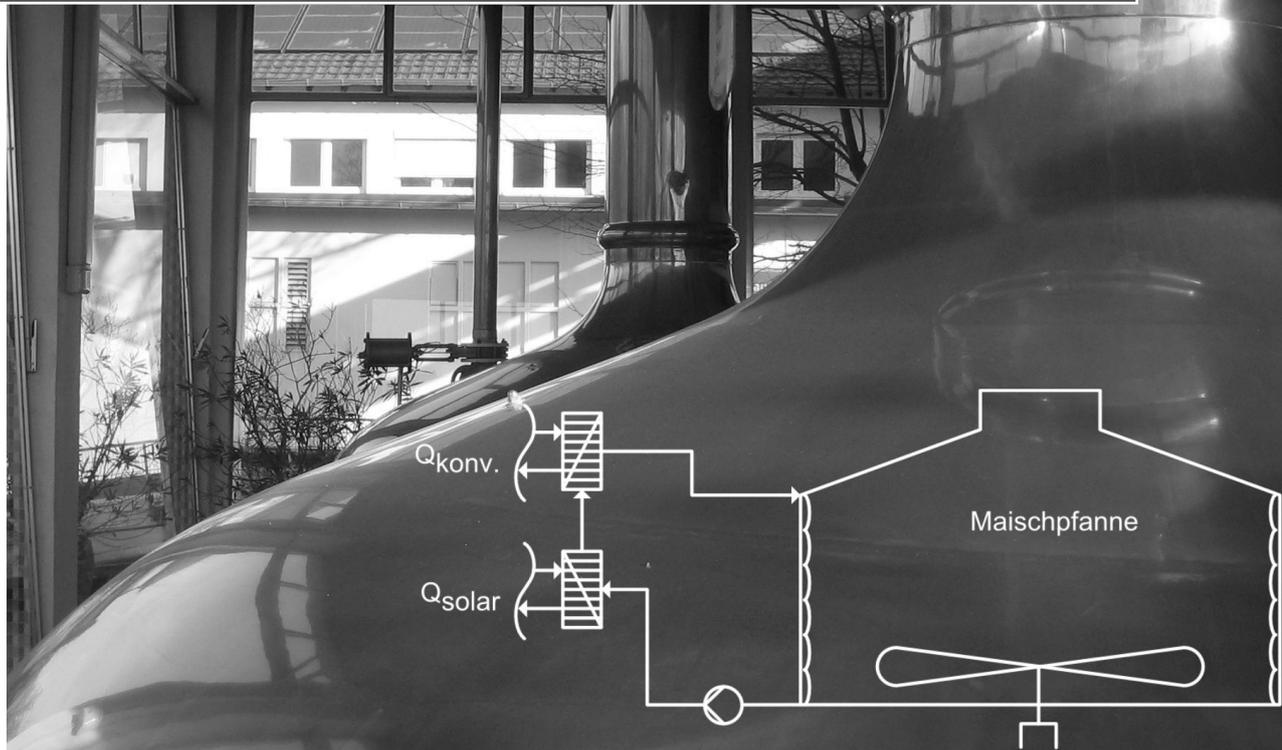


S O L A R .
UNI-KASSEL.DE

Leitfaden zur Nutzung solarer Prozesswärme in Brauereien



U N I K A S S E L
V E R S I T Ä T

Über den Leitfaden

Dieser Leitfaden wurde im Rahmen des Projektes „SOPREN – Solare Prozesswärme und Energieeffizienz“ (FKZ: 0329601T) erstellt. Der Leitfaden stellt eine stark gekürzte Fassung des Branchenkonzepts „Solare Prozesswärme für Brauereien“ dar und soll Energieberatern und Solarexperten als Planungshilfe dienen. Für Quellenangaben und detaillierte Informationen die über den Leitfaden hinausgehen, kann das Branchenkonzept „Solare Prozesswärme für Brauereien“ unter www.solar.uni-kassel.de/downloads heruntergeladen werden.

Inhaltsverzeichnis

| | |
|--|----|
| 1. Überblick der Bierproduktion..... | 1 |
| 2. Identifikation eines geeigneten Integrationspunktes | 4 |
| 3. Anlagenkonzepte zur solaren Beheizung | 7 |
| Warmwasserbereitstellung..... | 7 |
| Wasseraufbereitung | 8 |
| Tunnelpasteurisation | 9 |
| Entalkoholisierung | 10 |
| CIP-Reinigung | 11 |
| Maischen | 12 |
| Kurzzeiterhitzung | 13 |
| Flaschenreinigung | 14 |
| Kegreinigung | 15 |
| 4. Checkliste zum Vorgehen..... | 16 |
| 5. Glossar | 17 |
| 6. Quellenverzeichnis..... | 18 |

Veröffentlicht durch:

Universität Kassel
Institut für thermische Energietechnik
Kurt-Wolters-Str. 3
34125 Kassel
+49 561 804 3890
solar@uni-kassel.de

Autoren:

Bastian Schmitt
Christoph Lauterbach
Klaus Vajen

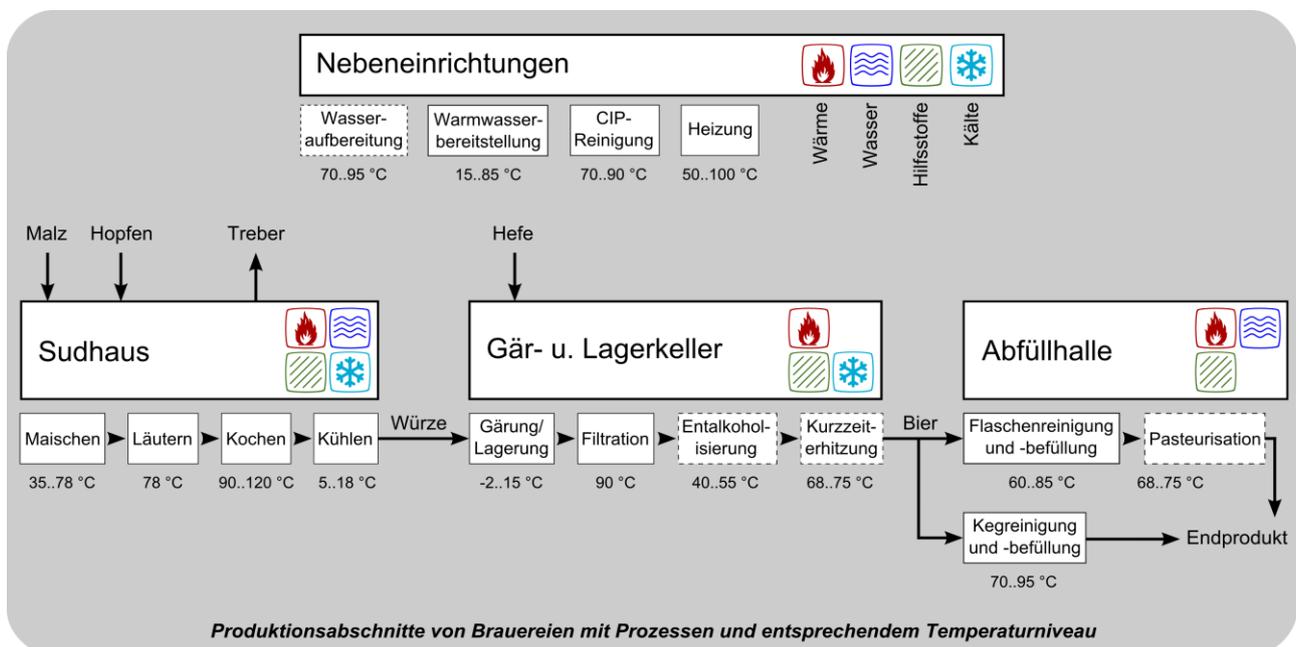
September 2012

Der Leitfaden kann unter www.solar.uni-kassel.de/downloads herunter geladen werden.

1. Überblick der Bierproduktion

Die Herstellung von Bier ist ein Teil des Wirtschaftszweiges Getränkeherstellung und erfolgt deutschlandweit in einer Vielzahl von Braustätten. Während Kleinst- bzw. Gasthausbrauereien mit sehr geringen Produktionsmengen den Großteil der Brauereien ausmachen (ca. 980 von 1.330), produzieren Großbrauereien (weniger als 5 % aller Betriebe) knapp drei Viertel der Gesamtjahreserzeugung von gut 95 Mio. hl Bier [1]. Nach dem deutschen Reinheitsgebot dürfen für die Produktion von Bier lediglich Wasser, Malz, Hopfen und Hefe verwendet werden. Neben diesen Rohstoffen benötigen Brauereien zur Produktion weitere Hilfsstoffe wie CO₂, Lauge und andere Chemikalien zur Reinigung sowie unterschiedliche Behältnisse zur Abfüllung des Bieres.

Der Produktionsablauf innerhalb einer Brauerei lässt sich unabhängig von Größe und Sortiment in drei Abschnitte unterteilen. Diese sind das Sudhaus, der Gär- und Lagerkeller sowie die Abfüllhalle. Neben diesen drei Produktionsabschnitten gibt es die Nebeneinrichtungen, die wichtige Aufgaben zur Ver- und Entsorgung des Produktionsablaufes wahrnehmen. Hierzu zählen die Medienversorgung (Wärme, Kälte, Druckluft), Reinigungseinrichtungen, die Wasseraufbereitung sowie Lagerhallen und Bürogebäude. Während im Sudhaus bei der Herstellung der Würze der größte Wärmebedarf anfällt, benötigt man im Gär- und Lagerkeller sehr viel Kälte, sodass hier ein großer Stromverbrauch zu verzeichnen ist. In der Abfüllhalle ist das Verhältnis von benötigter thermischer und elektrischer Energie eher ausgeglichen. Im Sudhaus verfügt jede Brauerei i.d.R. über zwei Installationen zur Wärmerückgewinnung. Beim Kochen wird die Energie des verdampften Wassers rückgewonnen, bei der Kühlung wird kaltes Brauwasser durch die heiße Würze erwärmt.



