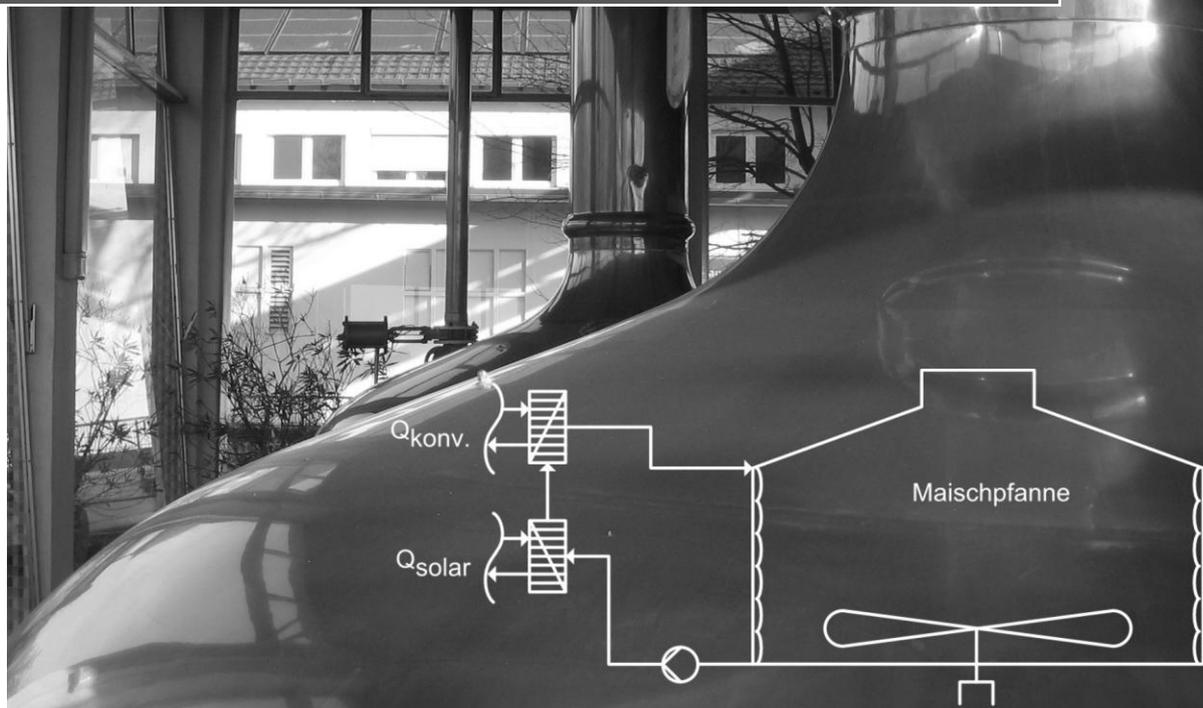


**S O L A R .**  
**UNI-KASSEL.DE**

# Branchenkonzept

## Solare Prozesswärme für Brauereien



**U N I K A S S E L**  
**V E R S I T Ä T**



# Branchenkonzept

## Solare Prozesswärme für Brauereien

Teil 2 des Abschlussberichtes zum Forschungsvorhaben  
„SOPREN – Solare Prozesswärme und Energieeffizienz“  
Förderkennzeichen: 0329601T

### Autoren:

B. Schmitt, C. Lauterbach, K. Vajen

Institut für Thermische Energietechnik

Universität Kassel



# Inhaltsverzeichnis

<b>Zusammenfassung</b> .....	<b>1</b>
<b>1. Einleitung</b> .....	<b>2</b>
<b>2. Das Brauwesen in Deutschland</b> .....	<b>3</b>
<b>3. Überblick der Bierproduktion</b> .....	<b>6</b>
3.1. Das Sudhaus .....	7
3.2. Der Gär- und Lagerkeller .....	8
3.3. Die Abfüllhalle .....	10
3.4. Nebeneinrichtungen.....	11
3.5. Energetische Betrachtung der Bierproduktion .....	15
<b>4. Wärmerückgewinnung in Brauereien</b> .....	<b>21</b>
4.1. Würzekochung.....	21
4.2. Würzekühlung .....	24
4.3. Nebeneinrichtungen.....	26
<b>5. Identifikation eines geeigneten Integrationspunktes</b> .....	<b>29</b>
<b>6. Anlagenkonzepte zur solaren Beheizung</b> .....	<b>34</b>
6.1. Wasseraufbereitung .....	34
6.2. Warmwasserbereitstellung .....	37
6.3. Maischen .....	38
6.4. Entalkoholisierung.....	41
6.5. Haltbarmachung .....	45
6.6. Gebindereinigung .....	50
6.7. CIP-Reinigung.....	57
<b>7. Checkliste zum Vorgehen</b> .....	<b>60</b>
<b>8. Anhang</b> .....	<b>62</b>
8.1. Glossar.....	62
8.2. Literaturverzeichnis .....	64
8.3. Abbildungsverzeichnis .....	67
8.4. Tabellenverzeichnis.....	68

## Zusammenfassung

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. 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 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. Kleinere Brauereien haben tendenziell einen höheren spezifischen Wärmeverbrauch als Großbrauereien, was hauptsächlich am diskontinuierlichen Braubetrieb und einem niedrigeren Effizienzstandard liegt.

Die Einbindung von Solarwärme kann auf Versorgungs- und Prozessebene erfolgen. Die Versorgungsebene umfasst das Kesselhaus und die Vor- und Rücklaufleitungen des Wärmeträgers (häufig wird Dampf verwendet). 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. 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.

Um einen geeigneten Punkt zur Einbindung der Solarwärme auf Prozessebene identifizieren zu können, werden Kriterien benötigt anhand derer die Prozesse einer Brauerei bewertet werden können. In Deutschland und Ländern mit vergleichbaren klimatischen Bedingungen ist die Prozesstemperatur 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 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. Berücksichtigt man diese Kriterien, so lässt sich aus allen Produktionsprozessen eine Auswahl treffen, die für eine solare Unterstützung geeignet erscheinen. Besonders gut eignen sich demnach die solare Bereitstellung von warmen Brau- oder Betriebswasser, die solare Unterstützung der Wasseraufbereitung oder Tunnelpasteurisation. Erheblich aufwendiger ist die Nutzung von Solarwärme beispielsweise für das Maischen oder die Flaschen- und Kegreinigung.

# 1. Einleitung

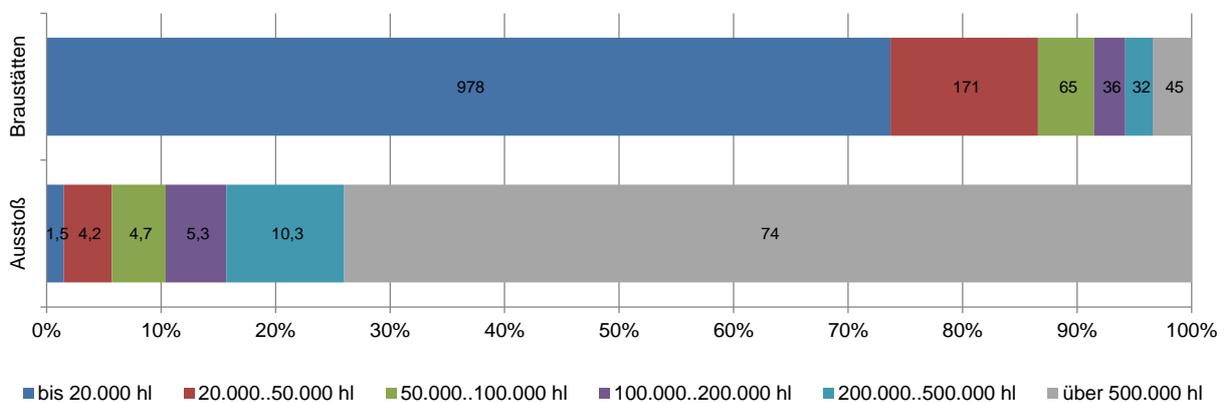
Im Rahmen des Projektes „SOPREN – Solare Prozesswärme und Energieeffizienz“ hat das Institut für thermische Energietechnik der Universität Kassel ein Konzept erarbeitet, welches die Einbindung eines effizienten Würzekochverfahrens mit einer verbesserten Wärmerückgewinnung im Sudhaus und einer thermischen Solaranlage kombiniert. Im Rahmen der Umsetzung dieses Konzepts bei der Hütt-Brauerei in Kassel/Baunatal wurde eine thermische Solaranlage mit 155 m<sup>2</sup> Flachkollektoren und 10 m<sup>3</sup> Pufferspeicher in die Brauwasserreserve eingebunden und messtechnisch begleitet. Die Ergebnisse der umfangreichen Untersuchungen bei der Umsetzung dieses Pilotprojektes sowie weitere Audits in anderen Brauereien unterschiedlicher Größe (40.000 bis 1.800.000 hl pro Jahr) mündeten in einem Leitfaden zur Nutzung solarer Prozesswärme in Brauereien. Der Leitfaden beinhaltet auf wenigen Seiten die wichtigsten Informationen zur Machbarkeitsprüfung und Identifikation eines geeigneten Integrationspunktes für Solarwärme sowie die wichtigsten Anlagenkonzepte zur solaren Beheizung. Der Leitfaden kann unter [www.solar.uni-kassel.de/downloads](http://www.solar.uni-kassel.de/downloads) heruntergeladen werden.

Das vorliegende Branchenkonzept „Solare Prozesswärme in Brauereien“ stellt die Langfassung des Leitfadens dar. Mit den zusätzlichen, im Branchenkonzept enthaltenen, Informationen sollen Zusammenhänge und Hintergründe verdeutlicht werden, die aufgrund der limitierten Seitenzahl im Leitfaden nicht dargestellt werden konnten. Das Branchenkonzept beinhaltet zunächst Informationen zur Struktur der Brauereibranche wie z.B. Anzahl und Ausstoß deutscher Brauereien sowie die Aufteilung nach Bundesländern und Konzernangehörigkeit. Das darauffolgende Kapitel gibt einen hinreichend genauen Überblick der Produktionsabläufe in Brauereien. Neben den relevanten Prozessen und Anlagen werden auch die Energiebereitstellung und Aufteilung des Energieverbrauchs erläutert. Da die Wärmerückgewinnung innerhalb des Sudhauses Einfluss auf den Warmwasserhaushalt einer Brauerei und damit auch auf die Möglichkeiten der Nutzung von Solarwärme hat, beschäftigt sich Kapitel 4 ausführlich mit dieser Thematik. Neben den unterschiedlichen Möglichkeiten der Wärmerückgewinnung im Sudhaus, wird in diesem Kapitel auch auf die Möglichkeit der Wärmerückgewinnung bei der Dampf-, Kälte-, und Druckluftbereitstellung eingegangen. In Kapitel 5 wird erläutert wie ein geeigneter Punkt zur Einbindung von Solarwärme identifiziert werden kann und anhand unterschiedlicher Kriterien Prozesse ausgewählt, die sich für die Einbindung von Solarwärme eignen. Schließlich werden in Kapitel 6 die identifizierten Integrationspunkte detailliert beschrieben. Dazu werden die Prozesse zunächst detailliert beschrieben und anschließend die Anlagenkonzepte zur Einbindung von Solarwärme dargestellt.

Bei der Verwendung von Branchenkonzept und Leitfaden ist zu beachten, dass im Brauwesen eine gewisse Diversität herrscht. Unterschiede in Betriebsgröße und Sortiment können schnell zu veränderten Randbedingungen bei verwendeter Anlagentechnik, Betriebszeiten oder anteiligen Wärmebedarf führen.

## 2. Das Brauwesen in Deutschland

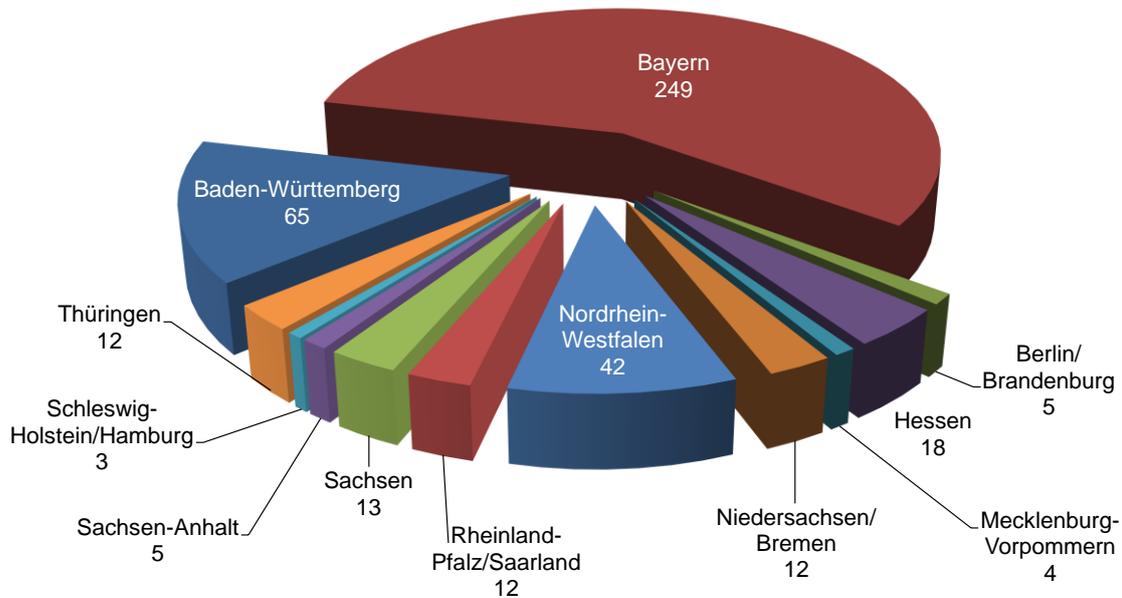
Die Herstellung von Bier ist ein Teil des Wirtschaftszweiges Getränkeherstellung und verfügt über eine Vielzahl unterschiedlichster Unternehmen. Im Jahr 2009 gab es in Deutschland über 580 Brauunternehmen, die mit knapp 31.000 Beschäftigten 1.327 Brauereien betrieben und dabei insgesamt 5.000 verschiedenen Biersorten produzierten (Berkhout et al., 2009), (Kelch, 2010a). Der Großteil dieser Braustätten entfällt gemäß Abbildung 2-1 auf die Größenklasse mit einer Jahresproduktion unter 20.000 hl (so genannte Kleinst- oder Gasthausbrauereien). Diese Brauereien produzierten jedoch lediglich 1,5 % der deutschen Gesamtjahreserzeugung. Knapp ein Viertel der Jahresproduktion geht auf typisch mittelständische Brauereien mit einem Ausstoß zwischen 20.000 hl und 500.000 hl pro Jahr zurück. Weniger als 5 % aller Betriebe sind Großbrauereien mit einer Jahresproduktion über 0,5 Mio. hl. Diese produzierten jedoch in 2009 über 74 % der Gesamtjahreserzeugung von knapp 95 Mio. hl Bier. Der gesamte Umsatz der Branche lag bei etwa 8 Mrd. Euro.



**Abbildung 2-1: Braustätten und Ausstoßmenge in Deutschland nach Betriebsgröße nach (Kelch, 2010a)**

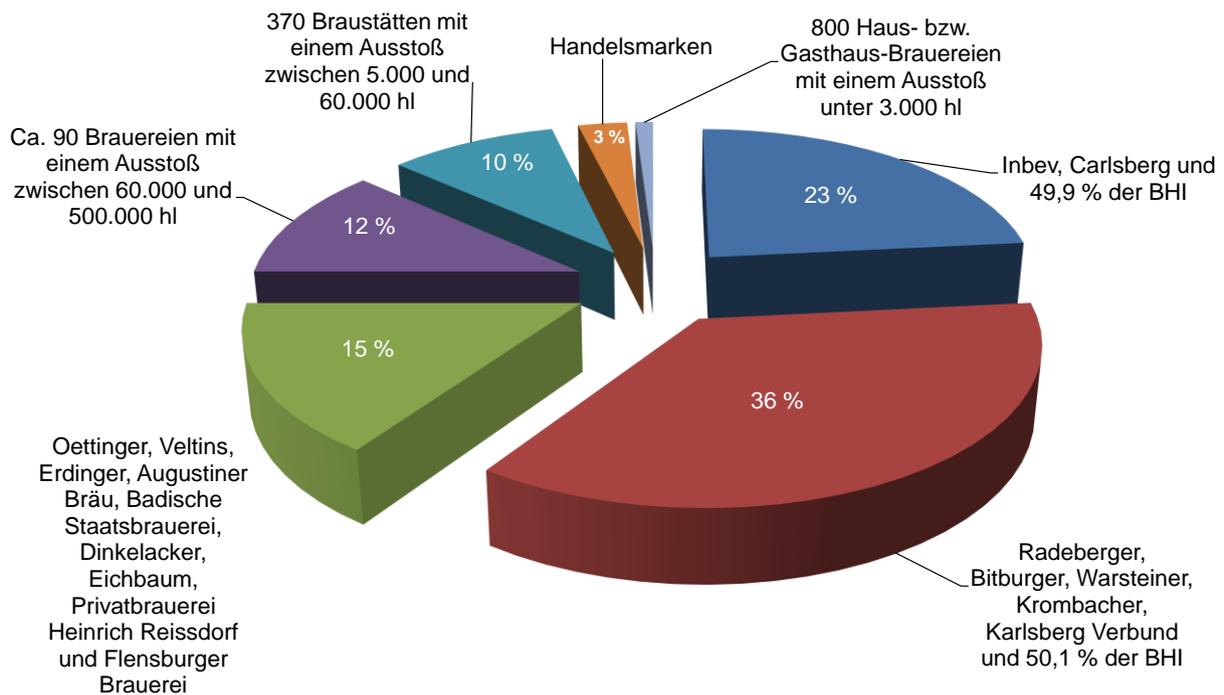
Die Aufteilung der deutschen Braustätten nach Bundesländern zeigt Abbildung 2-2. Diese beinhaltet ausschließlich Brauereien mit einer Jahreserzeugung von über 5.000 hl Bier pro Jahr. Zunächst wird ersichtlich, dass ein Großteil der deutschen Braustätten in dieser Aufteilung nicht enthalten ist (887 Stück), da Kleinst- und Gasthausbrauereien einen geringeren Ausstoß haben als die zugrunde gelegten 5.000 hl/Jahr. Fast drei Viertel aller deutschen Brauereien befinden sich demnach in Bayern und Baden-Württemberg (Kelch, 2010a).

Über die Hälfte des in Deutschland produzierten Bieres ist Pils. Weizen und Export nehmen jeweils knapp 10 % ein. Der Rest verteilt sich auf die Sorten Hell, Alkoholfrei, Kölsch und Alt sowie Biermischgetränke. In Deutschland kommen hauptsächlich Mehrweggebinde zum Einsatz. So nehmen Pfandflaschen einen Anteil von 60 % ein, Fassbier und Einweggebinde haben einen Anteil von jeweils 20 % (Hahn et al., 2009). Dieser geringe Einweganteil ist im europäischen Vergleich eher eine Besonderheit. So liegt zum Beispiel in der Schweiz der Einweganteil durchschnittlich bei über 50 %.



**Abbildung 2-2: Braustätten über 5.000 hl Deutschland nach Bundesländern (Kelch, 2010a)**

Etwa drei Viertel des deutschen Biermarktes wird von einigen wenigen Großunternehmen bedient, die unterschiedliche Marken vereinen. Dies ist in Abbildung 2-3 dargestellt. Demnach sind ca. 23 % des deutschen Biermarktes in ausländischer Hand und werden von der InBev-Gruppe (Brauereien Becks, Diebels, Gilde und Spatengruppe), der Carlsberg-Gruppe (Holsten, Lübzer und Feldschlösschen Dresden) sowie den durch Heineken gehaltenen 49,9 %igen Anteil der Brau Holding International (Paulaner und Kulmbacher Gruppe sowie Fürstenberg, Hoepfner und Schmucker) bedient. Die sechs größten Privatbrauereigruppen (Radeberger, Bitburger, Warsteiner, Krombacher, Karlsberg Verbund und die übrigen 50,1 Prozent der Brau Holding International) bedienen mit knapp über 36 % den größte Anteil des deutschen Biermarktes. Die neun größten Privatbrauereien Oettinger, Veltins, Erdinger, Augustiner Bräu, Badische Staatsbrauerei, Dinkelacker, Eichbaum, Privatbrauerei Heinrich Reissdorf und Flensburger (Jahresproduktion über 0,5 Mio. hl) decken knapp 16 % des deutschen Marktes ab. Die verbleibenden 25 % verteilen sich demnach auf kleinere Brauereien. Etwa 90 Brauereien mit einem jährlichen Ausstoß zwischen 60.000 und 500.000 hl nehmen etwa 12 % Marktanteil ein, das Frankfurter Brauhaus und die Brauereien Darguner, Königshof und Iserlohn (4 Braustätten) stellen ca. 3 % vom deutschen Inlands-Biermarkt für den Handel her. Um die verbleibenden 10 % des Biermarktes konkurrieren rund 370 kleinere Braustätten mit einem Ausstoß zwischen 5.000 hl und 60.000 hl. Lediglich ein verschwindend geringer Anteil geht auf Haus- bzw. Gasthausbrauereien zurück, deren jährliche Produktion unterhalb von 5.000 hl liegt (Kelch, 2010b). Die Globalisierung auf dem deutschen Brauereimarkt vollzog sich hauptsächlich in den Jahren von 2002 bis 2005 und führte zu teils gravierenden Ausstoßverlagerungen in den einzelnen Bundesländern und damit auch zu Veränderungen bei den betriebenen Braustätten.



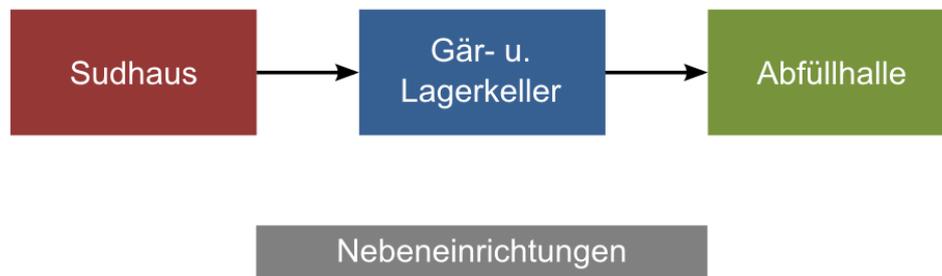
**Abbildung 2-3: Globalisierung auf dem deutschen Biermarkt (Kelch, 2010b)**

Innerhalb der letzten Jahre zeichnete sich ein signifikanter Anstieg der Produktionskosten für Bier ab, welcher hauptsächlich auf den drastisch gestiegenen Preisen für Hopfen basierte, der durch wetterbedingt schlechte Erträge zustande kam. Zusätzlich stiegen die Lohnkosten in den vergangenen Jahren überdurchschnittlich an, was sich letztendlich ebenfalls preissteigernd auf das Bier auswirkte. Der dadurch gestiegene Verkaufspreis des Bieres wirkte sich schließlich negativ auf das Konsumverhalten aus, welches zusätzlich durch den wirtschaftlichen Abschwung negativ beeinflusst wurde. So musste in vielen Ländern ein rückläufiger Bierkonsum verzeichnet werden (Berkhout et al., 2009).

Deutschland ist der wichtigste Biermarkt in Europa. Neben dem größten Anteil an den 3.733 europäischen Brauereien, ist Deutschland auch der größte Bierproduzent (Gesamteuropäischer Ausstoß in 2009: 427 Mio. hl). Lediglich das Konsumverhalten ist in Tschechien mit knapp 160 Litern pro Kopf höher als in Deutschland (ca. 110 Liter pro Kopf). Zudem produziert Deutschland jährlich über 30.000 t Hopfen und deckt damit gut ein Drittel des weltweiten Bedarfes ab (Berkhout et al., 2009), (BoE, 2010).

### 3. Überblick der Bierproduktion

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 CO<sub>2</sub>, 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 nach Abbildung 3-1 das Sudhaus, der Gär- und Lagerkeller sowie die Abfüllhalle. Neben diesen drei Produktionsbereichen gibt es noch 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.



**Abbildung 3-1: Produktionsabschnitte in Brauereien**

Die Grundlage des Brauprozesses ist die Herstellung der Würze, welche im Sudhaus aus Wasser, Malz und Hopfen gewonnen wird. Das Sudhaus stellt somit das elementare Glied innerhalb der Prozesskette dar. In diesem Produktionsabschnitt fällt der einzig nennenswerte Produktionsreststoff an, der Treber (unlösliche Malzbestandteile). Dieser wird in Silos gesammelt und meist der Landwirtschaft als Tierfutter zugeführt. Bei größeren Brauereien bietet sich zudem die Möglichkeit der energetischen Verwertung dieser Reststoffe durch Treberverbrennung oder Biogaserzeugung. Die gewonnene Würze durchläuft anschließend einen Gär- und Reifeprozess, wobei sie mit Hefe zu Alkohol und Kohlensäure vergoren wird. Während der Gärung müssen die Behälter, in denen sich die Würze befindet, auf eine konstant niedrige Temperatur herab gekühlt werden. Nach Abschluss der Gärung gelangt das Bier in Reifetanks, in denen eine Nachgärung stattfindet. Nach einer weiteren Lagerung bei niedrigen Temperaturen kann das Bier filtriert werden. Zum Abschluss erfolgt die Abfüllung in Flaschen und Fässer, genannt Gebinde. Hierzu werden die jeweiligen Gebinde zuerst gereinigt und anschließend unter CO<sub>2</sub>-Überdruck abgefüllt. Alle weiteren Teile der Brauerei, die zur Aufrechterhaltung der Produktion notwendig sind, werden in den sogenannten Nebeneinrichtungen zusammengefasst. Dies sind das Kesselhaus, die Druckluft- und Kältebereitstellung, Cleaning in Place (CIP) Installationen und die Wasserversorgung. Je nach Brauerei kann die Wasserversorgung einen brauereieigenen Brunnen beinhalten, oder aber eine Wasseraufbereitungsanlage.

### 3.1. Das Sudhaus

Im Sudhaus findet der eigentliche Brauprozess statt, bei dem eine verzuckerte Flüssigkeit, genannt Würze, hergestellt wird. Die einzelnen Prozessschritte der Würzeherstellung im Sudhaus sind in Abbildung 3-2 dargestellt. Zu Beginn erfolgt das **Schroten**, bei dem das Malz zerkleinert wird, um die spätere Lösung der darin enthaltenen Stoffe im Brauwasser zu erleichtern. Das Schroten erfolgt durch spezielle Mühlen, wobei Trockenschrot-, Nassschrot-, Hammer- und Dispergiermühlen unterschieden werden. Anschließend erfolgt das **Maischen**, bei dem die Inhaltsstoffe des Malzes durch enzymatisch-biologische oder physikalische Vorgänge in Lösung gebracht werden. Dazu wird das Malzschrot mit warmen Brauwasser (35..60 °C) vermischt und unter stetigem Umrühren über verschiedene Temperaturstufen erhitzt, wobei an bestimmten Punkten definierte Eiweiß- und Verzuckerungspausen eingehalten werden. Die jeweilige Einmaischtemperatur, Anzahl und Dauer der Rasten hängt vom Maischverfahren und der herzustellenden Biersorte sowie den Vorlieben des Braumeisters ab. Die Abmaischtemperatur liegt bei 74..78 °C. Die Zeitdauer des Maischens beträgt zwischen 1,5 und 3 Stunden. Am Ende des Maischprozesses besteht die Maische aus einem wässrigen Gemisch von gelösten und ungelösten Stoffen. Die wässrige Lösung der Extraktstoffe wird als Würze bezeichnet, die ungelösten Bestandteile heißen Treber. Diese bestehen hauptsächlich aus Spelzen, Keimlingen und anderen Stoffen, die beim Maischen nicht in Lösung gegangen sind (Kunze, 2007).

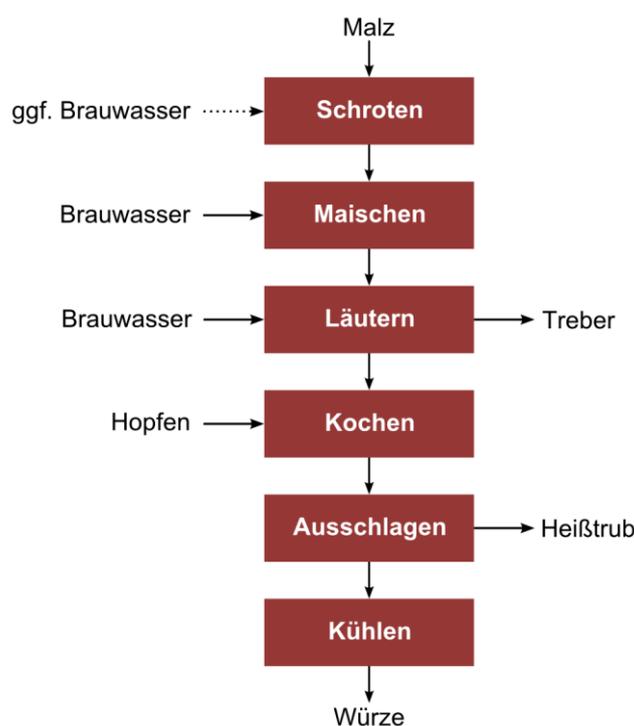


Abbildung 3-2: Produktionsablauf im Sudhaus

Beim anschließenden **Läutern** erfolgt die Trennung von Würze und Treber. Dies geschieht in zwei Phasen. Zunächst erfolgt das Abziehen der gewonnenen Würze in einem Filtrationsprozess. Dies wird als Abläutern der Vorderwürze bezeichnet. Anschließend erfolgt das Aus-

waschen des nach dem Filtrationsprozess in den Trebern noch verbleibenden Extraktes durch heißes Wasser. Dies wird auch als Anschwänzen bezeichnet. Das Abläutern erfolgt heute hauptsächlich mittels Läuterbottichen oder Maischefiltern. Der verbleibende Treber hat einen Wassergehalt von etwa 70..80 %. Pro Hektoliter Bier fallen gut 20 kg Treber an (Kunze, 2007).

Nach dem Läutern erfolgt unter Hopfenzugabe die **Würzekochung**. Dabei werden bittere und aromatische Bestandteile des Hopfens in die Würze überführt und gleichzeitig Eiweißstoffe ausgeschieden. Da die Vorderwürze beim Läutern durch die Nachgüsse stark verdünnt wurde, muss beim Kochen eine definierte Menge Wasser verdampft werden, um die gewünschte Würzekonzentration zu erhalten. Dazu werden je nach verwendetem Kochverfahren etwa 4..10 % des Würzevolumens verdampft. Zudem wird die Würze während der Kochung sterilisiert. Die Kochzeit beträgt in Abhängigkeit der Gesamtverdampfung etwa 40..100 Minuten (Kunze, 2007).

Ist der gewünschte Stammwürzegehalt erreicht, endet der Kochvorgang und es beginnt das **Ausschlagen**. Dabei wird der sogenannte Heißtrub entfernt, der beim Kochen entsteht. Dieser besteht aus nicht gelösten Hopfenbestandteilen und ausgefallenem Eiweiß und lässt sich durch Sedimentation oder Filtration entfernen. Häufig wird die Würze zur Trubabscheidung in einen Whirlpool gepumpt. Durch das Umpumpen wird die Würze in eine Rotationsbewegung versetzt, wodurch sich der Heißtrub in der Mitte des Behälters in Form eines Kegels absetzen kann.

Nach dem Ausschlagen erfolgt die **Abkühlung der Würze** auf Anstelltemperatur. Für die klassische Untergärung wird die Würze auf 4..7 °C, zum Teil auch auf 10 °C abgekühlt. Für obergärige Biere (z.B. Weizenbier) muss die Würze lediglich auf 12..18 °C gekühlt werden (Narziß, 2005). Die Abkühlung der Würze erfolgt mit ein- oder zweistufigen Plattenwärmeübertragern. Bei der Verwendung von einstufigen Wärmeübertragern wird zunächst frisches Brauwasser auf 2..5 °C gekühlt und dann im Gegenstrom zur Würze geführt. Das Brauwasser erwärmt sich dabei auf mindestens 80 °C und wird der Brauwasserreserve zugeführt. Beim nächsten Sud kann das heiße Brauwasser zum Einmaischen und Läutern verwendet werden. Bei zweistufigen Wärmeübertragern wird die Würze zunächst durch ungekühltes Brauwasser (10..15 °C) abgekühlt. Das Brauwasser erwärmt sich in diesem Fall ebenfalls auf eine Temperatur von mindestens 80 °C und kann zum Einmaischen und Läutern verwendet werden. Im zweiten Abschnitt des Wärmeübertragers wird Eiswasser oder ein anderes Kühlmittel (Glykol oder Ammoniak) verwendet. Der Wärmeübertrager ist derart ausgelegt, dass der gesamte Kühlungsprozess der Würze nicht länger als 60 Minuten dauert (Hackensellner und Bühler, 2008). Nach der Würzekühlung verlässt die Würze das Sudhaus und gelangt in den Gär- und Lagerkeller.

