

Schriftenreihe der Reiner Lemoine-Stiftung

Bastian Schmitt

Integration thermischer Solaranlagen zur Bereitstellung von Prozesswärme in Industriebetrieben

D 34 (Diss. Univ. Kassel)

Shaker Verlag
Aachen 2014

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Zugl.: Kassel, Univ., Diss., 2014

Die vorliegende Arbeit wurde vom Fachbereich Maschinenbau der Universität Kassel als Dissertation zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktors der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.) angenommen. Die Forschungsarbeiten erfolgten am Fachgebiet Solar- und Anlagentechnik, Institut für Thermische Energietechnik.

Erster Gutachter:	Prof. Dr. Klaus Vajen, Universität Kassel
Zweite Gutachterin:	Dr. Barbara Sturm, Newcastle University
Dritter Gutachter:	Prof. Matthias Rommel, Hochschule für Technik Rapperswil

Weitere Mitglieder der Promotionskommission:
Prof. Dr. Jens Knissel, Universität Kassel
Prof. Dr. Anton Maas, Universität Kassel

Tag der mündlichen Prüfung: 28. Februar 2014

Copyright Shaker Verlag 2014

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-2730-3

ISSN 2193-7575

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen
Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9
Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Zusammenfassung

Der industrielle Sektor bietet mit seinem hohen und über das Jahr konstant anfallenden Wärmeverbrauch sehr gute Randbedingungen zur Nutzung solarer Prozesswärme. Untersuchungen im Rahmen dieser Arbeit zeigen, dass 21 % des industriellen Wärmebedarfs unterhalb von 100 °C, weitere 8 % zwischen 100..200 °C und 2 % zwischen 200..300 °C verbraucht werden. Auf Basis des Wärmebedarfs unterhalb von 300 °C errechnet sich ein theoretisches Potential solarer Prozesswärme für Deutschland in Höhe von 134 TWh pro Jahr. Das technische Potential liegt bei etwa 16 TWh pro Jahr und entspricht 3,4 % des industriellen Wärmebedarfs. Als wichtigste Branche geht die Ernährungsindustrie aus den Untersuchungen hervor.

Trotz des enormen Potentials erfolgt die Markteinführung solarer Prozesswärme nur sehr langsam, da notwendige Machbarkeitsabschätzungen in Industriebetrieben bisher mit einem sehr hohen Aufwand einhergehen. Vor allem für die hydraulische Einbindung von Solarwärme stehen bisher keine geeigneten Hilfsmittel zur Verfügung. Daher wird im Rahmen dieser Dissertation eine einzelne Branche anhand von Fallstudien detailliert hinsichtlich der Integrationsmöglichkeiten von Solarwärme untersucht. Aufgrund der Relevanz der Ernährungsindustrie und des hohen Anteils thermischer Energie am Gesamtverbrauch wird für diese Untersuchung das Brauwesen gewählt. Es zeigt sich, dass vor allem die verwendete Anlagentechnik einen maßgeblichen Einfluss auf die Möglichkeiten zur Einbindung von Solarwärme hat. Um diese Ergebnisse zu verifizieren werden die Prozessketten und verwendete Anlagentechnik ausgewählter Branchen der Ernährungsindustrie analysiert. Dabei wird deutlich, dass die konventionelle Beheizungsart eines Prozesses ein entscheidendes Kriterium für die Integration thermischer Solarenergie ist.

Basierend auf den Ergebnissen der untersuchten Branchen wird eine Klassifizierung zur Integration von Solarwärme in industrielle Prozesse und Wärmeversorgungsstrukturen entwickelt. Die Klassifizierung ermöglicht eine branchenunabhängige Zuordnung des Großteils der in der Industrie angewandten Prozesse und Verfahren und beinhaltet Konzepte zur hydraulischen Einbindung von Solarwärme. Um die Auswahl eines geeigneten Integrationspunktes zu vereinfachen, wird ein Vorgehen vorgestellt, das die Identifikation und Bewertung möglicher Integrationspunkte sowie die Anwendung der Klassifizierung und weitere notwendige Schritte im Rahmen einer Machbarkeitsabschätzung beinhaltet.

Abstract

Industry represents a very promising application area for solar thermal technology, since it has a constant and very high heat demand. Analyses within this thesis show that 21 % of the industrial heat demand is in the temperature range lower than 100 °C for process heat, space heating and hot water. Additional 8 % are in the temperature range of 100..200 °C and another 2 % in the temperature range of 200..300 °C. In total, the theoretical potential of solar heat for industrial processes below 300 °C in Germany accounts for 134 TWh per year, the technical potential being 16 TWh per year or 3.4% of the overall industrial heat demand. The food and beverage industry is identified as the most important sector for the application of solar process heat.

In spite of the large potential, solar thermal systems are rarely used to provide process heat for industrial applications so far. An important barrier for the market development is the large effort to carry out a feasibility assessment and pre-dimension a suitable solar process heat system. Especially for the integration of solar heat in Industry, tools and guidelines are required. Hence, the brewing sector is systematically analyzed regarding the possibilities to integrate solar heat using case study research. The brewing sector is chosen based on the relevance of the food and beverage sector and its large share of thermal energy demand. The analyses show that the utilized process installations are of particular importance for the integration of solar heat. To verify these findings, process chains and typical installations of six additional sectors of the food and beverage industry are analyzed. This investigation shows that the conventional heating technology of a process is a crucial factor in integrating solar heat.

Based on the results of the analyses of several sectors of the food and beverage industry and conventional process heating technologies, a classification for the integration of solar heat in industrial processes and heat supply systems is developed. This classification is sector independent and contains concepts for the hydraulic integration of solar heat for the bulk of industrial processes and operations. Finally, an approach is presented to simplify the choice of a suitable integration point for solar heat in industry. This approach includes the identification and assessment of possible integration points as well as the utilization of the developed classification and other important steps within the feasibility assessment.

Danksagung

Es ist wohl durchaus bekannt, dass die Erstellung einer Dissertation mit viel Freud und Leid verbunden ist und zudem einer Menge Menschen bedarf, die dem Verfasser an diversen Punkten inspirieren, antreiben, stützen oder auch einfach mal ablenken. Ich danke allen Menschen, die in diesem Sinne an der Entstehung meiner Dissertation beteiligt waren.

Zu Beginn gilt mein ganz besonderer Dank meinem langjährigen Kollegen und Freund Christoph. Man kann wohl sagen, dass wir im Forschungsfeld der solaren Prozesswärme ein einmaliges Gespann gebildet haben, das sich stets wunderbar ergänzt und kontinuierlich weiterentwickelt hat. Diese besondere Zusammenarbeit fand ihren Höhepunkt im gemeinsamen Abschluss unserer Dissertationen und ich blicke mit einem lachenden und einem weinenden Auge auf das Ende dieses besonderen Lebensabschnittes.

Ich möchte meinem Doktorvater Klaus Vajen danken, der mir vor langer Zeit den Weg in Richtung solare Prozesswärme aufzeigte. Im Rahmen meiner Tätigkeiten am Fachgebiet Solar- und Anlagentechnik der Universität Kassel gewährte er mir viele Freiräume, was maßgeblich zu meiner Entwicklung beigetragen hat. Ich danke Barbara für die Übernahme der Gutachterschaft, vor allem aber für die wertvollen Diskussionen und die mentale Unterstützung während der Fertigstellung meiner Arbeit. Auch Matthias sei gedankt, der ebenfalls als Gutachter fungierte. Ich erinnere mich gerne an mein erstes Task Meeting in Rom, an dem auch er mit seiner freundlichen Art dazu beigetragen hat, dass ich mich als absoluter Neuling schnell in die Prozesswärmefamilie einfinden konnte. Schließlich möchte ich auch Jens Knissel und Anton Maas danken, die während der Disputation als Prüfer fungierten.

Für die großzügige finanzielle Unterstützung meiner Forschungstätigkeiten im Rahmen eines Promotionsstipendiums durch die Reiner-Lemoine-Stiftung möchte ich mich an dieser Stelle auch sehr herzlich bedanken.

Nun zum Fachgebiet. Hier arbeiten viele Menschen, die mich im Rahmen meiner Tätigkeit auf die ein oder andere Weise begleitet haben. Mein Dank gilt Ulrike für einige wichtige Denkanstöße, Corry für die leckeren veganen Muffins, Ruslan für die Hilfe bei der Kalibrierung, Mustafa für seine fast schon unmenschlich hilfsbereite Art, Christian für abwechslungsreiche Gespräche, Jany für jederzeit konstruktive Diskussionen, Emme und Bene für so manchen Gedankenaustausch, Dominik fürs Korrekturlesen sowie Esteban, Roland, Oleg, Magdalena und Meike.

Ich danke Kerstin, Marc, Paul und Michael, die mich mit ihren Abschlussarbeiten unterstützt haben. Ich danke Katrin für ihre stetige Bereitschaft zum Feedback und Claudius für sehr gute, teils auch verwirrende Ideen, vor allem aber für das wegweisende Gespräch im Schindelhaus an einem kritischen Punkt meiner Diss.

Ich danke Klaus-Peter Reinl und Peter Schollinger von der Hütt-Brauerei für das entgegengebrachte Vertrauen im Rahmen der Umsetzung unseres gemeinsamen Pilotvorhabens. Ein Dank an Herrn Dr. Ludwig Scheller von GEA Brewery Systems für die Unterstützung bei brautechnischen Fragestellungen. Ein Dankeschön an Bettina und Christoph vom AEE INTEC für das besonders freundschaftliche Verhältnis, das auch in inhaltlichen Punkten nicht von Institutsgrenzen beeinflusst wird. Gleiches gilt für meinen Lieblings-ISE-aner Stefan. Ich danke auch besonders meinem Freund Eli, der mir eine interessante Zeit am SPF in Rapperswil ermöglichte und stets für berufliche und persönliche Diskussionen zu haben ist. Ein Dank gilt auch Daggi, die sich als Fachfremde mit ihrem grammatikalischen Wissen in meine Dissertation eingebracht hat.