Im Durchschnitt werden drei Viertel der verbrauchten Energie in Brauereien für die Bereitstellung von Wärme benötigt. Der Rest entfällt auf Strom, welcher hauptsächlich zur Kälte- und Druckluftbereitstellung sowie für den Betrieb der vielfältigen Antriebe und Pumpen benötigt wird. Zur energetischen Gegenüberstellung unterschiedlicher Brauereien gibt es Benchmarks, die einen spezifischen Energieverbrauch angeben. Dabei wird die insgesamt verbrauchte Energie (thermisch oder elektrisch) auf die produzierte Menge Bier bezogen (häufig als Verkaufsbier (VB) bezeichnet). Dieser spezifische Verbrauch variiert typischerweise mit der Betriebsgröße. Kleinere Brauereien haben tendenziell einen höheren spezifischen Wärmeverbrauch als Großbrauereien, was



hauptsächlich am diskontinuierlichen Braubetrieb und einem niedrigeren Effizienzstandard liegt. Durchschnittswerte für den thermischen Energieverbrauch unterschiedlicher Größenklassen zeigt folgende Abbildung. Die Aufteilung des spezifischen Wärmebedarfs nach Größenklassen verdeutlicht, dass sehr große Brauereien mit durchschnittlich halb so viel Energie pro produzierten Hektoliter auskommen wie kleine Brauereien. Unabhängig von der Größenklasse kann der tatsächliche Verbrauch einer Brauerei allerdings deutlich von diesen Werten abweichen, sowohl nach unten als auch nach oben. Diese Abweichungen sind zu einem großen Teil im Energieverbrauch der Nebeneinrichtungen begründet.

Spezifischer Wärmeverbrauch für Brauereien unterschiedlicher Größenklassen [2]

| Ausstoß | bis 20.000 hl | 20.000..50.000 hl | 50.000..100.000 hl | 100.000..500.000 hl | über 500.000 hl |
|-----------------------|---------------|-------------------|--------------------|---------------------|-----------------|
| Wärmeverbrauch | 63 kWh/hl | 59 kWh/hl | 53 kWh/hl | 43 kWh/hl | 28 kWh/hl |

Nachfolgende Abbildung zeigt eine beispielhafte Verteilung des Wärmeverbrauchs auf unterschiedliche Abschnitte einer Brauerei. Etwa 50 % des Gesamtwärmeverbrauchs fällt im Sudhaus an, hauptsächlich für Maischen und Kochen. Gut ein Viertel wird in der Abfüllhalle verbraucht. Die 11 % Betriebswasser beinhalten den gesamten Warmwasserbedarf einer Brauerei (meist für Reinigungszwecke), der über den Brauwasserbedarf für Maischen und Läutern hinausgeht. Dieser Brauwasserbedarf ist dem Sudhaus zugeordnet, da er durch die Wärmerückgewinnung beim Kühlen i.d.R. gedeckt wird. Mit 15 % werden unter „restlicher Betrieb“ alle weiteren Verbraucher wie Raum- und Lagerhallenheizung, CIP-Reinigung sowie eine möglicherweise vorhandene Entalkoholisierung, Kurzzeiterhitzung oder Wasseraufbereitung zusammengefasst.



Aufteilung des Wärmeverbrauchs auf unterschiedliche Produktionsabschnitte [3]

Gerade bei kleinen Brauereien kann beispielsweise ein bedeutend größerer Teil für die Beheizung von Büro und Lagerflächen benötigt werden, sodass sich die dargestellten Verhältnisse verschieben. Zudem fallen auch die teilweise signifikanten Verluste der Wärmeverteilung innerhalb des Betriebes unter diesen Punkt. Während also die Benchmarks von Sudhaus und Abfüllhalle i.d.R. nur geringen Schwankungen unterliegen (in Abhängigkeit der Anlageneffizienz und Produktionszeiten), kann die Schwankung bei den sonstigen Verbrauchern weitaus höher ausfallen. Bei kleineren, ineffizienten Brauereien kann der Teil „restlicher Betrieb“ fast die Hälfte des Verbrauchs ausmachen. In einem solchen Fall kann der Wärmeverbrauch der Abfüllhalle oder des Sudhauses nicht mit der gezeigten Aufteilung und dem gesamten Wärmeverbrauch abgeschätzt werden. Hierzu werden prozessspezifische Kennwerte benötigt, mit denen man den Verbrauch einzelner Produktionsprozesse und -abschnitte ermitteln kann. Diese Kennwerte geben i.d.R. den Wärmebedarf in Abhängigkeit des Verkaufsbiere an. Abweichend kann der Bedarf auch auf die Anzahl gefüllter Flaschen bezogen werden. Eine Sammlung der wichtigsten spezifischen Größen

beinhaltet die nachfolgende Tabelle. Auch hierbei ist zu beachten, dass es sich um Durchschnittsgrößen und somit Anhaltswerte handelt. Bei sehr ineffizienten Installationen können die spezifischen Verbrauchswerte höher liegen.

Spezifischer Wärmeverbrauch unterschiedlicher Prozesse [4]

| Prozess | Bemerkungen | Spez. Kennzahlen |
|----------------------------|--------------------------------|--|
| Aufheizen Gesamtmaische | 50 °C → 76 °C | 2,4..2,5 kWh/hl VB |
| Würzeaufheizung | 72 °C → 100 °C | 4,1..4,2 kWh/hl VB |
| Würzekochung | 10 % GesV 5 % GesV | 6,9..7,2 kWh/hl VB 3,4..3,6 kWh/hl VB |
| Kurzzeiterhitzung | 54 °C → 68 °C | 1,7..1,8 kWh/hl VB |
| Tunnelpasteur | 5 °C → 62 °C | 19 ..23 kWh/1.000 Fl. |
| Flaschenreinigungsmaschine | 0,5-l-Fl.; Betriebswärmebedarf | 7..14 kWh/1.000 Fl., 80 °C |
| Keg-Füllanlage | WW-Bedarf (80 °C) | 0,4 hl/hl |
| Raumheizung/Klimaanlage | Gesamtbrauerei | 3,0..4,0 kWh/hl VB |
| Warmwasserbereitung | 12 °C → 82 °C, Betriebsw. | 8,3..8,7 kWh/hl WW |
| Betriebswarmwasserbedarf | Gesamtbrauerei | 0,2..0,8 hl/hl VB |

WW: Warmwasser; VB: Verkaufsbier; AW: Ausschlagwürze; GesV: Gesamtverdampfung, bezogen auf AW; Fl.: Flasche

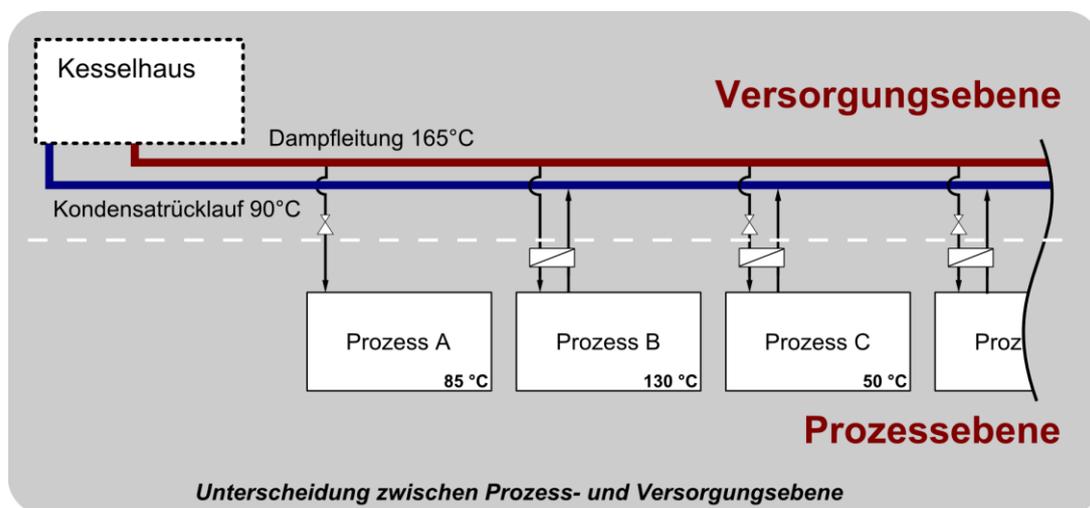
Die erläuterten ausstoßabhängigen Benchmarks können zusammen mit der Aufteilung auf einzelne Produktionsabschnitte sowie den prozessspezifischen Kennwerten dazu genutzt werden, um relativ schnell erste Aussagen hinsichtlich der Effizienz einer Brauerei machen zu können.

Exkurs Wärmeversorgung

Brauereien verfügen in der Regel über ein zentrales Kesselhaus, in welchem mittels Erdgas oder Heizöl, ggf. auch mit biogenen Brennstoffen Heißwasser oder Dampf erzeugt wird. Das erzeugte Heizmedium wird von dort aus zu den jeweiligen Verbrauchern geleitet. Typische Sattdampf-temperaturen liegen bei 150..170 °C (entspricht 5..8 bar). Häufig wird der im Kesselhaus bereitgestellte Dampf nicht nur für Produktionsprozesse, sondern auch für die Gebäudeheizung und Warmwasserbereitstellung verwendet. Bei den jeweiligen Verbrauchern wird der Dampf meist indirekt mittels Wärmetauschern genutzt und das dabei entstehende Kondensat zum Kesselhaus zurückgeführt. 90 % aller Kondensatsysteme werden bei Umgebungsdruck betrieben, sodass das Kondensat in Kontakt mit Luft kommt und somit vor der erneuten Nutzung im Dampferzeuger entgast werden muss. Diese offenen Kondensatsysteme verzeichnen aufgrund von Entspannungsvorgängen einen kontinuierlichen Massenverlust von 5..15 %. Die entstehenden Kondensatverluste (z.B. auch durch direkte Dampfinjektion) müssen durch sogenanntes Zusatzwasser ausgeglichen werden. Dazu ist im Kesselhaus eine Wasserenthärtung installiert, die Rohwasser entsalzt, bevor es der thermischen Entgasung zugeführt wird. Alternativ können Kondensatsysteme auch mit Überdruck (2..5 bar) ausgeführt werden. In diesem Fall kann das rückgeführte Kondensat direkt dem Dampferzeuger zugeführt werden [5].