## 3.2. Der Gär- und Lagerkeller

Der Gär- und Lagerkeller ist der sogenannte Kaltbereich einer Brauerei. Hier entsteht durch Gärung und Reifung das Bier aus der im Sudhaus hergestellten Würze. Bei der alkoholischen Gärung werden verschiedene Zuckerarten durch Hefe unter Wärmeentwicklung in Alkohol

und Kohlensäure zerlegt. Dazu muss die Würze für einen definierten Sauerstoffeintrag mit Sterilluft und schließlich der Hefe versetzt werden. Dieser Vorgang wird als **Anstellen** bezeichnet.

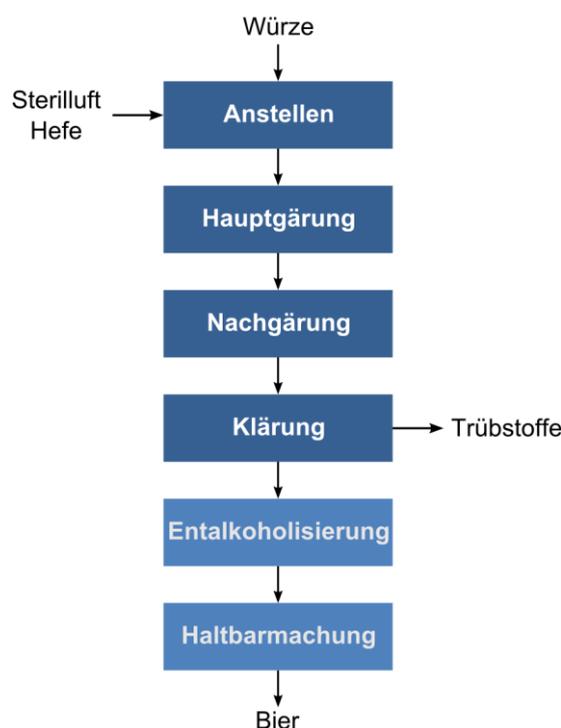


Abbildung 3-3: Produktionsablauf im Gär- und Lagerkeller

Die **Hauptgärung** kann in offenen oder geschlossenen Gärbottichen oder Gärtanks erfolgen. Am gebräuchlichsten sind stehende zylindro-konische Gärtanks. Die Temperatur während der Gärung beträgt etwa 5..15 °C und dauert 6..10 Tage. Da die Hefe bei einem Temperaturbereich von etwa 6 bis 10 °C ihr Wirkoptimum aufweist, muss das Bier während der Gärung auf einer konstant niedrigen Temperatur gehalten werden. Dazu haben die Gärbehältnisse in der Regel einen Mantel durch den ein Kühlmittel gepumpt wird. Die anschließende **Nachgärung** dauert 2..16 Wochen bei Temperaturen von -2 bis 3 °C.

Bevor das fertige Bier in Transportgebinde, Fässer, Flaschen oder Dosen gefüllt werden kann, erfolgt in der Regel die Klärung und Haltbarmachung des Bieres. Bei der **Klärung** werden Trübstoffe (Eiweißgerbstoffe, Hopfenharze, Hefe oder andere bierverderbende Bakterien) abgeschieden. Das Ziel der Klärung ist neben der eigentlichen Glanzfeinheit auch die Verbesserung der Haltbarkeit und erfolgt durch Filtrieren oder Zentrifugieren. Vor der Filtration müssen die verwendeten Filter sterilisiert werden. Hierzu werden diese in der Regel mit 90 °C heißem Wasser gespült. Da eine Erwärmung des Bieres während der Filtration allerdings zur Folge hätte, dass sich die Trübstoffe wieder im Bier lösen und nicht abgeschieden werden können, werden die Filter nach der Sterilisation wieder mit 0..1 °C kaltem Wasser abgekühlt (Kunze, 2007).

Für den Fall, dass eine Brauerei alkoholfreies Bier in ihrem Produktspektrum hat, muss der bei der Gärung entstandene Alkohol entfernt werden. Die **Entalkoholisierung** des Bieres

nach der Gärung kann durch thermische Verfahren oder Membrantrennverfahren erfolgen. Es besteht auch die Möglichkeit die Alkoholbildung während der Gärung zu unterbrechen oder zu unterbinden.

Die **Haltbarmachung** des Bieres kann sowohl im Gär- und Lagerkeller als auch in der Abfüllhalle angesiedelt sein. Im Gär- und Lagerkeller werden die Entkeimungsfiltration oder die Kurzzeiterhitzung zur Haltbarmachung verwendet. Bei der Entkeimungsfiltration fallen die beiden Prozessschritte Klärung und Haltbarmachung zusammen. Hierbei sind allerdings spezielle Anforderungen an den Filter hinsichtlich Filtermaterial und Sterilisation des Filters gestellt. Bei der Kurzzeiterhitzung wird das Bier nach der Filtration mit einem mehrstufigen Plattenwärmeübertrager auf die Pasteurisationstemperatur von 68..75 °C erhitzt. Auf dieser Temperatur wird das Bier für 30..60 Sekunden gehalten (Kunze, 2007).

### 3.3. Die Abfüllhalle

In der Abfüllhalle wird das Bier in unterschiedliche Gebinde gefüllt, die zuvor gereinigt werden müssen. In Deutschland werden dazu am häufigsten Glasflaschen und sogenannte Kegs verwendet. Kegs sind zylindrische Metallfässer aus Aluminium oder Chromnickelstahl, die über einen speziellen Fitting entleert, gereinigt und gefüllt werden können. Vereinzelt kommen auch Kunststoffflaschen und Dosen zum Einsatz.

Zur **Reinigung** von Glasflaschen werden Flaschenwaschmaschinen verwendet, die über unterschiedliche Laugenbäder und Spritzungen (Wasser und Lauge) verfügen, welche die Flaschen durchlaufen. Nach dem Reinigungsvorgang werden die Flaschen befüllt und bei Bedarf anschließend pasteurisiert. Das Reinigen und Befüllen der Kegs erfolgt in einer Linie, welches das Fass durchläuft. Es erfolgt zunächst die Außenreinigung und Restentleerung, anschließend die Innenreinigung mit Wasser, Lauge, Säure und Dampf. Abschließend erfolgen eine Kontrolle der Fässer und die Befüllung.



Abbildung 3-4: Produktionsablauf in der Abfüllhalle

Die **Haltbarmachung** durch Pasteurisation des abgefüllten Bieres erfordert gegenüber der Kurzzeiterhitzung im Gär- und Lagerkeller wesentlich höhere Einwirkungszeiten, da sichergestellt werden muss, dass der gesamte Flascheninhalt lange genug der gewünschten Temperatur ausgesetzt wurde. Bei großen Pasteurisationsleistungen werden kontinuierlich abreitende Tunnelpasteure eingesetzt, bei kleineren Leistungen wird das abgefüllte Bier chargenweise in Kammerpasteuren behandelt. Tunnelpasteure sind zwischen der Verschluss- und Etikettiereinheit angeordnet. Die Flaschen durchfahren langsam dieses Gerät und werden mit heißem Wasser berieselt. Die Flaschen werden in etwa 20 Minuten auf die Zieltemperatur von 62 °C erhitzt, welche weitere 20 Minuten gehalten wird. Anschließend erfolgt die Abkühlung. Das Abkühlen und Anwärmen der Flaschen geschieht durch interne Wärmerückgewinnung der Wasserströme. Bei der Verwendung von Kammerpasteuren (auch Palettenpasteur genannt) wird das Bier palettenweise in einem abgedichteten Raum durch ein Wasser-Dampf-Gemisch, Wasserberieselung oder Heißluft pasteurisiert (Narziß, 2005).

### 3.4. Nebeneinrichtungen

Die Nebeneinrichtungen einer Brauerei umfassen alle zur Aufrechterhaltung der Produktion relevanten Bereiche. Hauptsächlich sind dies Bereitstellung von Wärme, Kälte und Druckluft sowie Anlagen zur Wasseraufbereitung und automatisierten Reinigung der Anlagentechnik. Darüber hinaus zählen auch Lagerhallen oder Büro- und Verwaltungsgebäude zu Nebeneinrichtungen.

#### 3.4.1. Bereitstellung von Wärme

Brauereien verfügen in der Regel über ein zentrales Kesselhaus, in welchem mittels Erdgas, Heizöl oder biogener Brennstoffe Heißwasser oder Dampf erzeugt wird, der ausgehend vom Kesselhaus zu den jeweiligen Verbrauchern geleitet wird. In der Vergangenheit haben sich im Brauwesen Dampfsysteme gegenüber den Heißwassersystemen durchgesetzt (Krones, 2005), weshalb im Folgenden ein Kesselhaus zur Dampferzeugung exemplarisch dargestellt wird. Typische Sattdampftemperaturen, die vom Dampferzeuger bereitgestellt werden müssen liegen bei 150..170 °C (entspricht 5..8 bar). Der benötigte Druck wird dabei von dem Verbraucher mit den höchsten Temperaturanforderungen sowie den Dimensionen des Dampfnetzes bestimmt. Häufig wird der im Kesselhaus bereitgestellte Dampf nicht nur für Prozesswärme, sondern auch für die Gebäudeheizung und Warmwasserbereitstellung verwendet. Das Herzstück eines Kesselhauses ist, wie in Abbildung 3-5 dargestellt, der Dampfkessel. Durch Verbrennung beispielsweise von Erdgas produziert dieser Dampf, der über Haupt- und Nebenleitung zu den einzelnen Verbrauchern der Brauerei geleitet wird. Bei den Verbrauchern wird der Dampf meist indirekt mittels Wärmetauschern genutzt. Dabei werden unterschiedliche Wärmetauschertypen verwendet. Bei der Kurzzeiterhitzung kommen häufig Plattenwärmetauscher zum Einsatz, während die Beheizung von Flaschenwaschmaschinen in der Regel mit internen Rohrbündelwärmetauschern erfolgt. Eine weitere Möglichkeit stellt beispielsweise die Beheizung von Maischepfannen über angeschweißte Halbrohre oder Taschen dar, in denen der Dampf kondensiert. Unabhängig von der Wärme-

tauscherbauart wird das entstehende Kondensat zum Kesselhaus zurückgeführt. 90 % aller Kondensatsysteme werden bei Umgebungsdruck betrieben, sodass das Kondensat in Kontakt mit der Atmosphäre kommt und somit vor der erneuten Nutzung im Dampferzeuger entgast werden muss. Die Entgasung verläuft bei 95 °C (Teilentgasung) oder bei 105 °C (Vollentgasung). Dazu wird ein kleiner Dampfstrom vom Kessel in den Entgaser geleitet, der das Kondensat auf die gewünschte Temperatur aufheizt und damit unerwünschte Gase (hauptsächlich Sauerstoff und Kohlendioxid) löst. Nach der Entgasung steht das sogenannte Kessel-speisewasser für die Dampferzeugung zur Verfügung und gelangt in den Dampfkessel (Sattler und Schibel, 2011).

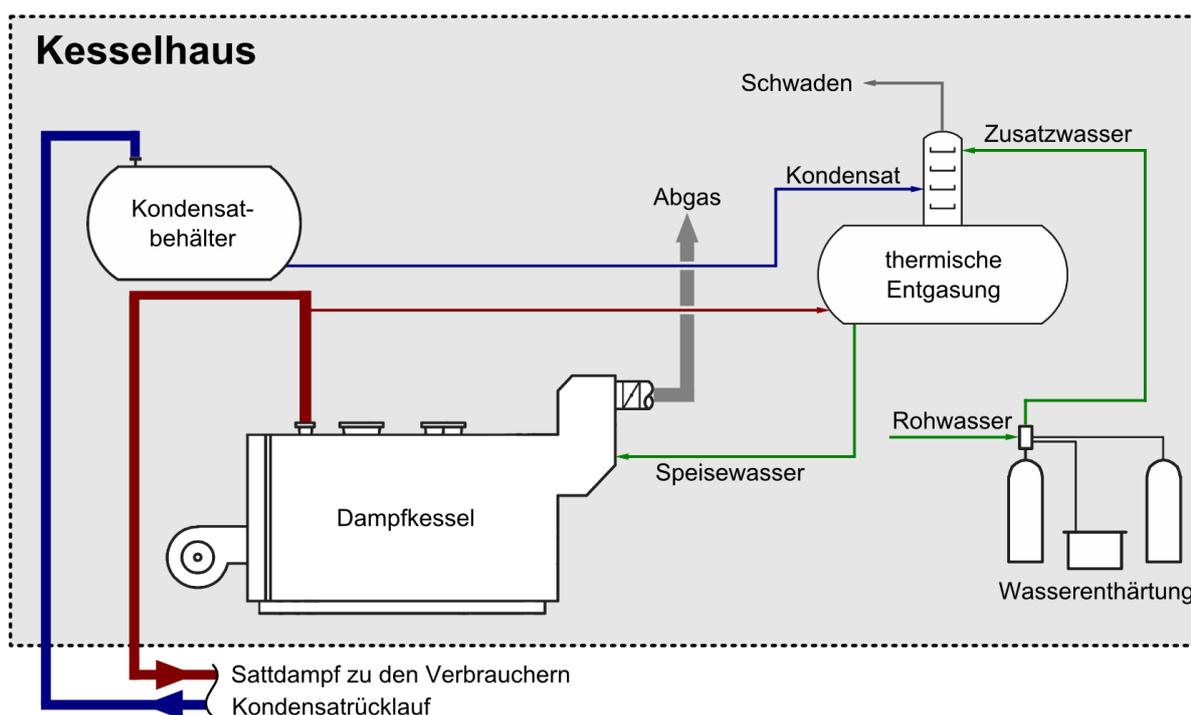


Abbildung 3-5: Hauptbestandteile eines Kesselhauses. Darstellung nach (Sattler und Schibel, 2011)

Offene Kondensatsysteme verzeichnen einen kontinuierlichen Massenverlust von 5..15 %, der mit Entspannungsvorgängen in verschiedenen Teilen des Dampfnetzes begründet ist. Diese sogenannte Nachverdampfung entsteht durch die Druckdifferenz zwischen Dampf- und Kondensatsystem. Auf der Kondensatseite liegt in der Regel ein niedrigerer Druck vor, damit Kondensat über die Entwässerungseinrichtung in die Kondensatleitung gedrückt werden kann. Zusätzliche Kondensatverluste können durch Prozesse entstehen, in denen Dampf stofflich genutzt wird (z.B. direkte Beheizung eines Bades durch Einblasen von Dampf) (Sattler und Schibel, 2011). Die entstehenden Kondensatverluste müssen durch sogenanntes Zusatzwasser ausgeglichen werden. Dazu ist im Kesselhaus eine Wasserenthärtung installiert, die zur Entsalzung von Rohwasser dient, welches anschließend der thermischen Entgasung zugeführt wird. Alternativ zu dem dargestellten offenen Kondensatsystem, kann dieses auch mit 2..5 bar ausgeführt werden. In diesem Fall kann das anfallende Kondensat direkt, also ohne zuvor entgast zu werden, dem Dampferzeuger zugeführt werden (Ernst, 2009).

### 3.4.2. Bereitstellung von Kälte

An verschiedenen Stellen des Produktionsprozesses wird Kälte benötigt, u.a. zur Würzekühlung, Gärung, Drucktank- oder Keller- und Lagerraumkühlung. Die jeweiligen Anwendungen haben unterschiedliche Anforderungen an die Kühltemperatur, sodass es mehrere Möglichkeiten gibt die Kältebereitstellung in Brauereien zu realisieren. So können in unterschiedlichen Bereichen der Brauerei einzelne Kältemaschinen installiert sein, die jeweils für eine Anwendung Kälte bereitstellen. Typischerweise wird Ammoniak als Kältemittel verwendet, das entweder zur direkten Kühlung (z.B. Direktverdampfung im Mantel des Gärtanks) oder zur indirekten Kühlung mittels eines weiteren Kälte-trägers (z.B. Glykol) genutzt wird. Moderne Kälteanlagen verfügen gemäß Abbildung 3-6 über mehrere Kältekreisläufe, die mit unterschiedlichen Temperaturen die jeweiligen Verbraucher der Brauerei mit Kälte versorgen. Aufgrund der unterschiedlichen Temperaturanforderungen verfügen moderne Kälteanlagen meist über mehrere Verdampfer (Kunze, 2007).

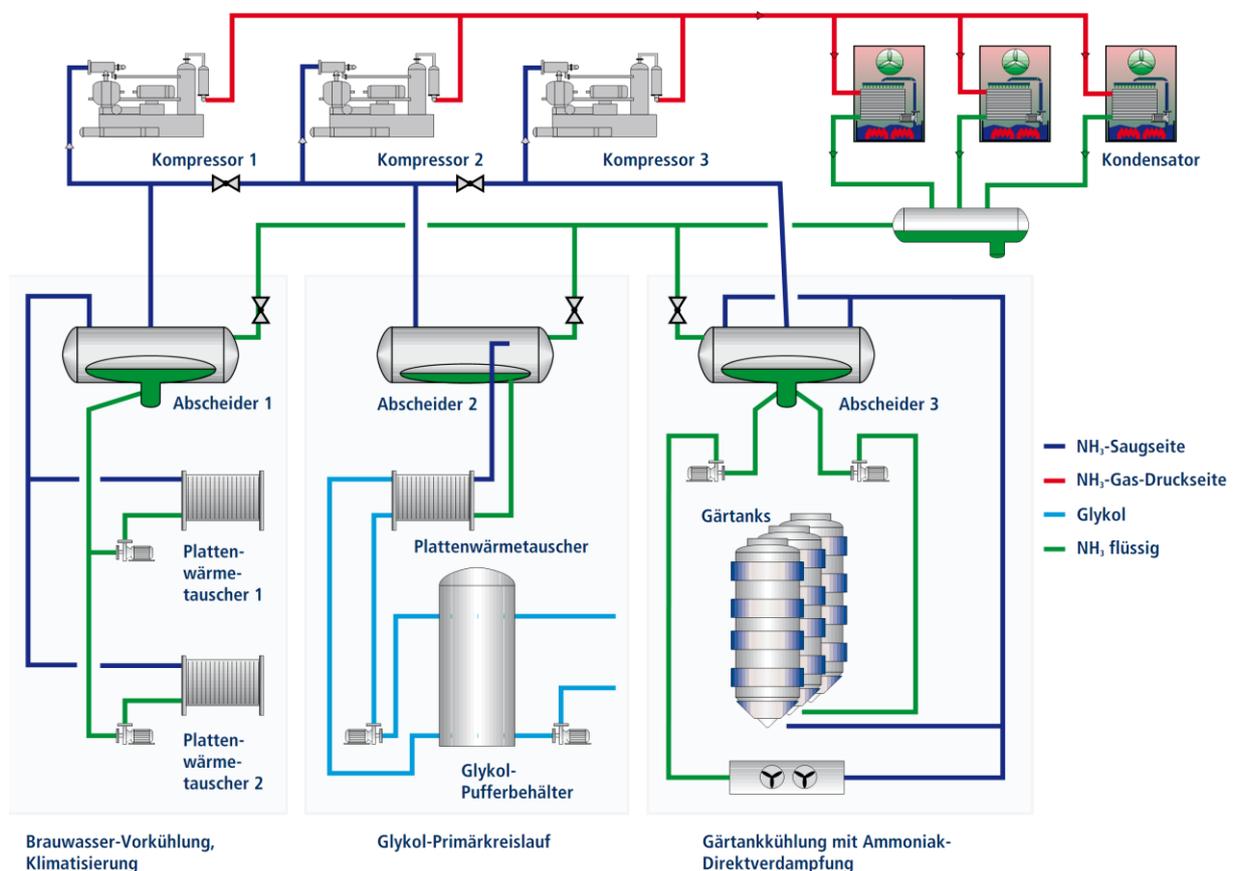


Abbildung 3-6: Zentrale Kälteanlage mit drei Kreisläufen (GEA, 2009)

Das flüssige Ammoniak (grün) wird über die unterschiedlichen Abscheider den jeweiligen Kühlzwecken zugeführt. So beispielsweise mit etwa  $-6\text{ °C}$  den Gärtanks, wo es im Mantel verdampft und dadurch den Inhalt kühlt. Für indirekte Kühlung wird das Ammoniak in einem separaten Kühler verdampft und kühlt damit einen Glykolkreislauf, der zum Beispiel bei der zweistufigen Würzekühlung verwendet wird. Der in allen Fällen entstehende Ammoniak-

dampf (blau) gelangt zurück in den jeweiligen Abscheider und wird dort von den Kompressoren angesaugt und auf 11..12 bar komprimiert. Dadurch erwärmt sich der Ammoniakdampf (rot) bei Schraubenkompressoren auf 70..90 °C und bei Kolbenkompressoren auf 90..110 °C. Anschließend wird es in den Kondensatoren auf ca. 25 °C abgekühlt und flüssig den jeweiligen Abscheidern zugeführt (Kunze, 2007).

### 3.4.3. Bereitstellung von Druckluft

Gemäß ISO 8573-1 werden in Brauereien sehr hohe Ansprüche an die Qualität der Druckluft gestellt. Prinzipiell werden zwei Arten von Druckluft mit unterschiedlichen Qualitätsanforderungen unterschieden: Arbeitsluft (z.B. zum Schalten von Ventilen oder zur pneumatischen Förderung) und Prozessluft (Belüftung der Würze und Entleeren von Tanks). Aus diesem Grund verfügen Brauereien meist über zwei Druckluftsysteme zur Bereitstellung von steriler und ölfreier Prozessluft und herkömmlicher Arbeits- und Steuerluft. Als Richtwert kann ein Verbrauch von 4..10 m<sup>3</sup>/hl Verkaufsbier angenommen werden. Davon entfallen 50..60 % auf die Flaschenabfüllung, 5..10 % auf die Kegfüllung, 7..10 % auf Steuerluft und der Rest auf das Sudhaus. Eine Druckluftanlage verfügt typischerweise über folgende Bestandteile: Ein Luftfilter der die angesaugte Luft von Kontaminationen befreit, einen Verdichter der die angesaugte Luft auf den benötigten Druck komprimiert, einen Kühler der die bei der Kompression erwärmte Luft abkühlt, einen Trockner der die kalte Luft trocknet, einen Druckbehälter der als Puffer dient und ein verzweigtes Leitungsnetz welches zu den jeweiligen Verbrauchern führt (Kunze, 2007).

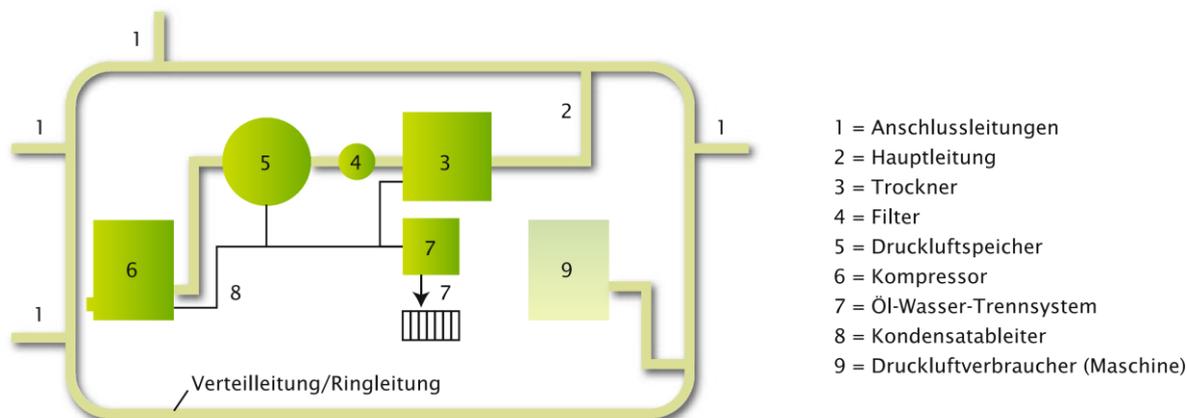


Abbildung 3-7: Hauptkomponenten eines Druckluftsystems (Hesselbach, 2012)

### 3.4.4. Wasseraufbereitung

Wasser nimmt in einer Brauerei die Rolle eines Rohstoffs, Arbeits- und Hilfsmittels ein und wird daher in unterschiedlichen Qualitätsanforderungen benötigt. Die vorhandene Anlagentechnik zur Aufbereitung, Speicherung und Verteilung von Wasser kann von Brauerei zu Brauerei stark variieren, was hauptsächlich an der Qualität des zur Verfügung stehenden Wassers liegt. Grundsätzlich benötigt eine Brauerei Brauwasser, welches die höchsten

Qualitätsanforderungen hat und Brauchwasser, was nicht mit dem Produkt in Berührung kommt. Typischerweise bezieht eine Brauerei das benötigte Wasser sowohl aus eigenen Brunnen als auch aus öffentlichen Netzen. Vor allem hinsichtlich der Ionenzusammensetzung und Härte erfüllt sogenanntes Stadtwasser in der Regel nicht die Anforderungen die an Brauwasser gestellt werden, sodass eine Aufbereitung notwendig wird. In diesem Fall gibt es getrennte Wasserversorgungen für Brau- und Brauchwasser. Für den Fall, dass ausreichend Brunnenwasser mit der geforderten Brauwasserqualität zur Verfügung steht, können beispielsweise auch Reinigungsprozesse mit diesem Wasser bedient werden, sodass nur eine Wasserversorgung in der Brauerei existiert. Ist die Aufbereitung des Wassers erforderlich, so erfolgt in der Regel eine Enthärtung und Entgasung des Wassers (Walter, 2005), (Petersen, 1993).

### **3.4.5. Cleaning in Place Einrichtungen**

In Brauereien wie auch in anderen Branchen der Ernährungsindustrie stellt die Reinigung von Produktionseinrichtungen einen wichtigen und immer wiederkehrenden Prozess dar. Mittels Reinigung sollen Produktrückstände und Mikroorganismen von Oberflächen entfernt werden, um hygienische Standards einzuhalten. Die Reinigung von Produktionsanlagen kann automatisiert oder manuell erfolgen. Bei der automatisierten Reinigung (bezeichnet als CIP - Cleaning in Place) werden im Anschluss an einen Produktionszyklus alle durchflossenen Anlagenteile (Tanks, Sudkessel, Wärmetauscher, Rohrleitungen, Füller, etc.) mit einer Reinigungslösung gespült, ohne dass die Anlage zerlegt werden muss. Erfolgt die Reinigung manuell (COP - Cleaning out of Place), werden die betroffenen Teile der Anlagen teilweise demontiert und anschließend gereinigt. Dieses geschieht meist manuell durch Waschen oder Hochdruckreinigen der verschmutzten Anlagenteile. Bei der CIP Reinigung werden zwei Verfahrensprinzipien unterschieden. Bei der verlorenen Reinigung wird die verschmutzte Reinigungslösung direkt nach der Reinigung dem Abwasser zugeführt. Einsatzgebiet hierfür sind kleine, selten genutzte und/oder sehr stark verschmutzende Anlagen. Bei der Stapelreinigung werden die Reinigungslösungen gemischt, temperiert in Stapeltanks bevorratet und nach ihrem Einsatz wieder dorthin zurückgeführt. Grundsätzlich kann eine zentrale CIP Anlage für alle Anlagenteile der Brauerei verwendet werden, oder es finden sich mehrere CIP Anlagen für unterschiedliche Bereiche (EIPPCB, 2006), (Bamforth, 2006).

## **3.5. Energetische Betrachtung der Bierproduktion**

Gemessen am jährlichen Energieverbrauch nimmt das Brauwesen den siebten Platz innerhalb der Ernährungsindustrie ein. Im Jahr 2009 lag der Endenergieverbrauch aller deutschen Brauereien bei etwa 3,8 TWh. Die Aufteilung des Energieverbrauchs auf die einzelnen Energieträger in Abbildung 3-8 zeigt einerseits deutlich den großen Stellenwert von Erdgas und impliziert andererseits, dass ein Großteil der eingesetzten Energieträger zur Bereitstellung von Wärme benötigt wird (DeStatis, 2010).

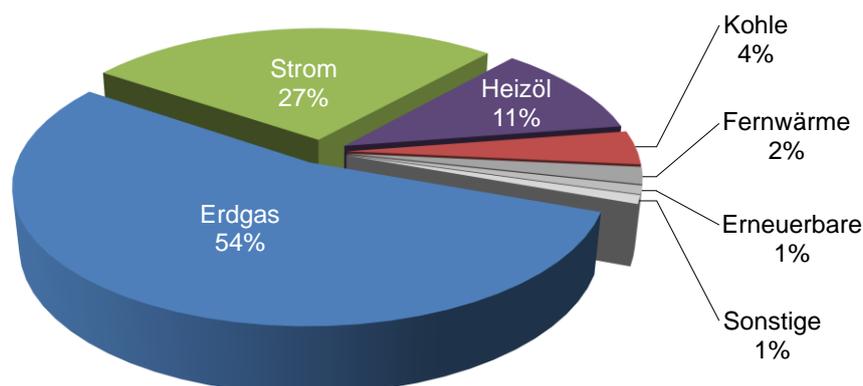


Abbildung 3-8: Anteil der im Brauwesen verwendeten Energieträger (DeStatis, 2010)

Durchschnittlich werden rund drei Viertel der verbrauchten Endenergie zur Bereitstellung von Prozesswärme, Raumwärme und Warmwasser aufgewendet. Aufgrund der Preisstruktur der einzelnen Energieträger nehmen Strom und Wärme hinsichtlich der Energiekosten etwa den gleichen Stellenwert ein. In Abhängigkeit von Unternehmensgröße, Effizienzstandard, Produktionsweise, etc. beträgt der Anteil der Energiekosten an den Produktionskosten etwa 5..10 % (BKWK, 2010). Aufgrund der tendenziell steigenden Energiepreise spielt daher die Reduktion des Energieverbrauchs durch Effizienzmaßnahmen und Einbindung regenerativer Energien eine wichtige Rolle bei der Wettbewerbsfähigkeit.

### 3.5.1. Verfügbare Benchmarks für Brauereien

Mit Hilfe von Benchmarks können die Verbrauchswerte einer speziellen Brauerei mit branchenspezifischen Größen verglichen und bewertet werden. Dadurch kann zum einen die absolute Höhe des Energieverbrauchs eingeordnet werden, zum anderen können ggf. Produktionsbereiche identifiziert werden, bei denen Handlungsbedarf besteht. So finden sich beispielsweise die in Abbildung 3-9 dargestellten Verbrauchswerte. (EIPPCB, 2006) bezeichnet dies als typische Verbrauchswerte großer deutscher Brauereien. Neben dem Verbrauch von thermischer und elektrischer Energie beinhaltet die Grafik auch den Wasserverbrauch und die entstehenden Reststoffe.

Bei der Verwendung solcher Benchmarks ist allerdings zu beachten, auf welche Größenklasse von Brauereien sie sich beziehen und welche Randbedingungen gegeben sind. So findet sich in der Literatur eine Vielzahl von Benchmarks, die auf unterschiedlichste Weise erhoben wurden (Fallstudien, Befragung, etc.) und für unterschiedliche Betriebsgrößen gelten. Tabelle 3-1 beinhaltet eine Zusammenfassung spezifischer Wärmeverbrauchswerte aus unterschiedlichen Quellen. Um Brauereien unterschiedlicher Größe miteinander vergleichen zu können, werden die Gesamtverbräuche auf die Ausstoßmenge in Hektoliter (hl) bezogen. Zur Gegenüberstellung verschiedener Brauereigrößen sind die Unternehmen in Abhängigkeit der Ausstoßmenge unterteilt. Die Spalte „Ø“ beinhaltet größenunabhängige Angaben, die in den Quellen keiner Größenklasse zugeordnet sind.