Getreu dem Motto „Daggy-Style ist was du draus machst“ danke ich Andi und Torti für unsere langjährige und besondere Freundschaft und die regelmäßige mentale Unterstützung. Ein ganz besonderer Dank gilt meinen Eltern Jutta und Peter für ihre stetige Unterstützung auf meinem gesamten Ausbildungsweg.

Nun zu dir geliebte Meike. Eine Dissertation zum Abschluss zu bringen ist nicht leicht und in Kombination mit der Geburt zweier wundervoller Mädels wird ein solches Unterfangen noch viel schwieriger. An unzähligen Abenden und Wochenenden, die in diese gedruckten Seiten geflossen sind, musstest du auf mich verzichten und hast es stets gewusst unsere Familie zu managen. Ik kan je niet genoeg bedanken voor het fijt dat je mij ten allen tijde ondersteund hebt.

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	iii
Abstract	iv
Danksagung.....	v
1. Einleitung.....	1
1.1. Ansätze zur Systemintegration	2
1.2. Zielsetzung und Methodik	3
1.3. Aufbau der Arbeit	5
2. Potential und Anwendungsgebiete für solare Prozesswärme	7
2.1. Industrieller Wärmebedarf in Deutschland.....	7
2.2. Potential zur Nutzung solarer Prozesswärme	10
2.3. Geeignete Branchen und Prozesse.....	12
3. Systematische Untersuchung des Brauwesens	17
3.1. Überblick der Produktionsabläufe in Brauereien	19
3.1.1. Sudhaus	20
3.1.2. Gär- und Lagerkeller	21
3.1.3. Abfüllhalle.....	23
3.1.4. Nebeneinrichtungen	23
3.2. Analyse des Wärmeverbrauchs.....	26
3.3. Wärmerückgewinnungsmöglichkeiten	29
3.3.1. Würzekochung	29
3.3.2. Würzekühlung	31
3.3.3. Nebeneinrichtungen	31
3.4. Geeignete Prozesse zur Einbindung von Solarwärme	32
3.4.1. Wasserentgasung	32
3.4.2. Warmwasserbereitstellung	33
3.4.3. Maischen	35

3.4.4. Kochen	37
3.4.5. Kurzzeiterhitzung.....	39
3.4.6. Entalkoholisierung	41
3.4.7. Flaschenreinigung	42
3.4.8. Kastenreinigung	44
3.4.9. Tunnelpasteurisation	45
3.4.10. Kegreinigung	46
3.4.11. CIP-Reinigung.....	48
3.5. Abschließende Betrachtung der Integrationspunkte.....	49
4. Untersuchung der Übertragbarkeit auf andere Branchen.....	53
4.1. Analyse ausgewählter Branchen der Ernährungsindustrie.....	54
4.1.1. Milchverarbeitung	54
4.1.2. Schlachten und Fleischverarbeitung	58
4.1.3. Back- und Teigwaren	61
4.1.4. Obst- und Gemüseverarbeitung	62
4.1.5. Süßwaren.....	64
4.1.6. Mineralwasser und Erfrischungsgetränke	66
4.1.7. Fazit.....	67
4.2. Thermische Energieversorgung industrieller Prozesse	68
4.2.1. Externe Wärmeübertrager	69
4.2.2. Interne Wärmeübertrager	74
4.2.3. Dampfinjektion	76
4.2.4. Verdampfer	77
4.2.5. Trockner	80
5. Klassifizierung möglicher Integrationspunkte	83
5.1. Bewertung bisheriger Ansätze zur Systemintegration	83
5.1.1. Identifikation typischer Niedertemperaturprozesse	83
5.1.2. Unterscheidung zwischen Versorgungs- und Prozessebene	86
5.1.3. Zusammenfassung vielversprechender Anwendungen	88
5.2. Ableiten einer allgemeingültigen Klassifizierung	89

5.3. Integrationskonzepte für klassifizierte Anwendungen	94
5.3.1. Versorgungsebene Dampf (VE_D)	95
5.3.2. Versorgungsebene flüssige Wärmeträger (VE_F)	102
5.3.3. Prozessebene externer Wärmeübertrager (PE_E)	106
5.3.4. Prozessebene interner Wärmeübertrager (PE_I)	110
5.3.5. Prozessebene Mehrzonen-Wärmeübertrager (PE_MZ)	111
5.3.6. Prozessebene Dampfbereitstellung (PE_D)	113
5.4. Vorgehen zur Auswahl geeigneter Integrationspunkte.....	114
5.4.1. Notwendige Schritte zur Identifikation möglicher Integrationspunkte.....	116
5.4.2. Kriterien zur Auswahl eines Integrationspunktes	118
5.4.3. Anwendung der Klassifizierung.....	121
5.4.4. Weiteres Vorgehen.....	123
6. Zusammenfassung und Ausblick.....	125
7. Verzeichnisse	129
7.1. Literaturverzeichnis	129
7.2. Abkürzungsverzeichnis.....	138
7.3. Abbildungsverzeichnis	140
7.4. Tabellenverzeichnis	142
8. Anhang.....	143
8.1. Grundfließbilder ausgewählter Prozessketten	143
8.2. Konventionelle Prozessbeheizung.....	147
8.3. Berechnungen zur Wärmerückgewinnung im Kesselhaus	153
8.4. Eigene Publikationen	156

1. Einleitung

Ein Großteil der installierten thermischen Solaranlagen wird bisher zur Bereitstellung von Trinkwarmwasser und Raumwärme in Ein- und Mehrfamilienhäusern verwendet. Ende 2011 wurden lediglich 3 % der insgesamt in Deutschland installierten Kollektorfläche von etwa 14,7 Mio. m² für andere Anwendungsgebiete wie Schwimmbadbeheizung, Nah- und Fernwärme, industrielle Prozesswärme oder solare Klimatisierung eingesetzt (Mauthner und Weiss, 2013). Vor allem die Bereitstellung solarer Prozesswärme für industrielle Anwendungen hat aber ein sehr großes Potential. Der industrielle Sektor eignet sich aufgrund des sehr hohen Wärmebedarfs, von dem ein signifikanter Teil unterhalb von 150 °C anfällt, für die Nutzung thermischer Solarenergie. Zudem verfügen Unternehmen des produzierenden Gewerbes in der Regel über einen sehr konstanten Wärmebedarf, sowohl während der Arbeitstage einer Woche als auch während eines Jahres. Dies ist ein signifikanter Vorteil gegenüber den Standardanwendungen im Wohnungsbereich, da im industriellen Sektor in aller Regel auch während der einstrahlungsintensivsten Zeit in den Sommermonaten ein bedeutender Wärmebedarf vorhanden ist, von dem ein Teil solar gedeckt werden kann. Aufgrund der konstanten und hohen Last können häufig sehr große Anlagen realisiert werden, wodurch teilweise sehr niedrige Wärmegestehungskosten erzielt werden können. Obwohl der industrielle Sektor damit sehr gute Randbedingungen für die Nutzung solarer Prozesswärme bietet, entwickelt sich dieser Markt nur sehr langsam. Der Anteil dieser Solaranlagen an der gesamten Zubaufläche liegt auf globaler Ebene mit einem Prozent auf einem sehr niedrigen Niveau (Mauthner und Weiss, 2013).

Ein entscheidender Grund für die langsame Markterschließung ist die Komplexität der Industrie als Anwendungsgebiet für Solarwärme. Zunächst ist es bisher sehr aufwendig einen geeigneten Integrationspunkt für Solarwärme zu identifizieren und den Aufwand zur Einbindung der Solarwärme in die existierenden Strukturen abzuschätzen. Zudem ergeben sich aufgrund der vielfältigen industriellen Wärmeverbraucher unterschiedliche Möglichkeiten zur Einbindung von Solarwärme und damit auch verschiedene Hydraulikkonzepte für Solaranlagen. Auf standardisierte Systeme wie im Bereich der Trinkwarmwasserbereitstellung oder Heizungsunterstützung kann dabei nicht zurückgegriffen werden. Daraus resultiert ein sehr hoher Aufwand zur Machbarkeitsabschätzung und Planung solarer Prozesswärmeanlagen, was derzeit eines der größten Hemmnisse bei der Markterschließung darstellt.

1.1. Ansätze zur Systemintegration

Grundsätzlich gilt es im Rahmen einer Machbarkeitsabschätzung zu prüfen, ob und wo bei einem Unternehmen Solarwärme genutzt werden kann. Hierzu muss zunächst ein geeigneter Integrationspunkt für Solarwärme identifiziert werden, der die Grundlage für das weitere Vorgehen darstellt. Basierend auf einem Integrationspunkt kann die benötigte solare Systemtechnik gewählt werden und anschließend eine Vorauslegung der wichtigsten Komponenten erfolgen. In Kombination mit einer Ertragsabschätzung sind damit alle wesentlichen Informationen vorhanden, die für eine Entscheidungsfindung für oder gegen eine Solaranlage seitens eines Unternehmens benötigt werden.

Die Forschungsschwerpunkte im Bereich solarer Prozesswärme lagen in den letzten Jahren neben der Kollektorentwicklung größtenteils im Bereich der Potentialermittlung, Identifikation geeigneter Branchen und Prozesse sowie der Durchführung von Fallstudien zur Initiierung von Pilot- und Demonstrationsanlagen. Ansätze zur Vereinfachung der Integration thermischer Solaranlagen in industrielle Prozesse finden sich nur vereinzelt. So wurden beispielsweise von Schnitzer et al. (2006) immer wiederkehrende verfahrenstechnische Grundoperationen identifiziert, die sich aufgrund ihres Niedertemperaturwärmebedarfs prinzipiell für die Nutzung von Solarwärme eignen. Zwar kann eine solche Auflistung von Grundoperation wie beispielsweise Trocknen, Pasteurisieren oder Waschen sehr gut zur Identifikation potentieller Anwendungen und Suche eines Integrationspunktes genutzt werden, allgemeingültige Aussagen hinsichtlich der Einbindung solarer Wärme beinhalte dieser Ansatz jedoch nicht.

