdruck. Wenn die Blasen kollabieren, werden lokale mechanische Energie (Stosswellen und Mikrostrahlen) und extreme Punktemperaturen freigesetzt, während gleichzeitig eine moderate Massetemperatur aufrechterhalten wird.

Für die Behandlung hochviskoser Moste, die mit suspendierten Feststoffen beladen sind, hat sich der **Venturi-Röhrenreaktor** gegenüber Blenden als technisch überlegen erwiesen, da er die fluiddynamische Stabilität gewährleistet und das Risiko von Ablagerungen oder Verstopfungen drastisch reduziert. Die Prozessintensität wird durch die **Kavitationszahl (σ)** gesteuert, die durch das Verhältnis zwischen statischem und dynamischem Druck definiert ist. Fortgeschrittene experimentelle Daten bestätigen, dass die Hefetötungseffizienz nicht linear ist, sondern zwei kritische lokale Maxima bei $\sigma = 0,3$ und $\sigma = 1,7$ aufweist, grundlegende Parameter für die Feinabstimmung des Reaktors.

Aus thermodynamischer Sicht bietet die hydrodynamische Kavitation einzigartige Vorteile:

- **Semiadiabatische Erwärmung:** Die von der Pumpe gelieferte mechanische Energie wird

durch volumetrische innere Reibung direkt in Wärme umgewandelt, sodass keine Hochtemperatur-Wärmeaustauschflächen erforderlich sind.

- **Keine thermischen Gradienten:** Die gleichmäßige Erwärmung des Flüssigkeitsvolumens verhindert die Bildung von „Hot Spots“, wodurch das Risiko der Zuckerkaramellisierung eliminiert und die Farbstabilität (EBC) erhalten bleibt.
- **Erhöhter kinetischer Wirkungsgrad:** Zellaufschluss und Stärkeextraktion erfolgen mechanisch, wodurch die enzymatische Kinetik erheblich beschleunigt wird.

3. Operative Analyse: Energieeffizienz und Verbesserung der Gewinnung

Im Rahmen des **Projekts TILA (Innovative Technology for Food Liquids)** wurde die Kavitationstechnologie für die Bierherstellung untersucht, um die Produktionszeiten und den Energieverbrauch zu verringern. Die bei den Versuchen gewonnenen Erkenntnisse zeigen einen deutlichen Unterschied zwischen dem herkömmlichen (TR) und dem kavitationsunterstützten (HC) Verfahren. Die HC-Technologie vereinfacht die Anlagenarchitektur, macht die Trockenmahlung überflüssig und verkürzt die Siedezeiten erheblich.

Betriebsparameter	Traditioneller Prozess (TR)	HC-Verfahren (CAVIBEER)	Dominanter physikalischer Mechanismus
Energieverbrauch (Zyklus)	Referenz 100 %	Verringerung > 30-40%	Eliminierung des Siedens und Reduzierung der Wärmeverluste
Hefe-Inaktivierung (Energie)	Referenz 100 %	Verringerung ~ 20%	Synergie zwischen mechanischer und thermischer Belastung
Verarbeitungszeiten	Standard-zyklus	Reduktion > 50%	Beschleunigung des Stoffwechsels und der Verzuckerung
Effizienz der Stärkeextraktion	Standard	30 % Steigerung	Mechanische Zerkleinerung der Körner
Verzuckerungstemperatur	~ 68-70°C	~ 33-35°C	Reduktion des Gradienten um ~ 35°C mittels mech. Mittel

Die Senkung der Verzuckerungstemperatur auf ca. **33-35°C** ist nicht nur eine thermische Einsparung, sondern auch eine Veränderung der Prozesskinetik, die die

oxidative Belastung der aromatischen Vorstufen minimiert.

4. Qualitative Exzellenz und bioaktive Profile

Die hydrodynamische Kavitation verbessert die Nährstoffqualität des Bieres erheblich. Anstatt die wertvollen Inhaltsstoffe des Hopfens zu zerstören oder zu verlieren, wie es beim traditionellen Brauen mit starkem, langem Kochen geschieht, schützt sie diese Methode und erhöht sogar ihren Anteil im Endprodukt. Hier die wichtigsten Vorteile:

- **Xanthohumol (XN) und DMX (Desmethyloxanthohumol):**

Dies sind zwei sehr wichtige prenylierte Flavonoide im Hopfen, die für ihre antioxidativen, entzündungshemmenden und potenziell krankheitsschützenden Eigenschaften bekannt sind. Beim herkömmlichen Kochen wird fast das gesamte Xanthohumol in eine weniger aktive Form (Isoxanthohumol) umgewandelt. Bei der hydrodynamischen Kavitation (HC) wird diese Umwandlung stark reduziert.

In einer Probe, die während der Projektversuche getestet wurde, stieg der DMX-Gehalt im Vergleich zur Ausgangsmenge sogar um 136 %: Das Verfahren schützte diese wertvollen Verbindungen praktisch zu 100 %.