2. Identifikation eines geeigneten Integrationspunktes

Bei der Einbindung von Solarwärme unterscheidet man die Versorgungs- von der Prozessebene. Die Versorgungsebene beinhaltet das Kesselhaus mit den Vor- und Rücklaufleitungen des Wärmeträgers (z.B. Dampf mit 165 °C und Kondensatrücklauf mit 90 °C). Die Integration auf Versorgungsebene geht i.d.R. mit sehr hohen Temperaturen einher, da thermische Solaranlagen meist parallel zum Kessel die Solltemperatur des Vorlaufs bereitstellen müssen. Die solare Bereitstellung von Dampf oder Hochdruckheißwasser mit 150 °C oder darüber ist allerdings aufgrund der klimatischen Bedingungen derzeit und in absehbarer Zukunft in Deutschland nicht wirtschaftlich. Bei der Integration auf Prozessebene wird die Solarwärme direkt für einen oder mehrere Prozesse genutzt. Deren Temperaturniveau ist immer, oft sogar deutlich, unterhalb der Temperatur des Heizmediums, was sich positiv auf den Ertrag der Solaranlage auswirkt.



Folgende Kriterien dienen zur Auswahl eines geeigneten Punktes zur Einbindung von Solarwärme:

- Die **Prozesstemperatur** ist in Deutschland und Ländern mit vergleichbarem Klima eins der wichtigsten Kriterien. Generell gilt, dass der Ertrag einer Solaranlage sinkt, wenn die bereitzustellende Temperatur steigt. Daher sollten für eine solare Unterstützung vornehmlich Prozesse mit niedriger Solltemperatur, oder Prozesse bei denen eine Vorwärmung möglich ist ausgewählt werden.
- Das **Lastprofil** ist ebenfalls von großer Bedeutung. Prinzipiell sollten Prozesse bevorzugt werden, die möglichst lange Laufzeiten innerhalb einer Woche aufweisen. Eine Mindestlaufzeit ist jedoch nur schwer vorzugeben. So eignet sich beispielsweise ein Prozess der jeden zweiten Tag betrieben wird besser für die Einbindung von Solarwärme als ein Prozess, der an direkt aufeinanderfolgenden Tagen betrieben auf die gleiche Laufzeit kommt, da hier gleich mehrere Tage mit einem Speicher überbrückt werden müssen. Eine Solarwärmenutzung für mehrere Prozesse kann zu einer Vergleichmäßigung der Last führen.
- Auch der **Aufwand zur Integration** der Solarwärme in den bestehenden Prozess spielt eine wesentliche Rolle. Dieser kann in Abhängigkeit vom Prozess stark variieren. Während bei der Brauwasserbereitstellung lediglich ein Wärmetauscher und etwas Peripherie benötigt werden und der Anschluss an die bestehende Brauwasserreserve erfolgt, muss bei der solaren Unterstützung des Maischens entweder ein Austausch der vorhandenen Maischepfanne oder eine aufwendige Nachrüstung mit ausreichender Wärmetauscherfläche im Inneren der Pfanne erfolgen.

Schlussendlich sollten alle drei Kriterien für die Entscheidung für einen Integrationspunkt berücksichtigt werden. Vergleicht man beispielsweise einen Prozess mit hoher Solltemperatur und langer Laufzeit mit einem Prozess mit niedriger Solltemperatur und kürzerer Laufzeit, können die Nachteile des ungünstigeren Lastprofils ggf. durch die Vorteile der niedrigeren Temperatur kompensiert werden. Weitere Kriterien, die eine Machbarkeit der Einbindung von Solarwärme beeinflussen können, sind der Anteil des Wärmebedarfs eines Prozesses am gesamten Wärmeverbrauch des Unternehmens, die Entfernung des möglichen Aufstellortes von Solaranlage und Pufferspeicher zu dem Ort wo die Wärme benötigt wird sowie vorhandene ungenutzte Abwärmequellen.

Exkurs Wärmerückgewinnung

Während die Wärmerückgewinnung (WRG) bei der Würzekühlung fast ausschließlich dazu genutzt wird um kaltes Brauwasser aufzuheizen (dies wird für den nächsten Sud zum Maischen und Läutern verwendet), gibt es bei der Würzekochung mehrere Möglichkeiten um die Abwärme zu nutzen. Diese unterschiedlichen Varianten haben Auswirkungen auf den Brauwasserhaushalt und nehmen damit direkt Einfluss auf die Möglichkeit zur Einbindung einer Solaranlage.

Häufig sind in Sudhäusern Pfannendunstkondensatoren installiert, die den entstehenden Brüden kondensieren. Diese werden entweder zur Bereitstellung von **Warmwasser** oder zur Temperaturerhöhung eines sogenannten Energiespeichers verwendet. Der **Energiespeicher** dient dazu beim nächsten Sud die Vorderwürze nach dem Läutern auf Kochtemperatur aufzuheizen. Eine weitere Möglichkeit bietet die **Brüdenverdichtung**. Dabei werden die beim Kochen entstehenden Brüden mechanisch oder thermisch verdichtet und zum Beheizen der Kochpfanne verwendet [6].

Die Verwendung des Energiespeichers oder der Brüdenverdichtung kann ein Indikator dafür sein, dass die Brauerei zusätzliches Kaltwasser aufheizen muss, um den gesamten Bedarf an Betriebswarmwasser für die Produktion zu decken. In diesem Falle könnte eine Solaranlage den fehlenden Bedarf teilweise decken. Wird mittels Pfannendunstkondensators Kaltwasser aufgeheizt, ist i.d.R. ausreichend Warmwasser vorhanden.

Auch bei den Nebeneinrichtungen sollten zumindest die gängigsten Maßnahmen zur WRG geprüft werden. Dampfkessel sollten über einen **Economiser** verfügen, der das Speisewasser vor Kesseleintritt vorwärmt. Durch die Abkühlung des Abgases können Wirkungsgradsteigerungen von 4..5 Prozentpunkten erzielt werden. Weitere Potentiale liegen in der **Kondensatrückführung** und **Entgasung** des Speisewassers [7].

Auch die Kälte- und Druckluftbereitstellung bieten Möglichkeiten zur WRG. Bei der **Kältebereitstellung** liegen die nutzbaren Temperaturen oft bei über 60 °C am Verdichter und etwa 25..30 °C am Kondensator [8]. Bei der Bereitstellung von **Druckluft** kann unter optimalen Bedingungen bis zu 90 % der Kompressorleistung in Form von Abwärme rückgewonnen werden. Abhängig von der Kompressorbauart liegt das nutzbare Temperaturniveau bei 50..90 °C [9].

Berücksichtigt man die Kriterien Temperatur, Laufzeit und Integrationsaufwand, so lässt sich aus allen Produktionsprozessen eine Auswahl treffen, die für eine solare Unterstützung geeignet erscheinen. Die Reihenfolge der aufgelisteten Prozesse kann als Ranking angesehen werden.

| Prozess bzw. Anlage | Bewertung | | | | Bemerkung |
|---|------------|----------|-------------|-------------|--|
| | Temperatur | Laufzeit | Integration | Wärmebedarf | |
| Warmwasserbereitstellung 15..85 °C | | | | | Zusätzlicher Warmwasserbedarf wird stark durch WRG beim Kochen sowie WRG aus Kälte- und Druckluftkompressoren beeinflusst. Spez. Energiebedarf: 1,7..1,7 kWh/hl VB |
| Wasseraufbereitung 70..95 °C | | | | | Notwendigkeit der Wasseraufbereitung hängt von der Qualität des vorhandenen Wassers ab (Stadtwasser oder eigener Brunnen). |
| Tunnelpasteurisation 68..75 °C | | | | | Laufzeit abhängig vom Produktspektrum (Anteil Einweggebinde, alkoholfreie- und Biermischgetränke). Spez. Energiebedarf: 19 ..23 kWh/1.000 Fl. |
| Entalkoholisierung 40..55 °C | | | | | Nicht in jeder Brauerei vorhanden. Laufzeit abhängig vom Produktspektrum. |
| CIP-Reinigung 70..90 °C | | | | | Wärmebedarf stark abhängig von Produktionsprofil und den damit verbundenen Reinigungszyklen. |
| Maischen 35..78 °C | | | | | Einbindung von Solarwärme meist nur bei Neubau der Maischepfanne sinnvoll. Spez. Energiebedarf: 2,4..2,5 kWh/hl VB <i>Aufheizen Gesamtmaische (50 °C → 76 °C)</i> |
| Kurzzeiterhitzung 68..75 °C | | | | | Anteil des Wärmebedarfs abhängig von Menge des Bieres, welches mittels KZE pasteurisiert wird. Spez. Energiebedarf: 1,7..1,8 kWh/hl VB |
| Flaschenreinigung 60..85 °C | | | | | Laufzeiten abhängig von Unternehmensgröße. Bei kleineren Brauereien ggf. abwechselnd mit Kegreinigung in Betrieb. Spez. Energiebedarf: 7 ..14 kWh/1.000 Fl. |
| Kegreinigung 70..95 °C | | | | | Laufzeiten siehe Flaschenreinigung. |

Die Auflistung ist Ergebnis eines quantitativen Rankings, bei dem Punkte für Temperatur, Laufzeit und Integrationsaufwand vergeben wurden. Die Platzierung ergibt sich aus der Gesamtsumme. Die Punktevergabe für das Temperaturniveau erfolgte unter Berücksichtigung der für den jeweiligen Prozess benötigten Solarvorlauftemperatur. Die Bewertung des Wärmebedarfs erfolgte anhand von Benchmarks für eine beispielhafte Brauerei mit einem Ausstoß von 250.000 hl pro Jahr, der sich zu 60 % auf Flaschen und zu 40 % auf Kegs verteilt. 10 % des produzierten Bieres wird entalkoholisiert, 20 % sind Biermischgetränke. Die Flaschen teilen sich jeweils zur Hälfte in 0,5 l und 0,33 l Flaschen auf. Die Wärmerückgewinnung beim Kochen dient der Läuterwürzaufheizung mittels Energiespeicher.