Ein ähnlicher Ansatz wird von Heß et al. (2011) beschrieben. Die Autoren fassen häufig verwendete und vielversprechende Anwendungen für solare Prozesswärme zusammen. Dies sind im Einzelnen: Erhitzen von Frischwasser für Reinigungsprozesse, Vorwärmung von Kesselzusatzwasser, Beheizen industrieller Bäder und konvektives Trocknen mit Heißluft. Hinsichtlich des Temperaturniveaus, Energiebedarfs und Verbreitungsgrades ist diese Klassifizierung sinnvoll, da hiermit eine Vielzahl industrieller Prozesse zusammengefasst wird. Da für einzelne Prozesse innerhalb einer Gruppe jedoch unterschiedliche Verfahren und Anlagen eingesetzt werden können, ist auch dieser Ansatz hinsichtlich der Systemintegration nur wenig aussagekräftig.

Ein dritter Ansatz liegt darin zu unterscheiden, auf welcher Ebene Solarwärme eingebunden wird. Dabei wird wie in (Schmitt et al., 2011) erläutert zwischen der Versorgungsebene (typischerweise Dampf- oder Wasserkreislauf) und der Prozessebene unterschieden. Während diese Unterscheidung auf Versorgungsebene tatsächlich zu einer Vereinfachung der Integrationsmöglichkeiten führt, ist die Unterscheidung auf Prozessebene aufgrund der vielfältigen Wärmeverbraucher nicht zielführend.

1.2. Zielsetzung und Methodik

Die Identifikation eines geeigneten Integrationspunktes und die Abschätzung des Aufwands zur Einbindung der Solarwärme sind ein wesentlicher Bestandteil einer Machbarkeitsabschätzung, da hiermit die Grundlagen für die weiteren Schritte (Kollektorauswahl, Dimensionierung und Ertragsabschätzung) geschaffen werden. Doch für die Identifikation geeigneter Integrationspunkte und der hydraulischen Einbindung von Solarwärme in bestehende industrielle Strukturen stehen bisher keine geeigneten Hilfsmittel zur Verfügung. Daher soll im Rahmen der vorliegenden Dissertation die Frage beantwortet werden, wie die vielfältigen industriellen Wärmeverbraucher auf eine möglichst überschaubare Anzahl von Klassen reduziert werden können, um sowohl die Identifikation geeigneter Integrationspunkte als auch den Aufwand zur hydraulischen Einbindung der Solarwärme deutlich zu vereinfachen. Das Ziel ist eine Klassifizierung möglicher Integrationspunkte zu entwickeln, die allgemeingültig auf alle Industriebranchen angewendet werden kann, zukünftige Machbarkeitsabschätzungen deutlich vereinfacht und damit zu einer schnelleren Markterschließung solarer Prozesswärme beitragen kann.

Ausgangspunkt zur Entwicklung dieser Klassifizierung war zunächst die detaillierte Untersuchung einer Branche hinsichtlich der Möglichkeiten zur Einbindung von Solarwärme. Da aus unterschiedlichen Potentialstudien die Ernährungsindustrie als Branche mit der größten Relevanz hervorging, erfolgte die systematische Untersuchung anhand eines Wirtschaftszweiges aus dieser Branche. Aufgrund des hohen Anteils thermischer Energie am gesamten Energiebedarf bei der Bierproduktion und vorangegangenen Untersuchungen (Benz et al., 1999; Jordan et al., 2006; Staudacher und Buttinger, 2002), die der Nutzung solarer Prozesswärme in Brauereien ein hohes Potential zusprechen, wurde der Wirtschaftszweig „Herstellung von Bier“ für die Untersuchung ausgewählt. Für ein strukturiertes Vorgehen und die Sicherstellung der Qualität der erzielten Ergebnisse wurde der Forschungsansatz von Fallstudien aus der empirischen Sozialforschung aufgegriffen und auf eine technische Fragestellung übertragen. Nach Albers (2007) sind Fallstudien im Allgemeinen ein Werkzeug der qualitativen Forschung, das dazu genutzt wird, auf Gebieten mit geringem Kenntnisstand detaillierte Informationen zu sammeln. Dabei können die Fallstudien sowohl zur Theorieentwicklung als auch zur Überprüfung von Theorien angewandt werden. Daher werden Fallstudien vorzugsweise in neuen oder sehr komplexen Forschungsfeldern eingesetzt. Yin (2009) unterscheidet bei der Verwendung dieser Forschungsmethode Einzelfallstudien von vergleichenden Fallstudien. Letztere wurden zur detaillierten Untersuchung des Brauwesens ausgewählt, da hierbei die gewonnenen Erkenntnisse einzelner Fallstudien verglichen und dadurch Unterschiede und Gemeinsamkeiten identifiziert werden können.

Zur Vorbereitung der Fallstudien in Brauereien wurde daher zunächst die zur Verfügung stehende Standardliteratur des Brauwesens verwendet, um die Struktur der Branche, die angewandten Prozesse und relevanten thermischen Verbraucher zu analysieren. Basierend auf diesen Informationen wurde versucht, eine Vielzahl von Fallstudien zu realisieren, die nach Möglichkeit die stark heterogene Struktur der Branche abdecken sollte. Schlussendlich konnten sieben Fallstudien realisiert werden und in die Untersuchungen einfließen. Die jeweiligen Brauereien unterschieden sich stark in ihrer Jahresproduktion (15.000 bis 1.800.000 hl/a), ihrem Produktspektrum und ihren Betriebszeiten. Die tatsächliche Tiefe der Untersuchungen variierte stark in Abhängigkeit von Interesse und vorhandenen Ressourcen der jeweiligen Brauerei und reichte von groben Screenings bis hin zu sehr detaillierten Untersuchungen, die die Erarbeitung von Konzepten zur Effizienzsteigerung und Einbindung solarer Wärme beinhalteten. Die umfangreichste Fallstudie wurde bei der Hütt-Brauerei in Baunatal durchgeführt. Im Rahmen des vom Bundesumweltministerium geförderten Projektes „SOPREN - Solare Prozesswärme und Energieeffizienz“ wurde der Produktionsprozess der Brauerei detailliert analysiert, eine Energiebilanz erstellt und Effizienzmaßnahmen für unterschiedliche Prozesse und Nebeneinrichtungen identifiziert. Basierend auf diesen Erkenntnissen wurde die Würzekochung erneuert, die Wärmerückgewinnung im Sudhaus optimiert und eine Solaranlage in die Brauwasserreserve integriert.

Bedarfsabhängig wurden während der Durchführung einzelner Fallstudien auch unterschiedliche Studien zur Effizienzsteigerung und Einbindung erneuerbarer Energien im Brauwesen analysiert. Zudem flossen die Analyse technischer Dokumentationen der in Brauereien verwendeten Anlagentechnik sowie der direkte Kontakt zu entsprechenden Anlagenbauern in die Auswertung der Fallstudien ein.

Nachdem anhand dieser detaillierten Untersuchung die Möglichkeiten zur Einbindung solarer Prozesswärme in Brauereien identifiziert und analysiert werden konnten, wurden weitere relevante Branchen der Ernährungsindustrie in die Untersuchungen mit aufgenommen. Mit Hilfe der Standardliteratur der jeweiligen Branchen und der verfügbaren BVTs (beste verfügbare Techniken) wurden Prozessketten und verwendete Anlagentechnik von sechs weiteren Branchen untersucht. Das Ziel dieser Untersuchung war die Identifikation von Gemeinsamkeiten und Unterschieden, um eine Übertragbarkeit der innerhalb des Brauwesens gewonnenen Erkenntnisse auf die gesamte Ernährungsindustrie zu prüfen.

Da die Analyse der zusätzlichen Branchen zeigte, dass die Einbindung von Solarwärme in einen bestehenden Prozess maßgeblich von der konventionellen Beheizung beeinflusst wird, erfolgte im weiteren Verlauf eine branchenübergreifende Untersuchung der konventionellen Möglichkeiten zur Prozessbeheizung in der Industrie. Hierzu wurden verfahrenstechnische Standardliteratur und technische Dokumentationen genutzt. Dabei lag der Fokus

der jeweiligen Beheizungsmöglichkeiten auf einem für thermische Solaranlagen relevanten Temperaturbereich von unter 200 °C. Aufgrund der damit gewonnenen Erkenntnisse konnte eine Klassifizierung der industriellen Wärmeverbraucher zur Integration von Solarwärme entwickelt werden.

1.3. Aufbau der Arbeit

In Kapitel 2 der vorliegenden Dissertation erfolgt zunächst eine Analyse des industriellen Wärmebedarfs in Deutschland hinsichtlich der Verteilung auf einzelnen Branchen und unterschiedliche Temperaturniveaus. Darauf aufbauend wird das Potential für solare Prozesswärme in Deutschland berechnet und besonders geeignete Branchen und die dort typischerweise angewendeten Prozesse vorgestellt. Das Kapitel basiert auf einer Publikation in einem peer-reviewed Journal, die aus den Arbeiten im Rahmen dieser Dissertation hervorgegangen ist (Lauterbach et al., 2012). Teile des Kapitels wurden zudem in (Lauterbach et al., 2010, 2011b, 2011c und 2014) publiziert. Eine vollständige Liste aller Publikationen die aus dieser Dissertation hervorgegangen sind, findet sich in Kapitel 8.4 im Anhang.