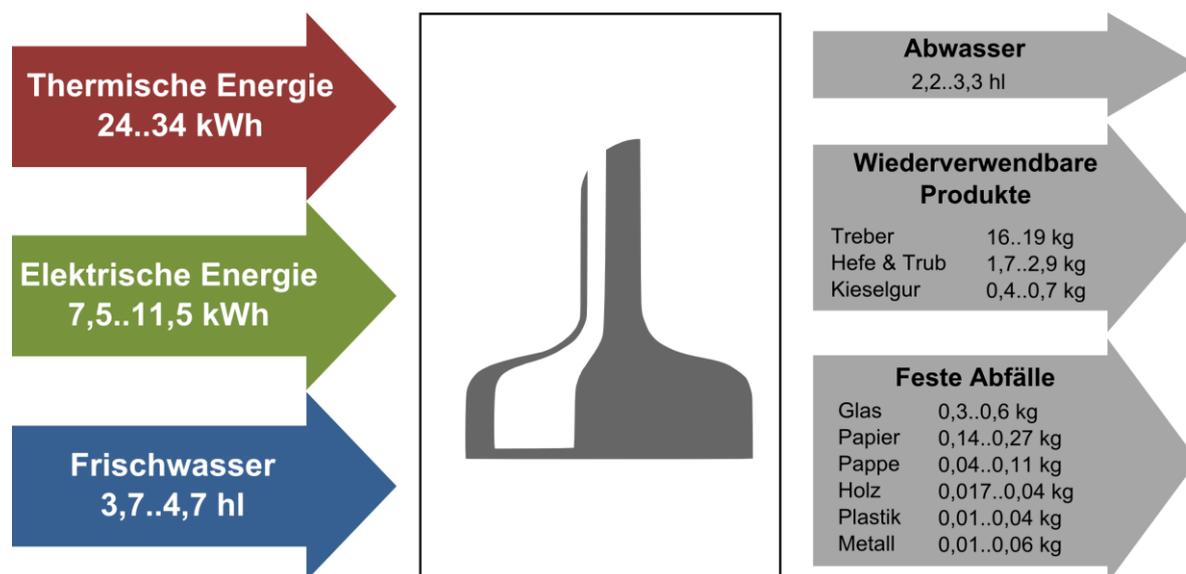


Abbildung 3-9: Input Output großer deutscher Brauereien pro Hektoliter Verkaufsbier (EIPPCB, 2006)

Die Werte der einzelnen Kategorien sind in der Regel als Durchschnittswerte zu betrachten. Ausnahmen bilden die „von...bis“-Werte, die eine Spanne um einen Mittelwert liefern sowie Zeile zwei und drei, die in der Quelle als Minimal- beziehungsweise Maximalwerte publiziert sind. Die Ursache für die Abweichung zwischen den einzelnen Werten liegt häufig an Art und Zeitpunkt der Datenerfassung, Anzahl, Größe und Struktur der befragten Unternehmen, unterschiedliche Bezugswerte oder der Exaktheit der von den Brauereien angegebenen Daten.

Tabelle 3-1: Spezifische Wärmeverbrauchswerte von Brauereien

	Quelle	Jahresbezug	Ausstoß in 1000 hl/Jahr					Ø
			bis 20	20-50	50-100	100-500	über 500	
spezifischer Verbrauch thermischer Energie in kWh/hl	(Schu et al., 2001)	1998	62,83	58,69	52,97	42,92	28,47	48,75
	(Schu et al., 2001) min	1998	44,97	27,31	34,64	23,69	24,89	23,69
	(Schu et al., 2001) max	1998	101,00	135,75	86,89	60,61	34,19	135,75
	(Aidonis et al., 2005)	1999	-	-	-	-	-	69,4...98,6
	(EVA, 2001)	2001	-	-	-	-	-	59
	(EIPPCB, 2006)	2002	-	-	-	-	24...34	27,78...55,55
	(Thiemann et al., 2009)	2006	-	-	46,06	-	27,28	-
	(Sattler, 2000)	1997/98	56	52	47	33	25	16,69...74,68
	(Petersen, 1993)	-	-	85,22	60,89	63,97	56,51	69,4...98,6

Aus den analysierten Quellen geht hervor, dass der spezifische Wärmebedarf mit steigendem Ausstoß signifikant sinkt. Kleinere Brauereien haben durchschnittlich einen höheren spezifischen Wärmeverbrauch als Großbrauereien. Dies liegt zum einem am diskontinuierlichen Braubetrieb, da kleinere Brauereien meistens im Einschichtbetrieb arbeiten. Dies hat zur Folge, dass sich der Nutzungsgrad der Wärmerückgewinnung verschlechtert und die Standby-Verluste steigen. Zudem sind viele kleinere Brauereien historisch gewachsen und energetisch nicht optimal abgestimmt. Durch den geringeren

Automationsgrad sind die Prozesse weniger transparent, sodass unerwünschte Wärmesenken oftmals nicht erkannt und abgestellt werden können. Trotzdem ist nach (Thiemann und Bohm, 2009) eine Anpassung an die spezifischen Energieverbräuche größerer Brauereien realistisch. Begründet wird dies mit der Nutzung der strukturellen Stärken mittelständischer Brauereien wie die kompakten Aufstellung der Prozess- und Energieanlagen, das übergreifende Prozesswissen der Mitarbeiter, die kurzen Entfernungen und die kurzen Entscheidungswege. Bei Quellen die Benchmarks über einen gewissen Zeitraum beinhalten, zeigt sich ein tendenzieller Rückgang der spezifischen Verbräuche in Brauereien. Die Implementierung moderner energiesparender Verfahren und Maßnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz führen zu dieser Entwicklung. Nach Analyse der Werte zum spezifischen Wärmeverbrauch in Brauereien erkennt man, dass es sehr schwierig ist feste Benchmarks für die unterschiedlichen Größenklassen nennen zu können. Da sich vor allem in den kleineren Größenklassen Brauereien sehr stark voneinander unterscheiden können, werden immer mehr oder weniger große Abweichungen zu den gelisteten Verbrauchswerten auftreten können. Diese sind begründet in der technischen Ausstattung, umgesetzten Effizienzmaßnahmen, der verwendeten Wärmerückgewinnung, Produktpalette, Ausstoß, Klimaverhältnisse und Höhenlage der Brauerei, Anteil alkoholfreier Getränke und dem Anteil der unterschiedlichen Gebinde. Grundsätzlich sollte man sich jedoch an den Minimalwerten orientieren, da diese als Vorbild auf dem Weg zu einer energieeffizienten Braustätte dienen können.

### 3.5.2. Aufteilung des Wärmeverbrauchs

Neben dem gesamten Wärmeverbrauch einer Brauerei sind die Anteile der einzelnen betrieblichen Einrichtungen von Interesse. Mit diesen Werten können Betriebsbereiche mit erhöhtem Einsparpotential identifiziert werden. Wie zuvor beim spezifischen Gesamtverbrauch erläutert, kann der Bedarf einzelner Unternehmensbereiche gleichermaßen stark schwanken. Um allgemeinere Aussagen treffen zu können, wird der in Tabelle 3-2 gelistete Wärmebedarf der jeweiligen Verbrauchergruppen als prozentualer Anteil des Gesamtwärmebedarfs angegeben. Gewisse betriebliche Einrichtungen werden aufgrund der durchgeführten Prozessschritte einen höheren Anteil als andere besitzen.

Für das Sudhaus finden sich Angaben, die den Bedarf für die Brauwasserbereitstellung separat aufführen. Ebenso gibt es für den Verbrauch des restlichen Betriebs Angaben, die explizit den Verbrauch der Verwaltung nennen. Der Geltungsbereich ist je nach Datenquelle verschieden. Tendenzielle Unterschiede können bei steigender Betriebsgröße nicht festgestellt werden. Die Anteile der einzelnen Verbrauchergruppen bleiben in etwa gleich. Das Sudhaus verbraucht in Brauereien die meiste thermische Energie. Der Anteil liegt knapp unter der Hälfte des Gesamtverbrauchs. Der zweitgrößte Verbrauch ist bei der Flaschenfüllung zu finden. Die Werte variieren jedoch stark und liegen circa zwischen 15 und 25 %. Der Anteil der Fassabfüllung beläuft sich auf knapp 10 %. Für die Erwärmung des Betriebswassers und den Verbrauch des restlichen Betriebs können aufgrund der stark schwankenden Angabe keine genaueren Eingrenzungen vorgenommen werden. Je nach Struktur der Brauerei kann die Gebäudeheizung dieser Wert stark nach oben ausreißen.

Tabelle 3-2: Prozentualer Anteil einzelner Verbrauchergruppen am Gesamtwärmebedarf

Quelle mit Angabe zum Geltungsbereich (hl als jährliche Ausstoßmenge)		Anteil am thermischen Gesamtverbrauch in %				
		Sudhaus	Betriebswasser	Flaschenfüllung	Faßfüllung	Restlicher Betrieb
(Petersen, 1992)	A >1,5 Mio hl	47	7	26	12	8
	B -	51	5	25	10	8
	C -	47	7	25	10	11
	D -	54	8	16	13	9
	E 25.000hl	47	5	14	10	23
(Sattler, 2000)	allgemein	43	12	25	6	14
(Blümelhuber, 2008)	allgemein	46	8	25	10	11
(Hackensellner et al., 2008)	allgemein	30...45	15...20	15...25		15
(Kunze, 2007)	20.000hl Ø	47	11	17	9	16
	250.000hl Ø	48	11	17	9	15
(Thiemann et al., 2009)	allgemein	43	3	25	15	14
(Aidonis et al., 2005)	allgemein	46...52	7...10	15...19	5...6	20

Abbildung 3-10 zeigt ein Beispiel für die prozentuale Aufteilung des Wärmeverbrauchs in Brauereien. Als Grundlage dienen die Durchschnittswerte für Brauereien mit einem Ausstoß von 250.000 hl pro Jahr nach (Kunze, 2007). Wie bei den Betrachtungen des spezifischen Gesamtwärmeverbrauchs können auch bei den Anteilen der Verbrauchergruppen keine festen Eckwerte festgestellt werden. Die dargestellten Werte dienen lediglich der Orientierung bei der Bewertung eines speziellen Betriebes. Liegen in gewissen Bereichen einer Braustätte deutlich höhere oder niedrigere Wärmeverbrauchsanteile vor, können diese schnell erkannt und entsprechende Maßnahmen eingeleitet werden.

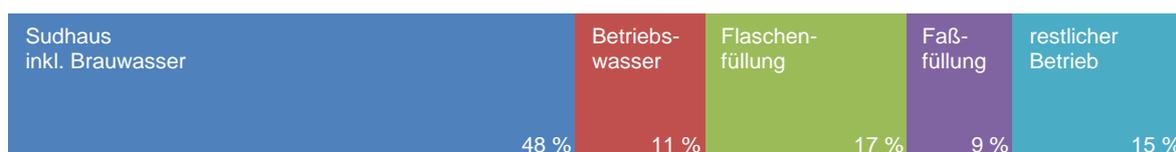


Abbildung 3-10: Anteil am Wärmeverbrauch nach (Kunze, 2007)

Neben der Aufteilung auf einzelne Produktionsbereiche kann auch einzelnen Prozessen oder Anlagen ein durchschnittlicher Wärmeverbrauch zugewiesen werden. So geben (Hackensellner und Bühler, 2008) die in Tabelle 3-3 aufgelisteten spezifischen Kennzahlen für einzelne Produktionsprozesse an. Zu den spezifischen Werten sind bei einem Großteil der Produktionsabschnitte die vorliegenden Temperaturen beziehungsweise Temperaturdifferenzen angegeben. Maßnahmen zur Wärmerückgewinnung sind ebenfalls Bestandteil der Betrachtungen. Dabei ist jedoch zu beachten, dass der tatsächliche Wärmebedarf stark von der Effizienz der verwendeten Anlagentechnik und Betriebsführung des Prozesses abhängt. Zudem sollte die Effizienz der Wärmebereitstellung und -verteilung berücksichtigt werden. Die Werte aus Tabelle 3-3 dienen daher nur überschlägigen Berechnungen und können nicht als feste Größen betrachtet werden.

Tabelle 3-3: Spez. Kennzahlen ausgewählter Produktionsabschnitte (Hackensellner und Bühler, 2008)

Nr.	Produktionsabschnitt	Prozess, Bemerkungen	Spez. Kennzahlen
1	Aufheizen Gesamtmaische	50 °C → 65 °C	1,3..1,35 kWh/hl VB
2	Dekoktion: Aufheizen Kochmaische	65 °C → 100 °C	1,1..1,2 kWh/hl VB
3	Dekoktion: Eindampfung Kochmaische	100 °C	0,5..0,75 kWh/hl VB
4	Aufheizen Gesamtmaische (Infusionsverfahren)	50 °C → 76 °C	2,4..2,5 kWh/hl VB
5	Würzeaufheizung	72 °C → 100 °C	4,1..4,2 kWh/hl VB
6	Würzekochung	10% GesV	6,9..7,2 kWh/hl VB
7	Würzekochung	5% GesV	3,4..3,6 kWh/hl VB
8	Therm. Brüdenverdichter	$\Delta p = 0,35$ bar Treibdampfdruck: 8 bar (abs.)	29..30 kWh/hl E
9	Pfannendunstkondensator	100 °C, 10% GesV, WRG	6,0..6,1 kWh/hl AW
10	Einstufige Würzekühlung	96 °C → 8 °C, WRG	9,7..9,9 kWh/hl AW
11	Zweistufige Würzekühlung	96 °C → 16 °C, WRG 16 °C → 8 °C, Kälte	8,8..9,0 kWh/hl AW 0,95..1,0 kWh(Q <sub>0</sub> )/hl AW
12	Warmwasserbereitung	12 °C → 82 °C, Betriebsw.	8,3..8,7 kWh/hl WW
13	Kurzzeiterhitzung, mit WRG	54 °C → 68 °C, WRG	1,7..1,8 kWh/hl VB
14	Tunnelpasteur	5 °C → 62 °C	19 ..23 kWh/1.000 Fl.
15	Flaschenreinigungsmaschine (mit WRG-Maßnahmen)	0,5-l-Fl.; Betriebswärmebedarf Wasserverbrauch	25..50 kJ/Fl., 80 °C 0,18..0,30 l/Fl.
16	Keg-Füllanlage	80°C	0,4 hl/hl
17	Raumheizung/Klimaanlage	Gesamtbrauerei	3,0..4,0 kWh/hl VB
18	Brauwasserbedarf	Hauptguss	0,7..0,9 hl/hl VB
19	Brauwasserbedarf	Nachgüsse	0,5..0,9 hl/hl VB
20	Betriebswarmwasserbedarf	Gesamtbrauerei	0,2..0,8 hl/hl VB
21	Abwasseranfall	Gesamtbrauerei	2,5..6,0 hl/hl VB
22	Wasserverbrauch	Gesamtbrauerei	4,0..8,0 hl/hl VB
23	Kältebedarf	Gesamtbrauerei	6,8..8,3 kWh(Q <sub>0</sub> )/hl VB
24	Druckluftbedarf	Gesamtbrauerei	6..10 m <sup>3</sup> /hl VB
25	Nasstreberanfall	20% TM	19,0 kg/hl VB
26	Kieselgurschlamm	-	0,65 kg/hl VB

TM: Trockenmasse; WW: Warmwasser; E: Eindampfung; kWh(Q<sub>0</sub>): Kälteenergie; VB: Verkaufsbier; AW: Ausschlagwürze;  
GesV: Gesamtverdampfung, bezogen auf AW; Fl.: Flasche;  $\Delta p$ : Druckerhöhung im Verdichter; WRG: Wärmerückgewinnung

## **4. Wärmerückgewinnung in Brauereien**

In der Regel verfügt jede Brauerei über mindestens zwei Einrichtungen zur Wärmerückgewinnung. Diese sind bei der Würzeherstellung im Sudhaus installiert. Die Abkühlung der Würze nach dem Kochen wird in der Regel gewährleistet, indem sie in einem Plattenwärmetauscher im Gegenstrom zu kaltem Brauwasser geführt wird, welches sich dabei aufheizt. Die zweite Wärmerückgewinnung findet bei der Würzekochung statt. Um die Energie aus dem verdampften Wasser zu nutzen gibt es mehrere Varianten. Diese Varianten wirken sich unterschiedlich auf den Brauwasserhaushalt einer Brauerei aus und haben damit einen direkten Einfluss auf die Möglichkeit zur Einbindung einer Solaranlage in die Brauwasserreserve. Daher werden die einzelnen Möglichkeiten im folgenden Abschnitt detailliert erläutert. Neben diesen gängigen Maßnahmen beinhaltet das Kapitel weitere Möglichkeiten der Wärmerückgewinnung bei den Nebeneinrichtungen, welche bei einem Projekt zumindest geprüft werden sollten.

### **4.1. Würzekochung**

Um Geruchsemissionen zu vermeiden und Energie zu sparen müssen die während der Würzekochung entstehenden Brüden kondensiert werden. Hierzu können Pfannendunstkondensatoren (PfaDuKo) verwendet werden, die entweder Warmwasser bereitstellen, oder einen sogenannten Energiespeicher speisen. Eine weitere Möglichkeit ist die mechanische oder thermische Verdichtung des Brüdens, welcher daraufhin als Heizmedium im Innen- oder Außenkocher verwendet werden kann (Back, 2005).

#### **4.1.1. Warmwasserbereitstellung**

Prinzipiell beinhalten alle nachfolgenden Varianten der Wärmerückgewinnung die Möglichkeit der Bereitstellung von Warmwasser, da Brüdenkondensat anfällt, welches mit Hilfe eines Wärmetauschers abgekühlt werden kann. Dabei wird kaltes Wasser aufgeheizt und der Warmwasserreserve zugeführt. Dieser Abschnitt konzentriert sich jedoch nur auf die reine Kaltwasseraufheizung mittels PfaDuKo. Hierbei ist die Menge des bereitgestellten Warmwassers deutlich größer als bei der Abkühlung des Brüdenkondensats. Ob während der Würzekochung Brau- oder Brauchwasser (vgl. Kap. 3.4.4) aufgewärmt wird hängt vom jeweiligen Wassermanagement der Brauerei ab. Zur Vereinfachung wird nachfolgend der Begriff Brauwasser verwendet. Bei der Brauwasserbereitstellung mittels PfaDuKo wird zunächst die latente Wärme des Brüdens genutzt, indem dieser kondensiert wird. Dazu strömt kaltes Brauwasser mit 12..20 °C durch die Rohre des liegenden Rohrbündels. In Folge der Kondensation des Brüdens im Mantelraum erwärmt sich das Wasser in Abhängigkeit der Effizienz des Wärmetauschers auf ca. 80..98 °C. Die absolute Menge des erwärmten Brauwassers hängt dabei von der Gesamtverdampfung ab. Das entstehende Brüdenkondensat kann anschließend einem weiteren Plattenwärmetauscher zugeführt werden, wo es im Gegenstrom zu kaltem Brauwasser auf etwa 30 °C abgekühlt wird. Das dabei erwärmte Brauwasser wird ebenfalls der Warmwasserreserve zugeführt (Lenz und Burlein, 2000).

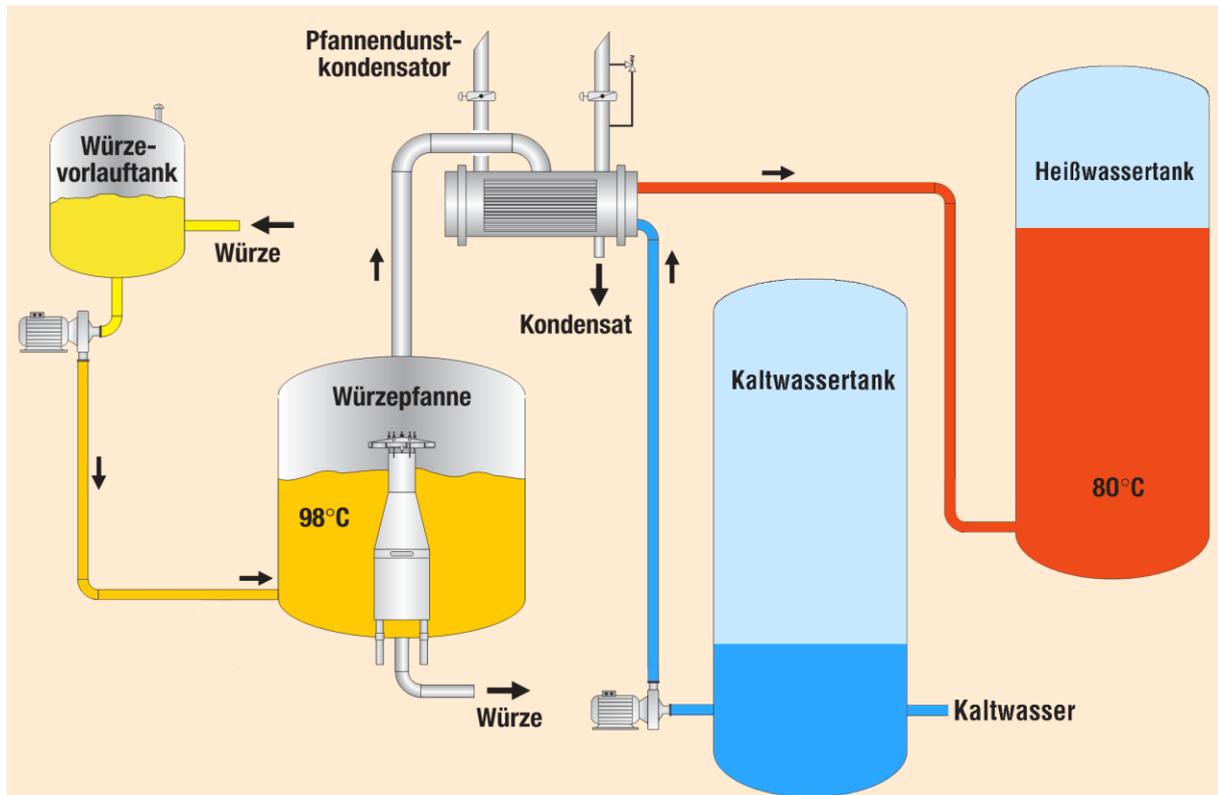


Abbildung 4-1: Bereitstellung von Warmwasser mittels PfaDuKo nach (Lenz und Burlein, 2000)

#### 4.1.2. Energiespeicher

Der Sinn und Zweck eines Energiespeichers ist es die beim Kochen entstehende Abwärme auf einem möglichst hohen Temperaturniveau zu nutzen. Hauptsächlich wird die rückgewonnene Wärme beim nächsten Sud zur Läuterwürzeaufheizung verwendet. Eine Beheizung der Maischepfanne ist ebenfalls möglich, wenn die Pfanne über eine ausreichend große Wärmetauscherfläche verfügt. Für diese Art der Wärmerückgewinnung werden gemäß Abbildung 4-2 neben dem Pfannendunstkondensator ein Verdrängungsspeicher sowie ein oder mehrere Plattenwärmetauscher benötigt. Während der Kochung wird Wasser aus dem unteren Teil des Energiespeichers mit ca. 78 °C in den Pfannendunstkondensator geleitet, durch den kondensierenden Brüden auf knapp 100 °C aufgeheizt und zurück in den Speicher geführt. Vor dem nächsten Kochvorgang kann die gespeicherte Wärme dazu verwendet werden, die Würze mit Hilfe eines Plattenwärmetauschers während des Umpumpens in die Würzepfanne aufzuheizen. Bereits ab einer Gesamtverdampfung von 5 % (bezogen auf die Ausschlagwürze) reicht die rückgewonnene Energie aus, um die gesamte Würze von 74 auf 95 °C vorzuwärmen. Die restliche Erwärmung auf Kochtemperatur erfolgt konventionell über den Innenkocher (Hackensellner und Bühler, 2008).

Die Wärme aus dem Energiespeicher kann neben den beschriebenen Heizprozessen im Sudhaus auch für weitere Wärmeverbraucher verwendet werden, wie z.B. für Absorptions-Kälteanlagen, anderweitige Heizaufgaben oder zur Bereitstellung von Betriebswarmwasser.

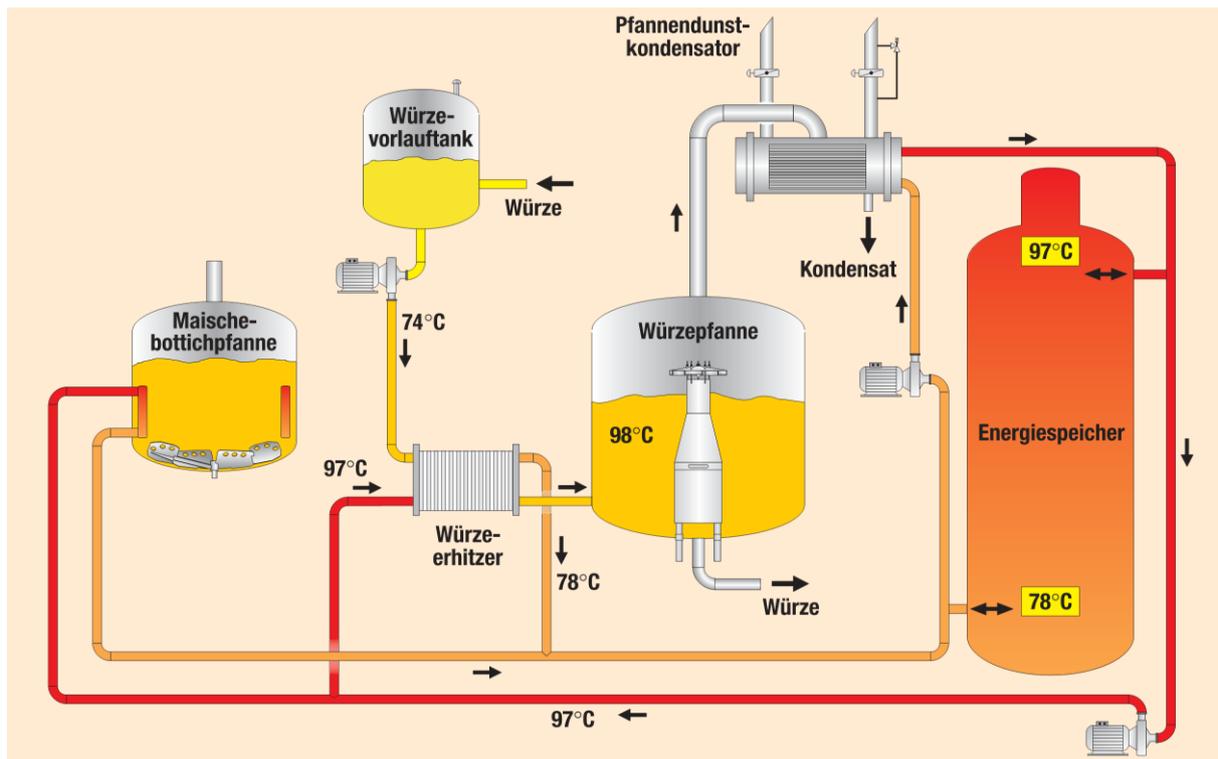


Abbildung 4-2: Wärmerückgewinnungskonzept mit Energiespeicher (Hackensellner und Bühler, 2008)

### 4.1.3. Brüdenverdichtung

Das seit den 80er Jahren eingesetzte Verfahren der Brüdenverdichtung geht auf den Grundgedanke zurück, thermische Energie mit Hilfe eines thermodynamischen Kreisprozesses von einem niedrigen Temperaturniveau auf ein höheres Temperaturniveau zu bringen. Damit sollen die bei der Kochung entstehenden Brüden zur Beheizung der Pfanne genutzt werden. Die Verdichtung erfolgt thermisch oder mechanisch, wobei heute fast ausschließlich thermische Verdichter zum Einsatz kommen. Grund hierfür sind die hohen laufenden Kosten der mechanischen Brüdenverdichtung. Abbildung 4-3 zeigt die Einbindung einer thermischen Brüdenverdichtung in den Prozessablauf. In diesem Fall wird für die Würzekochung ein Außenkocher (hier Thermostar) verwendet. Zu Beginn des Kochvorgangs wird der Außenkocher mit herkömmlichem Frischdampf beheizt. Sobald die Verdampfung einsetzt, werden die entstehenden Brüden vom Dampfstrahlverdichter angesaugt und verdichtet. Hierzu wird Frischdampf mit mindestens 6 bar Überdruck benötigt. Der sich bildende Mischdampf wird zum Außenkocher geleitet und beheizt die Würze. Häufig werden nicht die gesamten Brüden in den Verdichter geleitet. 20..40 % der Brüdenmasse können in einen PfaDuKo geleitet werden und dort entweder zur Bereitstellung von Warmwasser oder, wie zuvor erläutert, zur Beladung eines Energiespeichers genutzt werden. Das Kondensat des Mischdampfes wird aufgrund der organischen Bestandteile in der Regel nicht in den herkömmlichen Kondensatkreislauf eingespeist. Ebenso wie das Brüdenkondensat aus dem Pfannendunstkondensator wird die verbleibende sensible Wärme rückgewonnen und das Brüdenkondensat dem Abwasser zugeführt (Hackensellner und Bühler, 2008), (Ziemann, 2008).

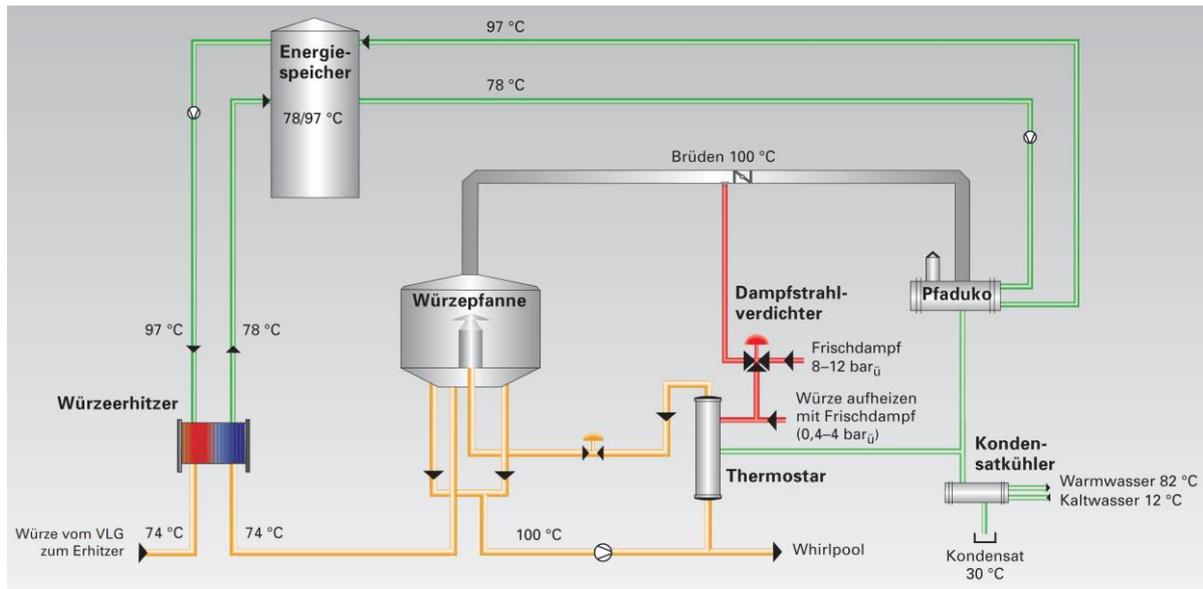


Abbildung 4-3: Thermische Brüdenverdichtung mit Energiespeicher (Ziemann, 2008)

#### 4.1.4. Gegenüberstellung

Jede Brauerei sollte über eine der zuvor genannten Möglichkeiten der Wärmerückgewinnung während der Würzekochung verfügen. Am häufigsten anzutreffen ist der Pfannendunstkondensator zur Warmwasserbereitstellung. Bei neuen Sudhausinstallationen oder Erneuerungen wird jedoch immer mehr das Konzept des Energiespeichers verwendet. Dies hat zur Folge, dass grundsätzlich weniger warmes Brauwasser aus der Wärmerückgewinnung vorhanden ist. Dennoch ist dieser Trend sinnvoll, da die Wärmerückgewinnung bei dem Konzept des Energiespeichers auf dem höchst möglichen Temperaturniveau stattfindet. Zur Bereitstellung von Brauwasser können auch Abwärmequellen mit einem niedrigeren Temperaturniveau (Flaschenwaschmaschine, Kompressoren, etc.) oder regenerative Quellen wie Solarenergie genutzt werden.

## 4.2. Würzekühlung

Die zweite standardmäßige Wärmerückgewinnung in Brauereien ist die Würzekühlung. Die Würze muss nach der Heißtrubabscheidung im Whirlpool von 90..98 °C auf Anstelltemperatur (5..18 °C) herab gekühlt werden. Dazu werden gemäß Abbildung 4-5 einstufige (links) oder zweistufige (rechts) Plattenwärmetauscher verwendet.