Auch wenn die **Bereitstellung von Raumwärme** in der Tabelle nicht explizit aufgeführt wird, sollte sowohl der Anteil am gesamten Wärmeverbrauch als auch die Möglichkeit zur solaren Unterstützung nicht außer Acht gelassen werden. So könnte beispielsweise eine Solaranlage die im Sommer einen Prozess mit hoher Solltemperatur unterstützt, in der Übergangs- und Winterzeit die Beheizung der Lagerhallen und Büroräume unterstützen, wenn hierfür ein niedrigeres Temperaturniveau gefordert ist. Diese Möglichkeit hängt allerdings stark von der Anlagentechnik zur Gebäudeheizung mit der geforderten Vorlauftemperatur ab.

Warmwasserbereitstellung



Laufzeit



Aufwand



Wärmebedarf

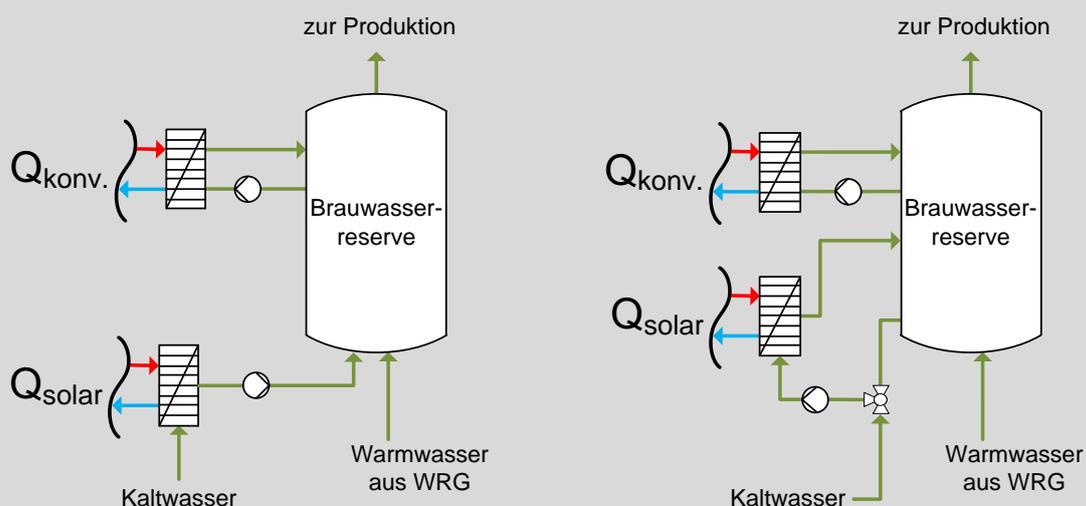
Temperatur 15..85 °C

Zweck Neben dem Bedarf an warmen Brauwasser für Maischen und Läutern (wird i.d.R. durch die WRG beim Würzekühlen gedeckt), benötigen Brauereien zusätzliches Warmwasser für Sterilisations- und Reinigungszwecke. Dieser Betriebswarmwasserbedarf liegt bei 0,2..1,5 hl pro hl Ausschlagwürze.

Anlagentechnik In Abhängigkeit der vorhandenen Wasserqualität haben Brauereien eine getrennte Betriebswasser- und Brauwasserreserve oder eine zentrale Brauwasserreserve, die alle Verbraucher bedient. Die dafür notwendigen Speicher können seriell oder parallel verschaltet sein.

Konv. Beheizung Die Wasserreserve hat i.d.R. einen Anschluss für eine Nachheizung sowie einen Kaltwasseranschluss. Zur Nachheizung wird das Wasser aus der Reserve abgezogen, mittels Wärmetauscher aufgeheizt und zurück in den Speicher geführt. Zusätzlich kann die Reserve über einen Warmwasserzulauf von der Würzekühlung gespeist werden.

Einbindung Solarwärme Vor der Einbindung von Solarwärme muss geprüft werden, in welchem Umfang Kaltwasser in die Brauwasserreserve eingebracht wird. Bei einem signifikanten Bedarf bietet sich die solare Vorwärmung an (linkes Schema). Neben der Möglichkeit den solaren Wärmetauscher rein als Durchlauferhitzer zu betreiben, kann dieser zusätzlich auch zur Speicherbeladung genutzt werden. Dabei ist zu beachten, dass die Solaranlage deutlich höhere Temperaturen bereitstellen muss, da die Speicher in der Regel mit Warmwasser aus der Wärmerückgewinnung gespeist werden. Abnahmen und Einspeisungen erfolgen mit sehr großen Volumenströmen, sodass sich keine oder nur eine sehr geringe Temperaturschichtung einstellt. Durch die speicherinterne Vermischung von Kalt- und Warmwasser aus der Wärmerückgewinnung resultiert eine ausschließliche solare Nachheizung des Speichers in einem eher niedrigeren Solarertrag.



Wichtig Der Bedarf an zusätzlichem Warmwasser kann von Brauerei zu Brauerei stark variieren und wird durch die WRG beim Kochen beeinflusst. Wird die Abwärme der Würzekochung zur WW-Bereitstellung verwendet, ist die Nutzung von Solarwärme zur Brauwasseraufheizung meist nicht mehr möglich.



Wasseraufbereitung

Temperatur 70..95 °C

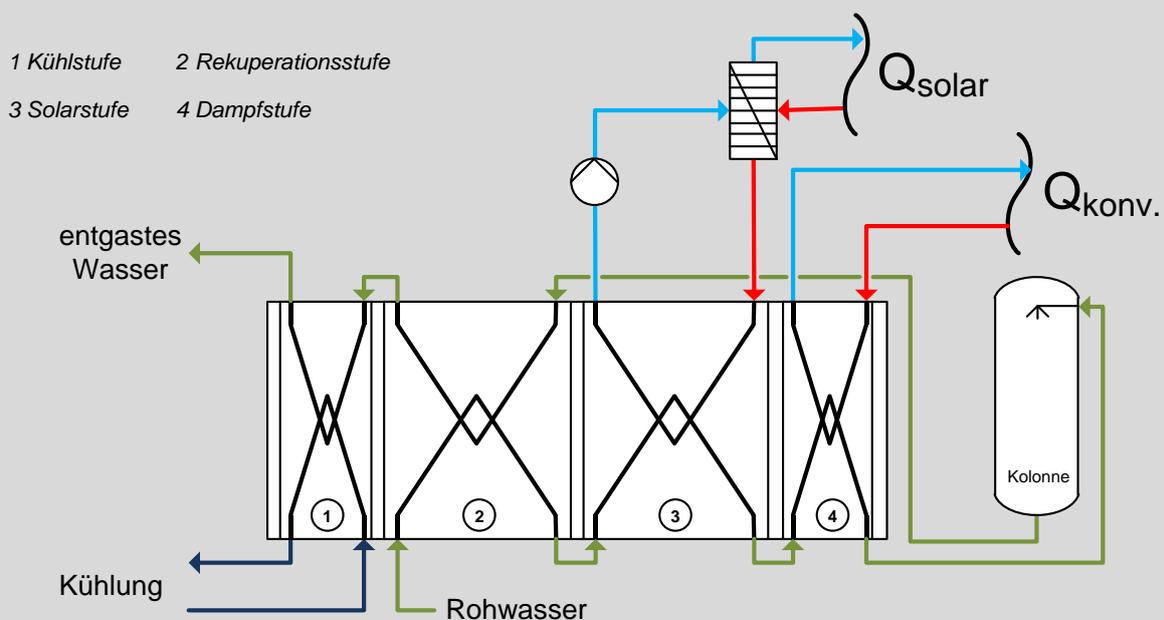


Zweck Um die Anforderungen an die Brauwasserqualität einzuhalten, kann eine Wasseraufbereitung notwendig sein. Dabei werden im Wasser gelöste Gase (hauptsächlich Sauerstoff und Stickstoff) entfernt.

Anlagentechnik Am häufigsten wird die Kolonnenentgasung verwendet. Dabei rieselt das erwärmte Rohwasser durch eine Kolonne im Gegenstrom zu einem Stripgas, welches die unerwünschten Gase aufnimmt. Der Kolonne ist ein Mehrzonenwärmetauscher vorgeschaltet, der das Rohwasser auf die Entgasungstemperatur erwärmt.

Konv. Beheizung Das entgaste Wasser wärmt in der rekuperativen Zone des Mehrzonenwärmetauschers das Rohwasser vor. Der verbleibende Temperaturhub auf Entgasungstemperatur wird durch eine Heizzone sichergestellt, die mit Dampf beheizt wird. In Einzelfällen kann die Heizstufe auch als separater Wärmetauscher ausgeführt sein.

Einbindung Solarwärme Zur Einbindung von Solarwärme muss der Mehrzonenwärmetauscher um eine solar beheizte Zone erweitert werden (3). Dadurch wird das Wasser nach der Rekuperation solar auf Entgasungstemperatur erwärmt oder vorgewärmt. Falls der Wärmetauscher nicht über ausreichend Platz zur Aufnahme eines zusätzlichen Plattenpaketes verfügt, muss eine Anschlussplatte eingebracht werden, an die ein externer Wärmetauscher angeschlossen werden kann. Die Anbindung über einen externen Wärmetauscher ohne den Umbau des Mehrzonenwärmetauschers kann nicht erfolgen, da die notwendigen Anschlüsse der Plattenpakete unzugänglich sind. Verfügt eine Entgasungsstation über eine externe Heizstufe, kann an der zugänglichen Rohrleitung ein externer solarbeheizter Plattenwärmetauscher zwischen rekuperativer Vorwärmstufe und dampfbeheizter Heizstufe vorgeschaltet werden.