Das dritte Kapitel beinhaltet die systematische Untersuchung des Brauwesens hinsichtlich der Möglichkeiten zur Einbindung von Solarwärme. Zunächst erfolgt ein Überblick der Produktionsabläufe in Brauereien, die Analyse des Wärmeverbrauchs und Vorstellung typischer Wärmerückgewinnungsmaßnahmen dieser Branche. Basierend auf den dargestellten Informationen werden die prinzipiell zur Einbindung von Solarwärme geeigneten Prozesse beschrieben. Abschließend werden die einzelnen Integrationsmöglichkeiten bewertet und gegenübergestellt. Die Inhalte dieses Kapitels wurden bereits im Rahmen des Branchenkonzepts „Solare Prozesswärme in Brauereien“ (Schmitt et al., 2012b) sowie in der stark gekürzten Form des Leitfadens zur Nutzung solarer Prozesswärme in Brauereien (Schmitt et al., 2012c) publiziert. Zudem wurde ein Artikel bei einem peer-reviewed Journal eingereicht. Kleinere Auszüge des Kapitels wurden bereits in (Schmitt et al., 2008, 2009, 2010, 2011 und 2012a) publiziert. Teile der Integrationsmöglichkeiten zur Nutzung solarer Prozesswärme in Brauereien wurden im Rahmen einer betreuten Diplomarbeit durch Dittmar (2012) erarbeitet.

Im vierten Kapitel erfolgt die Untersuchung der für das Brauwesen erarbeiteten Integrationskonzepte hinsichtlich einer Übertragbarkeit auf andere Branchen der Ernährungsindustrie. Dazu werden zunächst die Prozessketten und verwendete Anlagentechnik ausgewählter Branchen der Ernährungsindustrie analysiert. Darauf aufbauend erfolgt anschließend eine branchenübergreifende Untersuchung der in der Industrie verwendeten konventionellen Beheizungsmethoden.

Abschließend beschreibt Kapitel 5 die Entwicklung der allgemeingültigen Klassifizierung zur Integration von Solarwärme in industrielle Prozesse und Wärmeversorgungsstrukturen. Hierzu werden zunächst die zuvor genannten Ansätze zur Vereinfachung der Integration thermischer Solaranlagen in industrielle Prozesse beschrieben und bewertet. Anschließend wird die entwickelte Klassifizierung vorgestellt, die eine branchenübergreifende Zuordnung des Großteils aller in der Industrie angewandten Prozesse und Verfahren ermöglicht. Die für die jeweiligen Integrationsmöglichkeiten erarbeiteten Konzepte zur Einbindung von Solarwärme werden vorgestellt und teilweise anhand von Beispielen aus unterschiedlichen Branchen erläutert. Abschließend wird ein Vorgehen zur Auswahl geeigneter Integrationspunkte vorgestellt.

2. Potential und Anwendungsgebiete für solare Prozesswärme

Die Bereitstellung solarer Wärme für industrielle Anwendungen ist ein verhältnismäßig neues Anwendungsgebiet für thermische Solarenergie, das sich zukünftig zu einem der wichtigsten Solarthermiemärkte entwickeln könnte. Hierfür ist es von besonderer Bedeutung das Potential dieser Technologie zu ermitteln und Branchen zu identifizieren, die sich für die Einbindung thermischer Solarenergie besonders gut eignen. Daher wird in diesem Kapitel der industrielle Wärmebedarf in Deutschland hinsichtlich der Verteilung auf einzelnen Branchen und unterschiedliche Temperaturniveaus analysiert. Darauf aufbauend folgt die Potentialberechnung für Deutschland. Abschließend werden die als besonders geeignet identifizierten Branchen und die dort typischerweise angewendeten Prozesse vorgestellt. Das Kapitel basiert auf einer Publikation in einem peer-reviewed Journal, die aus den Arbeiten im Rahmen der Erstellung dieser Dissertation hervorgegangen ist (Lauterbach et al., 2012). Teile des Kapitels wurden zudem in (Lauterbach et al., 2010, 2011b, 2011c und 2014) publiziert.

2.1. Industrieller Wärmebedarf in Deutschland

Deutschlands Endenergieverbrauch lag im Jahre 2009 bei 2.414 TWh, wovon rund 640 TWh im industriellen Sektor benötigt wurden. Wie Abbildung 2-1 zeigt, nimmt innerhalb der Industrie der thermische Energiebedarf für Prozesswärme, Raumheizung und Warmwasser mit 74 % den höchsten Stellenwert ein (BMW, 2010).

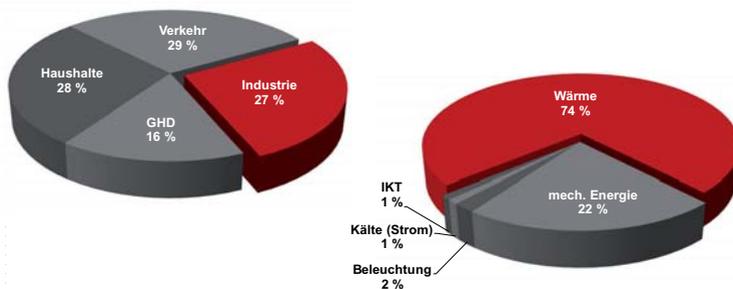


Abbildung 2-1: Endenergieverbrauch in Deutschland und Aufteilung innerhalb der Industrie für 2009 (BMW, 2010).

2. Potential und Anwendungsgebiete für solare Prozesswärme

Die gemäß Abbildung 2-1 verbrauchte Wärme wurde größtenteils fossil bereitgestellt. Dabei hatte Erdgas mit ca. 47 % den größten Anteil, gefolgt von Kohle (21 %), Öl und Elektrizität (beide jeweils 8 %). Fernwärme hatte einen Anteil von sieben Prozent an der Wärmebereitstellung, Erneuerbare fünf Prozent und sonstige Energiequellen wie beispielsweise Reststoffe vier Prozent (BMWi, 2010). Um das Potential zur solaren Bereitstellung von Prozesswärme bestimmen zu können, ist vor allem die Aufteilung des industriellen Wärmebedarfs auf unterschiedliche Temperaturniveaus relevant. Hierzu zeigt Tabelle 2-1 den industriellen Wärmebedarf im Jahr 2009, aufgeteilt auf unterschiedliche Temperaturniveaus. Die Daten wurden mittels beschäftigungsspezifischen Kennzahlen zum Wärmebedarf aus Eikmeier et al. (2005) und der Anzahl sozialversicherungspflichtiger Beschäftigter im Jahr 2009 (DeStatis, 2011c) berechnet.

Tabelle 2-1: Aufschlüsselung des industriellen Wärmebedarfs für das Jahr 2009 (DeStatis, 2011c; Eikmeier et al., 2005).

Wirtschaftszweig (WZ 2008)	WW	RH	Prozesswärme				Summe	Anteil*
			<100°C	100 ..500°C	500 ..1000°C	>1000°C		
Nahrungs- und Futtermittel, Getränke (10/11)	0,3	8,3	11,8	14,6	0	0	35,0	7,5 %
Tabakverarbeitung (12)	0,0	0,0	0,0	0,0	0	0	0,1	0,0 %
Textilien (13)	0,1	1,2	2,0	0	0	0	3,3	0,7 %
Bekleidung (14)	0,0	0,1	0,2	0	0	0	0,3	0,1 %
Leder, Lederwaren und Schuhe (15)	0,0	0,1	0,2	0	0	0	0,3	0,1 %
Holz-, Flecht-, Korb- und Korkwaren (16)	0,0	0,3	1,5	0,4	0	0	2,1	0,5 %
Papier, Pappe und Waren daraus (17)	0,1	2,4	2,7	9,9	0	0	15,1	3,2 %
Druckerzeugnisse; Vervielfältigung von Ton-, Bild- und Datenträgern (18)	0,0	0,4	0,2	2,7	0	0	3,3	0,7 %
Chemische und pharmazeutische Erzeugnisse (20/21)	0,2	6,7	13,5	20,9	44,7	11,0	96,9	20,7 %
Gummi- und Kunststoffwaren (22)	0,1	1,6	0,9	3,5	0	0	6,1	1,3 %
Glas und Glaswaren, Keramik, Verarbeitung von Steinen und Erden (23)	0,1	3,5	1,2	1,8	26,9	55,8	89,3	19,0 %
Metallerzeugung und -bearbeitung (24)	0,2	4,4	0,9	2,7	31,5	123,5	163,1	34,8 %
Metallerzeugnisse (25)	0,9	6,3	2,3	1,8	1,0	2,4	14,8	3,2 %
Datenverarbeitungsgeräte, elektr. u opt. Erzeugnisse (26)	0,1	0,9	0,3	0,2	0,1	0,3	2,0	0,4 %
Elektrische Ausrüstungen (27)	0,3	2,4	0,9	1,1	0,3	0,8	5,8	1,2 %
Maschinenbau (28)	0,6	4,5	1,6	1,2	0,6	1,7	10,3	2,2 %
Kraftwagen und Kraftwagenteile (29)	1,0	7,3	2,7	2,0	1,0	2,8	16,8	3,6 %
Sonstiger Fahrzeugbau (30)	0,1	0,9	0,3	0,2	0,1	0,3	2,0	0,4 %
Möbel und sonstige Waren (31/32)	0,0	0,7	0,4	1,0	0,0	0,1	2,4	0,5 %
Summe	4,2	52,0	43,6	64,2	106,2	198,7	468,9	100 %
Anteil*	1 %	11 %	9 %	14 %	23 %	42 %	100 %	
Vergleichswerte**	5,7	49,4					473,7	

* am gesamten industriellen Wärmebedarf, Kokerei und Mineralölverarbeitung (19) nicht aufgeführt, da der Wärmebedarf durch eigene Produktion gedeckt wird

alle Werte ohne Einheit in TWh; WW: Warmwasser, RH: Raumheizung

** kumulierte Werte für Warmwasser, Raumheizung und Prozesswärme für 2009 aus der nationalen Energiestatistik (BMWi, 2010)