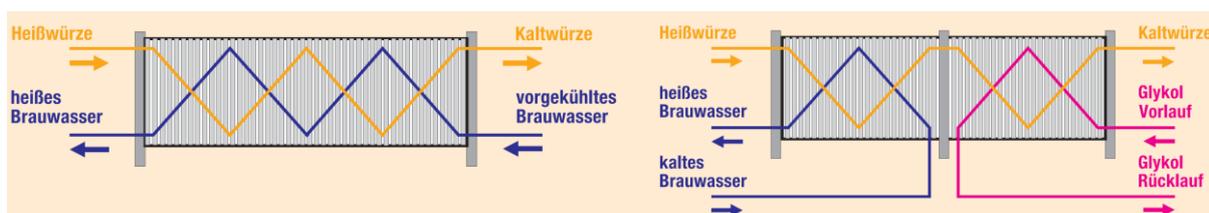


Abbildung 4-4: Schema der ein- und zweistufigen Würzekühlung (Hackensellner und Bühler, 2008)

Bei der einstufigen Würzekühlung wird die Würze mit Brauwasser gekühlt, das zuvor über eine Kälteanlage von Kaltwassertemperatur auf 2..5 °C herab gekühlt wurde. Das Brauwasser erwärmt sich dabei auf mindestens 80 °C. Bei der zweistufigen Würzekühlung wird die Würze zunächst durch ungekühltes Brauwasser und anschließend durch Eiswasser oder ein Kältegemisch gekühlt. Auch hierbei wird warmes Brauwasser mit min. 80 °C bereitgestellt. Der Kühlvorgang darf aufgrund der thermischen Belastung der Würze nicht länger als 60 Minuten dauern. Bei korrekter Auslegung und Betriebsweise des Plattenwärmetauschers ergibt sich ein Flüssigkeitsverhältnis von Brauwasser zu Würze von 1,1 zu 1,0. Das bedeutet, dass der Warmwasserbedarf für das Einmaischen und Läutern durch das während der Würzekühlung bereitgestellte warme Brauwassers gedeckt wird (Hackensellner und Bühler, 2008).

Eine Kombination der Würzekühlung mit dem in Abschnitt 4.1.2 erläuterten Energiespeicher zeigt Abbildung 4-5. Bei diesem System wird zunächst wie gewohnt die Verdampfungswärme des Brüdens in den Energiespeicher eingespeist. Zusätzlich entzieht der Würzekühler der heißen Würze in der ersten Stufe Wärme auf hohem Temperaturniveau, welche ebenfalls in den Energiespeicher eingespeist wird. Dadurch kann neben der Läuterwürzeaufheizung auch das Maischgefäß mit rückgewonnener Wärme aus dem Energiespeicher beheizt werden. In der zweiten Stufe des Wärmetauschers wird die Würze konventionell über gekühltes Brauwasser abgekühlt (Krones, 2011).

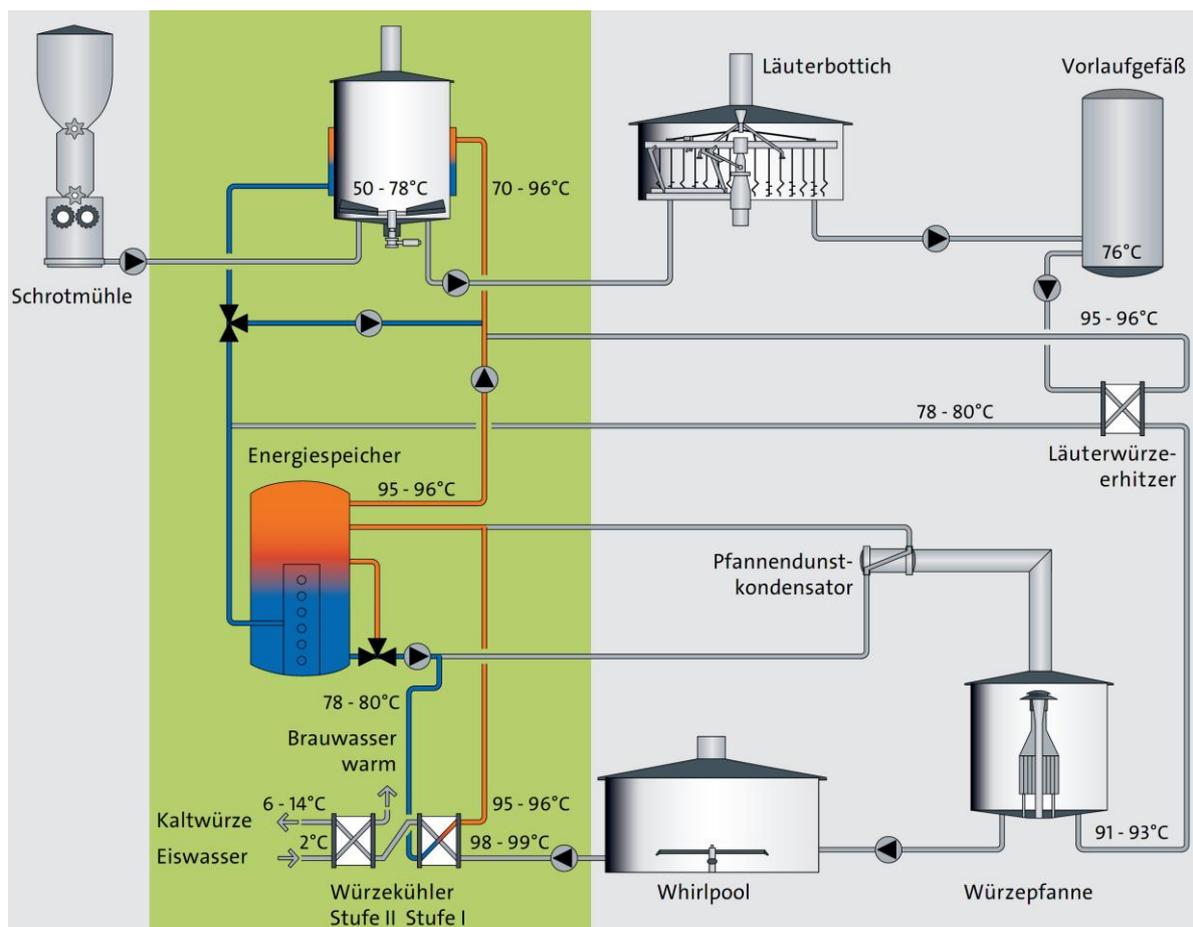


Abbildung 4-5: Zweifach gespeister Energiespeicher im Sudhaus (Krones, 2011)

### 4.3. Nebeneinrichtungen

Während in den Produktionsbereichen wie Sudhaus oder Abfüllhalle häufig Installationen zur Wärmerückgewinnung vorhanden sind, werden die Nebeneinrichtungen diesbezüglich meist vernachlässigt. Vor allem bei der Dampferzeugung im Kesselhaus lassen sich mit verhältnismäßig einfachen Maßnahmen signifikante Mengen Energie einsparen. Im Folgenden werden daher Ansätze zur Wärmerückgewinnung der Nebeneinrichtungen aufgezeigt, die bei einem konkreten Kontakt zu einer Brauerei zumindest geprüft werden sollten.

#### 4.3.1. Dampfbereitstellung

Grundsätzlich sollten Dampf- oder Heißwasserkessel über einen **Economiser** verfügen. Dies ist ein Abgaswärmetauscher, der integriert, als separate Baugruppe oben auf dem Abgassammelkasten aufgesetzt oder hinter dem Kessel angeordnet sein kann. Bei Dampfkesseln wird mit Hilfe eines Economisers das Speisewasser vor Eintritt in den Kessel vorwärmt. Dadurch kühlt sich das Abgas von der ursprünglichen Temperatur (60..80 K über Sattdampf-temperatur) auf bis zu 130 °C ab, was bei typischen Betriebsdrücken einer Wirkungsgradsteigerung von 4..5 Prozentpunkten entspricht (Sattler und Schibel, 2011).

Prinzipiell eignen sich auch Dampfkessel für die Nutzung der **Brennwerttechnik**. Dabei ist dem Economiser ein weiterer Wärmetauscher nachgeschaltet, der das im Abgas enthaltene Wasser kondensiert. Diese zusätzliche Wärmerückgewinnung macht jedoch nur Sinn, wenn große Mengen Kaltwasser aufgeheizt werden müssen, da das Abgas auf etwa 50 °C herabgekühlt werden muss. Dies scheint in Brauereien in der Regel allerdings nicht der Fall zu sein (Meyer, 2000).

Sollte eine Brauerei nicht über ein geschlossenes **Kondensatsystem** verfügen, sollte die Möglichkeit geprüft werden, den bei der Nachverdampfung entstehenden Dampf für Prozesse mit einem niedrigeren Temperaturniveau zu nutzen. Bei der Nachverdampfung können durchschnittliche Verluste von 6,5..10,5 Masse-% auftreten. Als mögliche Wärmeabnehmer kommt beispielsweise die Bereitstellung von Warmwasser, die thermische Entgasung oder Gebäudeheizung in Frage (Meyer, 2000), (Tuffner, 2008).

Weitere Möglichkeiten zur Wärmerückgewinnung ergeben sich bei der thermischen **Entgasung**. Hierzu lassen sich die Entgasungsbehälter bei Bedarf mit einem Brüdenkondensator nachrüsten. Dabei wird der während der Entgasung entstehende Brüden kondensiert, indem das zu entgasende Zusatzwasser vor Eintritt in den Entgaser durch den Brüdenkondensator geführt wird (Ernst, 2009).

#### 4.3.2. Kältebereitstellung

Zur Kondensation des Kältemittels einer Kältemaschine ist es notwendig, die bei der Verdampfung aufgenommene und die durch den Verdichter zugeführte Energie in Form von Wärme abzugeben. Das aus dem Verdichter austretende Kältemittel (Heißgas) kann je nach Verdichtertyp und Auslegung der Anlagenkomponenten hohe Temperaturen von ca. 70 bis 120 °C aufweisen und bietet daher ein Potential zur Wärmerückgewinnung. Es lassen sich

mittlere Warmwassertemperaturen von 60 °C erzielen. Zusätzlich kann bei modernen Schraubenverdichtern auch die Abwärme des Ölkühlers genutzt werden. Dabei muss jederzeit sichergestellt werden, dass immer eine ausreichende Kühlung, beispielsweise durch eine zuschaltbare Wasserkühlung, zur Verfügung steht. Nach der Abkühlung des Heißgases erfolgt die eigentliche Kondensation in der Regel über den Luftkondensator oder den wassergekühlten Kondensator. Als Alternative zur ungenutzten Wärmeabgabe an die Umgebung ist die vollständige Nutzung der Kondensationswärme zur Vorerwärmung von Betriebswasser (Meyer, 2000). Allerdings liegt das zu erreichende Temperaturniveau etwa 5 K unter der Kondensationstemperatur, d.h. im Bereich von 25..35 °C. Durch eine Kombination von Wärmerückgewinnungssystemen, die das hohe und niedrige Temperaturniveau nutzen sowie durch eine Erhöhung der Kondensationstemperatur der Kälteanlage ist eine Wärmerückgewinnung bis zu 50 % auch für Temperaturbereiche oberhalb von 50 °C möglich (EA NRW, 2010b). Dabei muss beachtet werden, dass die Erhöhung der Kondensationstemperatur einer Kälteanlage zu einem höheren Strombedarf führt, was in der Regel vermieden werden sollte. Das Potential zur Wärmerückgewinnung, also die Kondensationsleistung ergibt sich aus der Summe aus Kälteleistung und Leistung des Verdichters abzüglich der Wärmeverluste (ca. 20 %) der Anlage. Der Anteil der Überhitzungsleistung (Abkühlung des Heißgases auf Kondensationstemperatur) an der gesamten Kondensatorleistung liegt bei etwa 20 % (Schiessl, 2010).

### 4.3.3. Druckluftbereitstellung

Bei der Erzeugung von Druckluft entsteht Wärme. Bei jeder Druckluftanlage muss daher sichergestellt werden, dass immer eine ausreichende Kühlung zur Verfügung steht. Diese Kühlung kann entweder mit Umgebungsluft oder mit einem Kühlwassersystem geschehen. Durch eine Wärmerückgewinnung kann bis zu ca. 90 % der Abwärme eines Druckluftkompressors genutzt werden. Der Rest geht über Abstrahlung verloren oder verbleibt in der Druckluft. In welchem Umfang eine Nutzung der Abwärme möglich ist, hängt von der Arbeitsweise des Kühlsystems, der Entfernung zum Verbraucher und die Dauer des Bedarfs ab (Atlas Copco, 2009). Für die Abwärmenutzung fallen lediglich Anschaffungs- und Installationskosten an, welche sich durch die Einsparungen bei der Wärmebereitstellung meist nach wenigen Jahren amortisiert haben. Danach steht die Wärme, von geringfügigen Wartungskosten abgesehen, kostenlos zur Verfügung (dena, 2010). Da die Kompressoren zur Druckluftherzeugung nicht ständig in Betrieb sind, steht auch die Abwärme nur unregelmäßig zur Verfügung, sodass die bestehende Wärmebereitstellung erhalten bleiben muss. Auf der anderen Seite müssen die Kompressoren auch gekühlt werden, wenn gerade kein Wärmebedarf vorhanden ist, was eine Notkühlung und/oder eine Speicherung der Abwärme notwendig macht.

Die Luftkühlung einer Druckluftanlage stellt die einfachste Variante dar. Bei Kompressoren mit hoher Leistung oder mehreren Kompressoren in einem Raum, ist eine Luftkühlung oftmals nicht möglich und die Maschinen müssen mit Wasser gekühlt werden. Da die Abwärmenutzung im Wesentlichen von der eingesetzten Kühlung abhängt, sollen Luft- und Wasserkühlung im Folgenden näher betrachtet werden. Zur **Luftkühlung** eines Druckluft-

kompressors wird ein relativ großer Kühlluftstrom mit möglichst niedriger Temperatur benötigt. Soll die erwärmte Abluft nicht einfach an die Umgebung abgegeben werden, kann sie zum Heizen eines Gebäudes, z.B. einer Lagerhalle, oder über einen Wärmeübertrager zum Vorwärmen von Wasser genutzt werden. Im Falle der direkten Gebäudebeheizung muss die erwärmte Kühlluft über ein Kanalsystem in den zu erwärmenden Raum geführt werden. Aufgrund von Druck- und Wärmeverlusten sollten möglichst kurze Wege eingehalten werden. Im Sommer kann die Abwärme über eine Weiche im Kanal an die Umgebung abgegeben werden (EA NRW, 2010a). Die Wärmerückgewinnung aus der Kühlluft wird meistens nur bei kleineren und mittleren Kompressoren angewandt. Diese Art der Wärmerückgewinnung ist relativ kostengünstig (Atlas Copco, 2009).

Bei einer **Wasserkühlung** hängen die Möglichkeiten zur Wärmerückgewinnung vom eingesetzten Kompressortyp ab. Trockenverdichtende Kompressoren können relativ einfach mit einer Wärmerückgewinnung ausgestattet werden und es können hohe Wassertemperaturen von 90 °C erreicht werden. Bei Schraubekompressoren mit Öleinspritzung führt das Öl ca. 72 % der zugeführten elektrischen Energie als Wärme ab. Diese Energie kann zurückgewonnen werden, indem das Öl über einen Wärmeübertrager geführt wird. Hier kann Heizungswasser auf bis zu 70 °C erwärmt werden. Soll die Abwärme der Druckluftherzeugung zur Brauchwassererwärmung genutzt werden, muss zusätzlich ein Sicherheitswärmeübertrager eingesetzt werden. So wird verhindert, dass es bei schadhafte Platten im Wärmeübertrager zu einem Durchbruch kommt und sich Wasser und Öl vermischen. Bei diesem System kann Brauchwasser um ca. 35 K auf ca. 55 °C erwärmt werden. Bei Turbo-kompressoren sind die Temperaturniveaus allgemein niedriger, so dass auch die Möglichkeiten der Wärmerückgewinnung schlechter sind. Außerdem beeinträchtigen höhere Kühlwassertemperaturen die Leistung des Kompressors (Atlas Copco, 2009), (EA NRW, 2010a).

## 5. Identifikation eines geeigneten Integrationspunktes

Bei der Bierproduktion kommen unterschiedlichste Prozesse, Verfahren und Anlagen zum Einsatz, die thermische Energie benötigen. Dabei können für einen Prozess, wie z.B. das Haltbarmachen, unterschiedliche Verfahren (Pasteurisation, Kurzzeiterhitzung) und für die jeweiligen Verfahren unterschiedliche Anlagen (Tunnel- oder Kammerpasteur) verwendet werden. Abbildung 5-1 zeigt eine Zuordnung aller Prozesse nach Produktionsabschnitten mit dem jeweiligem Temperaturniveau.

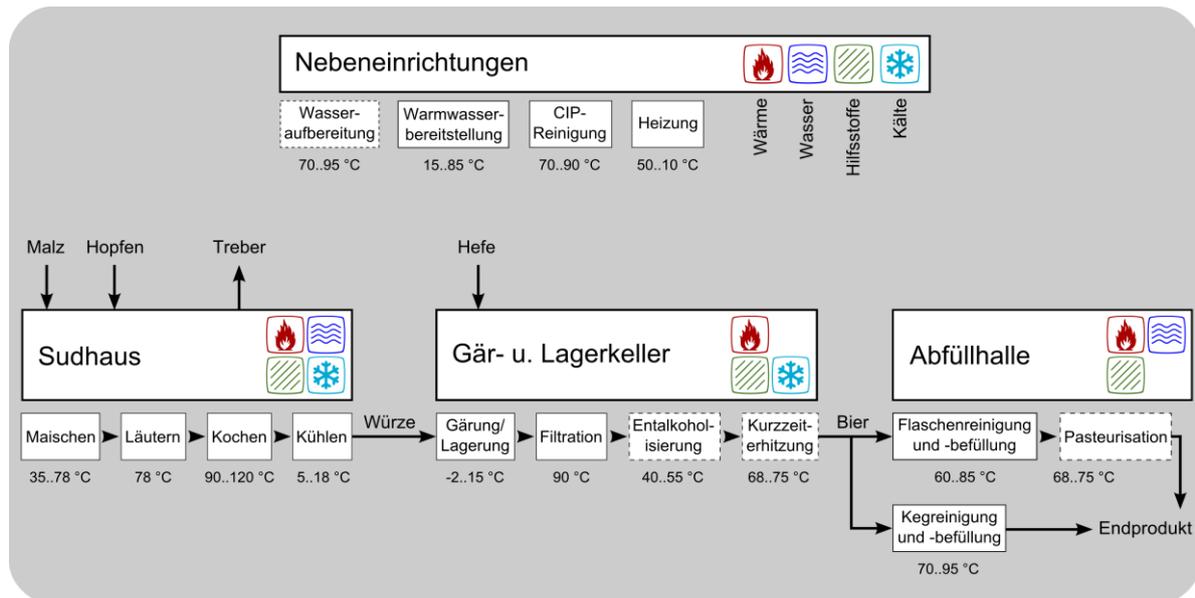


Abbildung 5-1: Produktionsabschnitte mit Prozessen und jeweiligem Temperaturniveau

Bei der Einbindung von Solarwärme lässt sich grundsätzlich die Versorgungs- von der Prozessebene unterscheiden. Die Versorgungsebene beinhaltet gemäß Abbildung 5-2 das Kesselhaus mit den Vor- und Rücklaufleitungen des Wärmeträgers, in diesem Beispiel Dampf mit 165 °C und einem offenen Kondensatrücklauf mit 90 °C.

Die Integration auf Versorgungsebene geht typischerweise mit sehr hohen Temperaturen einher, da thermische Solaranlagen meist parallel zum Kessel die Solltemperatur des Vorlaufs bereitstellen oder bei Druckheißwasserkreisen die sehr hohe Rücklauftemperatur anheben 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. Die Einbindung von Solarwärme mit einer niedrigeren Temperatur auf Versorgungsebene kann prinzipiell zur Bereitstellung von Zusatzwasser oder zur Aufheizung des Kesselspeisewassers erfolgen. Die hierzu benötigte Energie lässt sich häufig jedoch durch kesselhausinterne Maßnahmen der Wärmerückgewinnung minimieren.

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.

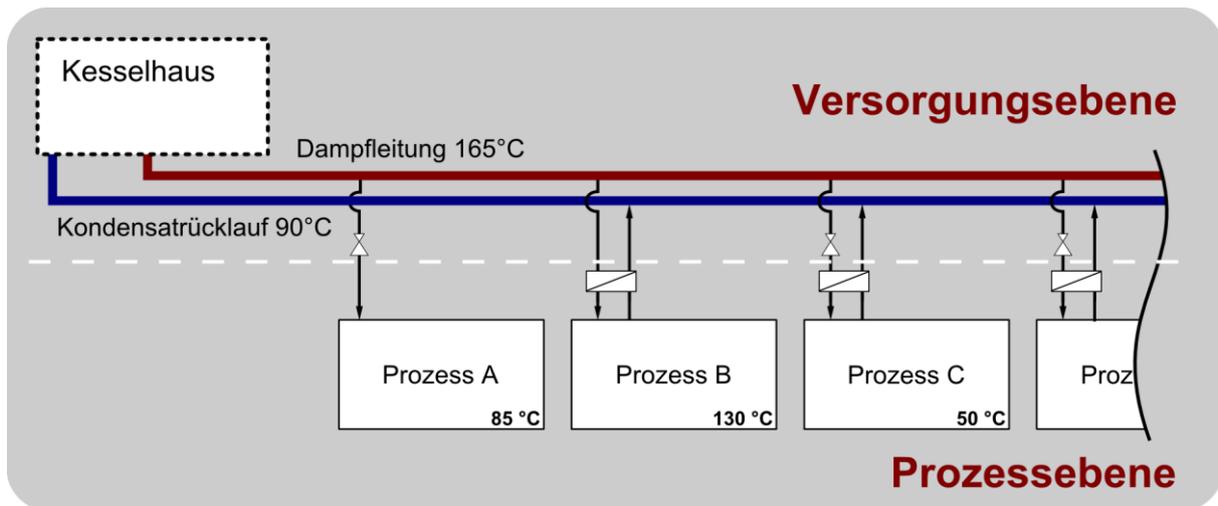


Abbildung 5-2: Unterscheidung zwischen Prozess- und Versorgungsebene (Schmitt et al., 2011)

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

- Die **Prozesstemperatur** ist in Deutschland und Ländern mit vergleichbarem Klima eines der wichtigsten Kriterien. Unabhängig vom verwendeten Kollektortyp 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 strikte Angabe wie viele Tage pro Woche ein Prozess mindestens laufen sollte, lässt sich allerdings nur schwer machen. Ein Prozess der jeden zweiten Tag betrieben wird, eignet sich beispielsweise wesentlich besser für die Einbindung von Solarwärme als ein Prozess, der zwar die gleiche Laufzeit innerhalb einer Woche hat, allerdings an direkt aufeinanderfolgenden Tagen betrieben wird, da hier gleich mehrere Tage mit einem Speicher überbrückt werden müssen. Ein Vorteil kann die Nutzung von Solarwärme für mehrere Prozesse mit sich bringen, wenn dies zu einer Vergleichmäßigung der Last führt.
- Schließlich spielt der **Aufwand zur Integration** der Solarwärme in den bestehenden Prozess eine wesentliche Rolle. Dieser kann in Abhängigkeit des Prozesses 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 schlechteren 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.

Berücksichtigt man die Kriterien Temperatur, Laufzeit und Integrationsaufwand, so lässt sich aus allen Produktionsprozessen eine Auswahl treffen, die für eine solare Unterstützung geeignet erscheinen (vgl. Tabelle 5-1).

**Tabelle 5-1: Geeignete Prozesse zur Einbindung von Solarwärme in Brauereien**

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

Die Reihenfolge der in Tabelle 5-1 gelisteten Prozessen können als Ranking angesehen werden. Für die Bewertung der Laufzeit entspricht ein hoher Wert einer häufigen bzw. langen Laufzeit. Bei der Bewertung des Integrationsaufwands bedeutet ein hoher Wert eine einfache Integration. Der dritte Bewertungspunkt, Anteil des Prozesses am gesamten Wärmebedarf der Brauerei, dient lediglich der Einordnung der Signifikanz, bzw. der Abschätzung des erzielbaren Einflusses einer Solaranlage.

Die **Warmwasserbereitstellung** bietet gute Möglichkeiten zur Einbindung von Solarwärme. Die jeweiligen Solltemperaturen des Warmwassers, welches für die Produktion benötigt wird, variieren dabei sehr stark. Während für Reinigungszwecke oder das Läutern die Wassertemperatur um die 80 °C liegt, wird für das Einmischen eine deutlich niedrigere Temperatur benötigt. Wie in Kapitel 4 beschrieben, verfügt jede Brauerei über Maßnahmen zur Wärmerückgewinnung, die teilweise oder vollständig zur Aufheizung von Kaltwasser dienen. Das durch die Würzekühlung bereitgestellte Warmwasser reicht in der Regel aus, um den Bedarf von Einmischen und Läutern komplett zu decken. Wird darüber hinaus die Wärmerückgewinnung beim Kochen zur Warmwasserbereitstellung verwendet, reicht das damit vorhandene Warmwasser häufig aus, um den gesamten Bedarf der Brauerei zu decken. In diesem Falle ist die Einbindung einer Solaranlage in die Brauwasserreserve nicht sinnvoll. Falls die Wärmerückgewinnung allerdings anderweitig genutzt wird, kann sich ein signifikanter Warmwasserbedarf einstellen, der teilweise solar gedeckt werden kann. Dieser Einbindungspunkt hat den Vorteil, dass die Solaranlage in der Regel keine feste Solltemperatur bereitstellen muss. Bei unzureichender Einstrahlung kann daher auch eine solare Vorwärmung stattfinden.

Falls die Brauerei nicht über einen Brunnen mit geeigneter Wasserqualität verfügt, stellt die solare Unterstützung der **Wasseraufbereitung** (Entgasung) aufgrund der sehr kontinuierlichen Laufzeiten dieses Prozesses einen geeigneten Integrationspunkt dar.

**Tunnelpasteure** sind typischerweise in größeren Brauereien anzutreffen und kommen dort auch auf entsprechend lange Laufzeiten. Der tatsächliche Aufwand zur Nutzung von Solarwärme kann allerdings von Anlage zu Anlage variieren. Am Wochenbeginn kann zur Aufheizung des Pasteurs ggf. Solarwärme mit einem niedrigeren Temperaturniveau genutzt werden.

Auch Produktionsanlagen zur **Entalkoholisierung** von Bier finden sich häufiger in Großbrauereien und sind meist derart ausgelegt, dass sie auf lange Laufzeiten kommen. Trotz des sehr guten Temperaturniveaus ist die Einbindung der Solarwärme allerdings relativ komplex.

Die **CIP-Reinigung** weist zwar häufig nicht so konstante Laufzeiten auf, allerdings ist die Einbindung der Solarwärme bei geläufigen CIP-Anlagen verhältnismäßig einfach. Je nach Reinigungsprogramm kann zumindest vor Beginn des Reinigungszyklus auch eine solare Vorwärmung erfolgen.

Die **Kurzzeiterhitzung** ähnelt hinsichtlich der Integration der Wasserentgasung, kommt i.d.R. allerdings auf deutlich geringere Laufzeiten.

Die Laufzeiten der **Flaschenreinigung** sind stark von der Brauereigröße abhängig. Bei kleineren Brauereien kann sie abwechselnd mit der Kegreinigung betrieben werden. Die Integration von Solarwärme in bestehende Flaschenwaschmaschinen ist meist sehr aufwendig.

Während die Laufzeiten des **Maischens** prinzipiell für eine solarthermische Unterstützung sprechen, ist der große Aufwand zur Einbindung der Solarwärme ein signifikanter Nachteil. Eine solare Unterstützung des Maischens sollte lediglich bei bevorstehendem Austausch der Sudpfanne in Betracht gezogen werden.

Ebenso gestaltet sich die Einbindung bei der **Kegreinigung** als aufwendig. Genaue Angaben zur Laufzeit sind ähnlich schwierig zu machen wie bei der Flaschenreinigung oder Kurzzeiterhitzung, da sie von Größe und Sortiment der Brauerei bestimmt wird.

Auch wenn die **Bereitstellung von Raumwärme** in Tabelle 5-1 nicht explizit aufgeführt wird, ist ihr Anteil am gesamten Wärmeverbrauch zum Teil erheblich und es besteht die Möglichkeit zur solaren Unterstützung. 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.

## 6. Anlagenkonzepte zur solaren Beheizung

Nachfolgend werden ausgewählte Prozesse der Bierproduktion, welche sich für die Einbindung thermischer Solarenergie prinzipiell eignen, detailliert beschrieben und Anlagenkonzepte zur solaren Beheizung vorgestellt. Dabei liegt das Hauptaugenmerk auf der Schnittstelle zwischen Produktionsprozess, herkömmlicher Beheizung und Solaranlage. Es werden dabei keine detaillierten Angaben zur Konfiguration und Auslegung der Solaranlage gemacht, da dies von den jeweiligen Gegebenheiten vor Ort (Wärmebedarf, Lastprofil, geeignete Dachflächen, etc.) abhängt. Die Schnittstelle für die nachfolgenden Ausführungen ist daher der Wärmetauscher, der die Solarwärme in den Prozess einspeist. Um den Aufwand zur Anlagenumrüstung zu minimieren, sind Varianten, die wenig Einfluss auf die ursprüngliche Prozessbeheizung haben, zu bevorzugen. In einigen Fällen werden Bestands- und Neuanlagen unterschieden. Verfahrensvarianten, die für denselben Prozessschritt eingesetzt werden können, werden ebenfalls differenziert betrachtet. Prinzipiell gilt auch bei Produktionsprozessen, dass vor der Integration einer thermischen Solaranlage die Möglichkeit der Abwärmenutzung und Effizienzsteigerung berücksichtigt werden sollten. Die ausgewählten Prozesse werden in der Reihenfolge beschrieben, wie sie in der Prozesskette einer Brauerei vorkommen. Beginnend bei der Wasserentgasung und endend mit der CIP-Reinigung. Alle Prozessschritte die Warmwasser (egal ob Brau- oder Brauchwasser) benötigen (z.B. Maischen, Läutern, Filtersterilisation oder manuelle Reinigung) sind in Abschnitt 6.2 zusammengefasst. Eine solare Unterstützung des Kochprozesses wird aufgrund des hohen Temperaturniveaus, welches eine Solaranlage bereitstellen müsste, nicht näher erläutert.

### 6.1. Wasseraufbereitung

Wie in Abschnitt 3.4.4 erläutert, ist die Herkunft des zum Brauen verwendeten Wassers von Brauerei zu Brauerei unterschiedlich. Zur Einhaltung der gewünschten Anforderungen ist in den meisten Fällen eine Aufbereitung nötig. Dazu werden in der Regel Wasserentgasungsanlagen verwendet, um gelöste Gase wie Sauerstoff und Stickstoff zu entfernen. Die im Wasser gelösten Luftbestandteile können beispielsweise zu Oxidationen führen und haben damit negativen Einfluss auf die Qualität und die Alterungsstabilität des Bieres. Vor allem bei Vorgängen nach dem Würzekochen ist der Kontakt von Sauerstoff und Bier zu vermeiden. Hierzu gehören beispielsweise Vorgänge wie die Reinigung, bei der Sauerstoff an die Kontaktflächen des Braugutes gelangen kann. Beinhaltet das Wasser bei einer der Verfahrensschritte zu viel gelösten Sauerstoff, so wird das Bier geschädigt. Um dies zu verhindern, muss der Sauerstoff aus dem Wasser entfernt werden.

Die Anforderungen an die Entgasung können unterschiedlich hoch sein. Verwendet man das Wasser beispielsweise für das High-Gravity-Verfahren, bei dem eine stark konzentrierte Würze nachträglich gestreckt wird, müssen im Vergleich zu anderen Verwendungen strengere und somit niedrigere Grenzwerte eingehalten werden. Bei der Nutzung als Spülwasser sind bereits höhere Sauerstoffkonzentrationen zulässig. Prinzipiell existieren drei physikalische Methoden zur Entfernung des Sauerstoffs. Bei der Strippentgasung wird das Wasser mit einem Strippgas in Verbindung gebracht. Das Strippgas ist vornehmlich CO<sub>2</sub> oder Stickstoff

und bewirkt eine Störung des Phasengleichgewichts des im Wasser gelösten Sauerstoffs. Dieser geht vom Wasser in die Gasphase über, bis sich der Gleichgewichtszustand eingestellt hat. Die Konzentration im Wasser senkt sich ab. Bei der Methode Heißentgasung erhöht man die Temperatur des Wassers. Dadurch senkt sich die Gaslöslichkeit im Wasser, sodass Sauerstoff aus der Flüssigphase tritt. Bei der Methode der Vakuumentgasung nimmt die Gaslöslichkeit durch die Senkung des Drucks ab. Der Partialdruck des Sauerstoffs fällt, sodass ein Ungleichgewicht vorliegt. Die Moleküle des Sauerstoffs treten solange in die Gasphase bis das Phasengleichgewicht wieder hergestellt ist. Eine Maßnahme allein reicht oft nicht aus, um die geforderten Werte zu erreichen. In den meisten Fällen wird eine Kombination der drei Methoden verwendet (Corosys, 2011).