Wichtig Ob eine Wasseraufbereitung notwendig ist und damit die Möglichkeit besteht an dieser Stelle Solarwärme zu nutzen, hängt von der Qualität des zur Verfügung stehenden Wassers ab (Stadtwater oder eigener Brunnen). Welche der genannten Varianten umgesetzt werden kann, hängt von der Bauform der Entgasungsanlage ab.



Tunnelpasteurisation

Temperatur 68..75 °C

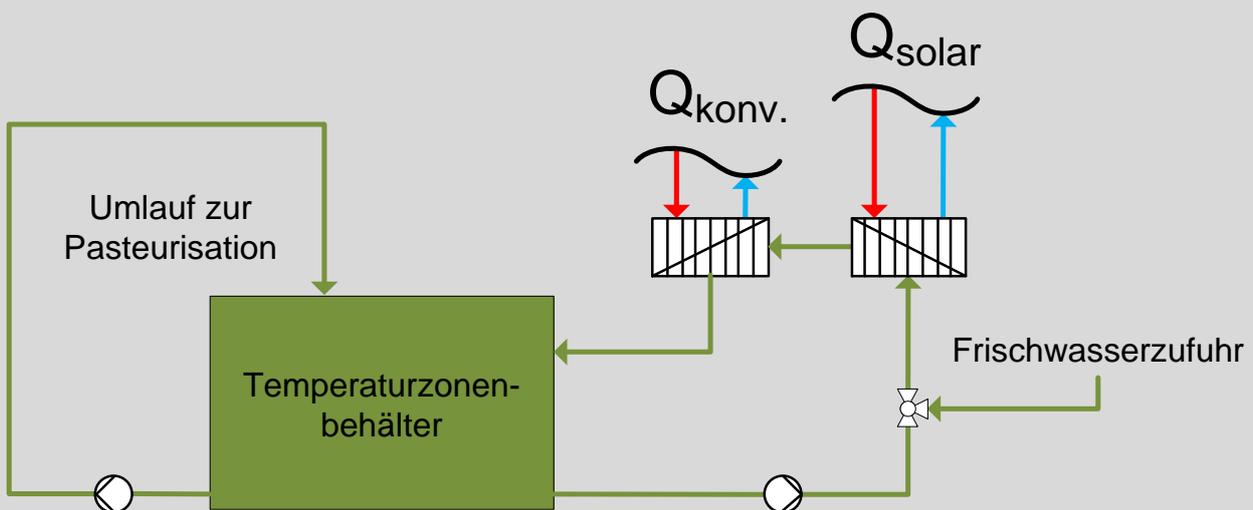


Zweck Um eine lange Genießbarkeit des Bieres gewährleisten zu können, durchlaufen alkoholfreie Biere, Biermischgetränke und ggf. für den Export vorgesehene Biere nach der Abfüllung in Flaschen einen Tunnelpasteur.

Anlagentechnik Die gefüllten Flaschen durchlaufen auf breiten Förderbändern den Tunnelpasteur (ggf. in mehreren Etagen) und werden dabei mit Wasser besprüht. In mehreren Temperaturzonen werden sie bis auf Pasteurisationstemperatur aufgewärmt und auf dieser Temperatur für eine definierte Zeit warmgehalten. Anschließend erfolgt die Rückkühlung.

Konv. Beheizung Prinzipiell verfügen Tunnelpasteure über eine interne Wärmerückgewinnung, indem das Wasser aus den Kühlzonen den Heizzonen zum Anwärmen der Flaschen zugeführt wird. Lediglich die wärmste Temperaturzone muss nachgeheizt werden. Dazu werden i.d.R. ein oder mehrere externe Wärmetauscher verwendet. Der Energiebedarf unterteilt sich in drei zeitlich getrennte Bereiche. Zunächst wird Wärme zum Aufheizen der Bäder beim Betriebsbeginn benötigt. Anschließend wird beim Anfahren der Maximalbedarf erreicht, da hier noch keine WRG zwischen den äquivalenten Zonen erfolgen kann. Im stationären Betrieb wird lediglich Wärme zum Aufheizen von der regenerativ erreichten auf Pasteurisationstemperatur benötigt.

Einbindung Solarwärme Bei der externen Beheizung der Zonenbehälter kann ein solarbeheizter Wärmetauscher zur Rücklaufanhebung vorgeschaltet werden. Neuanlagen können mit zwei separat beheizten Plattenpaketen ausgestattet werden. Da aufgrund von Verdampfung und Verschleppung Frischwasser nachgespeist werden muss (bis zu 20 ml pro Flasche), kann auch hier eine solare Vorwärmung erfolgen.



Wichtig Tunnelpasteure werden häufig in größeren Brauereien verwendet. Die Laufzeit ist stark durch das Produktspektrum der Brauerei geprägt (Anteil von Einweggebinde, alkoholfreien- und Biermischgetränken). Da in kleineren, regionalen Brauereien nur sehr wenig Bier pasteurisiert wird, kommen häufig Kammerpasteure zum Einsatz, die keine guten Möglichkeiten zur Solarwärmenutzung bieten.

Entalkoholisierung

Temperatur 40..55 °C



Laufzeit



Aufwand



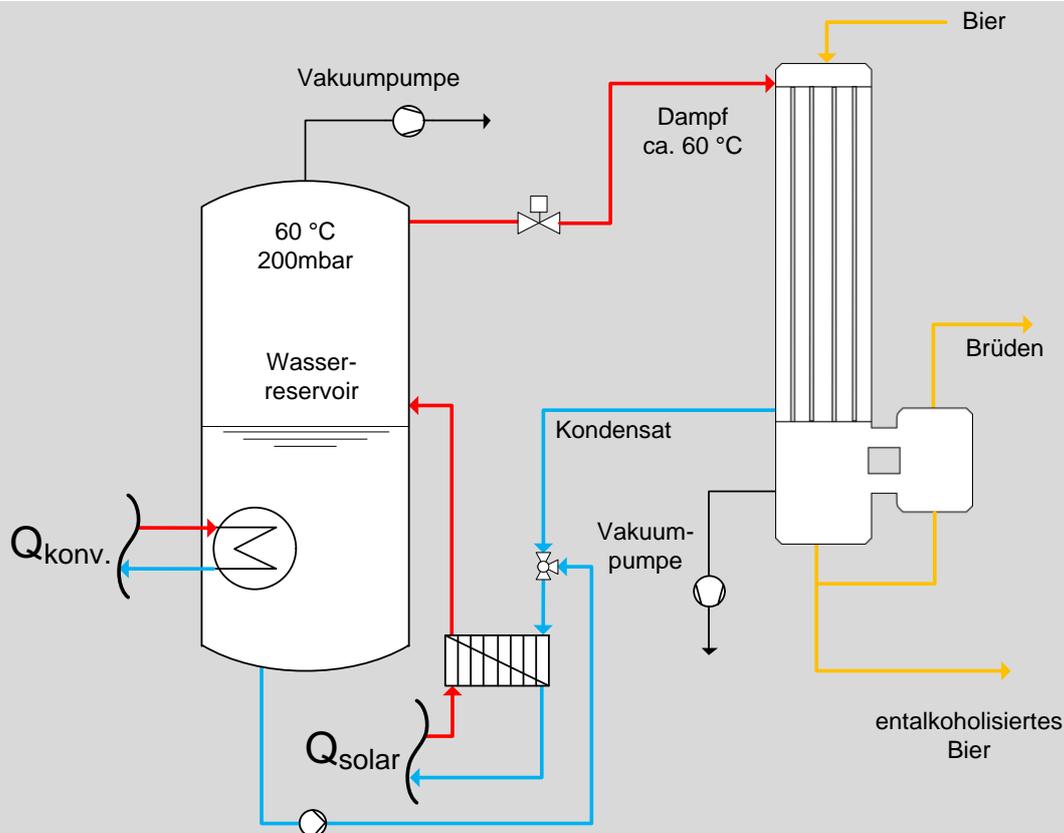
Wärmebedarf

Zweck Zweck der Entalkoholisierung ist es den wachsenden Markt für alkoholfreie (<0,05 Vol%) und alkoholarme (<0,5 Vol%) Biere zu bedienen. Neben dem vorzeitigen Abbruch der Gärung und der Umkehrosmose können auch mit thermischen Verfahren alkoholfreie Biere hergestellt werden.

Anlagentechnik Bei der thermischen Entalkoholisierung kommen Rektifikationskolonnen, Dünnschicht- und Fallstromverdampfer zum Einsatz, um den Alkohol zu entfernen. Rektifikationskolonnen und Fallstromverdampfer sind häufig mehrstufig ausgeführt.

Konv. Beheizung Aus Gründen der Produktschonung werden die Verdampfer sowohl produktseitig als auch heizseitig im Unterdruck betrieben. Dadurch kann die Entalkoholisierung bei niedrigen Temperaturen stattfinden. Als Heizmedium wird i.d.R. Sattdampf mit ca. 60 °C verwendet.

Einbindung Solarwärme Zur solaren Beheizung der Entalkoholisierung wird ein Heizsystem, bestehend aus einem nachgeheizten Speicher, einem vorgeschalteten Solarwärmetauscher und einer Vakuumpumpe benötigt. Mit der Bypass-Leitung kann die Solarwärme bereits zum Anfahren der Anlage genutzt werden. Nach Start der Entalkoholisierung wird das Kondensat solar (vor-)erwärmt und bei Bedarf konventionell nachgeheizt.