Der Wärmebedarf wird von lediglich drei Branchen dominiert: Herstellung von chemischen Erzeugnissen (WZ 20/21), Herstellung von Glas und Glaswaren, Keramik, Verarbeitung von Steinen und Erden (23) sowie Metallerzeugung und -bearbeitung (24). Gemeinsam hatten diese drei Branchen im Jahr 2009 einen Anteil von fast 75 % am gesamten industriellen Wärmebedarf. Weitere Branchen mit relevanten Anteilen am Wärmebedarf sind das Ernährungsgewerbe, Herstellung von Kraftfahrzeugen, Herstellung

von Papier, Herstellung von Metallerzeugnissen sowie der Maschinenbau. Diese fünf Branchen haben einen kumulierten Anteil von fast 20 % des industriellen Wärmebedarfs. Berücksichtigt man das Temperaturniveau, wird deutlich, dass mit 65 % der Großteil des Wärmebedarfs über 500 °C anfällt. Etwa 14 % des Wärmebedarfs wird in einem Temperaturbereich von 100..500 °C verbraucht, 21 % bei niedrigen Temperaturen unter 100 °C. Dies beinhaltet die Bereitstellung von Warmwasser, Raum- und Prozesswärme. In diesem niedrigen Temperaturbereich haben die Chemische Industrie und das Ernährungsgewerbe mit Abstand den größten Anteil mit jeweils 20 %. Zur Beurteilung des Potentials solarer Prozesswärme ist neben dem Temperaturniveau unter 100 °C auch das Temperaturniveau zwischen 100 °C und 300 °C von Interesse, da für die Bereiche 100..200 °C und 200..300 °C unterschiedliche solarthermische Technologien zur Verfügung stehen. Aus diesem Grund erfolgt eine weitere Unterteilung des in Tabelle 2-1 aufgeführten Temperaturbereichs von 100..500 °C. Hierzu zeigt Abbildung 2-2 die Aufteilung des industriellen Wärmebedarfs nach Temperaturniveau für die Chemische Industrie, das Ernährungsgewerbe sowie den Durchschnitt der anderen Branchen (Hofer, 1994).

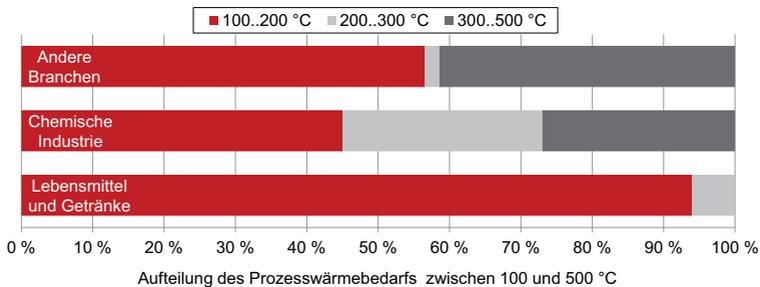


Abbildung 2-2: Aufteilung des industriellen Prozesswärmebedarfs zwischen 100 und 500 °C. Eigene Darstellung basierend auf Hofer (1994).

Bei Anwendung dieser Aufteilung auf die Werte von Tabelle 2-1 ergibt sich eine detaillierte Aufteilung des industriellen Wärmebedarfs zwischen 100 und 500 °C gemäß Tabelle 2-2, die nach dem Wärmebedarf unter 300 °C sortiert ist. Gut ein Fünftel des industriellen Wärmebedarfs wird demnach unter 100 °C für die Bereitstellung von Warmwasser, Raum- und Prozesswärme benötigt. Weitere 8 % fallen in einem Temperaturbereich von 100..200 °C an. Der Anteil des Wärmebedarfs bei 200..300 °C ist mit 2 % bereits wesentlich geringer. Die Chemische Industrie und das Ernährungsgewerbe haben unterhalb 300 °C mit Abstand den größten Anteil.

Tabelle 2-2: Aufschlüsselung des industriellen Wärmebedarfs mit Unterteilung des Temperaturniveaus zwischen 100..500 °C.

Wirtschaftszweig (WZ 2008)	WW	RH	Prozesswärme [TWh]					Summe	Summe < 300°C	
			< 100°C		100 ..200°C	200 ..300°C	300 ..500°C			> 500°C
Chemische und pharmazeutische Erzeugnisse (20/21)	0,2	6,7	13,5	9,5	6	6	56	96,9	35,7	
Nahrungs- und Futtermittel, Getränke (10/11)	0,3	8,3	11,8	13,7	1	0	0	35,0	35,0	
Kraftwagen und Kraftwagenteile (29)	1,0	7,3	2,7	1	0	1	4	16,8	12,2	
Papier, Pappe und Waren daraus (17)	0,1	2,4	2,7	6	0	4	0	15,1	11,0	
Metallerzeugnisse (25)	0,9	6,3	2,3	1	0	1	3	14,8	10,6	
Maschinenbau (28)	0,6	4,5	1,6	0,7	0	1	2	10,3	7,5	
Metallerzeugung und -bearbeitung (24)	0,2	4,4	0,9	1,5	0	1	155	163,1	7,0	
Glas und Glaswaren, Keramik, Verarbeitung von Steinen und Erden (23)	0,1	3,5	1,2	1,0	0	1	83	89,3	5,9	
Gummi- und Kunststoffwaren (22)	0,1	1,6	0,9	2,0	0,1	1,4	0,0	6,1	4,7	
Elektrische Ausrüstungen (27)	0,3	2,4	0,9	0,6	0	0	1	5,8	4,3	
Textilien (13)	0,1	1,2	2,0	0,0	0,0	0,0	0,0	3,3	3,3	
Druckerzeugnisse; Vervielfältigung von Ton-, Bild- und Datenträgern (18)	0,0	0,4	0,2	1,5	0,1	1,1	0,0	3,3	2,2	
Holz-, Flecht-, Korb- und Korkwaren (16)	0,0	0,3	1,5	0,2	0,0	0,2	0,0	2,1	2,0	
Möbel und sonstige Waren (31/32)	0,0	0,7	0,4	0,6	0,0	0,4	0,2	2,4	1,8	
Datenverarbeitungsgeräte, elektr. u opt. Erzeugnisse (26)	0,1	0,9	0,3	0,1	0,0	0,1	0,4	2,0	1,5	
Sonstiger Fahrzeugbau (30)	0,1	0,9	0,3	0,1	0,0	0,1	0,4	2,0	1,4	
Leder, Lederwaren und Schuhe (15)	0,0	0,1	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,3	0,3	
Bekleidung (14)	0,0	0,1	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,3	0,3	
Tabakverarbeitung (12)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1	
Summe	4,2	52,0	43,6	39,3	7,5	17,4	304,9	468,9	146,6	
Anteil*	1 %	11 %	9 %	8 %	2 %	4 %	65 %	100 %	31 %	

* am gesamten industriellen Wärmebedarf
alle Werte ohne Einheit in TWh; WW: Warmwasser, RH: Raumheizung

2.2. Potential zur Nutzung solarer Prozesswärme

Das theoretische Potential zur Nutzung solarer Prozesswärme in Deutschland ergibt sich aus der Summe des Wärmebedarfs für Warmwasser, Raumheizung und Prozesswärme bis 300 °C für alle Branchen der Industrie. Lediglich die beiden Branchen *Metallerzeugung (24)* und *Glas, Steine, Erden (23)* werden nicht berücksichtigt, da hier aufgrund des dominierenden Wärmebedarfs oberhalb von 1000 °C das mit Abstand größte Abwärmepotential vorhanden ist. Es ist anzunehmen, dass sämtlicher Wärmebedarf unterhalb 300 °C durch Wärmerückgewinnung abgedeckt werden kann. Damit liegt das theoretische Potential solarer Prozesswärme in Deutschland bei 134 TWh pro Jahr. Um das technische Potential angeben zu können, müssen weitere Einschränkungen berücksichtigt werden.

Zunächst kann der Wärmebedarf in vielen Branchen mittels Wärmerückgewinnung und Effizienzsteigerung reduziert werden. Neben der Abwärmennutzung bei der Bereitstellung von Wärme, Kälte und Druckluft kann auch die Abwärme einzelner Prozesse genutzt werden. Zudem kann auch bei Niedertemperaturprozessen die Verwendung von Elektrizität

zur Wärmebereitstellung aus betriebstechnischen Gründen notwendig sein. Schließlich werden die im industriellen Sektor meist unzureichenden Frei- oder Dachflächen einen limitierenden Faktor bei der Installation thermischer Solaranlagen darstellen (Schweiger et al., 2001). Müller et al. (2004) nehmen an, dass 60 % des theoretischen Potentials aufgrund der erläuterten Einschränkungen nicht erschlossen werden kann. Auch wenn sich diese Annahme nicht vollständig verifizieren lässt, wurde sie für die Berechnung des Potentials solarer Prozesswärme in Deutschland übernommen.

Eine weitere Reduktion des theoretischen Potentials ergibt sich durch eine anzunehmende durchschnittliche solare Deckungsrate. Um hierfür eine realistische und vergleichbare Annahme zu treffen wurden unterschiedliche Quellen ausgewertet. So liegt beispielsweise die durchschnittliche solare Deckungsrate von sechs deutschen Prozesswärmeanlagen aus den Branchen Metallbearbeitung und Ernährungsindustrie bei 32 % (OÖ ESV, 2011). Die von Schweiger et al. (2001) beschriebene Dimensionierung von 25 Systemen in Spanien und Portugal erzielen eine durchschnittliche Deckung von 29 %. Sechs weitere Anlagenkonzepte, erarbeitet im Rahmen der österreichischen Studie PROMISE, kommen auf eine durchschnittliche Deckung von 40 % (Müller et al., 2004). Schließlich wurde auch in der Niederländischen Potentialstudie eine durchschnittliche Deckungsrate von 30 % angesetzt (van de Pol und Wattimena, 2001). Aufgrund der Erfahrungen durchgeführter Fallstudien und bereits realisierter Anlagen sowie aus Gründen der Übertragbarkeit sollte auch für die Berechnung des deutschen Potentials eine durchschnittliche Deckungsrate von 30 % angenommen werden. Mit dieser Größe und den zuvor erläuterten Einschränkungen hinsichtlich Effizienz und Flächenverfügbarkeit berechnet sich ein technisches Potential für die Nutzung solarer Prozesswärme in Deutschland von 16 TWh pro Jahr. Dies entspricht 3,4 % des industriellen Wärmebedarfs.