- **6-Geranylneringenin (6-GN):**

Hierbei handelt es sich um eine weitere seltene und hochgradig bioaktive Verbindung im Hopfen, die unter anderem eine antioxidative Wirkung hat. Die Kavitation fördert ihre Bildung aus den im Hopfen vorhandenen Vorläufersubstanzen erheblich.

In derselben Probe mit hoher DMX-Konzentration wurden 55 µg/L erreicht, ein sehr hoher Wert, der über dem von hellen Bieren liegt und sich dem von dunklen Bieren annähert, die normalerweise reicher an dieser Verbindung sind. Die Umwandlung betrug 20,9 %, während sie bei der traditionellen Methode praktisch bei Null liegt.

- **Schonende Pasteurisierung zum Schutz der Aromen:**

Um das Bier stabil und sicher zu machen, ist zur Beseitigung von Heferesten wie *Saccharomyces cerevisiae* normalerweise eine Erhitzung auf hohe Temperaturen (etwa 62-63 °C) erforderlich. Bei der Kavitation reichen bereits 52 °C aus, um 90 % der Hefe zu inaktivieren.

Es handelt sich um eine Art "kalte Pasteurisierung": Die zarten und flüchtigen Aromen des Hopfens, wie z. B. frische, krautige und zitrusartige Noten, bleiben viel besser erhalten, da sie nicht durch übermäßige Hitze "gekocht" werden.

- **Reduzierung des Glutens zur Herstellung von "glutenreduzierten" oder glutenfreien Bieren mit herkömmlichen Getreidesorten:**

Prolin ist der "hartnäckigste" Teil des Glutens, der sich der Verdauung am meisten widersetzt und für Menschen mit Glutensensitivität Probleme verursacht.

Durch die Anwendung spezifischer Kavitationsverfahren während des Kochens und der Gärung kann dieses Prolin

auf natürliche Weise abgebaut werden, ohne zusätzliche Enzyme oder radikale Rezepturänderungen. Das Ergebnis: Biere mit sehr geringem Glutengehalt oder sogar "glutenfrei" gemäß den Normen können mit normaler Gerste oder Weizen hergestellt werden, wobei der traditionelle Geschmack und Stil erhalten bleiben.

Einfach ausgedrückt: Diese Technologie spart nicht nur Energie und macht den Prozess effizienter, sondern führt auch zu einem Bier, das reicher an gesunden Hopfenbestandteilen ist.

5. Die Rolle des CDR BeerLab®: Optimierung und wissenschaftliche Validierung

Bei den CNR-Experimenten war das CDR BeerLab® nicht nur ein einfaches Überwachungsinstrument, sondern das wichtigste Gerät zur Validierung der mathematischen Modelle der Hefe-Inaktivierung (thermische FT und Kavitations-FC). Die fotometrische Präzision ermöglichte eine rigorose Kalibrierung dieser Modelle und die Quantifizierung der Verringerung der Lebensfähigkeit der Zellen in Abhängigkeit von den angewandten Kavitationsregimen. Ohne diese Genauigkeit bliebe die Optimierung der fluiddynamischen Parameter theoretisch.

Sofortige Prozessoptimierung: was ermöglicht CDR BeerLab® in der Praxis?

Dank der schnellen und präzisen Analysen ist es möglich, den Prozess in Echtzeit zu optimieren:

- **IBU- und XN-Überwachung:** Passt das Druckventil an, um die Kavitationszahl σ in Abhängigkeit von der Hopfenextraktion zu optimieren.
- **Zuckeranalyse:** zeigt die verbleibende Lebensfähigkeit der Hefe an und validiert die Lethalitätsmodelle unter Praxisbedingungen (mehr Restzucker = geringere Hefelebensfähigkeit).
- **Bestimmung der Farb- und Alkoholstabilität:** Überprüfung des oxidationsfreien Zustands sowie der Homogenität der Gärung nach der Kavitation.

Die Präzision des CDR BeerLab® ermöglichte es uns, reale Daten mit der Letalität zu korrelieren und experimentell die Spitzen der maximalen Effizienz bei $\sigma = 0,3$ und $\sigma = 1,7$ zu identifizieren.

Dank dieser kontinuierlichen fotometrischen Messungen konnten die Forscher das Verfahren auf konkrete und zuverlässige Weise bestätigen und optimieren.

6. Schlussfolgerungen: Auf dem Weg zu Brauerei 4.0

Die Integration der "CAVIBEER"-Technologie und der analytischen Präzision des **CDR BeerLab®** ebnet den Weg für das industrielle Brauen der Zukunft. Die Ergebnisse sind eindeutig: Energieeinsparungen von über 30 %, halbierte Zykluszeiten und ein verbessertes bioaktives Profil.

Die Synergie zwischen fortschrittlicher Flüssigkeitstechnik und strenger Qualitätskontrolle ist der Grundstein für eine nachhaltige, gesunde und technisch überlegene Produktion. Der Übergang zu einer Brauerei 4.0 beinhaltet notwendigerweise diese Verbindung von mechanischer Innovation und analytischer Sicherheit.