Wichtig Nicht in jeder Brauerei wird alkoholfreies Bier produziert. Entalkoholisierungsanlagen sind häufiger in Großbrauereien anzutreffen. Die Anlagen werden i.d.R. auf niedrige Leistungen ausgelegt, sodass sie auf hohe Laufzeiten kommen.

CIP-Reinigung

Temperatur 70..90 °C

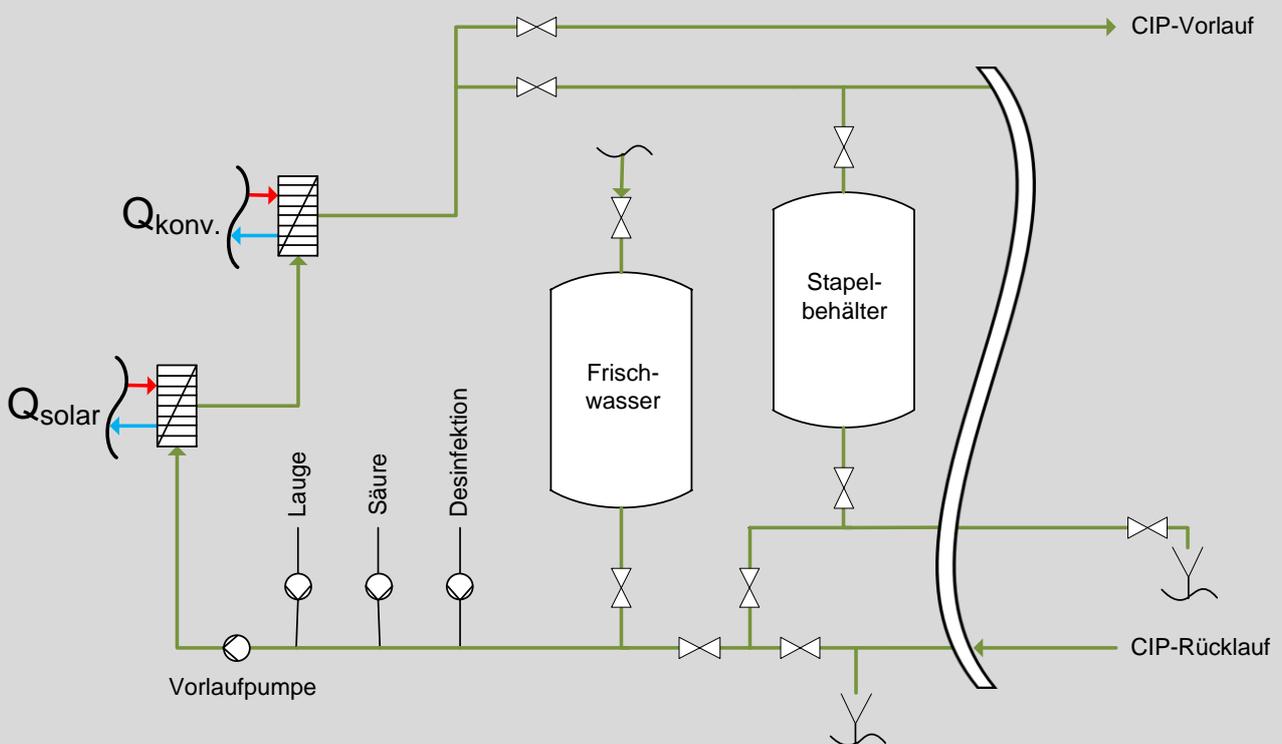


Zweck Cleaning-in-Place ist ein Verfahren zur Reinigung verfahrenstechnischer Anlagen, ohne dass eine Demontage einzelner Bauteile erfolgen muss. Die Produktionsanlagen einer Brauerei werden in unterschiedlichen Zyklen (täglich bis wöchentlich) der CIP-Reinigung unterzogen. Je nach Bereich erfolgt die Reinigung kalt oder heiß.

Anlagentechnik Eine CIP-Anlage besteht aus mehreren Stapelbehältern für Frischwasser, Heißwasser, Säure, Lauge und Stapelwasser sowie Umwälz- und Dosierpumpen, ein oder mehreren Wärmetauschern und etwas Peripherie.

Konv. Beheizung I.d.R. verfügen CIP-Anlagen über einen externen Wärmetauscher, der die unterschiedlichen Medien auf die geforderte Temperatur aufheizt, bevor diese den zu reinigenden Anlagenteilen zugeführt werden. Durch eine Kreislaufschtung können auch einzelne Stapelbehälter beheizt werden.

Einbindung Solarwärme Bei CIP-Anlagen mit externem Wärmetauscher lässt sich ohne großen Aufwand ein solar beheizter Wärmetauscher vorschalten. Wenn größere Zeiträume zwischen den Reinigungsphasen liegen, können die Stapelbehälter auch mit einem kleiner dimensionierten Wärmetauscher solar vorgewärmt werden. Falls die Zieltemperatur dabei nicht erreicht wird, führt der dampfversorgte Wärmetauscher die restliche thermische Energie zu. Bei der verlorenen Reinigung (ohne Stapelbehälter) sollte der Solarwärmetauscher für die gleiche Wärmeleistung wie die konventionelle Beheizung ausgelegt werden.





Maischen

Temperatur 35..78 °C

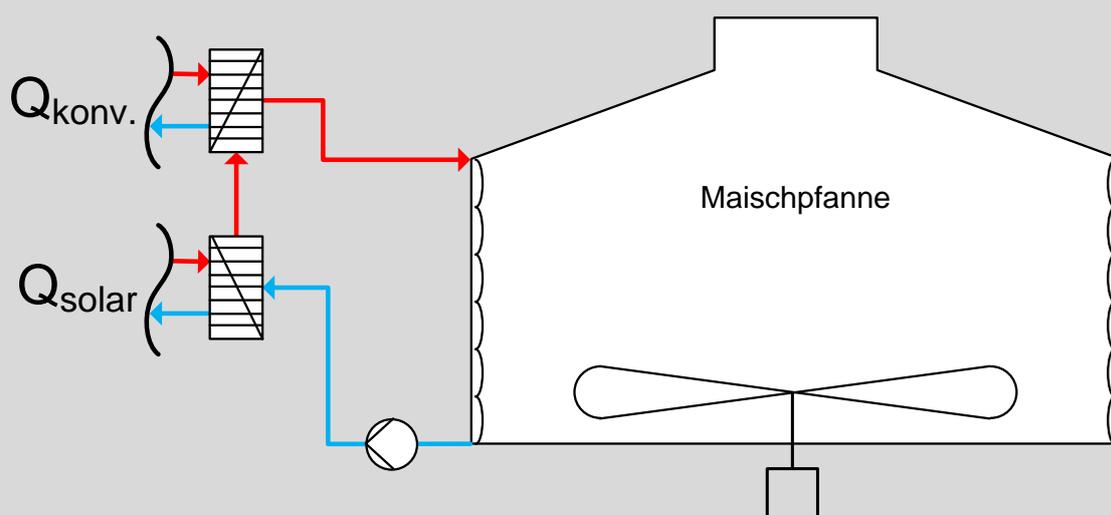


Zweck Beim Maischen wird das Malzschrot mit Brauwasser vermischt und anschließend erhitzt, um die Inhaltsstoffe des Malzes in lösliche Verbindungen zu überführen. Die tatsächliche Einmaischtemperatur und das folgende Zeit-Temperatur-Profil hängen von der produzierten Biersorte und dem verwendeten Maischverfahren ab.

Anlagentechnik Die verwendeten Maischpfannen verfügen über eine Beheizung und einen Rührer. Je nach Maischverfahren wird entweder der gesamte Pfanneninhalt erwärmt (Infusionsverfahren) oder ein Teil der Maische wird abgezogen, gekocht und mit dem Rest vermischt (Dekoktionsverfahren).

Konv. Beheizung I.d.R. verfügen Maischpfannen über angeschweißte Halbrohre oder Heitzaschen an Pfannenseite und -boden, die mit Dampf beheizt werden. Seltener erfolgt die direkte Injektion von geeignetem Dampf. Bei neuen Maischsystemen die mit Heißwasser beheizt werden, besteht die gesamte Gehäusewandung aus einer strukturierten Heizfläche (sog. Dimple Plates).

Einbindung Solarwärme Für die solare Unterstützung des Maischens wird ausreichend Wärmetauscherfläche im Inneren der Pfanne benötigt, um diese mit Heißwasser zu beheizen. Die erforderliche Vorlauftemperatur für Maischepfannen mit Dimple Plates liegt in der Regel bei ca. 95 °C. Da die Maische allerdings bei höchstens 78 °C gehalten wird, können Rücklauftemperaturen unter 85 °C erzielt werden, zu Beginn des Maischprozesses sogar deutlich darunter. Geforderte Aufheizraten liegen bei 1 K pro min. Bei Sicherstellung einer homogenen Temperaturverteilung können auch etwas niedrigere Aufheizraten in Kauf genommen werden. Die Einbindung der Solarwärme erfolgt seriell als Rücklaufanhebung. Durch die Reihenschaltung wird gewährleistet, dass auch bei unzureichender solarer Erwärmung die geforderte Solltemperatur erreicht wird.



Wichtig Die solare Beheizung einer Maischepfanne sollte nur erfolgen, wenn diese bereits mit Heißwasser beheizt wird oder wenn ein Austausch der vorhandenen Pfanne vorgesehen ist. Die Umrüstung einer bestehenden dampfbeheizten Maischepfanne ist i.d.R. zu aufwendig und teuer.