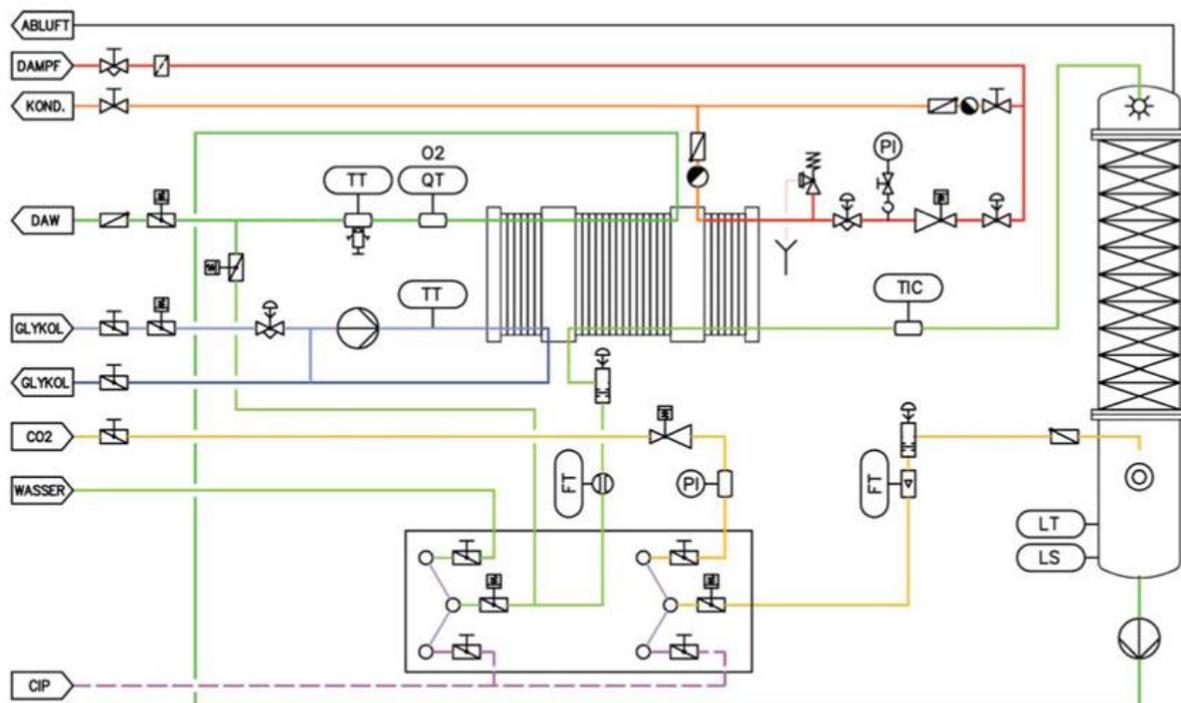


Abbildung 6-1: Heißwasserentgasungsanlage HWD (Corosys, 2011)

Die Entgasung kann in verschiedenen Apparaten durchgeführt werden. Möglichkeiten hierzu bieten Kolonnen-, Sprüh- und Membranentgasung. Die Kolonnenentgasung ist in den meisten Fällen die beste Alternative und wird im Folgenden aufgrund des thermischen Wärmebedarfes detailliert beschrieben (vgl. Abbildung 6-1). Das Wasser wird vor dem Entgasungsprozess auf über 70 °C vorgewärmt. Dies geschieht in einem Mehrzonen-wärmetauscher. Die erste Beheizungsstufe erfolgt rekuperativ durch das bereits entgaste Wasser. Im zweiten Teil wird das Wasser üblicherweise durch Dampf oder Heißwasser auf die Entgasungstemperatur gebracht. Anschließend wird das Wasser von oben in die Kolonne gegeben. Diese beinhaltet eine Füllkörperpackung, welche die Oberfläche des durchrieselnden Wassers um ein Vielfaches erhöht. Das Stripppgas wird im Gegenstrom von unten nach oben durch die Kolonne geleitet. Durch die lange Kontaktzeit zwischen dem Stripppgas und dem Wasser können sehr geringe Sauerstoffwerte erreicht werden. Das entgaste Wasser wird im Kolonnenunterteil gesammelt. Nach dem erneuten Durchlauf des rekuperativen Teils des Wärmetauschers dient

die dritte Zone der Abkühlung des entgastem Wassers. Als Kühlmedium wird hier ein etwa 20-prozentiges Propylenglykol-Gemisch oder Wasser verwendet. Als positiver Nebeneffekt tritt bei der thermischen Entgasung eine Pasteurisation des Wassers auf (Corosys, 2011).

Aus thermischen Gesichtspunkten ist lediglich die Temperaturerhöhung in der zweiten Heizstufe zu gewährleisten. Je nach Effizienz der Wärmerückgewinnung muss die Temperatur des zu entgasenden Wasser um eine gewisse Temperaturdifferenz erhöht werden. Die Zieltemperatur liegt in Abhängigkeit der Rohwasserqualität und der geforderten Güte zwischen 70 und 95 °C (Koukal, 2012). Um die Entgasungsleistung zu steigern, können auch höhere Temperaturen gefordert werden. Die zweite Heizstufe ist in den meisten Fällen als Plattenpaket im Mehrzonenwärmetauscher implementiert. In Einzelfällen kann sie auch als separater Wärmetauscher realisiert sein.

Zur Einbindung von Solarwärme in den Entgasungsprozess muss entsprechend Abbildung 6-2 eine zusätzliche Heizstufe (3) zwischen der rekuperativen (2) und dampfbeheizten (4) Zone implementiert werden. Prinzipiell handelt es sich bei den dargestellten Mehrzonenplattenwärmetauschern um geschraubte Modelle, deren Gestelle eine Plattenerweiterung zulassen. Um bestehende Anlagen mit einer solar beheizten Zone zu erweitern, kann ein Teil der gedichteten Platten des Mehrzonenwärmetauschers entfernt und nach Einbringung der zusätzlichen solaren Heizstufe wieder eingesetzt werden.

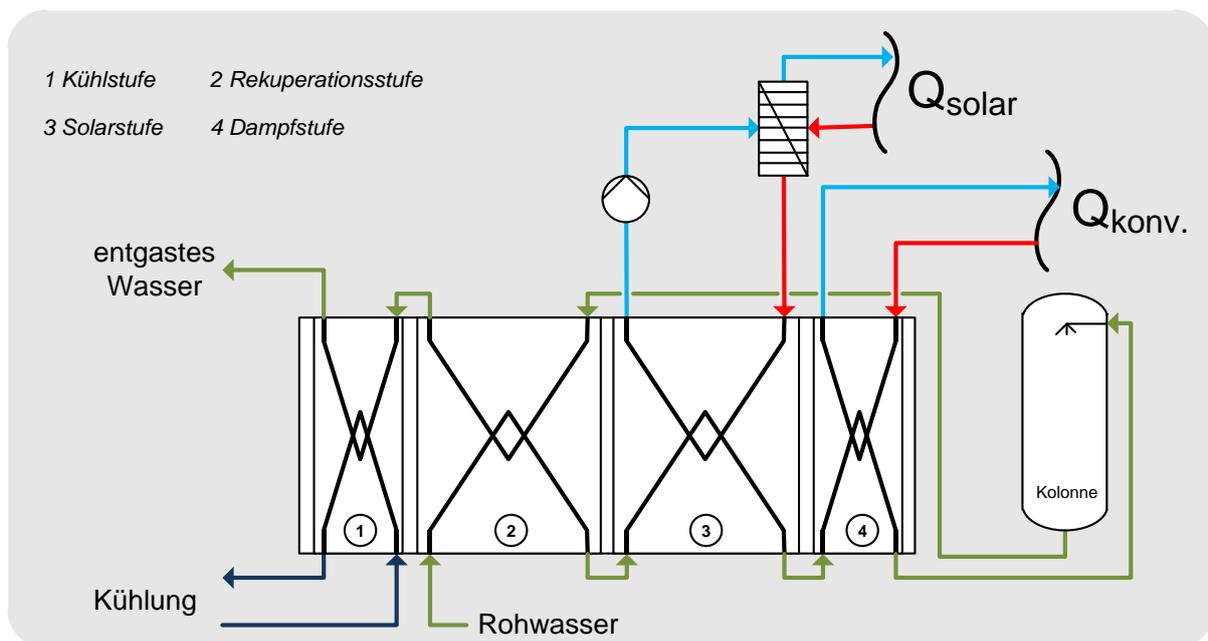


Abbildung 6-2: Konzept zur solaren Einbindung bei der Wasserentgasung

Ist eine zusätzliche Plattenaufnahme nicht möglich, ist die Einbringung einer Anschlussplatte zu prüfen (vgl. Kurzzeiterhitzung in Abschnitt 6.5.1). Durch die Anschlussplatte kann ein externer, solar gespeister Plattenwärmetauscher angeschlossen werden. Neuanlagen können direkt mit zusätzlichem Plattenpaket oder Anschlussplatte bestellt werden. Die Anbindung über einen externen Wärmetauscher ohne den Umbau der Platten 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 implementiert werden. Der solar beheizte Teil dient beiden Varianten als weitere Vorwärmstufe zwischen der rekuperativen und der Dampfzone, deren Leistung entsprechend der zugeführten Solarwärme gedrosselt werden kann.

## 6.2. Warmwasserbereitstellung

Zusätzlich zum Warmwasser, welches für den Brauprozess (Maischen, Läutern) benötigt wird, verbraucht eine Brauerei zusätzliches Warmwasser für Sterilisations- und Reinigungsaufgaben. Dieser sogenannte Betriebswarmwasserbedarf kann sehr stark zwischen 0,2..1,5 hl/hl Ausschlagwürze schwanken. Die Gründe hierfür liegen hauptsächlich in der Art der Wärmerückgewinnung während der Würzekochung (Warmwasserbereitstellung, Energiespeicher oder Brüdenverdichtung). Die Bereitstellung von Warmwasser erfolgt in der Regel zentral. Das aus der Wasseraufbereitung kommende Wasser wird auf die maximal notwendige Temperatur aufgewärmt (meist 80..90 °C) und gespeichert. Beim Verbraucher kann bei Bedarf durch die Beimischung von kaltem Wasser die Temperatur reduziert werden. Die tatsächlich vorhandene Anzahl und Verschaltung von Speichern zur Bevorratung von Warmwasser variiert allerdings von Brauerei zu Brauerei. So wird in Brauereien mit eigenem Brunnen meist keine Unterscheidung zwischen Brau- und Betriebswasser gemacht, sodass eine zentrale Brauwasserreserve vorhanden ist. Warmes Betriebswasser, das zum Beispiel als Trinkwarmwasser in den Gebäuden oder zu Reinigungszwecken genutzt wird, wird dann ebenfalls über die Brauwasserreserve bereitgestellt. Dabei kann die Brauwasserreserve aus mehreren seriell oder parallel verschalteten Speichern bestehen. Diese verfügen in der Regel über eine Dampfnachheizung, einen Kaltwasseranschluss und je nach Konfiguration auch über einen Warmwasserzulauf von der Würzekühlung und die Möglichkeit der Aufheizung über den Pfannendunstkondensator (Heyse, 2000).

Da Warmwasserreserven unterschiedlichste Konfigurationen aufweisen können, enthalten die nachfolgenden Konzepte zur Einbindung von Solarwärme in die Warmwasserreserve zur Vereinfachung nur einen Speicher. Besteht die Warmwasserreserve einer Brauerei aus mehreren unterschiedlich verschalteten Speichern, sind die vorgestellten Konzepte entsprechend zu übertragen. Ein geeigneter Einbindungspunkt kann dabei unter Umständen variieren.

Bei der Integration von Solarwärme in die Warmwasserreserve sollte grundsätzlich geprüft werden, in welchem Umfang Kaltwasser in diese eingebracht wird. Sollte ein signifikanter Bedarf vorhanden sein, bietet sich eine solare Vorwärmung an (linkes Schema in Abbildung 6-3). Diese Art Integration führt aufgrund der niedrigeren Wassertemperaturen zu hohen spezifischen Erträgen der Solaranlage. Die restliche Temperaturerhöhung des Brauwassers bis zum Sollwert wird durch die vorhandene Nachheizung sichergestellt. Neben der Möglichkeit den solaren Wärmetauscher rein als Durchlauferhitzer zu betreiben, kann dieser zusätzlich auch zur Speicherbeladung genutzt werden (rechte Variante in Abbildung 6-3). Dabei ist jedoch zu beachten, dass die Solaranlage in diesem Fall auf einem deutlich höheren

Temperaturniveau arbeitet, da die Speicher in der Regel mit Warmwasser aus der Wärmerückgewinnung gespeist werden. Da Abnahmen und Einspeisungen mit sehr großen Volumenströmen erfolgen, stellt sich keine oder nur eine sehr geringe Temperaturschichtung ein. Durch die speicherinterne Vermischung von Kaltwasser und Warmwasser aus der Wärmerückgewinnung (ca. 70..80 °C) resultiert eine ausschließliche solare Nachheizung des Speichers in einem geringeren Solarertrag.

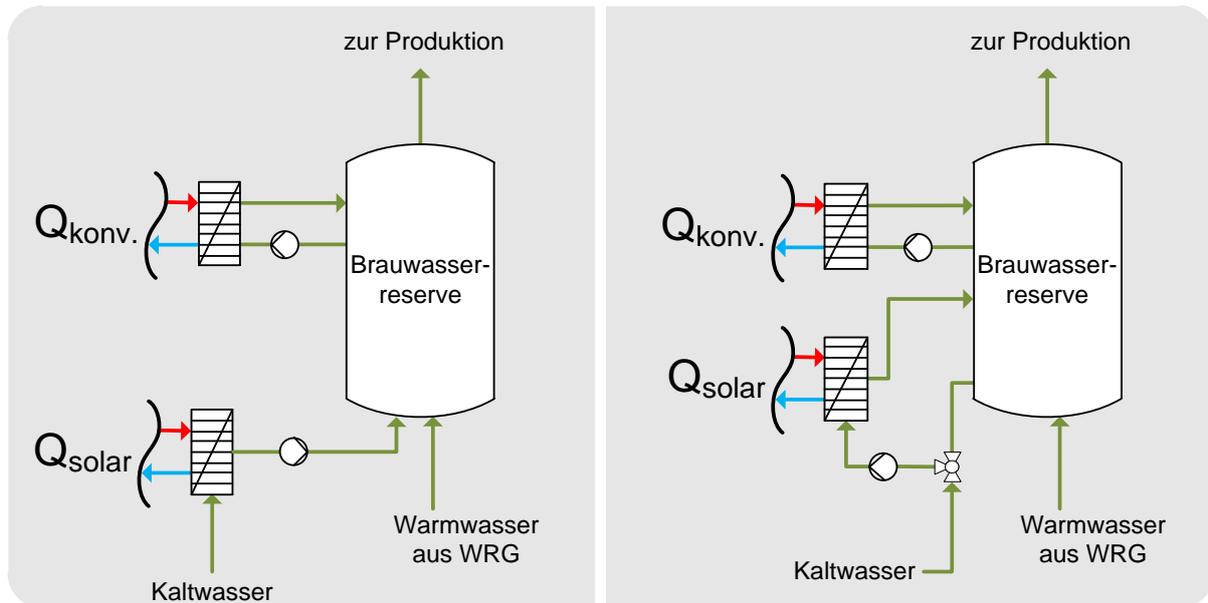


Abbildung 6-3: Konzepte zur solaren Brauwassererwärmung

Der Aufwand des Umbaus für Variante 1 dürfte in der Regel nicht besonders hoch sein, da der solare Wärmetauscher lediglich eingebunden wird und der bestehende Teil nicht weiter verändert werden muss. Variante 2 ist aufwendiger zu realisieren.

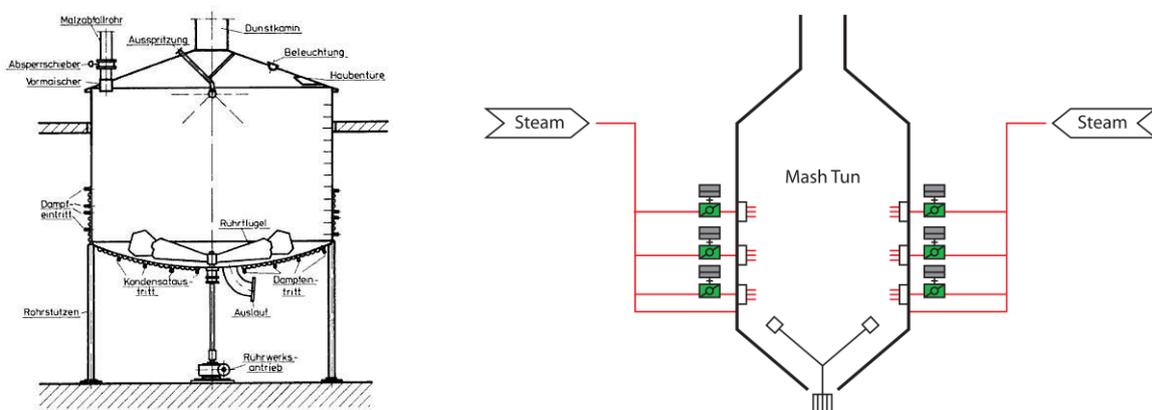
### 6.3. Maischen

Beim Maischen wird das Malzschrot mit Brauwasser vermischt und anschließend erhitzt. Die Inhaltsstoffe des Malzes gehen dabei in Lösung. Es wird versucht, unter anderem mit Hilfe von Enzymen, möglichst viele unlösliche Bestandteile in lösliche Verbindungen zu überführen, um so möglichst viel Extrakt zu gewinnen.

Das Maischen beginnt mit dem Einmaischen, bei dem das Brauwasser möglichst homogen mit dem Malzschrot in einem gewünschten Verhältnis vermischt werden soll. Je nachdem welche Enzyme man zu Beginn wirken lassen will, wird die Einmischtemperatur des Brauwassers in Bezug auf die Optimaltemperatur der gewünschten Enzyme festgelegt. Die Temperaturen können im Bereich von 35 bis 63 °C liegen. Die Bereitstellung des dafür benötigten Warmwassers hängt von den spezifischen Eigenschaften der Brauerei ab. In der Regel kommt es aus der Brauwasserreserve, die durch die Wärmerückgewinnung beim Würzekühlen und gegebenenfalls beim Kochen gespeist wird (Kunze, 2007).

Beim Maischen unterscheidet man zwei grundsätzlich unterschiedliche Prinzipien der Temperaturerhöhung: das Infusionsverfahren und das Dekoktionsverfahren. Beim Infusionsverfahren wird die gesamte Maische unter Einhaltung bestimmter Rasten erwärmt. Beim Dekoktionsverfahren erreicht man die Temperaturerhöhung der Gesamtmaische, indem man einen Teil der Maische (Kochmaische) abtrennt, kocht und anschließend zur Restmaische zurückpumpt. Ziel beider Verfahren ist das Erreichen bestimmter Temperaturniveaus, den sogenannten Rasten, bei denen bestimmte Enzyme ihr Wirkoptimum haben. Für das Infusionsverfahren benötigt man lediglich ein beheizbares Gefäß, die sogenannte Maischpfanne. Beim Dekoktionsverfahren befindet sich die Maische im Maischbottich. Die Kochmaische wird zum Erhitzen in die Maischpfanne gepumpt. Um die Flexibilität im Maischprozess zu erhöhen ist in moderneren Sudhäusern der Bottich ebenfalls beheizbar (sog. Maischbottichpfanne). Die Maische wird aufgrund der Enzymempfindlichkeit maximal auf circa 78 °C erwärmt (Kunze, 2007).

Bei der Durchführung des Maischens existieren unzählige Verfahren und Sonderverfahren, die zur Herstellung unterschiedlicher Biertypen führen. Sie unterscheiden sich unter anderem in der Einmischtemperatur, der Anzahl der Kochmaischen beziehungsweise der Anzahl der Rasten, der Rasttemperaturen, der Dauer oder der möglichen Zusammenführung unterschiedlicher Teilmaischen. Außer beim Springmaisverfahren, bei dem man nach dem Einmischen kochendes Wasser zugibt, besteht der thermische Aufwand im Beheizen der Maischgefäße, um die jeweils notwendigen Temperaturen zu erreichen. Die Möglichkeiten zur Beheizung der Maischpfanne sind in Abbildung 6-4 dargestellt.

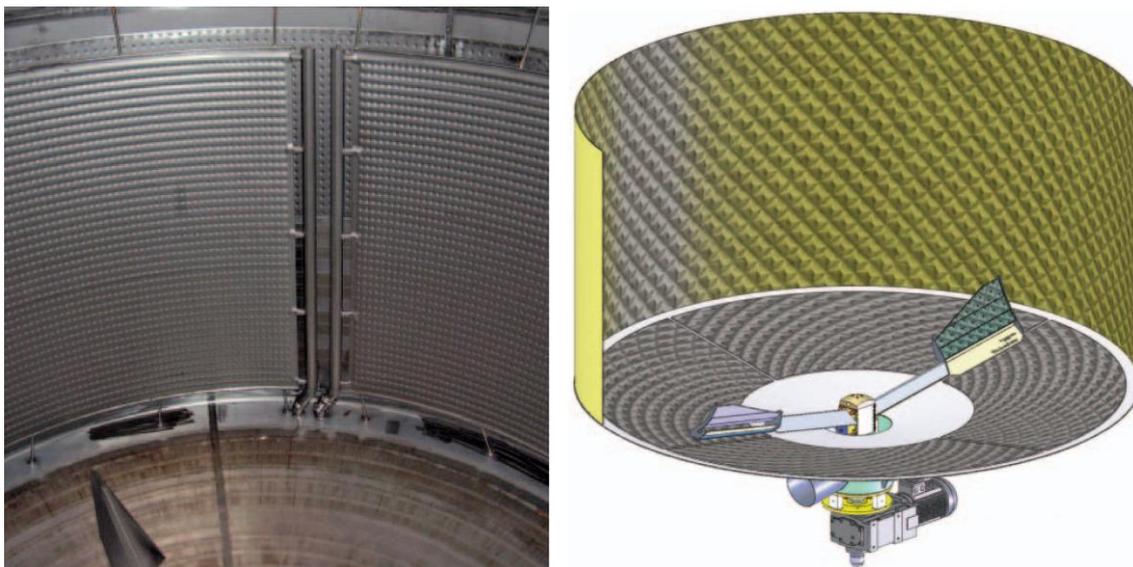


**Abbildung 6-4: Beheizung mit Halbrohren (Narziß et al., 2009) und Dampf-injektion (Meura, 2009)**

Zunächst ist die Beheizung über angeschweißte Halbrohre an der Seite und am Pfannenboden dargestellt. Bei dieser sehr weit verbreiteten Art der Pfannenbeheizung sind typischerweise zwei voneinander getrennte Heizzonen vorhanden: Am Boden und in der Zarge. Dampf gelangt mit Überdruck in die Rohre und kondensiert aufgrund der Abgabe von thermischer Energie an die Wandung. Das Kondensat wird über einen Kondensatopf abgeleitet. Eine weitere, jedoch nicht so weit verbreitete Möglichkeit ist die direkte Dampf-injektion über Dampf-dü-sen an der Bottichwand. Neben den Vorteilen der verlustlosen Abgabe der Verdampfungswärme und dem Wegfall des Kondensatrücklaufs ergibt sich allerdings das Problem, dass der Dampf aus reinem Brauwasser erzeugt werden muss. Der im Betrieb

befindliche Dampfkessel kann diese Forderung nicht erfüllen, sodass ein separater Dampferzeuger notwendig wird (Kunze, 2007), (Meura, 2009).

Um Maischgefäße mit Heizmedien betreiben zu können, die eine niedrigere Vorlauf-temperatur haben, reichen die konventionellen Heizrohre an Pfannenboden und Seitenwand in der Regel nicht aus. In diesem Fall können wie in Abbildung 6-5 dargestellt zusätzliche Heizflächen im Innenraum angebracht werden. Mit Hilfe dieser sogenannten Dimple Plates kann Heißwasser mit 95 °C, z.B. aus dem Energiespeicher oder einem BHKW, zur Beheizung des Maischgefäßes verwendet werden. Bei der links dargestellten Variante wurden die originären Heizzonen für den Sattdampfbetrieb im Gefäßboden und im unteren Teil der Zarge beibehalten, sodass diese im Bedarfsfall als Reserveheizflächen dienen (Scheller, 2011). Beim sogenannten ShakesBeer-Verfahren (rechtes Bild in Abbildung 6-5) besteht die komplette Gehäusewandung aus einer strukturierten Heizfläche, ähnlich einem Golfball. Die Oberfläche soll in Verbindung mit dem Rührflügel zu einer verbesserten Wärmeübertragung führen und damit ebenfalls ermöglichen, das Maischgefäß mit Heißwasser von ca. 95 °C zu betreiben (Wasmuth, 2005).



**Abbildung 6-5: Zusatzheizfläche im Maischgefäß (Scheller, 2011) und Maischgefäß „ShakesBeer“ (Hofbauer, 2005)**

Für die Beheizung des Maischbottichs werden typischerweise Aufheizraten von mindestens 1 K/min gefordert (Narziß, 2005). Um den Maischprozess zu beschleunigen, können auch höhere Aufheizraten gefahren werden. Bei sehr guten Rührwerken, die einen homogenen Wärmeeintrag in die Maische gewährleisten, sind auch Aufheizraten unterhalb 1 K/min akzeptabel.

Die Maischebeheizung erfolgt derzeit hauptsächlich über die Wandung der Maischepfanne. Die wärmeübertragende Fläche bestehender Maischepfannen ist meist für Dampf oder Hochdruckheißwasser ausgelegt, selten für Vorlauftemperaturen unter 100 °C. Die solare Integration bei diesem hohen Temperaturniveau führt jedoch zu reduzierten Erträgen der

Solaranlage. Um die Pfanne mit niedrigeren Temperaturen versorgen zu können, müssen Umbaumaßnahmen vorgenommen werden. Bei bestehenden funktionsfähigen Maischepfannen ist eine solarthermische Integration sehr aufwendig. Steht jedoch ein Austausch der Maischepfanne bevor (oder bei Neuanlagen), können hingegen die erläuterten Dimple Plates zum Einsatz kommen, die eine Beheizung mit Heißwasser erlauben. Die erforderliche Vorlauftemperatur liegt in der Regel bei 95 °C, da die Maische allerdings bei höchstens 78 °C gehalten wird, können Rücklauftemperaturen unter 85 °C erzielt werden. Grundsätzlich ist eine solarthermische Versorgung beim Infusionsverfahren aussichtsreicher, da die benötigten Temperaturen zum Kochen der Teilmaischen beim Dekoktionsverfahren deutlich höher sind.

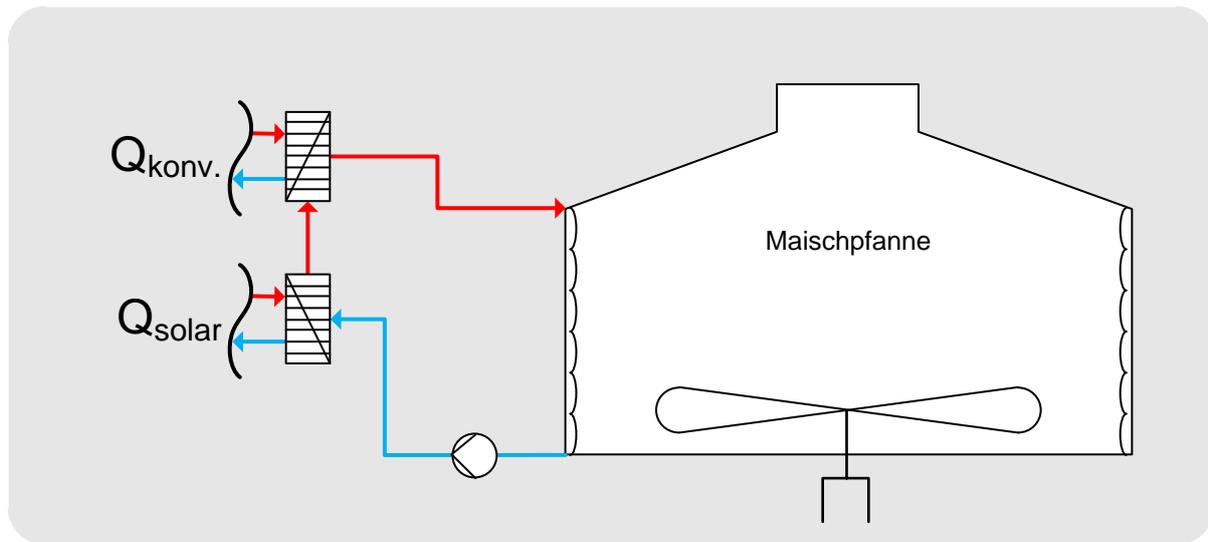


Abbildung 6-6: Solare Rücklaufanhebung zur Beheizung der Maischepfanne

Abbildung 6-6 zeigt eine Möglichkeit der solarthermischen Einbindung. Die Maischepfanne wird mit einem Warmwasserkreis versorgt, der über zwei seriell verschaltete Wärmetauscher zunächst mit Solarwärme und anschließend konventionell mittels Dampf auf die notwendige Temperatur gebracht wird. Durch die Reihenschaltung wird gewährleistet, dass auch bei unzureichender solarer Erwärmung die geforderten Temperaturen erreicht werden.

## 6.4. Entalkoholisierung

Alkoholfreie Biere stoßen als Genuss- und Lebensmittel aufgrund ihrer biertypischen Eigenschaften und niedrigen bis nicht vorhandenen Alkoholgehalt weltweit auf wachsenden Zuspruch. Laut Gesetz wird in Deutschland Bier mit einem Alkoholgehalt unter 0,5 Vol% als alkoholfrei bezeichnet. In anderen Regionen, wie z.B. dem arabischen Raum werden Alkoholgehalte von unter 0,05 Vol% gefordert. Zur Entalkoholisierung stehen verschiedene Methoden zur Verfügung. Neben dem vorzeitigen Abbruch der Gärung und der Umkehrosmose existieren auch thermische Verfahren. Alle Methoden können in verschiedenen Varianten kombiniert werden (Back, 2005).

Bei der thermischen Entalkoholisierung wird durch eine Erwärmung des Bieres der Alkohol entfernt. Dabei macht man sich zunutze, dass die Siedetemperatur von Alkohol deutlich

unterhalb der von Wasser liegt ( $78,3\text{ °C}$  bei atmosphärischem Druck). Das fertige Bier auf eine solche Temperatur zu erwärmen hätte allerdings Beeinträchtigungen der geschmacklichen Eigenschaften zur Folge, weshalb man sich der Vakuumtechnik bedient. Dadurch kann die Siedetemperatur gesenkt werden, ohne den Geschmack des Bieres zu beeinflussen. Grundsätzlich arbeiten alle Verfahren nach diesem Prinzip. Die Prozesstemperatur liegt je nach Verfahren und Anlage bei ca.  $40\text{ °C}$ . Das Vakuum wird zu Beginn durch eine Vakuumpumpe sichergestellt und danach durch die Kondensation der Brüden aufrechterhalten. Eine Abgrenzung der Verfahren lässt sich hinsichtlich der Bauart des Verdampfers treffen. Dabei wird zwischen Rektifikationskolonnen, Dünnsfilm- und Fallstromverdampfern unterschieden (Narziß, 2005).

Das Prinzip der Fallstromverdampfung zeigt Abbildung 6-7. Das Bier (A) wird nach einer rekuperativen Vorwärmung von oben in einen mit Satttdampf beheizten Rohrbündelwärmetauscher (2) geführt. Es läuft in einem dünnen Film auf der Innenseite der senkrechten Rohre nach unten. Die hierbei entstehenden Brüden werden durch das nach unten laufende Bier im Gleichstrom mitgerissen. Im darunter angebrachten Abscheider werden die Brüden des entalkoholisierten Bieres abgetrennt. In dem zweistufigen Prozess können die Brüden als Heizmedium im zweiten Verdampfer genutzt werden. Um das Bier thermisch nicht zu stark zu belasten, wird nicht nur das Bier, sondern auch der Satttdampf im Unterdruckbereich betrieben.