Abbildung 2-3 zeigt das ermittelte technische Potential für Deutschland im Vergleich zu den Ergebnissen früherer Potentialstudien für Österreich (Müller et al., 2004), Italien (Vannoni et al., 2008), Niederlande (van de Pol und Wattimena, 2001) sowie Portugal und Spanien (Schweiger et al., 2001). Wie die Abbildung zeigt variiert das technische Potential zwischen 3 und 4,5 % des industriellen Wärmebedarfs des jeweiligen Landes. Das Potential für die Europäische Union (EU27) wurde von Vannoni et al. (2008) mit 72 TWh pro Jahr bzw. 3,8 % des Wärmebedarfs angegeben. Das für Deutschland ermittelte technische Potential liegt damit etwas unter dem Durchschnitt der zuvor durchgeführten Studien. Absolut gesehen hat Deutschland mit 16 TWh das mit Abstand größte Potential zur Nutzung solarer Prozesswärme in Europa. Unter Annahme eines durchschnittlichen spezifischen Solarertrags von $450 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ wäre eine Kapazität von $25 \text{ GW}_{\text{th}}$ (35 Mio. m^2) notwendig, um dieses Potential zu erschließen.

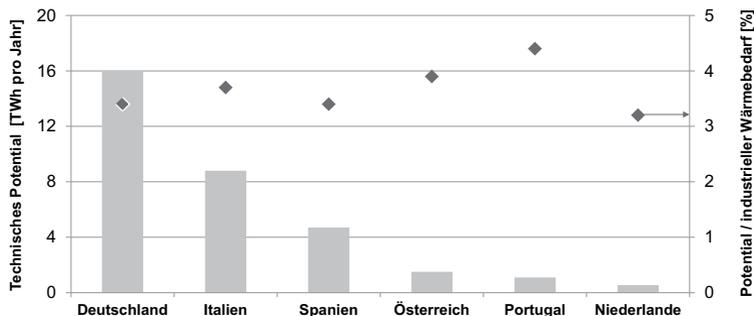


Abbildung 2-3: Technisches Potential zur Nutzung solarer Prozesswärme in europäischen Ländern.

2.3. Geeignete Branchen und Prozesse

Es wurden bereits in einigen Potentialstudien Branchen ermittelt, die sich für die Nutzung solarer Prozesswärme besonders eignen. Neben den Studien aus Österreich (Müller et al., 2004) und Spanien/Portugal (Schweiger et al., 2001) finden sich Untersuchungen über Victoria in Australien (McLeod et al., 2005), Italien (Vannoni et al., 2008), die Niederlande (van de Pol und Wattimena, 2001), Schweden (Kovacs et al., 2003) sowie Griechenland, Wallonien (Belgien) und einige Branchen in Deutschland (Vannoni et al., 2006). Tabelle 2-3 fasst die untersuchten Branchen der genannten Studien zusammen.

Tabelle 2-3: Geeignete Branchen identifiziert im Rahmen früherer Potentialstudien.

Wirtschaftszweig (WZ 2008)	AT	AU (Victoria)	BE (Wallonien)	DE	ES/ PT	GR	IT	NL
Chemische und pharmazeutische Erzeugnisse (20/21)	X	X	X	-	X	X	X	-
Nahrungs- und Futtermittel, Getränke (10/11)	X	X	X	X	X	X	X	X
Papier, Pappe und Waren daraus (17)	-	X	X	X	X	X	X	X
Kraftwagen und Kraftwagenteile (29)	-	-	-	X	X	X	X	-
Maschinenbau (28)	-	X	-	-	-	-	-	-
Gummi- und Kunststoffwaren (22)	X	-	-	-	-	-	-	-
Textilien (13)	X	X	X	-	X	X	X	X
Tabakverarbeitung (12)	-	-	X	-	X	X	X	-
Leder, Lederwaren und Schuhe (15)	-	-	-	-	X	X	X	-

Während die Relevanz einzelner Branchen und damit auch ihr Potential innerhalb der jeweiligen Länder variieren können, sind die angewandten Prozesse davon unabhängig auch auf andere Länder übertragbar. Aus diesem Grunde lassen sich die in den Studien als geeignet identifizierten Branchen auch auf andere Länder übertragen. Nachfolgend werden die am besten geeigneten Branchen zur Nutzung solarer Prozesswärme beschrieben. Diese Auswahl basiert neben den Ergebnissen früherer Potentialstudien auf dem im Abschnitt 2.1 ermittelten Wärmebedarf unterhalb von 300 °C und dem Abwärmepotential der jeweiligen Branchen.

Die **chemische Industrie** ist aufgrund der Struktur ihres Wärmebedarfs der Wirtschaftszweig mit dem insgesamt größten Potential zur Nutzung solarer Prozesswärme. Obwohl der größte Teil des Wärmebedarfs bei hohen Temperaturen anfällt, ist auch im Nieder- (unter 100 °C) und Mitteltemperaturbereich (bis 300 °C) ein nennenswerter Wärmebedarf vorhanden. Potentielle Prozesse für die Einbindung von Solarwärme sind beispielsweise Kochen (85..110 °C) und Destillieren (110..300 °C), biochemische Reaktionen mit niedrigen Temperaturen (< 60 °C) sowie Vorwärm- und Polymerisationsprozesse (Schnitzer et al., 2006). Aufgrund der hohen Komplexität der Produktionsanlagen im chemischen Sektor und des gleichzeitig großen Abwärmepotentials ist eine tieferegehende Analyse dieser Branche erforderlich, um allgemeingültige Aussagen zum Potential und der Einbindung thermischer Solarenergie treffen zu können.

Das **Ernährungsgewerbe** wurde in allen durchgeführten Potentialstudien zur solaren Prozesswärme als besonders vielversprechend bezeichnet. Diese Branche hat im niedrigen und mittleren Temperaturbereich in etwa den gleichen Wärmebedarf wie die chemische Industrie. Der größte Teil fällt jedoch mit 58 % unterhalb von 100 °C an. Die restlichen 42 % werden im mittleren Temperaturbereich (100..300 °C) benötigt. Zur Identifikation der geeignetsten Subsektoren wurden die statistisch erfassten Energieverbräuche von DeStatis (2011a) verwendet. Darin weist die Zuckerherstellung den größten Energieverbrauch auf. Diese Branche kommt für die Nutzung von Solarthermie allerdings nicht in Frage, da die Produktion in Deutschland lediglich im Herbst und Winter stattfindet und der Wärmebedarf hauptsächlich durch Kraft-Wärme-Kopplung gedeckt wird. Die Verarbeitung von Milch, Fleisch, Obst und Gemüse hingegen weist neben einem signifikanten Wärmebedarf auch eine Vielzahl von Prozessen auf, die vielversprechend für die Nutzung solarer Prozesswärme erscheinen. Weiterhin eignen sich Herstellung von Bier, Malz, Futtermitteln, Mineralwasser und alkoholischen Getränken. Typische Prozesse sind das Pasteurisieren von flüssigen Produkten (65..100 °C), Kochen (100 °C), Blanchieren bspw. von Gemüse und Fleischprodukten (65..95 °C), Trocknen (40..240 °C) und Eindampfen (40..130 °C) sowie das Reinigen von Produkten und Produktionsanlagen (60..90 °C).

Etwa zwei Drittel des Wärmebedarfs im **Papiergewerbe** liegen bei Temperaturen über 100 °C. Dieser Bedarf verteilt sich nach Tabelle 2-2 auf die Bereiche 100..200 °C und 300..500 °C. Immerhin ein Drittel der Wärme wird auf einem Temperaturniveau unterhalb von 100 °C für Prozesswärme, Warmwasser und Raumheizung verbraucht. Trocknungsprozesse sind bei der Papierherstellung die mit Abstand energieintensivsten Verfahren. Hierzu werden vor allem dampfbeheizte Zylinder verwendet, die Temperaturen von 130..200 °C aufweisen. Bei der Herstellung von Hygienepapier werden häufig direktbeheizte Trocknungshauben mit Betriebstemperaturen von 400 °C eingesetzt (Vogt et al., 2008). Neben Trocknen, De-Inken von Recyclingpapier, Kochen und Bleichen ist die Bereitstellung von Kesselzusatzwasser eine aussichtsreiche Anwendung für solare Prozesswärme. Die Herstellung von Papier ist durch extrem konstante Produktionszeiten geprägt, die im Jahresverlauf oft nur für wenige Stunden unterbrochen werden.

Fast zwei Drittel des Wärmebedarfs bei der **Herstellung von Metallerzeugnissen** werden für Prozesswärme unter 100 °C, Warmwasserbereitstellung und Raumheizung benötigt. Ein sehr kleiner Teil fällt bei Temperaturen von 100..300 °C an, der restliche Bedarf für Prozesswärme liegt oberhalb von 300 °C. Niedertemperaturprozesswärme wird vor allem für Beschichtungsprozesse benötigt wie beispielsweise Entfetten, Galvanisieren oder Beizen. Lufttrocknung wird in Verbindung mit den genannten Prozessen häufig verwendet, die bei etwa 120 °C verläuft. Ähnliche Prozesse finden sich in den Branchen *Herstellung von Kraftfahrzeugen, Maschinenbau und elektrische Ausrüstungen*. Zusammengenommen liegt der Wärmebedarf dieser vier Branchen unter 200 °C bei 34,4 TWh/a und ist damit genauso groß wie der Wärmebedarf der Ernährungsindustrie.

In der **Gummi- und Kunststoffindustrie** fallen 43 % des Wärmebedarfs unter 100 °C an, weitere 40 % bei 100..300 °C. Neben der Bereitstellung von Warmwasser und Raumheizung stellt das Trocknen von Pellets und Granulat bei Temperaturen von 50..150 °C ein interessantes Anwendungsgebiet für thermische Solaranlagen dar. Eine weitere Möglichkeit ist die Vorwärmung der Pellets vor der Verarbeitung durch Extrusion oder Spritzgießen.