Kurzzeiterhitzung

Temperatur 68..75 °C

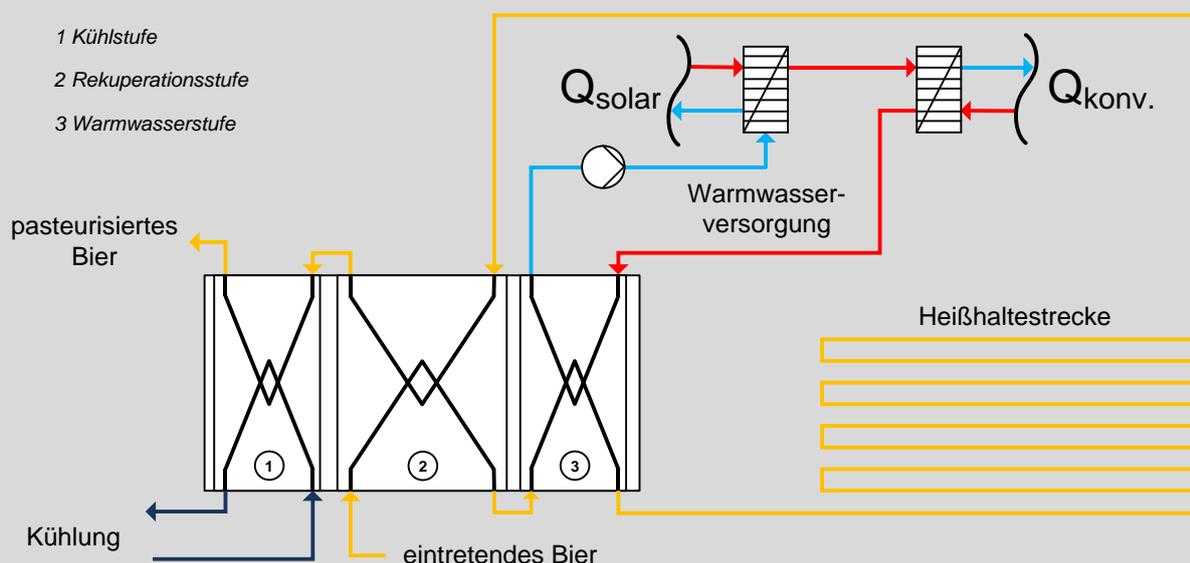


Zweck Die Pasteurisation mittels Kurzzeiterhitzung erfolgt vor der Abfüllung des Bieres. Die Gründe für die Haltbarmachung entsprechen der Tunnelpasteurisation.

Anlagentechnik Die Anlagentechnik der Kurzzeiterhitzung ähnelt der Wasseraufbereitung. Es werden Mehrzonenplattenwärmetauscher verwendet, bei denen die Heizstufe und Heißhaltestrecke intern oder extern ausgeführt sein kann.

Konv. Beheizung Das Bier wird in einem ersten Plattenwärmetauscher rekuperativ vorgewärmt (im Gegenstrom zum pasteurisierten Bier). Im zweiten Wärmetauscher wird das Bier durch einen Warmwasserkreis auf Pasteurisationstemperatur erwärmt. Dieser zusätzliche Warmwasserkreis dient der schonenden Bieraufheizung und wird mit Dampf oder Heißwasser beheizt.

Einbindung Solarwärme Die Solarwärme muss dem Wasserkreis vor dem dampfbeheizten Wärmetauscher zugeführt werden. Anlagen mit externer Heizstufe können demnach durch die Vorschaltung eines zusätzlichen Wärmetauschers relativ leicht mit solarer Wärme versorgt werden. Im Betrieb gelangt das Warmwasser mit etwa 70..75 °C aus der Warmwasserstufe und wird mittels Solarwärme und bei Bedarf mit Dampf in der externen Heizstufe um 3..4 Grad erwärmt. Im Falle eines Mehrzonenwärmetauschers erfolgt die Einbindung der Solarwärme analog zur Wasseraufbereitung mittels zusätzlichem Plattenpaket oder Anschlussplatte.



Wichtig Die tatsächliche Menge des Bieres, welches mittels Kurzzeiterhitzung pasteurisiert werden muss, kann sehr stark variieren. Dies ist abhängig von Sortiment und Vertriebsstruktur der jeweiligen Brauerei.

Flaschenreinigung

Temperatur 60..85 °C

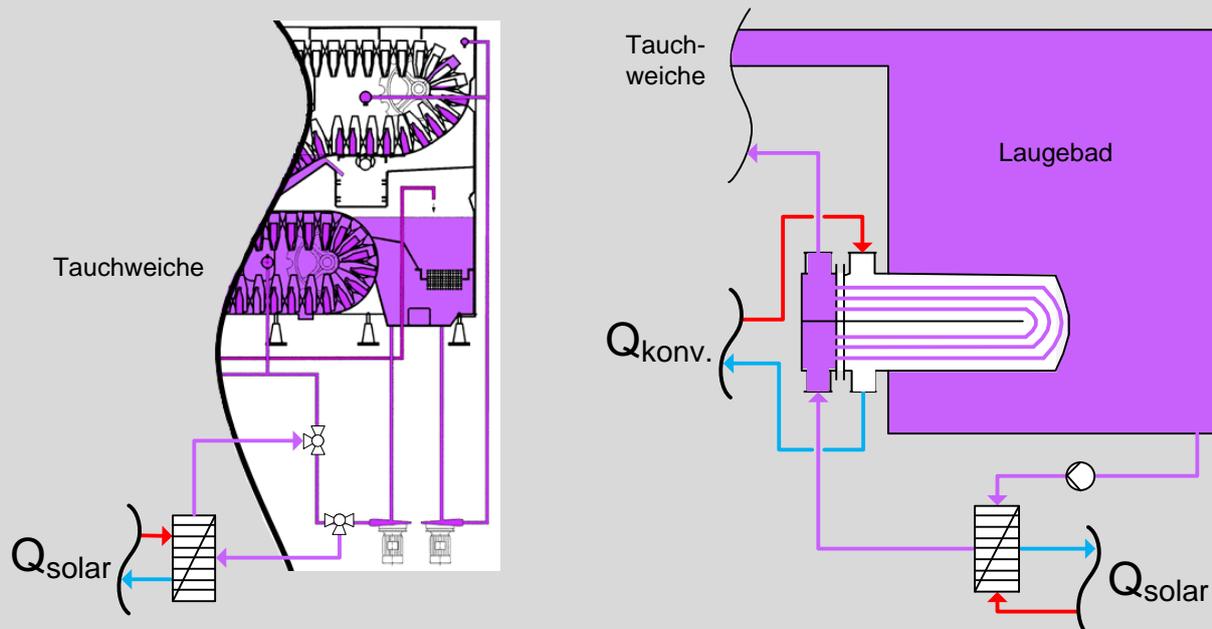


Zweck Ein Großteil des in Deutschland produzierten Bieres wird in Glasmehrwegflaschen verkauft. Vor der Befüllung müssen die Flaschen gereinigt werden, wozu spezielle Flaschenwaschmaschinen verwendet werden.

Anlagentechnik Flaschenwaschmaschinen verfügen über ein Endlosförderband, mit welchem die Flaschen einzelne Tauch- und Spritzstationen in der Maschine durchlaufen. Die Stufen unterteilen sich in den Vorwärm-, Lauge- und Abkühlbereich.

Konv. Beheizung Lediglich der Laugebereich wird über extern zugeführte Energie beheizt, alle anderen Bereiche verfügen über eine interne WRG. I.d.R. wird das Hauptlaugebad über ein dampfbeheiztes internes Rohrbündel auf 80 °C gehalten (60 °C bei Kunststoffflaschen). Von dort wird die erwärmte Lauge in unterschiedliche Bereiche des Laugebads gepumpt. Es existieren auch Ausführungen mit externen Wärmetauschern.

Einbindung Solarwärme Die Einbindung von Solarwärme hängt bei Flaschenwaschmaschinen von der Art und Einbringung des dampfbeheizten Wärmetauschers ab. Bei Maschinen mit internem Rohrbündel besteht eine Möglichkeit in der solaren Überhitzung der Lauge (linke Variante), welche aus dem Bereich des Rohrbündels abgezogen und zum Flascheneintritt in das Hauptlaugebad gepumpt wird. An dieser Stelle wird die höchste Temperatur benötigt, weshalb die Lauge durch einen solar betriebenen Wärmetauscher um 3..4 Grad im Vergleich zum Hauptlaugebad überhitzt werden kann. Bei einer anderen Rohrbündelbauform wird die Lauge aus dem Bad abgezogen und durch die Rohre des Bündels geführt. Der Dampf beheizt die Lauge in den Rohren sowie über den Mantel das gesamte Bad. Bei dieser Bauart kann die aus dem Laugebad abgezogene Lauge solare aufgeheizt werden, bevor sie in das Rohrbündel gelangt (rechts).



Wichtig Eine solare Nachrüstung im Bestand ist i.d.R. aufwendig und teuer. Neuanlagen hingegen werden immer kundenspezifisch geplant und gebaut, sodass sich individuelle Wünsche hinsichtlich der Beheizung relativ einfach umsetzen lassen.