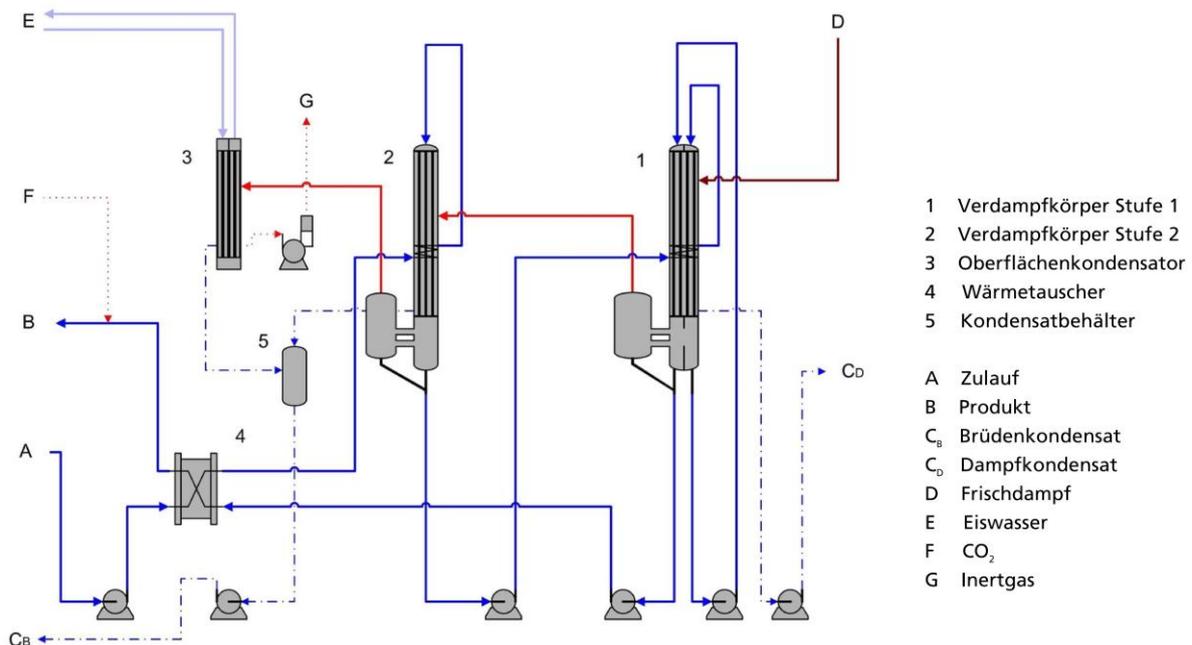


Abbildung 6-7: Zweistufiger Fallstromverdampfer (GEA, 2010)

Im Gegensatz zum Fallstromverdampfer werden bei der Rektifikation die Bierbrüden in einem separaten Wärmetauscher am Ende des Prozesses erzeugt. Von hier werden sie im Gegenstrom zum flüssigen Bier durch die Rektifikationskolonne geführt. Abbildung 6-8 zeigt das Verfahrensfließbild der Rektifikation. Zunächst wird das Bier durch einen rekuperativen Wärmetauscher mit dem entalkoholisierten Bier vorgewärmt und in die Rektifikationskolonne geführt. Die Kolonne beinhaltet eine Packung, die die Oberfläche des Bieres um ein Viel-

faches erhöht. Das Bier strömt nach unten, wobei die entgegenströmenden Brüden aus dem separaten Wärmetauscher Verdampfungs- und Kondensationsvorgänge an der Grenzfläche zwischen Gas- und Flüssigphase bewirken. Hierdurch wird an der Grenzfläche zwischen den beiden Aggregatzuständen des Bieres eine Trennung des Alkohols vom Rest des Bieres hervorgerufen. Auch hier werden Bier- und Dampfseite des separaten Wärmetauschers zur Minimierung der thermischen Belastung im Unterdruck betrieben (Narziß, 2005).

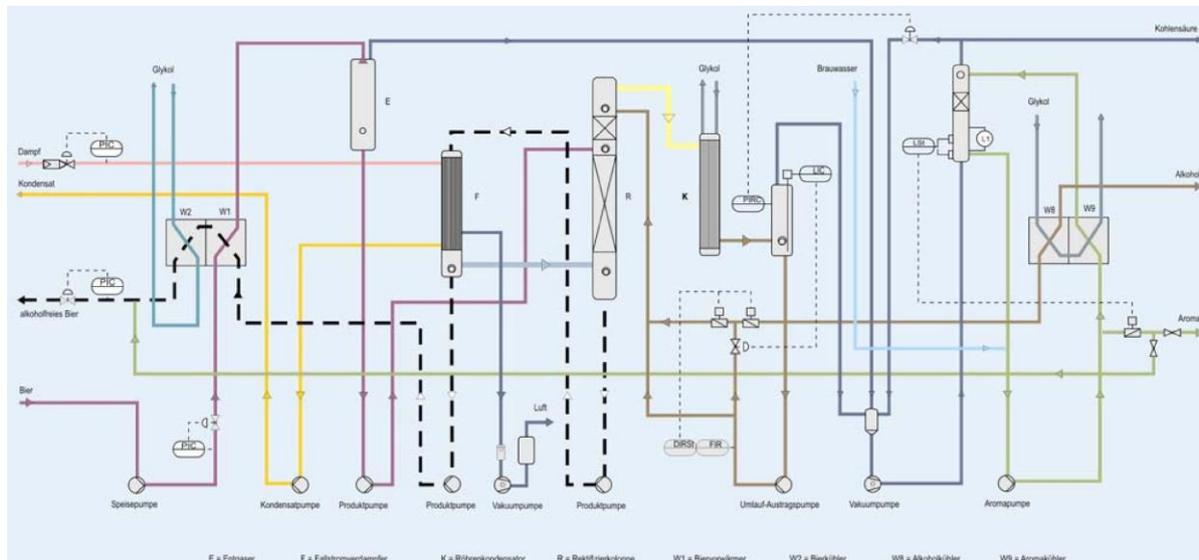


Abbildung 6-8: Rektifikationskolonne (API, 2004)

Die Prinzipien der thermischen Entalkoholisierung werden von unterschiedlichen Herstellern angeboten. Die Verdampfungstemperatur liegt bei allen in Abhängigkeit des Unterdrucks bei circa 40 °C. Die Verdampfer der Anlagen haben unterschiedliche Bauformen. Die Beheizung erfolgt aus Gründen der Produktschonung in der Regel mit Satttdampf mit etwa 60 °C. Die Aufrechterhaltung des Unterdrucks erfolgt durch die Brüdenkondensation. Die zurück gewonnene Energie kann entweder in einer folgenden Stufe oder in anderen Prozessen der Brauerei genutzt werden.

Da das Temperaturniveau des benötigten Dampfes verhältnismäßig niedrig ist, ergibt sich die Möglichkeit zur Einbindung von Solarwärme. Für die Entalkoholisierung mittels Fallstromverdampfer kann die Integration gemäß Abbildung 6-9 erfolgen. Dabei kann die solar unterstützte Bereitstellung des 60 °C warmen Satttdampfes sowohl bei Neuanlagen, als auch bei bestehenden Verdampfern erfolgen. Hierzu wird das Heizsystem, bestehend aus einem konventionell nachgeheizten Speicher und einem vorgeschalteten Solarwärmetauscher durch eine zusätzliche Vakuumpumpe evakuiert (ca. 200 mbar). Der Fallstromverdampfer ist über diesem Wasserreservoir angeordnet, sodass anfallendes Kondensat aufgrund des Höhenunterschiedes in den Behälter laufen kann. Falls diese Anordnung nicht möglich ist, muss eine Förderpumpe verwendet werden. Das Wasserreservoir muss mehr als den gesamten flüssigen Inhalt der Anlage aufnehmen können, damit die Vakuumpumpe betriebsbereit bleiben kann. Bevor das Kondensat in das Wasserreservoir gelangt, wird die Temperatur durch Solarwärme erhöht. Im Speicherbehälter ist zur Versorgungssicherheit eine dampfbeheizte Heizschlange eingebracht. Alternativ können auch andere Wärmequellen zur Beheizung genutzt werden.

Am Behälterboden ist eine Bypass-Leitung vorgesehen, die über ein Drei-Wege-Ventil zum Solarwärmetauscher führt. Dadurch kann auch zum Anfahren des Prozesses Solarwärme genutzt werden. Wenn sich aufgrund der Erwärmung ausreichend Dampf im Wasserreservoir gebildet hat, kann mit der Dampfzufuhr zum Fallstromverdampfer durch Öffnen des Ventils begonnen werden. Die beschriebene Wärmeversorgung kann an die bestehenden Dampfanschlüsse des Fallstromverdampfers angeschlossen werden. Nach selbigem Prinzip können die Verdampfer am Ende von Rektifikationskolonnen beheizt werden.

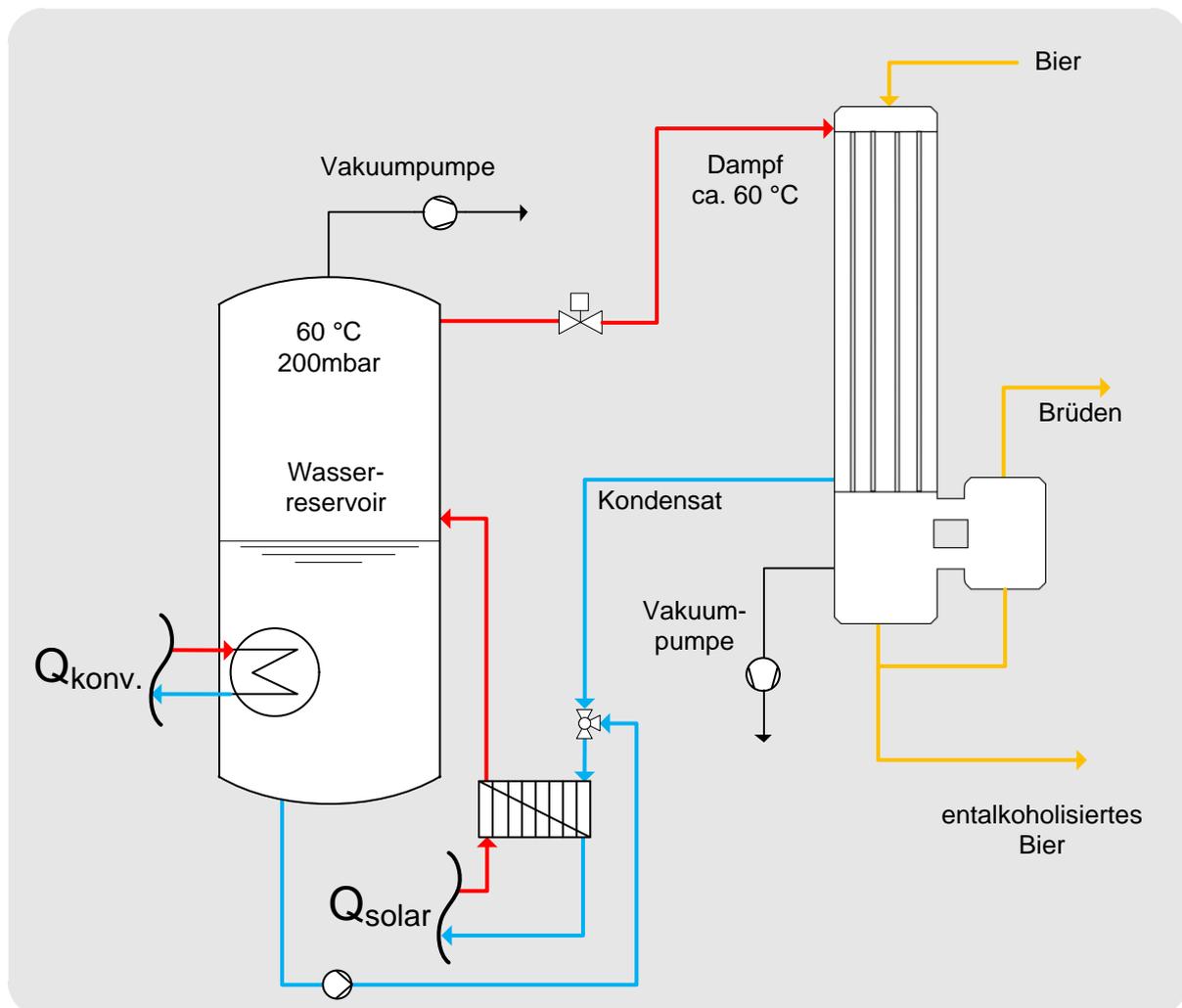


Abbildung 6-9: Konzept zur solaren Einbindung bei der Entalkoholisierung

Eine andere Möglichkeit besteht in der Beheizung über einen Warmwasserkreis. Dies kann allerdings nur bei Neuanlagen oder Austausch bzw. Erneuerung der vorhandenen Anlagentechnik erfolgen, da die Wärmetauscherfläche bestehender Entalkoholisierungsanlagen für eine Beheizung mit Warmwasser typischerweise nicht ausreicht. Verfahren bei denen der brüdenbildende Wärmetauscher außerhalb der eigentlichen Entalkoholisierungseinheit angeordnet ist, lassen sich möglicherweise durch einen größeren Wärmetauscher ersetzen, sodass eine thermische Solaranlage Warmwasser mit etwa 60..70 °C zur Beheizung bereitstellt.

## 6.5. Haltbarmachung

Um die Genießbarkeit des Bieres bis zum Mindesthaltbarkeitsdatum zu gewährleisten müssen in gewissen Fällen Maßnahmen zur Haltbarmachung getroffen werden. Ursache für die Verderblichkeit sind sich vermehrende Mikroorganismen, die durch Unsauberkeiten in das Bier gelangen. Besonders wichtig ist dies für Biere, die für den Export bestimmt sind und daher eine längere Haltbarkeit aufweisen müssen. Bei Bieren für den regionalen Vertrieb wird oftmals darauf verzichtet und ein früheres Mindesthaltbarkeitsdatum in Kauf genommen. Biermischgetränke, die mit Zucker gesüßt werden, haben ein besonders großes Gefahrenpotential für nachträgliche Gärvorgänge und Kontaminationen und müssen deshalb konservierenden Verfahren unterzogen werden. Wie in den Abschnitten 3.2 und 3.3 erläutert, kann die Haltbarmachung des Bieres im Gär- und Lagerkeller mittels Kurzzeiterhitzung oder in der Abfüllhalle durch Pasteurisation erfolgen. Im Weiteren werden lediglich thermische Verfahren der biologischen Haltbarmachung behandelt, da diese die Möglichkeit zur Einbindung von Solarwärme bieten (Kunze, 2007).

Die im Gär- und Lagerkeller angesiedelte Kurzzeiterhitzung (KZE) ähnelt hinsichtlich der Integration von Solarwärme sehr stark der zuvor beschriebenen Wasserentgasung. Die Einbindung von Solarwärme zur Haltbarmachung in der Abfüllhalle unterscheidet sich hiervon deutlich. Im Folgenden werden die Möglichkeiten zur Einbindung bei der KZE und dem Tunnelpasteur erläutert. Die Nutzung von Solarwärme für die Kammerpasteurisation macht aufgrund der geringen Laufzeiten, dem geringen Wärmebedarf sowie der verwendeten Anlagentechnik nur bedingt Sinn. Bei diesem Verfahren werden kleinere Chargen, meist einzelne Paletten, in eine dicht schließende Kammer gebracht. Die Erwärmung erfolgt über Wasserdampf, Wasserberieselung oder Heißluft (Narziß, 2005).

### 6.5.1. Kurzzeiterhitzung

Für die Kurzzeiterhitzung werden üblicherweise Plattenwärmetauscher verwendet. Das Fließschema für die KZE ist in Abbildung 6-10 dargestellt. In der Anfahrphase der Anlage wird über ein 4-Wege-Ventil Wasser im Kreis gepumpt und die Heizstufe mit Dampf beheizt, bis die geforderte Betriebstemperatur erreicht ist. Anschließend wird das Ventil umgeschaltet, um das Wasser mit dem zu pasteurisierendem Bier aus der Anlage zu drücken. Das Bier wird zunächst in einem ersten Plattenwärmetauscher rekuperativ vorgewärmt. Im zweiten Wärmetauscher wird das Bier durch einen Warmwasserkreis auf Pasteurisationstemperatur erwärmt. Dieser Warmwasserkreis dient der schonenden Bieraufheizung und wird mit Dampf oder Heißwasser beheizt.

Der zur Aufheizung des Wassers erforderliche Wärmetauscher ist in Abhängigkeit des Herstellers als zusätzliches Plattenpaket in den Mehrzonenwärmetauscher integriert, oder extern, wie die Abbildung zeigt, angeordnet. Nach der Aufheizung auf Pasteurisationstemperatur wird das Bier für eine gewisse Zeit heiß gehalten. Dies geschieht in einem Plattenpaket oder mit der hier dargestellten Rohrschlange. Ein Plattenpaket, das mit in den Mehrzonenwärmetauscher eingebracht ist, rechtfertigt höhere Anschaffungskosten mit einer kompakten und platzsparenden Bauweise und höherer Wartungsfreundlichkeit gegenüber den

Röhren (Hietz, 2012). Nach der Heißhaltestrecke wärmt das pasteurisierte Bier im rekuperativen Wärmetauscher das eintretende Bier auf und kühlt sich dabei selbst ab. In einem letzten Wärmetauscher wird das Bier auf die gewünschte Abfülltemperatur abgekühlt. In Verbindung mit einem Puffertank kann die Anlage direkt vor die Abfülleinrichtung installiert werden. Die Pasteurisationstemperaturen des Bieres liegen üblicherweise zwischen 68 °C und 75 °C. (Narziß, 2005) gibt für die Mindesttemperatur einen Wert von 66,4 °C und für die Mindestdauer 15 Sekunden an. Die komplette Anlagenstrecke nach der KZE muss steril sein, damit das Bier nicht wieder kontaminiert wird.

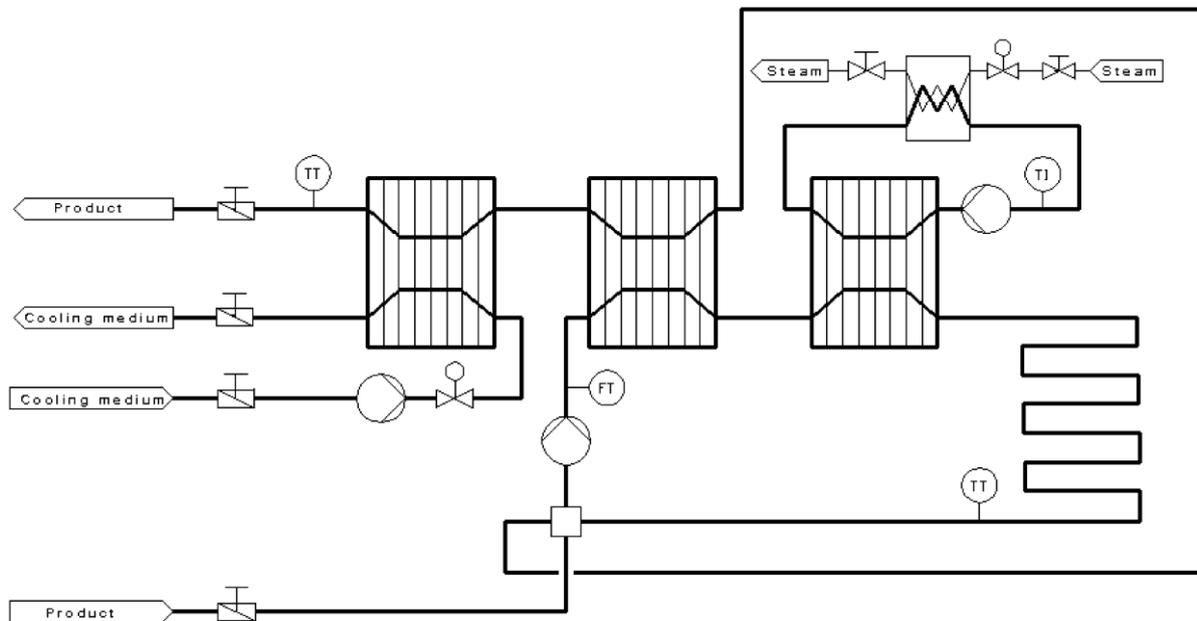


Abbildung 6-10: Fließschema der Kurzzeiterhitzung (Centec, 2012)

Wenn Solarwärme für die KZE genutzt werden soll, muss diese vor dem dampfbeheizten Wärmetauscher dem Warmwasserkreis zugeführt werden, da hier die geringsten Temperaturen im System auftreten. Anlagen mit externer Heizstufe können durch die Vorschaltung eines zusätzlichen Wärmetauschers relativ leicht mit solarer Wärme versorgt werden. Diese Systemkonfiguration ist in der Praxis jedoch nicht so häufig zu finden, da Neuanlagen in der Regel kompakt in einem Mehrzonenwärmetauscher und somit kostengünstiger gebaut werden. Das in Abbildung 6-11 dargestellte KZE System besteht aus einem 3-Zonen-Wärmetauscher, der die kühlende, rekuperative und Warmwasserstufe beinhaltet sowie eine Heißhaltestrecke und externe Heizstufe. In diesem Fall besteht die Heizstufe aus dem Solarwärmetauscher, der mit dem konventionellen dampfbetriebenen Wärmetauscher in Reihe geschaltet ist. 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 K erwärmt. Diese garantiert eine schonende Aufheizung des Bieres auf die erforderliche Pasteurisationstemperatur.

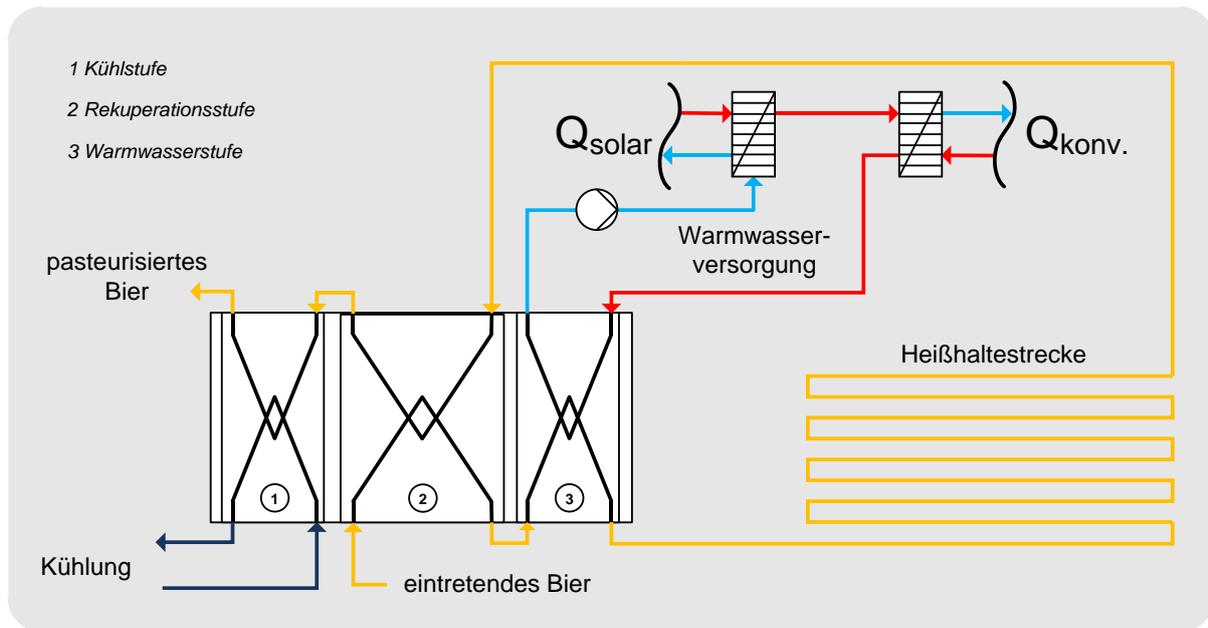


Abbildung 6-11: Solare Einbindung bei der KZE mit externer Heizstufe

Etwas aufwendiger ist die Integration von Solarwärme bei einer KZE mit kompaktem Mehrzonenwärmetauscher. Grundsätzlich besteht ein solcher Wärmetauscher aus fünf Paketen (Kühlstufe, Rekuperationsstufe, Heißhaltestufe, Warmwasserbereiter und Warmwasserstufe für das Bier). Wenn es die Gestellgröße der geschraubten Platten zulässt, kann der Wärmetauscher um ein Plattenpaket zur solaren Vorwärmung erweitert werden. Ist dies nicht der Fall, besteht die Möglichkeit vor der Stufe des dampfbetriebenen Heißwasserbereiters gemäß der Ausführungen zur Entgasung in Abschnitt 6.1 eine zusätzliche Anschlussplatte zu installieren. Diese Möglichkeit ist in Abbildung 6-12 dargestellt.

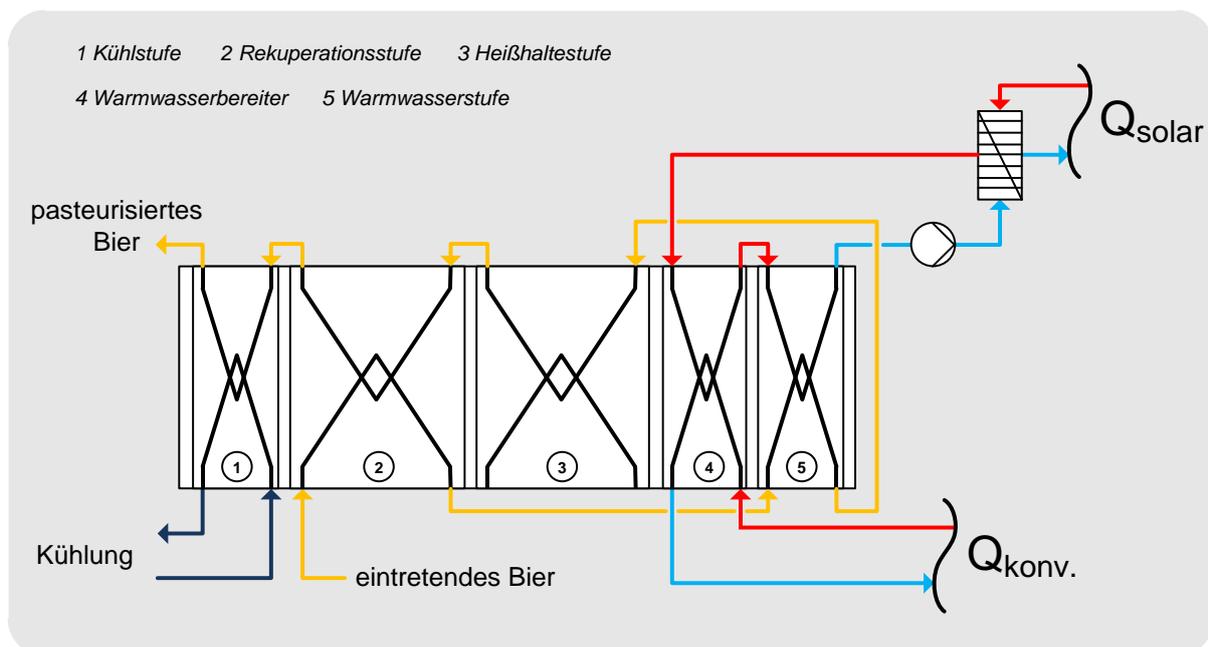


Abbildung 6-12: Solare Einbindung bei der KZE mit Mehrzonenwärmetauscher

Eine Anschlussplatte ist deutlich schmaler als das gesamte Plattenpaket, sodass auch bei nicht ausreichendem Platz im Gestell ein externer Solar-Wärmetauscher an den Mehrzonenwärmetauscher angeschlossen werden. Für beide Varianten der Einbindung müssen die Platten aus dem Gestell genommen werden. Um Kosten zu sparen kann dies in Verbindung mit Wartungsarbeiten oder Plattenerneuerungen geschehen. Dampfbeheizte Platten haben Lebensdauern von circa 10 Jahren. Die anderen Platten halten aufgrund der geringeren Temperaturen ungefähr 15 Jahre (Hietz, 2012). Neuanlagen können generell bei entsprechender Anlagenplanung mit den nötigen Anschlüssen oder einem integrierten solarbeheizten Plattenpaket versehen werden. In allen Fällen dient die Dampfbeheizung zur Versorgungssicherheit.

### 6.5.2. Pasteurisation

Die Pasteurisation in der Abfüllhalle erfolgt meist durch Tunnelpasteure. Wie in Abbildung 6-13 zu sehen ist, besteht ein Tunnelpasteur aus mehreren Temperaturzonen. Die durchlaufenden Flaschen werden über Spritzdüsen oder Berieselungsdüsen zunächst erwärmt (H1 bis H3), dann überhitzt (S), auf einer längeren Strecke pasteurisiert (P) und anschließend wieder abgekühlt (C1 bis C3). Prinzipiell verfügen Tunnelpasteure über eine interne Wärmerückgewinnung, indem das Wasser aus den Kühlzonen den Heizzonen zum Anwärmen der Flaschen zugeführt wird (C3 → H1, C2 → H2, C1 → H3). Bei Bedarf können die Ströme der Kühlzonen nachgeheizt werden. Der Großteil der benötigten Wärme wird in die Überhitzungszone eingebracht. Durch die Prozessführung ist ein langsamer Temperaturanstieg sichergestellt, wodurch sich der Flaschenbruch in Grenzen hält. Die Pasteurisationstemperatur liegt etwa bei 62 °C, sodass die Temperatur des Heizmediums für die Nachheizung um etwa 5 Kelvin höher sein muss (Kunze, 2007), (Narziß, 2005).

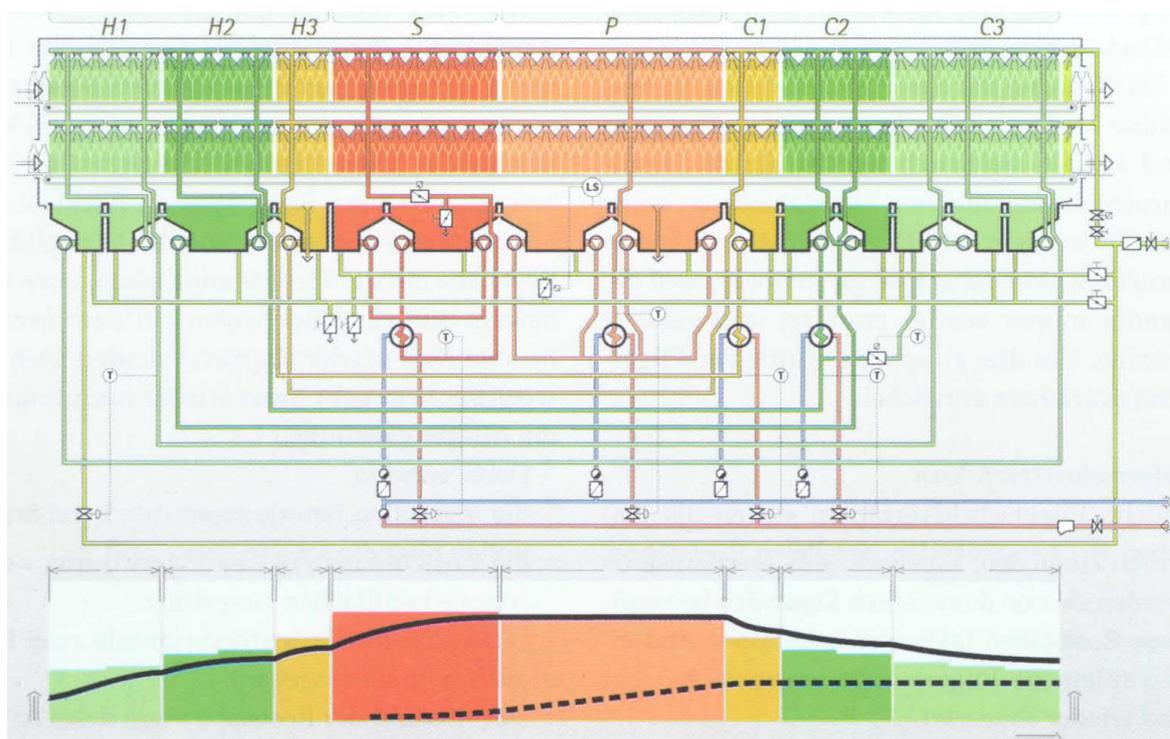


Abbildung 6-13: Zweistöckiger Tunnelpasteur mit entsprechendem Temperaturverlauf (Kunze, 2007)

Tunnelpasteure können mit unterschiedlich vielen Beheizungsstufen ausgeführt sein. Das reicht von einem Wärmetauscher für jede einzelne Zone bis hin zu einem einzigen Wärmetauscher für die gesamte Anlage. Externe Wärmetauscher können als Plattenpaket oder Rohrbündel ausgeführt sein. Interne Heizschlangen finden so gut wie keine Verwendung, da diese im Behälter immer mit Wasser bedeckt sein müssen und Nachteile bei der Reinigung mit sich bringen. Intelligente Überlaufsysteme können die Anzahl der Beheizungsstufen reduzieren. So beheizt beispielsweise das Beheizungssystem „CHESS“ den gesamten Tunnelpasteur mit einem Plattenwärmetauscher in Verbindung mit einem Puffertanksystem. Das über die Gebinde rieselnde Warmwasser wird in Behältern aufgefangen bevor es erneut zur Berieselungseinrichtung gepumpt wird. In die Heizzonen gelangt durch die Verschleppung zusätzlich Wasser. Das überlaufende Wasser der Heizzonen gelangt in einen Pufferbehälter, wo es mit dem Wärmetauscher auf die maximal notwendige Temperatur erwärmt wird. Zur Erwärmung der einzelnen Heizzonen wird bei Bedarf über eine Ringleitung Warmwasser aus dem Pufferbehälter zu dosiert (Krones, 2009b).