Der Wärmebedarf bei der **Herstellung von Textilien** beschränkt sich fast ausschließlich auf das Temperaturniveau unterhalb 100 °C. Entgegen der Zahlen aus Tabelle 2-1 zeigte eine Analyse dieser Branche, dass vereinzelte Prozesse auch einen Wärmebedarf oberhalb 100 °C aufweisen. Aus thermischen Gesichtspunkten sind Waschen (40..90 °C), Trocknen und eine Vielzahl von Veredelungsverfahren wie Bleichen (40..100 °C), Entschlichten (80..90 °C) oder Färben (40..120 °C) die wichtigsten Prozesse der Textilindustrie. Nach einer groben Abschätzung von Müller et al. (2004) könnten 25..50 % des Wärmebedarfs der Textilindustrie mittels thermischer Solarenergie gedeckt werden. Dies stellt ein nicht zu vernachlässigendes Potential dar, auch wenn der Anteil dieser Branche am gesamten industriellen Wärmebedarf insgesamt eher gering ist.

Das **Holzgewerbe** verbraucht etwa 2 TWh pro Jahr in einem Temperaturbereich unterhalb von 300 °C. Die wichtigsten Sektoren dieser Branche hinsichtlich des thermischen Energieverbrauchs sind die Herstellung von Furnier-, Sperrholz-, Holzfaser- und Holzspanplatten sowie Säge-, Hobel- und Holzimprägnierwerke. Ein Großteil der Wärme (82 %) wird bei Temperaturen unter 100 °C für Trocknungsprozesse, Dämpfen oder Beizen benötigt.

Abbildung 2-4 zeigt das technische Potential der zuvor erläuterten Branchen. Neben der absoluten Höhe beinhaltet die Abbildung die Aufteilung auf unterschiedliche Temperaturbereiche, was für eine Beurteilung hinsichtlich der geeignetsten Branchen wichtig ist. In den Branchen *Fahrzeugbau*, *Metallverarbeitung*, *Maschinenbau* und *elektrische Ausrüstungen* basiert ein Großteil des Potentials auf der Bereitstellung von Warmwasser und Raumwärme. Die Chemie- und Lebensmittelindustrie haben mit Abstand das größte Potential. Aufgrund der weniger komplexen Prozesse erscheint die Lebensmittelindustrie allerdings als geeigneter für die Nutzung solarer Prozesswärme. Daher sprechen auch Taibi et al. (2012) dieser Branche das größte kurz- bis mittelfristige Potential zu.

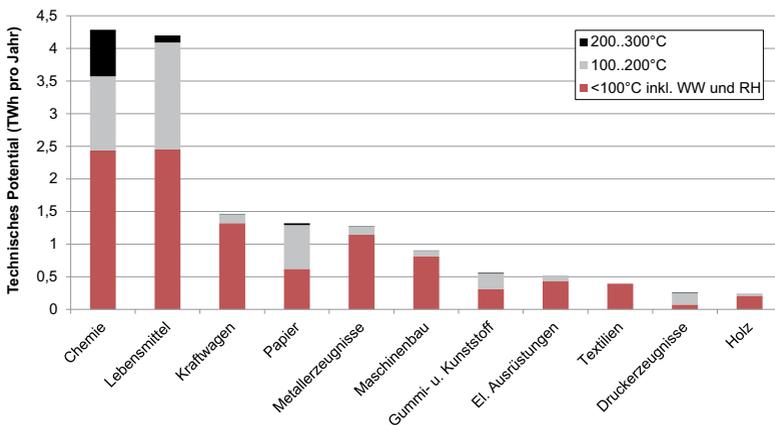


Abbildung 2-4: Technisches Potential ausgewählter Branchen unterteilt nach Temperaturniveau.

Die Analyse der geeigneten Branchen zeigt, dass sich ausgehend vom Temperaturniveau eine Vielzahl von Prozessen für die Einbindung thermischer Solarenergie eignet. Abbildung 2-5 gibt einen Überblick geeigneter Prozesse, die im Rahmen der Potentialstudie für Deutschland identifiziert und anhand vorangegangener Studien (Aidonis et al., 2005; Müller et al., 2004; Schweiger et al., 2001) verifiziert wurden

2. Potential und Anwendungsgebiete für solare Prozesswärme

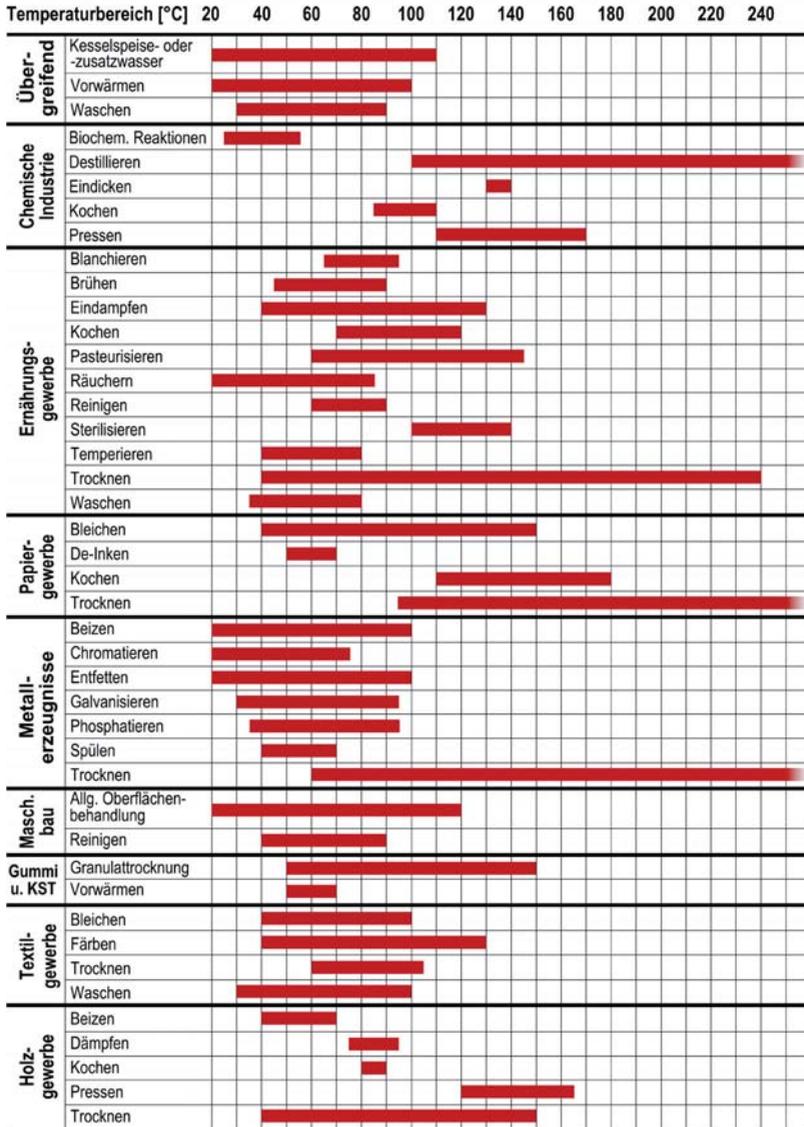


Abbildung 2-5: Geeignete Prozesse für die Integration solarer Wärme. Verifiziert mit (Aidonis et al., 2005; Müller et al., 2004; Schweiger et al., 2001).

3. Systematische Untersuchung des Brauwesens

Für eine schnelle und effektive Machbarkeitsabschätzung zur Nutzung solarer Prozesswärme ist es von elementarer Bedeutung, einen geeigneten Integrationspunkt für Solarwärme zu identifizieren, ohne zeitaufwendige Analysen des gesamten Produktionsprozesses durchführen zu müssen. Um die erforderlichen Kenntnisse für ein effektives Vorgehen zur Identifikation geeigneter Integrationspunkte und die hydraulische Einbindung zu gewinnen, erfolgte die detaillierte Analyse einer Branche mit Hilfe gezielter Fallstudien. Da aus den Untersuchungen zur Potentialermittlung für Deutschland (vgl. Kapitel 2.3) die Ernährungsindustrie als Branche mit der größten Relevanz hervorging, sollte die systematische Untersuchung anhand eines Wirtschaftszweiges aus dieser Branche erfolgen. Aufgrund des hohen Anteils thermischer Energie am gesamten Energiebedarf bei der Bierproduktion und vorangegangener Untersuchungen (Benz et al., 1999; Jordan et al., 2006; Staudacher und Buttinger, 2002), die der Nutzung solarer Prozesswärme in Brauereien ein hohes Potential zusprechen, wurde der Wirtschaftszweig „Herstellung von Bier“ für die Untersuchung ausgewählt. Durch die detaillierte und systematische Analyse des Brauwesens soll die Frage beantwortet werden, welche Möglichkeiten zur Einbindung thermischer Solarenergie in Brauereien gegeben sind und wie diese in kurzer Zeit identifiziert werden können.

Die Untersuchung der Branche erfolgte mit Hilfe von Fallstudien. Dafür wurden mehrere Brauereien verschiedener Größen ausgewählt und untersucht. Der Detaillierungsgrad dieser Untersuchungen reichte von kurzen Screenings bis hin zu sehr detaillierten Betrachtungen inklusive Konzepterstellung für die Einbindung solarer Prozesswärme. Die Fallstudie mit dem größten Detaillierungsgrad wurde bei der Hütt-Brauerei in Baunatal (Ausstoß ca. 61.000 hl pro Jahr) durchgeführt. Im Rahmen des vom Bundesumweltministerium geförderten Projektes SOPREN - Solare Prozesswärme und Energieeffizienz wurden die Produktionsprozesse der Brauerei detailliert analysiert, eine Energiebilanz erstellt und Effizienzmaßnahmen für unterschiedliche Prozesse und Nebeneinrichtungen identifiziert. Basierend auf diesen Erkenntnissen wurde die Würzekochung erneuert, die Wärmerückgewinnung im Sudhaus optimiert und eine Solaranlage in die Brauwasserreserve integriert (siehe hierzu auch Schmitt et al., 2012d). Eine weitere Fallstudie erfolgte im Rahmen des schweizerischen Forschungsprojekts „EINSTEIN goes Swiss“ bei der Großbrauerei Feldschlösschen in Rheinfelden, Schweiz (Marty et al., 2010). Die weiteren deutschen Brauereien, die an den Fallstudien teilgenommen haben, wurden aus Daten-

schutzgründen anonymisiert. Tabelle 3-1 zeigt die Jahresproduktion der Brauereien, die in die Untersuchung eingeflossen sind. Die Brauereien variieren neben dem Ausstoß auch stark in ihren Produktionszeiten und dem Produktspektrum.