Kegreinigung

Temperatur 70..95 °C



Laufzeit



Aufwand



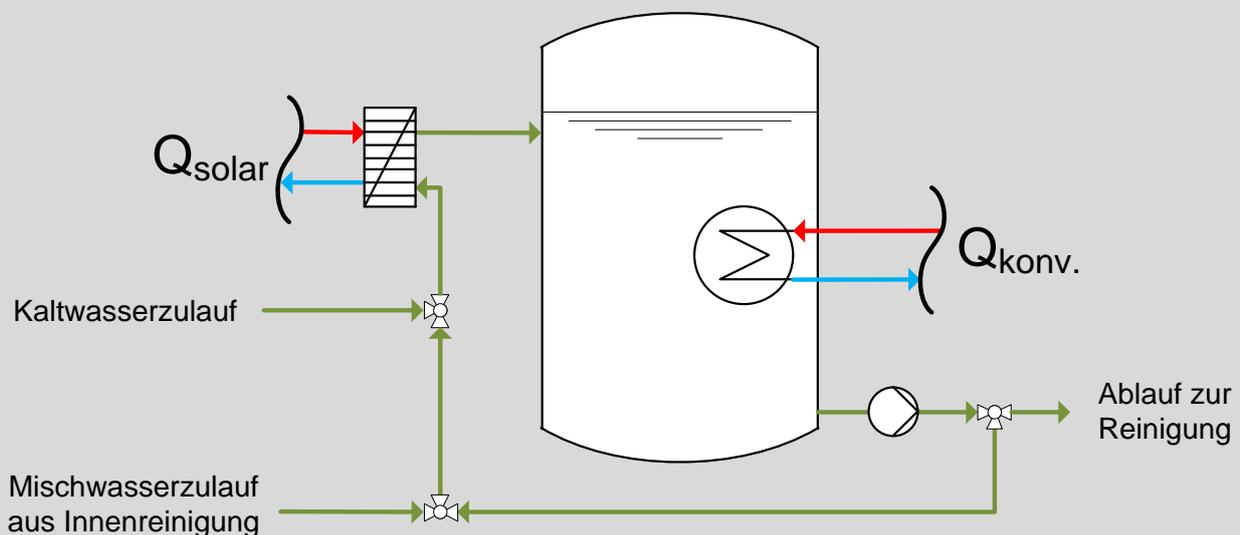
Wärmebedarf

Zweck Kegs sind zylindrische Metallfässer aus Aluminium oder Chromnickelstahl mit einem hermetisch abgeschlossenen Innenteil. Sie werden über einen Fitting entleert, gereinigt und befüllt. Kegs werden am häufigsten in den Größen 30 und 50 l verwendet.

Anlagentechnik Die Reinigung und Befüllung von Kegs verläuft automatisiert an mehreren Stationen. Dabei wird das Keg von außen und innen gereinigt. Die Innenreinigung erfolgt mit unterschiedlichen Spritzungen (Wasser, Lauge, Säure, Heißwasser und Dampf).

Konv. Beheizung Keganlagen verfügen über Sammelbehälter für Wasser, Säure und Lauge, die i.d.R. über interne Heizschlangen auf der benötigten Temperatur gehalten werden.

Einbindung Solarwärme Um Solarwärme bei der Kegreinigung zu nutzen, muss ein Wärmetauscher in den Zulauf zum jeweiligen Speicherbehälter (hier Mischwasserzulauf) integriert werden. Somit kann eine direkte solare Aufheizung des einlaufenden Misch- und Kaltwassers erfolgen. Um auch bei diskontinuierlichem Betrieb der Keg-Reinigung den Behälterinhalt solar aufheizen zu können, ist nach der Förderpumpe ein Drei-Wege-Ventil vorgesehen, sodass das Mischwasser im Umlauf über den Solarwärmetauscher gefahren werden kann. Darauf kann verzichtet werden, wenn die Reinigungsanlage dauerhaft betrieben wird.



Wichtig Das dargestellte Integrationsschema für die Beheizung des Mischwassertanks lässt sich auch auf Lauge- und Säuretanks übertragen. Dabei stellt sich allerdings eine höhere Rücklauftemperatur ein und ein Kaltwasserzulauf ist i.d.R. nicht gegeben.



4. Checkliste zum Vorgehen

1. Einschätzung zur Energieeffizienz der gesamten Brauerei

Bildung spezifischer Kennwerte und Vergleich mit Benchmarks. Bei sehr hohem spezifischem Verbrauch ist die Ursache zu untersuchen. Ggf. reduziert sich der Wärmebedarf einzelner Prozesse durch Effizienzmaßnahmen, was bei der Auslegung einer Solaranlage berücksichtigt werden muss. Das Produktsortiment gibt Aufschluss über die Menge Bier, welche entalkoholisiert und pasteurisiert werden muss. Dies kann Abweichungen vom Benchmark erklären.

- Ausstoß
- Verbrauch fossiler und ggf. biogener Brennstoffe
- Produktionssortiment

2. Erfassung der Produktionszeiten

Mithilfe der Produktionszeiten lassen sich die Laufzeiten der einzelnen Prozesse, produktionsfreie Perioden (Wochenenden oder Betriebsferien) sowie jahreszeitliche Schwankungen ermitteln.

- Sud- und Abfüllprotokolle
- Laufzeiten weiterer Prozesse

3. Analyse der Wärmebereitstellung und -verteilung

Überblick über die Wärmebereitstellung und -verteilung. Temperaturniveau und Medium der Wärmeverteilung haben Einfluss auf Integrationsmöglichkeiten auf Versorgungsebene.

- Technische Daten der Wärmebereitstellung und -verteilung
- Gaslastgang bzw. vergleichbare Aufzeichnungen anderer Energieträger

4. Prüfung der Wärmerückgewinnung

Wird WRG beim Kochen zur Warmwasserbereitstellung verwendet, ist die Nutzung solarer Wärme hierfür unwahrscheinlich. Auch eine Abwärmenutzung aus Kälte- und Druckluftbereitstellung für Prozesse mit niedrigem Temperaturniveau ist ggf. möglich.

- Auskunft zur verwendeten WRG bei der Würzekochung
- Technische Daten Druckluftkompressoren und Kältemaschinen

5. Erfassung verfügbarer Dachflächen

Prüfung ob ausreichend belastbare Dach- oder Freiflächen für eine Solaranlage verfügbar sind. Ein Auswahlkriterium für einen Integrationspunkt können geeignete Flächen in unmittelbarer Nähe sein.

- Lageplan
- Unterlagen zur Statik

6. Auswahl eines geeigneten Integrationspunktes

Anhand der drei relevanten Kriterien Temperatur, Laufzeit und Integrationsaufwand sowie den Gegebenheiten vor Ort kann ein geeigneter Integrationspunkt ausgewählt werden. Ein entsprechendes Konzept zur solaren Beheizung hängt von der jeweiligen Anlagentechnik des Prozesses ab.

- Lastprofil des ausgewählten Prozesses
- Technische Spezifikationen der verwendeten Anlagentechnik



5. Glossar

| | |
|--------------------------|--|
| Ausschlagwürze | Menge der Würze, welche nach dem Kochen verbleibt |
| Ausstoß | Jahresproduktion einer Brauerei |
| Betriebswasser | Warmwasserbedarf der Brauerei, der über das Maischen und Läutern hinaus geht; hauptsächlich für Reinigungs- und Sterilisationszwecke |
| Brauwasser | Warmwasser mit hohen Qualitätsanforderungen, das für Maischen und Läutern benötigt wird |
| Brüden | Verdampftes Wasser während der Würzekochung |
| CIP | Cleaning in Place. Automatisiertes Reinigungsverfahren |
| Economiser | Abgaswärmetauscher von Dampf- oder Heißwasserkesseln. Integriert im Kessel oder als separate Baugruppe. |
| Energiespeicher | Warmwasserspeicher (geschlossenes System), der die beim Würzekochen rückgewonnene Energie zwischenspeichert. |
| Hektoliter (hl) | Gängige Maßeinheit im Brauwesen, 1 hl = 100 l |
| Keg | Zylindrische Metallfässer mit speziellem Fitting |
| Kesselspeisewasser | Dem Dampfkessel zugeführtes Wasser, setzt sich aus Kondensat und Zusatzwasser zusammen. |
| Läutern | Trennung von Würze und Treber nach dem Maischen |
| Maische | Gemisch aus Brauwasser und geschrotetem Malz |
| Malz | Gekeimtes und getrocknetes Getreide. Für die Bierproduktion wird hauptsächlich Gerste verwendet |
| Pfannendunst-kondensator | Rohrbündelwärmetauscher der zur Brüdenkondensation während der Würzekochung verwendet wird. |
| Rohwasser | Unbehandeltes Wasser, welches vor der Nutzung als Kesselspeisewasser oder Brauwasser behandelt werden muss. |
| Stapelwasser | Nachspülwasser bei der CIP Reinigung, welches beim nächsten Reinigungszyklus zum Vorspülen verwendet wird |
| Treber | Unlösliche Malzbestandteile, bestehend hauptsächlich aus Spelzen und unlöslichem Eiweiß |
| Verkaufsbier (VB) | Mengenangabe, auf die typischerweise spezifische Angaben wie der Energieverbrauch bezogen werden |
| Würze | Vorstufe des Bieres, Endprodukt nach dem Sudhaus |
| Zusatzwasser | Aufbereitetes Rohwasser, welches nach der Entgasung dem Kessel zugeführt wird. Gleicht Kondensatverluste des Dampfkreislaufs aus. |



6. Quellenverzeichnis

- [1] Kelch, K., 2010. *Gravierende Veränderungen der betriebenen Braustätten von 1987 bis 2009*. Brauwelt 15-16, S. 446-447.
- [2] Schu, G. F., Stolz, F., Jordan, U. & Kansy, R., (2001). *Betriebevergleich Energie 1998*. Brauwelt 4, S. 116-120.
- [3] Kunze, W., 2007. *Technologie Brauer & Mälzer*. 9., VLB Berlin, Berlin. 978-3-921690-56-7.
- [4] Hackensellner, T., Bühler, T., 2008. *Effizienter Energieeinsatz im Sudhaus*, Kitzingen.
- [5] Ernst, H., 2009. *Damperzeugungssysteme für Industrie und Gewerbe*. Anlagen und Komponenten, Prozesstechnik, Wärmebilanz, Vulkan-Verl., Essen, Ruhr. 9783802725531.
- [6] Back, W., 2005. *Ausgewählte Kapitel der Brauereitechnologie*, Hans Carl, Nürnberg. 978-3418008028.
- [7] Sattler, G., Schibel, T., 2011. *Planungshandbuch Dampfkessel*. Viessmann Werke, Allendorf (Eder).
- [8] Energieagentur NRW, 2010a. *Drucklufttechnik - Potenziale zur Energieeinsparung*, Berlin.
- [9] Atlas Copco Kompressoren und Drucklufttechnik GmbH, 2009. *Handbuch der Drucklufttechnik*.