Der Energiebedarf bei der Pasteurisation unterteilt sich in drei zeitlich getrennte Bereiche. Zunächst wird thermische Energie zum Aufheizen der Bäder bei Betriebsbeginn benötigt. Anschließend hat die Maschine beim Anfahren ihren Maximalbedarf, da hier noch kein Energieaustausch zwischen den äquivalenten Zonen erfolgen kann. Im stationären Betrieb wird Wärme zum Aufheizen von der regenerativ erreichten auf die gewünschte Pasteurisationstemperatur benötigt (Esmarch, 1999). Um das Bier im Gebinde auf die gewünschten 62 °C zu erwärmen, muss das Warmwasser in der wärmsten Stufe auf circa. 68 °C gebracht werden.

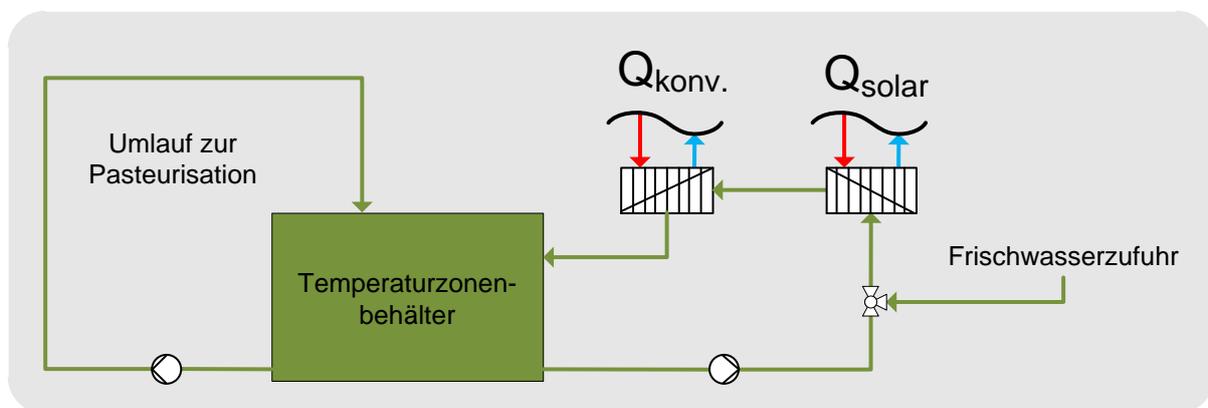


Abbildung 6-14: Solare Einbindung beim Tunnelpasteur

Abbildung 6-14 zeigt das Konzept zur solarthermischen Integration beim Tunnelpasteur. Bei der üblichen externen Beheizung der Zonenbehälter kann ein solarbeheizter Wärmetauscher vorgeschaltet werden. Neuanlagen können mit zwei separat beheizten Plattenpaketen ausgestattet werden. Zusätzlich zur Einbindung an der Zonenbeheizung kann möglicherweise ein weiterer Integrationspunkt genutzt werden. Aufgrund von Verdampfung, anhaftenden Wasser und anderen Vorgängen der Wasserverschleppung muss die verlorene Wassermenge der Anlage wieder zugeführt werden. Diese kann in Abhängigkeit von der Anlagengröße, Flaschengröße und -form bis zu 20 ml pro Flasche betragen. Der genaue Wert muss

anlagenspezifisch erfasst werden. Bei der Wasserrückführung werden von den Herstellern unterschiedlichste Varianten entwickelt. Es existieren Einrichtungen, die am Ende des Pasteurs die Flaschen ablasen und das aufgefangene Wasser in die letzten Zonen zurückführen. Andere führen Frischwasser einzelnen Becken zu. In diesem Fall ist zu prüfen, ob eine solare Einbindung an dieser Stelle sinnvoll ist. Mit einem Wärmetauscher kann, wie die Abbildung zeigt, die Wasserzufuhr solar vorgewärmt werden. Die beschriebenen Konzepte gelten äquivalent für Anlagen zur Dosenpasteurisation (Hasenbeck, 2012).

## 6.6. Gebindereinigung

Vor der Befüllung müssen die verwendeten Gebinde gereinigt werden. In Deutschland wird der Großteil des Bieres in Glasmehrwegflaschen und Kegs gefüllt. Ein geringer Teil wird in Dosen und Kunststoffflaschen gefüllt. Da es sich hierbei um Einweggebilde handelt, muss vor der Abfüllung keine aufwendige Reinigung erfolgen. Daher wird in diesem Abschnitt lediglich auf die Reinigung von Mehrweggebinden eingegangen. Bei der Reinigung dieser Gebinde besteht prinzipiell die Möglichkeit Solarwärme zur Beheizung von Flaschenwaschmaschinen, Kastenwäschern und Keg-Anlagen zu nutzen. Bei Kastenwäschern ist zunächst zu prüfen, ob diese überhaupt einen extern aufzubringenden Wärmebedarf haben, da sie häufig mit Abwärme der Flaschenwaschmaschine betrieben werden. Eine Verallgemeinerung zur Einbindung bei Keg-Anlagen ist eher schwierig, da es hier viele mögliche Anlagenvarianten gibt. Gemessen am Wärmebedarf ist die Flaschenwaschmaschine der wichtigste Verbraucher im Bereich der Abfüllhalle.

### 6.6.1. Flaschenwaschmaschine

Flaschenwaschmaschinen reinigen Bierflaschen bevor sie mit dem gewünschten Bierprodukt gefüllt werden. Vor der Reinigung werden Fremdflaschen und Fremdkörper entfernt. Anschließend werden die Flaschen der Flaschenwaschmaschine zugeführt. Prinzipiell lassen sich diese Anlagen in Einend- und Doppelend-Reinigungsmaschinen unterscheiden. Ein- und Ausgabe befinden sich bei der Einend-Maschine auf einer Seite und bei der Doppelend-Maschine jeweils auf der anderen. In den Maschinen durchlaufen die Flaschen über ein Endlosförderband mehrere Stufen der Reinigung. Alle Stufen lassen sich dem Vorwärm-, Lauge- oder Abkühlbereich zuordnen. Die Anzahl der einzelnen Arbeitsschritte innerhalb dieser Stufen variiert herstellerepezifisch. Nach Eintritt in die Reinigungsmaschine erfolgt zunächst die Restentleerung, bevor die Flaschen die Vorweichbäder durchlaufen. Durch das Lösen von Schmutz mit Warmwasser wärmen sich die Flaschen langsam auf 40 bis 50 °C auf. Im nächsten Abschnitt erfolgt die Reinigung in Vorlauge-, Lauge- und Nachlaugezonen. Durch die Verwendung von Lauge erhöht sich der Reinigungseffekt. Die keimtötende Wirkung wird durch die hohe Laugentemperatur zusätzlich gesteigert. Im Vorlaguesektor erhöht sich die Temperatur der Flaschen durch die Lauge auf circa 60 °C und Schmutzteilchen werden angelöst. Anschließend erfolgt ein längerer Aufenthalt im Laugenbad bei etwa 80 °C, wobei jegliche Art von Verschmutzung gelöst wird. In der Nachlaugezone werden die Flaschen nochmals mit Lauge abgespritzt und kühlen sich bereits leicht ab. Zum Ende hin werden die

Flaschen in mehreren Stationen mit Warmwasser besprüht, um die Lauge zu entfernen und sie weiter abzukühlen bevor sie im letzten Sektor mit Frischwasser ausgewaschen werden. Die Reinigung von Kunststoff-Mehrwegflaschen erfolgt in konstruktiv anderen Maschinen. Es ist darauf zu achten, dass je nach Kunststoffart ein Überschreiten der maximalen Reinigungstemperatur verhindert wird. Vor allem bei PET Flaschen ist eine Schrumpfung oberhalb von 59 °C zu beachten. Bei PEN-Flaschen hingegen liegt die Maximaltemperatur bei 80 °C (bevcomp, 2005), (Kunze, 2007).

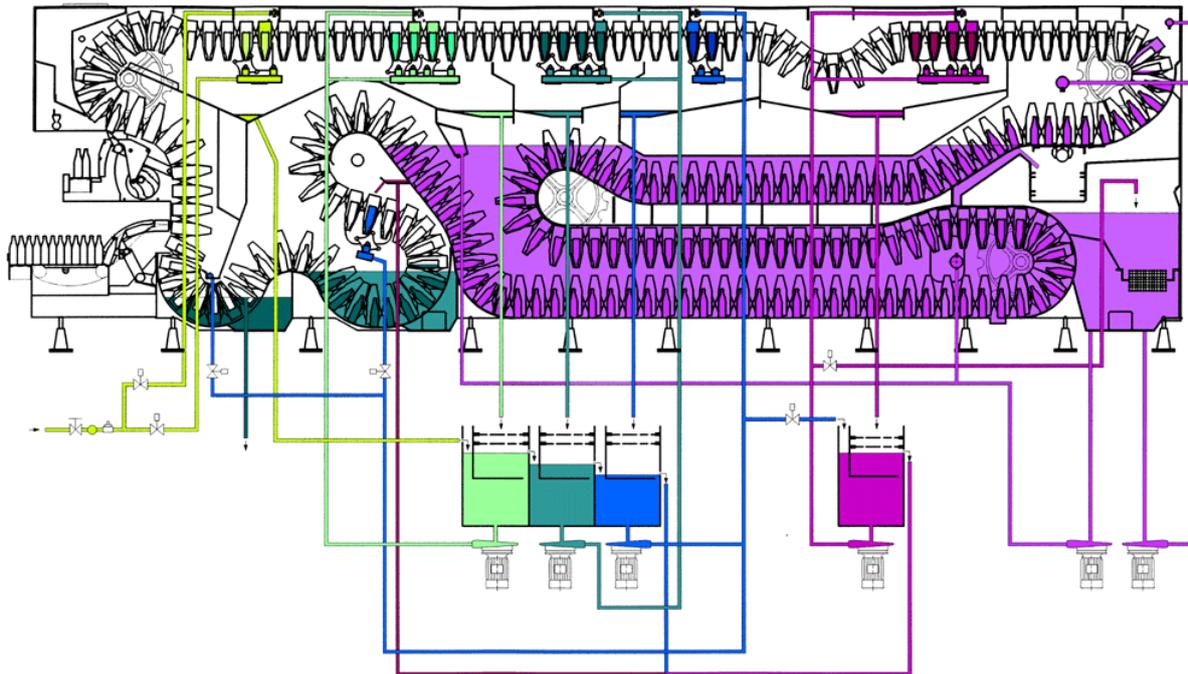


Abbildung 6-15: Aufbau einer Flaschenwaschmaschine (GM Gera, 2011)

Abbildung 6-15 zeigt die schematische Darstellung einer Flaschenwaschmaschine. Für jede Zone existiert ein Auffangbehälter, um die Reinigungsflüssigkeit wieder zu verwenden. Die wasserführenden Behälter sind so ausgeführt, dass das Wasser in den Behälter der vorhergehenden Stufe überlaufen kann. Frischwasser wird nur am Ende der Maschine zugegeben. Von dort aus wird es nach einer gewissen Rezirkulation in jeder Zone im Gegenstrom zu den Flaschen durch die Maschine geführt. Im Bereich der Rückkühlung erwärmt sich das Wasser und wird anschließend von der wärmsten Rückkühlstufe zur wärmsten Aufheizstufe gebracht. In diesem Bereich kühlt sich das Wasser bis zur ersten Vorweichstufe ab. Die Lauge der Nachbehandlung kann in gleicher Art der Vorlaugezustufe zugeführt werden. Herstellerspezifisch können verschiedene Varianten der Wärmerückgewinnung angewandt werden. Grundsätzlich haben jedoch alle Maschinen gemeinsam, dass ausschließlich in im Hauptlaugebad thermische Energie und bei der letzten Spritzung Frischwasser eingebracht werden muss. Alle anderen Zonen werden über den Flaschenumlauf, den Flüssigkeitsüberlauf oder rekuperative Maßnahmen versorgt. Durch Umwälzpumpen wird ein Teil der Lauge an andere Stellen der Laugezone gebracht. Durch einen zusätzlichen Wärmetauscher kann auch thermische Energie zwischen Nachlauge- und wärmster Vorwärmstufe getauscht werden.

Das Abwasser aus der ersten Vorwärmzone verfügt zudem über ausreichend Niedertemperaturabwärme, um es in anderen Bereichen der Brauerei nutzen zu können.

Zur Beheizung werden wie in der Abbildung dargestellt interne oder externe Wärmetauscher verwendet, die in der Regel mit Dampf oder Heißwasser versorgt werden. In den meisten Bestandsanlagen sind Rohrbündelwärmetauscher zu finden. Grund hierfür ist die hohe Belastung von Schmutzstoffen und festen Bestandteilen in der Lauge. Neuere Anlagen können auch mit Plattenwärmetauschern ausgerüstet sein. Ein solches System bietet beispielsweise die Firma Krones mit dem Heizsystem VarioTherm an. Dies ist eine externe Plattenwärmetauscherstation, die die Einbindung alternativer Heizmedien wie Solarwärme erleichtern soll. Um mit der Feststoffbelastung umgehen zu können, wird ein größerer Plattenabstand als bei üblichen Apparaten gewählt (Krones, 2009a). Der Wärmetauscher muss neben der Betriebs- auch die Aufheizleistung sicherstellen können. Beim Aufheizen der Maschine liegt die größte thermische Last an, da das Laugenbad aufgeheizt wird und über den Umlauf des leeren Flaschenbandes, die Überläufe der Becken und über rekuperative Wärmetauscher die anderen Zonen erwärmt werden. Um den Energieverbrauch beim Aufheizen in Grenzen zu halten, kann die Lauge während des Anlagenstillstands in isolierten Tanks aufbewahrt werden. Dabei findet gleichzeitig eine Sedimentation der Lauge statt, bei der sich die Schwebstoffe absetzen.

Die Einbindung von Solarwärme muss bei Flaschenwaschmaschinen in der Laugezone erfolgen, da hier der Anlage die thermische Energie zugeführt wird. Konzepte zur solarthermischen Integration hängen von der Art und Einbringung des dampfbeheizten Wärmetauschers ab. Externe Wärmetauscher bieten die Möglichkeit mit verhältnismäßig geringem Aufwand einen zusätzlichen Wärmetauscher vorzuschalten. Typischerweise erfolgt die Beheizung der Laugenzone allerdings durch interne Rohrbündel.

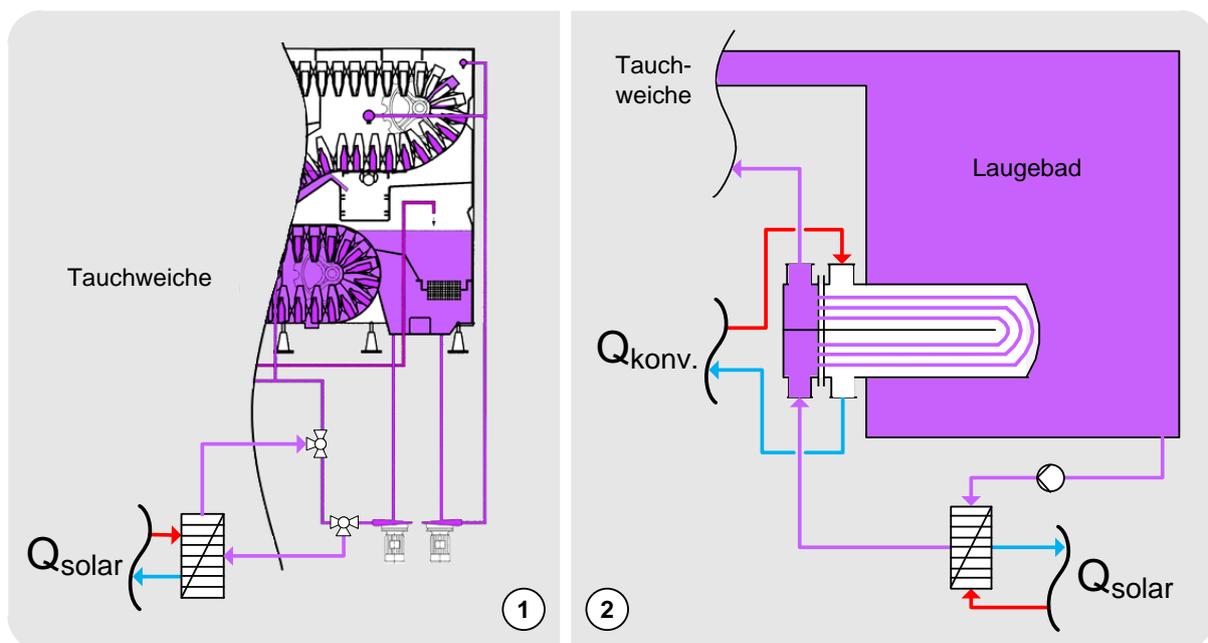


Abbildung 6-16: Zwei Varianten zur Einbindung von Solarwärme bei Flaschenwaschmaschinen

Abbildung 6-16 zeigt zwei Möglichkeiten zur Einbindung von Solarwärme bei innenliegenden Wärmetauschern. Variante 1 (links) stellt eine Anlage dar, bei der das Laugebad durch ein internes Rohrbündel beheizt wird. Von diesem Bad aus wird die Lauge mittels Umwälzpumpen zu verschiedenen Bereichen der Maschine geführt (Flascheneintritt in Hauptlaugebad, Laugespritzung, etc.). Die Lauge fließt durch das Bad zum Wärmetauscher zurück. Da beim Eintauchen der kühleren Flaschen in das Hauptlaugebad der größte Wärmebedarf besteht, wird das Laugebad mit dem Rohrbündel um etwa 3..4 Kelvin zur eigentlichen Betriebstemperatur von 80 °C überhitzt, sodass dem Eintauchbereich Lauge mit erhöhter Temperatur zugeführt werden kann. Dementsprechend erfolgt allerdings auch die nachfolgende Spritzung mit erhöhter Temperatur. An dieser Stelle wirkt sich die Überhitzung jedoch kontraproduktiv aus, da sich die erhöhte Temperatur in die zu kühlenden Zonen überträgt und dadurch mehr Abwärme der Gesamtanlage abgeführt werden muss. Durch die dargestellte solare Erwärmung des Zonenumlaufs (Variante 1) kann die Badtemperatur auf 80 °C herabgesetzt werden, sodass die Wärmeverluste des Bads und der Spritzung verringert werden. Badtemperatur und Umlauftemperatur hätten damit verschiedene Sollwerte. Erst wenn der Solar-Wärmetauscher nicht mehr genügend Wärme bereitstellen kann, muss die Solltemperatur des Bads und somit die Dampfleistung erhöht werden. Wenn der Solarkreis gänzlich außer Betrieb ist, kann die Flaschenwaschmaschine wie gewohnt betrieben werden. Die Lauge Temperatur im Bad entspricht dann wieder der Umlauftemperatur. Die Wärmezufuhr in der Aufheizphase kann ebenfalls durch den Zonenumlauf erfolgen.

Eine weitere Art der Integration von Solarwärme ergibt sich mit anderen Rohrbündelbauarten, wie Variante zwei in Abbildung 6-16 zeigt. Bei dieser Bauform des Rohrbündels wird die Lauge aus dem Bad abgezogen und durch die Rohre des Bündels geführt, wobei diese von außen mit Dampf beaufschlagt werden. Der Dampfraum ist wiederum von einer Hülle umgeben, die in das Laugebad ragt. Das Rohrbündel beheizt also einerseits das Laugebad über den Mantel und andererseits die Lauge, welche durch das Bündel gepumpt wird. Anlagen, deren Beheizung dieser Variante entspricht, haben bei der Einbindung im Gegensatz zu Variante 1 den Vorteil, dass die solare Energiezufuhr vor der eigentlichen Beheizung, also seriell, stattfindet. Bei einer Teillastabdeckung durch die Dampfbeheizung kann die Wärme des Solar-Wärmetauschers auf einem etwas geringeren Temperaturniveau zugeführt werden, sodass ein etwas höherer Ertrag erzielt werden kann. Auch bei dieser Variante erfolgt die solare Beheizung über den Umlauf der Lauge und nicht im eigentlichen Behälter. Die Aufheizphase kann analog zu Variante 1 durchgeführt werden.

Grundsätzlich bieten sich bei Flaschenwaschmaschinen Möglichkeiten der Einbindung von Solarwärme. Dennoch sind bei der Umsetzung durch die kompakte Bauweise der Anlagen Schwierigkeiten zu erwarten. Externe Beheizungssysteme bieten demnach das höchste Potential zur Integration. Allerdings findet diese Art weniger Verwendung. Da Neuanlagen allerdings von den herstellenden Unternehmen brauereispezifisch geplant und gefertigt werden, lassen sich bei entsprechender Planung individuelle Wünsche hinsichtlich der Beheizung relativ einfach umsetzen.

### 6.6.2. Kastenreinigung

Nach Entnahme der Flaschen werden die Bierkisten auf Defekte überprüft, gewendet, von Fremdkörpern befreit und gelangen in den Kastenwäscher. Dort werden sie durch Hochdruck-spritzdüsen mit Reinigungsmedien wie Lauge und Warmwasser besprüht (vgl. Abbildung 6-17). Der genaue Reinigungsablauf kann sich anlagenspezifisch unterscheiden. Danach werden alle Seiten mit Kaltwasser abgesprüht. Zum Schluss tropfen die Kästen ab und stehen anschließend der Füllereinrichtung zur Verfügung. Unterhalb der Kastenstrecke fangen Behälter die Reinigungsflüssigkeiten auf. Die Warmwasser- oder Laugebäder werden auf ca. 60 °C temperiert. Die Wärmezufuhr kann variabel ausgeführt werden. Es unterscheiden sich Anlagen mit separater Dampfversorgung von Kastenwäschern, die durch die Wärmerückgewinnung an der Flaschenwaschmaschine versorgt werden. Dies erfolgt entweder über einen Wärmetauscher, der das Reinigungsmedium des Kastenwäschers durch ein Medium der Kühlzonen aufheizt oder durch direkte Übergabe der Flüssigkeit in den Kastenwäscher. Die thermische Versorgung durch die Flaschenwaschmaschine ist aufgrund der parallelen Betriebszeit und der überschüssigen Niedertemperaturwärme eine empfehlenswerte Lösung, bei der eine solarthermische Integration unzweckmäßig ist (Kunze, 2007).

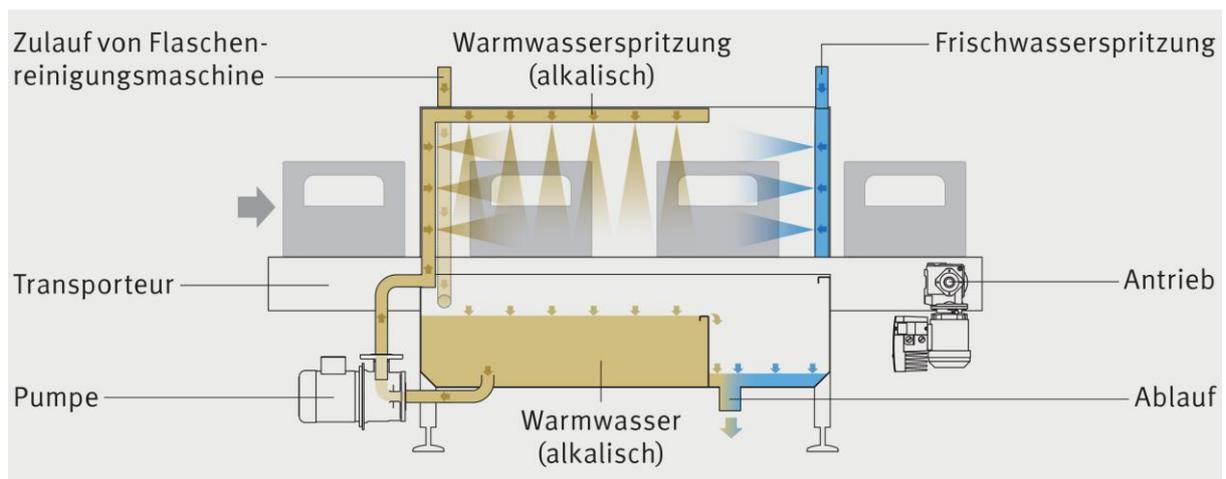


Abbildung 6-17: Funktionsweise eines Kastenwäschers (PAC, 2012)

Dennoch existieren Anlagen, die separat beheizt werden. In den meisten Fällen sind in den Bädern dampfbetriebene Heizschlangen implementiert. Damit erweist sich die solarthermische Einbindung bei Bestandsanlagen als schwierig, da mit internen Heizschlangen ein erheblicher Aufwand zur technischen Umsetzung einhergeht. Für einen zusätzlichen internen Wärmetauscher ist in der Regel kein Platz zu finden. Der externe Anschluss an den Behälter gestaltet sich als problematisch, da keine zusätzlichen Anschlüsse vorgesehen sind. Es besteht die Möglichkeit den Wärmetauscher in den Zulauf zur Spritzung einzubinden. Die solare Wärmezufuhr erfolgt in diesem Fall erst nach dem dampfbetriebenen Heizbad, sodass regelungstechnisch zusätzliche Schwierigkeiten auftreten. Für Neuanlagen bieten Hersteller kundenspezifische Lösungen und Konstruktionen an. Dabei könnten die Bäder entweder mit einem zusätzlichen internen Wärmetauscher oder durch entsprechende Anschlüsse extern solar versorgt werden. Auch die Aufheizphase des Bads könnte somit solar erfolgen.

### 6.6.3. Fass- und Keg-Reinigung

Fässer in denen Bier abgefüllt wird können aus Holz, Aluminium oder Edelstahl bestehen und variieren in der Größe von 10 bis 150 l. Die meisten Brauereien verwenden heute sogenannte Kegs. Dies sind zylindrische Metallfässer aus Aluminium oder Chromnickelstahl mit einem hermetisch abgeschlossenen Innenteil. Kegs werden über einen Fitting gereinigt, gefüllt und entleert. Das Fitting steht mit einem Steigrohr in Verbindung, das bis zum Kegboden reicht und damit die Befüllung und Entleerung ermöglicht. Das Keg steht immer unter Druck, wodurch Undichtigkeiten schnell detektiert werden können. Kegs werden am häufigsten in den Größen 30 und 50 l verwendet (Narziß, 2005).

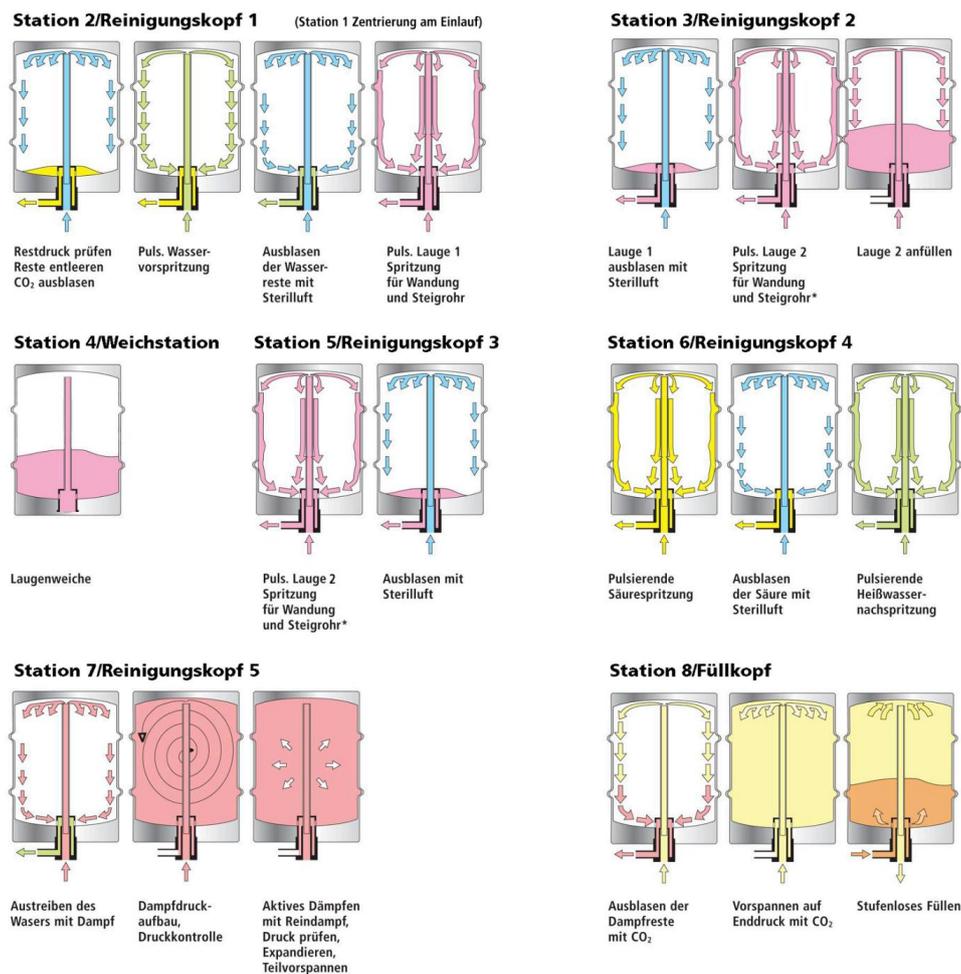


Abbildung 6-18: Ablauf der automatisierten Kegreinigung (KHS, 2009)

Die Reinigung und Befüllung der Kegs verläuft in der Regel automatisiert. Dabei erfolgt in der ersten Station die Außenreinigung mittels Bürsten und Sprühen. Dabei werden die Kegs von rotierenden Düsen mit einem Druck von 5..20 bar mehrmals abgespritzt. Dazu wird kaltes oder warmes Wasser verwendet. Anschließend werden die Kegs durch rotierende Bürsten gereinigt. Vor der Innenreinigung (vgl. Abbildung 6-18) wird das Keg gedreht. Alle Reinigungsvorgänge erfolgen nun von unten über das Steigrohr, der Ablauf von Wasser und Reinigungsmittel erfolgt über das Kohlendioxidventil. Die Innenreinigung weist bis zu sieben Behandlungsstufen auf: Zu Beginn erfolgt die Druckprüfung und Restentleerung.

Anschließend folgen mehrere Laugenspritzungen und eine Laugenweiche. Das Ausblasen der Lauge erfolgt mit Sterilluft. Im weiteren Verlauf der Reinigung erfolgen Spritzungen mit Säure und Heißwasser sowie das Dämpfen mit Reindampf. Nach der Vorspannung mit  $\text{CO}_2$  wird das Keg befüllt. Durchschnittlich werden zur Reinigung eines 50 l Kegs 14 l Heißwasser, 7 l Kaltwasser, 0,4 kg Dampf und 0,22 kg  $\text{CO}_2$  benötigt (Narziß, 2005).

Zur Fassreinigung können unterschiedliche Reinigungsmedien optional verwendet werden. Die Auswahl hängt von dem ursprünglichen Fassinhalt ab. In der Regel werden immer Säure, Lauge, Warmwasser und Sterildampf verwendet. Nach der inneren Warmwasserspülung wird das benutzte Wasser nochmals als Vorspülwasser für die Innereinigung verwendet. Das hieraus resultierende Abwasser nennt sich Mischwasser und wird zur Außenreinigung verwendet. Zuvor erfolgt die Zwischenspeicherung in einem Behälter. Die Differenz zwischen Bedarf und Anfall des Mischwassers wird mit Kaltwasser abgedeckt. Der Mischwasserbehälter wird typischerweise von einer dampfbeheizten Heizschlange auf circa  $80\text{ }^\circ\text{C}$  gehalten. Der genaue Wert hängt vom äußeren Verschmutzungsgrad der Fässer ab. Fässer, an denen zum Beispiel Etiketten angebracht wurden, müssen aufgrund des anhaftenden Klebers mit höherer Temperatur behandelt werden. Die Temperaturen des einlaufenden Mischwassers schwanken in Abhängigkeit der Fassetemperaturen um die  $60\text{ }^\circ\text{C}$ . Jahreszeitlich bedingt kühlen die zu reinigenden Fässer das Vorspülwasser mehr oder weniger stark ab. Über eine Pumpe gelangt das Mischwasser aus dem Versorgungstank zur Reinigungsstufe, wo es anschließend aufbereitet oder verworfen wird. Lauge und Säure der Innenreinigung werden ebenfalls in Versorgungstanks gelagert und über eine Heizschlange beheizt. Die Temperatur der Lauge liegt bei circa  $85\text{ }^\circ\text{C}$ , die der Säure bei  $70\text{ }^\circ\text{C}$ . Zur Reinigung werden die Flüssigkeiten über Pumpen der Keg-Anlage zugeführt. Nach dem Reinigungsschritt werden sie mit Sterildampf zurück in den Behälter gedrückt und bei Bedarf nachdosiert (Malek, 2012).

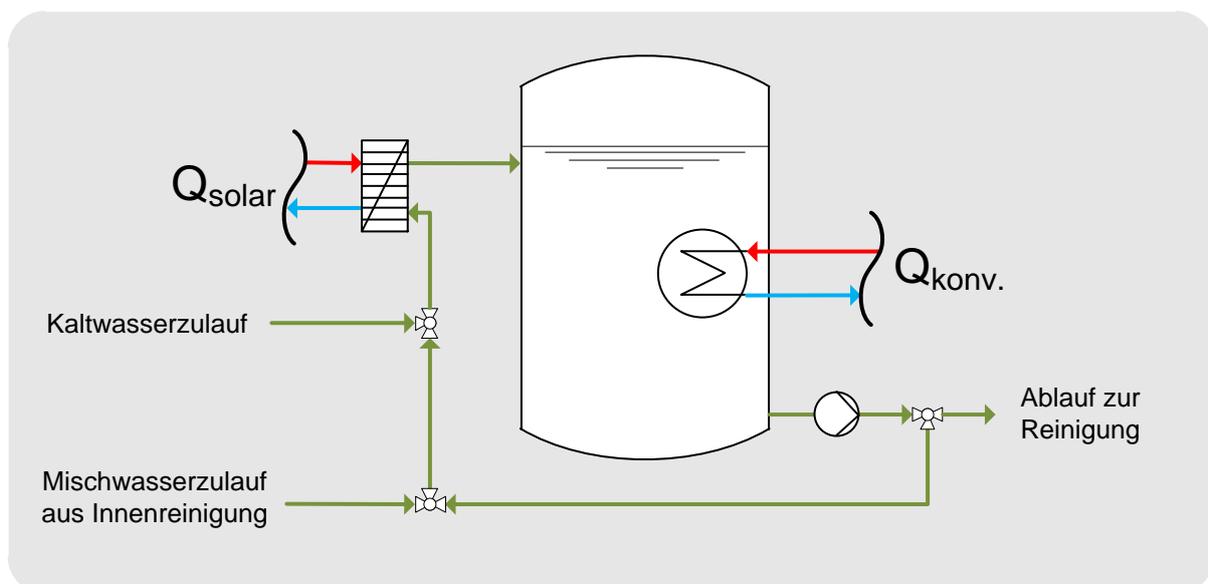


Abbildung 6-19: Solare Einbindung zur Unterstützung der äußeren Kegreinigung

Unabhängig vom genauen Reinigungsprogramm und den verwendeten Flüssigkeiten erfolgt bei der Fassreinigung die Behälterbeheizung meist über eine interne Heizschlange, die wenig

Platz für zusätzliche Einbauten lässt. Eine solare Einbindung muss daher extern erfolgen und wird im Folgenden am Beispiel des Mischwasserbehälters erläutert. Die in Abbildung 6-19 dargestellte Variante ermöglicht die direkte solare Aufheizung des einlaufenden Misch- und Kaltwassers. Die Temperaturen sind an dieser Stelle am niedrigsten, sodass die höchsten solaren Erträge erzielt werden können. Alternativ kann der Solar-Wärmetauscher in den Kaltwasserzulauf installiert werden, sodass nur dieser solar vorgewärmt werden kann. Dies macht allerdings nur Sinn, wenn signifikante Mengen Kaltwasser in das System eingebracht werden.

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 Solar-Wärmetauscher gefahren werden kann. Darauf kann verzichtet werden, wenn die Reinigungsanlage dauerhaft betrieben wird. Die gezeigten Möglichkeiten lassen sich an die vorhandenen Rohrleitungen von Bestandsanlagen anschließen, sodass keine Installationsarbeiten direkt am Behälter stattfinden müssen. Auch Neuanlagen können nach diesem Prinzip mit Solarwärme versorgt werden. Ähnlich zu diesem Integrationsschema lassen sich die Gefäße der Innenreinigung solarthermisch anbinden. Da hier kein nennenswerter Zulauf erfolgt, ist auf das Drei-Wege-Ventil des Kaltwasserzulaufs zu verzichten. Anstelle des Mischwasserzulaufs tritt der Rücklauf der Reinigungsstufe. Mit dieser Anlagenvariante können die aus der Reinigung kommenden Flüssigkeiten direkt solar aufgeheizt werden. Zudem kann nach Anlagenstillstand die Aufheizphase über den Solarwärmetauscher erfolgen. In allen Fällen dient die interne Heizschlange als Backup.

## 6.7. CIP-Reinigung

Die Cleaning-in-Place-Methode (kurz: CIP) ist ein Verfahren zur Reinigung verfahrenstechnischer Anlagen. Die Besonderheit besteht darin, dass auf eine Demontage einzelner Bauteile verzichtet werden kann. Um auf eine manuelle Reinigung verzichten zu können, müssen die entsprechenden Anlagenteile CIP-fähig sein. Das heißt, dass die zu reinigenden Anlagen über festinstallierte Zuleitungen und Vorrichtungen der CIP verfügen müssen. Leitungen und Bauteile, die nicht in den Kreislauf eingebunden sind, müssen ausgebaut und in Desinfektionsbädern manuell gereinigt werden. Abbildung 6-20 zeigt die Bestandteile einer CIP-Anlage. Dies sind im Einzelnen mehrere Stapelbehälter für Frischwasser, Desinfektionslösung oder Heißwasser, Säure, Lauge und Stapelwasser sowie Umwälz- und Dosierpumpen, ein oder mehrere Wärmetauscher und Peripherie. Aus den Stapelbehältern werden unterschiedliche Ströme mit definierten Temperaturen, Konzentrationen und Mengen durch das angeschlossene System gepumpt. Die Festlegung der genauen Mengen sowie dem Ablauf des Spülprogramms basiert auf Vorschriften und betrieblichen Erfahrungen. Zwischen den einzelnen Spülschritten mit Lauge, Säure oder Desinfektionsmittel wird in der Regel mit Wasser nachgespült. Die Reinigungsflüssigkeiten können nach dem Einsatz entweder abgeleitet oder wiederverwendet werden. Diese Möglichkeiten werden als verlorene und Stapelreinigung bezeichnet. Bei der Wiederverwendung ist auf die Konzentration und den Verschmutzungsgrad zu achten. Bei gewissen Grenzwerten müssen die Reinigungsmittel erneuert oder gereinigt werden. Das Nachspülwasser kann beim nächsten Reinigungsgang als

Vorspülwasser wieder verwendet werden. Ein Teil der Behälter (z.B. Lauge, Säure, Heißwasser) kann beheizt werden, um die Reinigungswirkung zu erhöhen. Dies geschieht über einen externen Wärmetauscher, der mit Dampf oder Heißwasser gespeist wird. Die Flüssigkeitstemperaturen der beheizten Behälter werden in Abhängigkeit der Reinigungsaufgabe bei circa 80 °C gehalten. Alle beheizten Gefäße sollten wärmegedämmt sein (Kunze, 2007).

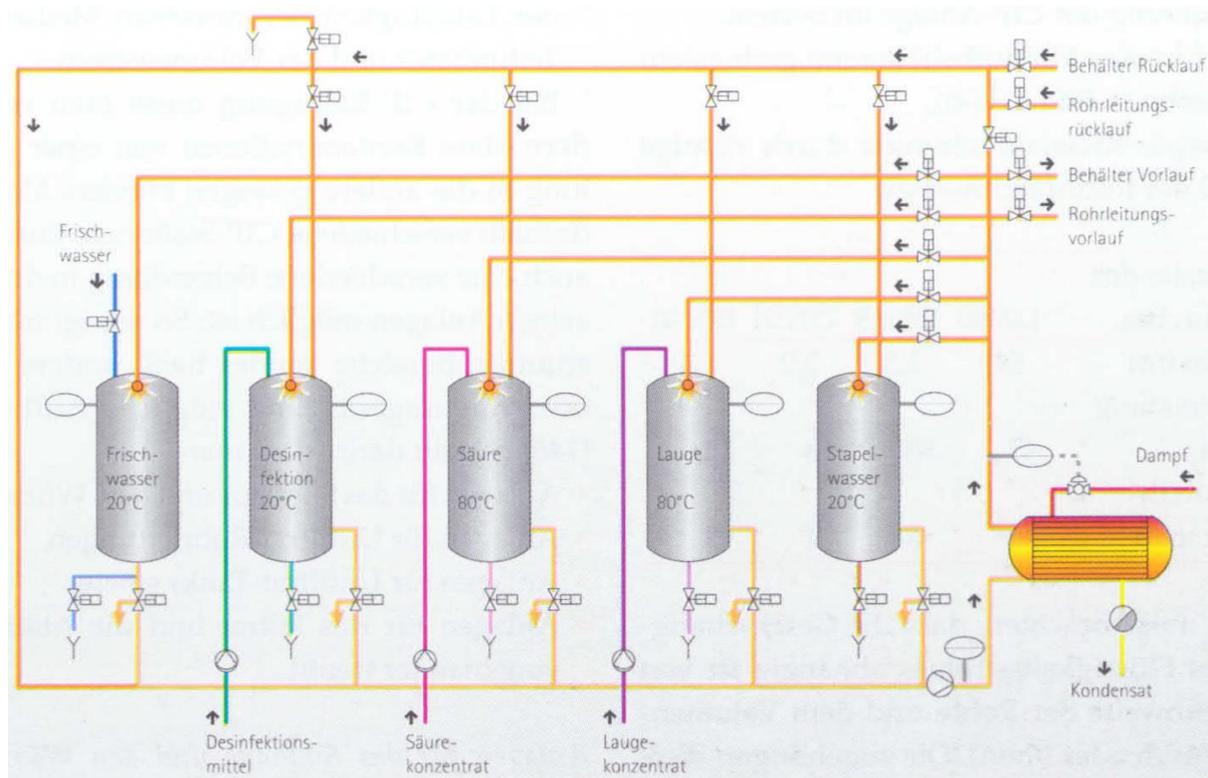


Abbildung 6-20: Beispiel einer CIP-Anlage (Kunze, 2007)

Die tatsächliche Systemkonfiguration einer CIP-Reinigungsanlage hängt von der zu bewerkstelligen Reinigungsaufgabe und dem verwendeten Reinigungsprinzip ab. Entsprechend werden die Behälter und Reinigungsmittel gewählt. Trotz der Unterschiede in der Komponentenzusammenstellung lässt sich eine Gemeinsamkeit bei der Beheizungsart erkennen. Die zu beheizenden Medien werden in der Regel über einen externen Wärmetauscher gepumpt und auf die gewünschte Temperatur erwärmt. Dieser kann als Platten- oder Rohrbündelwärmetauscher ausgeführt sein. Die Vorschaltung eines solar beheizten Plattenwärmetauschers (siehe Abbildung 6-21) ist im Allgemeinen ohne Probleme zu bewerkstelligen. Die Anschlüsse des bestehenden Wärmetauschers sind aufgrund der externen Lage zugänglich. Die Erwärmung der Reinigungsmedien auf ungefähr 80 °C erfolgt diskontinuierlich. Bei der Stapelreinigung werden die zwischengelagerten Medien vor dem Start des CIP-Programms durch die Umlaufpumpe im Kreis gepumpt und bis zur gewünschten Temperatur erwärmt. Gut gedämmte Behälter verringern daher den Wärmebedarf zur Aufheizung. Beim Prinzip der verlorenen Reinigung wird das Reinigungsmedium aus einem Ansatzbehälter über den Wärmetauscher direkt in den CIP-Kreislauf gefördert. Die meisten CIP-

Anlagen sind jedoch mit Stapelbehältern ausgestattet. Nach bestimmten Intervallen müssen auch bei der Stapelreinigung die Reinigungsflüssigkeiten erneuert werden.

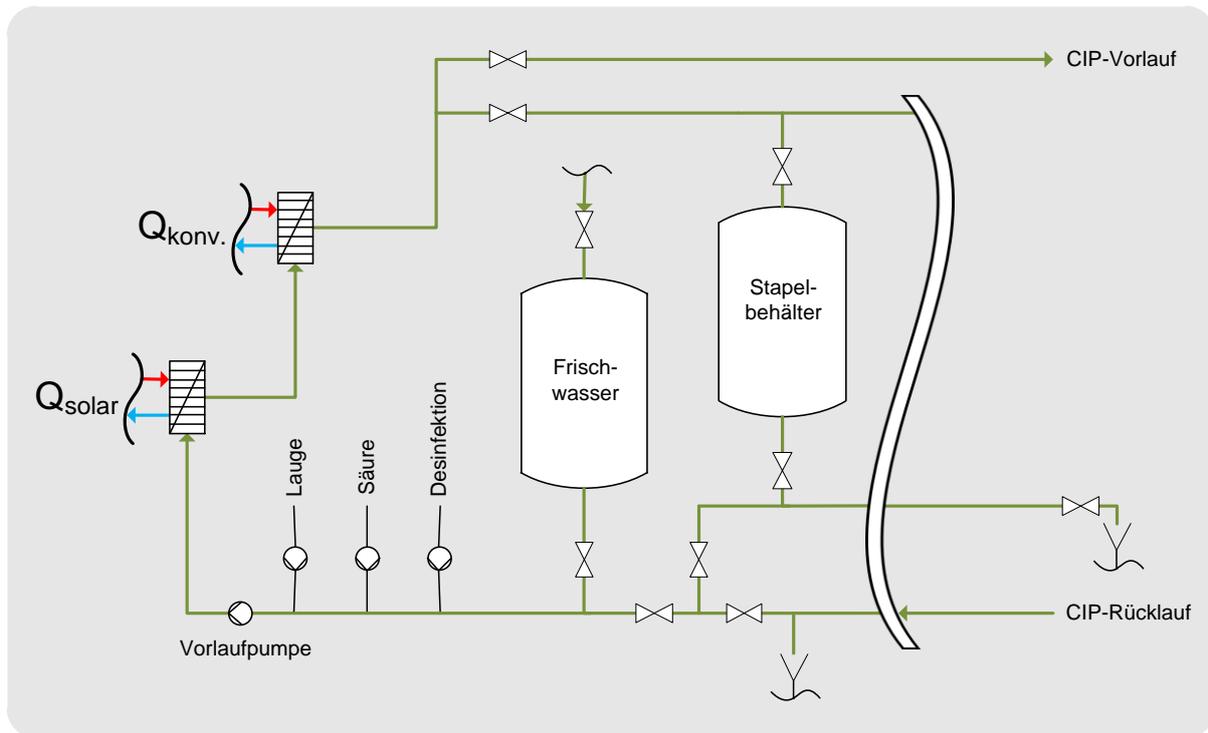


Abbildung 6-21: Solare CIP-Beheizung in Reihenschaltung

Die Intervalle zwischen den Aufheizphasen sind brauereispezifisch zu prüfen und hängen von den zu bedienenden Prozessen ab. Größere Zeiträume können dazu genutzt werden, die Speicherinhalte mit einem kleiner dimensionierten Wärmetauscher solar vorzuwärmen. Falls die Zieltemperatur dabei nicht erreicht wird, führt der dampfversorgte Wärmetauscher die restliche thermische Energie zu. Diese Regelstrategie kann auch zur Vorwärmung neu ange-setzter Reinigungsmittel dienen. Ist es jedoch erforderlich eine Aufheizzeit einzuhalten, so ist der solare Wärmetauscher für dieselbe Wärmeleistung wie die Dampfheizung auszulegen. Dieselbe Konfiguration gilt für die verlorene Reinigung, wenn keine Kapazitäten zur Vor-speicherung vorhanden sind.

Beim Vorhandensein von Speicherkapazitäten für die verschiedenen Reinigungsmittel lassen sich die diskontinuierlichen Verbräuche nutzen, um den solaren Ertrag zu erhöhen. Zudem lassen sich möglicherweise Kosten beim Wärmetauscher und bei einem Pufferspeicher auf Solarseite einsparen.

## 7. Checkliste zum Vorgehen

Nachdem in den vorangegangenen Kapiteln alle wesentlichen Informationen zum Brauwesen und der Nutzung thermischer Solarenergie für unterschiedliche Prozesse in Brauereien detailliert erläutert wurden, wird abschließend eine Checkliste vorgestellt, die das Vorgehen bei der Identifikation eines geeigneten Integrationspunktes erleichtern soll. Die Checkliste beinhaltet die einzelnen Schritte, welche durchlaufen werden mit wichtigen Hintergrundinformationen und relevanten Daten die dazu erhoben werden müssen. Zu Beginn soll die Effizienz der Brauerei anhand geeigneter Benchmarks eingeschätzt werden. Dies kann möglicherweise dazu führen, dass einzelne Produktionsbereiche der Brauerei genauer untersucht werden müssen, um die Gründe für größere Unstimmigkeiten erfassen zu können. Die Erfassung der Produktionszeiten dient dazu ein Lastprofil von Prozessen zu erstellen, welche aufgrund ihres Temperaturniveaus oder Wärmebedarfs besonders interessant erscheinen. Falls zum Beispiel aufgrund der klimatischen Bedingungen die Integration einer Solaranlage auf Versorgungsebene angestrebt wird, muss die Wärmebereitstellung und -verteilung intensiver analysiert werden. Die Prüfung vorhandener Installationen zur Wärmerückgewinnung und ungenutzter Potentiale ist vor allem hinsichtlich der Einbindung einer Solaranlage zur Bereitstellung von Warmwasser relevant. Abschließend müssen geeignete Dach- und/oder Freifläche erhoben werden. Bei Dachflächen ist vor allem auf die statische Belastbarkeit zu achten. Wenn die genannten Schritte nacheinander durchlaufen und die relevanten Informationen erhoben werden, kann unter Berücksichtigung der vorgestellten Kriterien ein geeigneter Punkt zur Einbindung einer Solaranlage ausgewählt werden.

### 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

## 8. Anhang

### 8.1. Glossar

Abläutern	Erster Prozessschritt beim Läutern, wobei die Würze durch den abgesetzten Treber abfließt
Anschwänzen	Zweiter Prozessschritt beim Läutern, wobei der verbleibende Treber mit heißem Wasser ausgewaschen wird
Anstellen	1. Prozessschritt im Gär- und Lagerkeller, bei dem die Würze nach der Kühlung mit Sterilluft und Hefe versetzt wird und den ZKT zur Gärung zugeführt wird
Ausschlagen	Bezeichnet den Prozessschritt nach dem Kochen, bei dem im Whirlpool der Heißtrub entfernt wird
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.
Glattwasser	Niedrigprozentige Würze die am Ende des Läuterns gewonnen wird
Heißtrub	Hopfen- und Eiweißrückstände nach dem Kochen
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. Kann den Energiespeicher laden oder Kaltwasser aufheizen.
Rohwasser	Unbehandeltes Wasser, welches vor der Nutzung als Kesselspeisewasser oder Brauwasser behandelt werden muss.
Spelzen	Hülse des Getreidekorns
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	Mengenangabe, auf die typischerweise spezifische Angaben wie der Energieverbrauch bezogen werden
Vorderwürze	Bezeichnung der beim Läutern gewonnenen
Würze	Vorstufe des Bieres, Endprodukt nach dem Sudhaus
ZKT	Zylindrokonische Tanks, verwendet zur Gärung und Lagerung des Bieres
Zusatzwasser	Aufbereitetes Rohwasser, welches nach der Entgasung dem Kessel zugeführt wird. Gleicht Kondensatverluste des Dampfkreislaufs aus.

## 8.2. Literaturverzeichnis

- Aidonis, A., Drosou, V., Mueller, T., Staudacher, L., Fernandez-Llebraz, F., Oikonomou, A., Spencer, S., 2002.** *PROCESOL II - Solar thermal plants in industrial processes: Design and Maintenance Guidelines*. Center for Renewable Energy Sources, Pikermi, Greece.
- API Schmidt-Bretten GmbH & Co. KG, 2004.** *SIGMATEC Entalkohlisierungsanlagen*, Bretten.
- Atlas Copco Kompressoren und Drucklufttechnik GmbH, 2009.** *Handbuch der Drucklufttechnik*.
- Back, W., 2005.** *Ausgewählte Kapitel der Brauereitechnologie*, Hans Carl, Nürnberg. 341800802x.
- Bamforth, C.W., 2006.** *Brewing. New technologies*, Woodhead Pub., Cambridge. 978-1-84569-003-8.
- Berkhout, B., Boersma, N., Kruis, G., Poel, P., de Wit, W., 2009.** *The Contribution made by Beer to the European Economy*, Amsterdam.
- Blümelhuber, G., 2008.** Environment and Energy in German Breweries. *Master Brewers Association of the Americas, Global Emerging Issues*. www.mbaa.com: Doemens Brewing and Malting Academy.
- Bundesverband Kraft-Wärme-Kopplung e.V. (BKWK), 2010.** *Leitfaden zur Kostensenkung mit Kraft-Wärme-Kopplung in Brauereien*, Berlin.
- Centec Gesellschaft für Labor- und Prozessmesstechnik mbH, 2012.** *FPS Kurzzeiterhitzungsanlage*, Frankfurt-Maintal.
- Corosys Prozeßsysteme und Sensoren GmbH, 2011.** *Wasserentgasung für Brauereien*.
- Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena), 2010.** *Druckluftsysteme für Industrie und Gewerbe*, Berlin.
- Energieagentur NRW, 2010a.** *Drucklufttechnik - Potenziale zur Energieeinsparung*, Berlin.
- Energieagentur NRW, 2010b.** *Kälteerzeugung - Potentiale zur Energieeinsparung*, Düsseldorf.
- Energieverwertungsagentur (EVA), 2001.** *Energybenchmarking at the Company Level- Company Report Brewery*. Energieverwertungsagentur, Österreich.
- Ernst, H., 2009.** *Damperzeugungssysteme für Industrie und Gewerbe*. Anlagen und Komponenten, Prozesstechnik, Wärmebilanz, Vulkan-Verl., Essen, Ruhr. 9783802725531.
- Esmarch, B., 1999.** *Heisse Röhre - Verfahrenstechnische Auslegung von Tunnelpasteuren*. BrauIndustrie 9, S. 519–523.
- European IPPC Bureau (EIPPCB), 2006.** *Reference Document on Best Available Techniques (BREF) in the Food, Drink and Milk Industries*. European Commission, Joint Research Centre, Institute for Prospective Technological Studies, Sevilla.
- GEA Wiegand GmbH, 2010.** *Anlagen für die Brauindustrie*, Ettlingen.

- GEA Brewery Systems GmbH**, 2009. *Prozesstechnik: Kältetechnik und CO<sub>2</sub>-Rückgewinnung*, Kitzingen.
- GM Gera**, 2011. *Technische Dokumentation Arcade GEK 2.1*, Gera.
- Hackensellner, T., Bühler, T.**, 2008. *Effizienter Energieeinsatz im Sudhaus*, Kitzingen.
- Hahn, P., Schock, D., Gertler, M.**, 2009. *25. Statistischer Bericht 2008*, Berlin.
- Hasenbeck, J.**, 2012. *Gespräch zu Tunnelpasteuren*. NIKO Nahrungsmittel-Maschinen GmbH & Co. KG.
- Hesselbach, J.**, 2012. *Energie- und klimaeffiziente Produktionsprozesse. Grundlagen, Leitlinien und Praxisbeispiele*, Vieweg + Teubner, Wiesbaden. 978-3-8348-0448-8.
- Heyse, K.-U.**, 2000. *Praxishandbuch der Brauerei*, Behr, Hamburg. 3-86022-998-2.
- Hietz, F.**, 2012. *Gespräch zu Kurzzeiterhitzungsanlagen*. Fischer AG Maschinen und Apparatebau.
- Hofbauer, A.**, 2005. *Vom Einmaischen bis zum Ausschlagen*. BrauIndustrie 8, S. 14–18.
- Kelch, K.**, 2010a. *Gravierende Veränderungen der betriebenen Braustätten von 1987 bis 2009*. Brauwelt 15-16, S. 446-447.
- Kelch, K.**, 2010b. *Veränderungen im deutschen Brauereiwesen*. Brauwelt 4, S. 83-84.
- KHS AG**, 2009. *INNOKEG TILL TRANSOMAT 5/1*, Kriftel.
- Kompetenzforum Getränkebehälter (bevcomp)**, 2005. *Praxis-Handbuch für die Reinigung von Mehrwegflaschen aus Glas oder PET*. 2, VLB Berlin.
- Koukal, R.**, 2012. *Gespräch zur Thermischen Entgasung*. Centec Gesellschaft für Labor- und Prozessmesstechnik mbH.
- KRONES AG**, 2005. *KRONES Utilities - Versorgung des Getränkebetriebs*, Freising.
- KRONES AG**, 2009a. *KRONES Lavatec D4/D5 - Die Doppelend-Reinigungsmaschine*, Neutraubing.
- KRONES AG**, 2009b. *Sander Hansen Shield - Der Tunnelpasteur*, Neutraubing.
- KRONES AG**, 2011. *Steinecker EquiTherm*, Neutraubing.
- Kunze, W.**, 2007. *Technologie Brauer & Mälzer*. 9., VLB Berlin, Berlin. 978-3-921690-56-7.
- Lenz, A., Burlein, R.**, 2000. *Dynamische Niederdruckkochung - Ein energetisch optimiertes Würzekochverfahren*. Huppmann Post 20, S. 26–30.
- Malek, H.**, 2012. *Gespräch zum Thema Keg-Reinigung*. Malek Brautech GmbH.
- MEURA S.A.**, 2009. *AFLOSJET - Mash heating by live steam injection*.
- Meyer, J.**, 2000. *Rationelle Energienutzung in der Ernährungsindustrie*. Leitfaden für die betriebliche Praxis ; Landesinitiative Zukunftsenergien NRW, Vieweg, Braunschweig ;, Wiesbaden. 978-3528031732.
- Narziß, L.**, 2005. *Abriß der Bierbrauerei*. 7., Wiley VCH, Weinheim. 3-527-31035-5.
- Narziß, L., Back, W., Burberg, F.**, 2009. *Die Bierbrauerei: Die Technologie der Würzebereitung*. 8, Wiley-VCH, Weinheim. 9783527325337.
- PAC Global GmbH**, 2012. *Vollautomatischer Kastenwascher PAC KW 750*, Zürich.
- Petersen, H.**, 1993. *Brauereianlagen*. Planung, Energieversorgung, Energiewirtschaft, Betriebstechnik, Kontrolle, Kennzahlen, Hans Carl, Nürnberg. 3-418-00739-2.

- Robert Schiessl GmbH**, 2010. *Wärmerückgewinnung*, Oberhaching.
- Sattler, G., Schibel, T.**, 2011. *Planungshandbuch Dampfkessel*. Viessmann Werke, Allendorf (Eder).
- Sattler, P.**, 2000. *Branchenkonzept-Energiekennzahlen und -sarpotentiale für Brauereien*. Gmunden, Österreich.
- Scheller, L.**, 2011. *Nachhaltigkeit gefordert - Konzepte zur Minderung des Energieverbrauchs*. BrauIndustrie 3, S. 27–29.
- Schmitt, B., Lauterbach, C., Vajen, K.**, 2011. *Investigation of selected solar process heat applications regarding their technical requirements for system integration*. Proceedings ISES Solar World Congress Kassel.
- Schu, G. F., Stolz, F., Jordan, U. & Kansy, R.**, 2001. *Betriebsvergleich Energie 1998*. Brauwelt 4, S. 116-120.
- Statistisches Bundesamt Deutschland (DeStatis)**, 2010. *Erhebung über die Energieverwendung der Wirtschaftszweige B und C der Bundesrepublik Deutschland für den Berichtszeitraum 2009*, Wiesbaden.
- The Brewers of Europe (BoE)**, 2010. *Beer statistics 2010 edition*, Brüssel.
- Thiemann, D., Bohm, B.**, 2009. *Aktueller denn je - Analyse und Optimierung der Produktions- und Energieeffizienz in mittelständischen Brauereien*. BrauIndustrie 3, S. 10–13.
- Tuffner, M.**, 2008. *Ökonomische Konzepte. Dampf- und Wärmeerzeugung in Brauereien*.
- Walter, S.**, 2005. *Untersuchung verfahrenstechnischer Möglichkeiten zur Brauchwasserkreislaufführung in der Brauerei*. Dissertation.
- Wasmuth, K.**, 2005. *Maischzeit unter zwei Stunden*. Brauwelt 33, S. 970–971.
- ZIEMANN Ludwigsburg GmbH**, 2008. *ZIEMANN-Energiesparsysteme*, Ludwigsburg.

### 8.3. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1: Braustätten und Ausstoßmenge in Deutschland nach Betriebsgröße nach .....	3
Abbildung 2-2: Braustätten über 5.000 hl Deutschland nach Bundesländern.....	4
Abbildung 2-3: Globalisierung auf dem deutschen Biermarkt.....	5
Abbildung 3-1: Produktionsabschnitte in Brauereien .....	6
Abbildung 3-2: Produktionsablauf im Sudhaus .....	7
Abbildung 3-3: Produktionsablauf im Gär- und Lagerkeller .....	9
Abbildung 3-4: Produktionsablauf in der Abfüllhalle.....	10
Abbildung 3-5: Hauptbestandteile eines Kesselhauses. Darstellung nach .....	12
Abbildung 3-6: Zentrale Kälteanlage mit drei Kreisläufen.....	13
Abbildung 3-7: Hauptkomponenten eines Druckluftsystems.....	14
Abbildung 3-8: Anteil der im Brauwesen verwendeten Energieträger .....	16
Abbildung 3-9: Input Output großer deutscher Brauereien pro Hektoliter Verkaufsbier .....	17
Abbildung 3-10: Anteil am Wärmeverbrauch nach .....	19
Abbildung 4-1: Bereitstellung von Warmwasser mittels PfaDuKo .....	22
Abbildung 4-2: Wärmerückgewinnungskonzept mit Energiespeicher.....	23
Abbildung 4-3: Thermische Brüdenverdichtung mit Energiespeicher.....	24
Abbildung 4-4: Schema der ein- und zweistufigen Würzekühlung .....	24
Abbildung 4-5: Zweifach gespeister Energiespeicher im Sudhaus .....	25
Abbildung 5-1: Produktionsabschnitte mit Prozessen und jeweiligem Temperaturniveau.....	29
Abbildung 5-2: Unterscheidung zwischen Prozess- und Versorgungsebene .....	30
Abbildung 6-1: Heißwasserentgasungsanlage HWD .....	35
Abbildung 6-2: Konzept zur solaren Einbindung bei der Wasserentgasung.....	36
Abbildung 6-3: Konzepte zur solaren Brauwassererwärmung.....	38
Abbildung 6-4: Beheizung mit Halbrohren und Dampfinjektion.....	39
Abbildung 6-5: Zusatzheizfläche im Maischgefäß und Maischgefäß „ShakesBeer“ .....	40
Abbildung 6-6: Solare Rücklaufanhebung zur Beheizung der Maischepfanne.....	41
Abbildung 6-7: Zweistufiger Fallstromverdampfer .....	42
Abbildung 6-8: Rektifikationskolonne .....	43
Abbildung 6-9: Konzept zur solaren Einbindung bei der Entalkoholisierung .....	44
Abbildung 6-10: Fließschema der Kurzzeiterhitzung .....	46
Abbildung 6-11: Solare Einbindung bei der KZE mit externer Heizstufe .....	47
Abbildung 6-12: Solare Einbindung bei der KZE mit Mehrzonenwärmetauscher .....	47
Abbildung 6-13: Zweistöckiger Tunnelpasteur mit entsprechendem Temperaturverlauf.....	48
Abbildung 6-14: Solare Einbindung beim Tunnelpasteur.....	49
Abbildung 6-15: Aufbau einer Flaschenwaschmaschine .....	51
Abbildung 6-16: Zwei Varianten zur Einbindung von Solarwärme bei Flaschenwaschmaschinen.....	52
Abbildung 6-17: Funktionsweise eines Kastenwäschers .....	54
Abbildung 6-18: Ablauf der automatisierten Kegreinigung.....	55
Abbildung 6-19: Solare Einbindung zur Unterstützung der äußeren Kegreinigung .....	56
Abbildung 6-20: Beispiel einer CIP-Anlage .....	58
Abbildung 6-21: Solare CIP-Beheizung in Reihenschaltung .....	59

## **8.4. Tabellenverzeichnis**

Tabelle 3-1: Spezifische Wärmeverbrauchswerte von Brauereien.....	17
Tabelle 3-2: Prozentualer Anteil einzelner Verbrauchergruppen am Gesamtwärmebedarf.....	19
Tabelle 3-3: Spez. Kennzahlen ausgewählter Produktionsabschnitte .....	20
Tabelle 5-1: Geeignete Prozesse zur Einbindung von Solarwärme in Brauereien.....	31