Tabelle 3-1: Jahresproduktion der mittels Fallstudien untersuchten Brauereien.

Brauerei	Ausstoß [hl/a]
Brauerei A	15.000
Brauerei B	30.000
Brauerei C	40.000
Brauerei D (Hütt-Brauerei)	61.000
Brauerei E	300.000
Brauerei F	880.000
Brauerei G (Feldschlösschen)	1.800.000

Zur Vorbereitung und Durchführung der Fallstudien erfolgte eine umfangreiche Literaturrecherche. Neben den Standardwerken des Brauwesens (Kunze, 2007; Narziß, 2005; Petersen, 1993) wurden auch die besten verfügbaren Techniken zur Vermeidung und Verminderung von Umweltauswirkungen (BVT) im Brauwesen berücksichtigt (EIPPCB, 2006), um die notwendigen Informationen zu angewandten Prozessen und der verwendeten Anlagentechnik zu erfassen. Als Datenbasis zur Untersuchung des Energieverbrauchs und möglicher Einsparpotentiale wurden neben der bereits genannten Standardliteratur auch Studien zur nachhaltigen Produktion und Effizienzsteigerung herangezogen (Blümelhuber, 2008; EVA, 2001; Meyer, 2000; Thiemann und Bohm, 2009). Zum Verständnis der existierenden Anlagen und der Analyse zur Einbindung von Solarwärme wurden zusätzlich die technischen Spezifikationen der jeweiligen Maschinen unterschiedlicher Anlagenhersteller als Informationsquelle genutzt.

Das folgende Kapitel ist das Ergebnis der detaillierten Analyse des Wirtschaftszweiges „Herstellung von Bier“ anhand ausgewählter Fallstudien unter Berücksichtigung der genannten Literaturquellen. Das Kapitel beinhaltet einen Überblick der Produktionsabläufe in Brauereien, die Analyse des Wärmeverbrauchs und die gängigsten Möglichkeiten zur Wärmerückgewinnung. Anschließend werden alle Prozesse, die thermische Energie benötigen, beschrieben und Konzepte zur Integration der Solarwärme vorgestellt. Abschließend erfolgt eine zusammenfassende Betrachtung der ermittelten Integrationsmöglichkeiten. Die Inhalte dieses Kapitels wurden bereits im Rahmen des Branchenkonzepts solare Prozesswärme in Brauereien (Schmitt et al., 2012b) sowie in der stark gekürzten Form des Leitfadens zur Nutzung solarer Prozesswärme in Brauereien (Schmitt et al., 2012c) publiziert.

Zudem wurde ein Artikel bei einem peer-reviewed Journal eingereicht. Kleinere Auszüge des Kapitels wurden bereits in (Schmitt et al., 2008, 2009, 2010, 2011, 2012a) publiziert. Teile der Integrationsmöglichkeiten zur Nutzung solarer Prozesswärme in Brauereien wurden im Rahmen einer betreuten Diplomarbeit durch Dittmar (2012) erarbeitet.

3.1. Überblick der Produktionsabläufe in Brauereien

Die Herstellung von Bier erfolgt deutschlandweit in einer Vielzahl von Braustätten. Während Kleinst- bzw. Gasthausbrauereien mit sehr geringen Produktionsmengen den Großteil der Brauereien ausmachen (ca. 980 von 1.330), produzieren Großbrauereien (weniger als 5 % aller Betriebe) knapp drei Viertel der Gesamtjahreserzeugung von gut 95 Mio. hl Bier (Kelch, 2010). Die wichtigsten Rohstoffe für die Herstellung von Bier sind Wasser, Malz, Hopfen und Hefe. Neben diesen Rohstoffen benötigen Brauereien zur Produktion weitere Hilfsstoffe wie CO₂, Lauge und andere Chemikalien zur Reinigung sowie unterschiedliche Behältnisse zur Abfüllung des Bieres. Der Produktionsablauf innerhalb einer Brauerei lässt sich unabhängig von Größe und Sortiment in drei Abschnitte unterteilen. Diese sind nach Abbildung 3-1 das Sudhaus, der Gär- und Lagerkeller und die Abfüllhalle. Zudem gibt es sogenannte Nebeneinrichtungen, die zur Aufrechterhaltung der Produktion notwendig sind. Hierzu zählen die Medienversorgung (Wärme, Kälte, Druckluft, Chemikalien, etc.), Reinigungseinrichtungen, die Wasseraufbereitung sowie Lagerhallen und Bürogebäude.

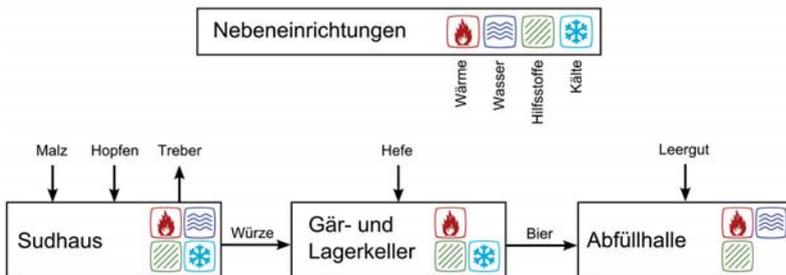


Abbildung 3-1: Produktionsabschnitte in Brauereien.

Die Grundlage des Brauprozesses ist die Herstellung der Würze, die im Sudhaus aus Wasser, Malz und Hopfen gewonnen wird. In diesem Produktionsabschnitt fällt mit dem Treber (dies sind unlösliche Malzbestandteile) der einzige nennenswerte Produktionsreststoff an. 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 (Mussatto et al., 2006). Die gewonnene Würze durchläuft im anschließenden Produktionsabschnitt 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, abgekühlt und auf einer konstant niedrigen Temperatur gehalten 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. Hierzu werden die jeweiligen Gebinde zuerst gereinigt und anschließend befüllt.

3.1.1. Sudhaus

Im Sudhaus findet der eigentliche Brauprozess statt, bei dem eine verzuckerte Flüssigkeit (Würze) hergestellt wird. Die einzelnen Prozessschritte der Würzeherstellung im Sudhaus sind in Abbildung 3-2 dargestellt.

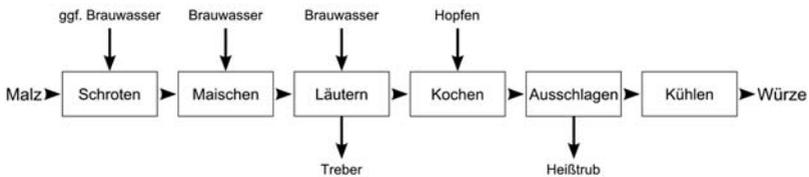


Abbildung 3-2: Produktionsablauf im Sudhaus.

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 kann nass, also unter Zugabe von Brauwasser, oder trocken erfolgen. Anschließend erfolgt das **Maischen**, bei dem die Inhaltsstoffe des Malzes in Lösung gebracht werden. Dazu wird das Malzschorot mit warmem Brauwasser vermischt und unter stetigem Umrühren über verschiedene Temperaturstufen erhitzt. Dabei werden an bestimmten Punkten sogenannte Eiweiß- und Verzuckerungspausen eingehalten. 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 bezeichnet man als Treber (Kunze, 2007).

Beim anschließenden **Läutern** erfolgt die Trennung von Würze und Treber. Dies geschieht in zwei Phasen. Zunächst erfolgt das Abziehen der gewonnenen Würze in einem Filtra-

tionsprozess. Dies wird als Abläutern der Vorderwürze bezeichnet. Anschließend wird der nach dem Filtrationsprozess in den Trebern noch verbleibende Extrakt durch heißes Wasser ausgewaschen. 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).

Dem Läutern folgt unter Hopfenzugabe die **Würzekochung**. Das Kochen der Würze hat den Zweck, Bestandteile des Hopfens in die Würze zu überführen, Eiweißstoffe auszuscheiden, die Würze zu konzentrieren und zu sterilisieren sowie bestimmte Aromabestandteile auszudampfen. Dazu wird die Würze nach dem Läutern auf Siedetemperatur erwärmt und solange gekocht, bis die gewünschten Reaktionen eintreten und die gewünschte Menge Wasser verdampft ist (dieses wird als Brüden bezeichnet). Basierend auf der traditionellen atmosphärischen Würzekochung mit einer Gesamtverdampfung von 8..12 % wurden verschiedene Verfahren entwickelt, um den Prozess hinsichtlich Energieverbrauch, Kochdauer oder thermischer Belastung der Würze zu optimieren (Willaert und Baron, 2004). In Abhängigkeit des verwendeten Kochverfahrens betragen Gesamtverdampfung und Kochzeit aktuell etwa 4..10 % des Würzevolumens bzw. 40..100 Minuten (Narziß et al., 2009).

Ist der gewünschte Stammwürzegehalt erreicht, endet der Kochvorgang und es beginnt das **Ausschlagen**. Dabei wird der beim Kochen entstehende Heißtrub entfernt. Dieser besteht aus nicht gelösten Hopfenbestandteilen und ausgefallenem Eiweiß und lässt sich durch Sedimentation oder Filtration entfernen.

Im nächsten Schritt wird die **Würze** auf Anstelltemperatur **abgekühlt**. 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 Plattenwärmeübertragern. Zur Kühlung der Würze wird kaltes Brauwasser verwendet, das sich dabei auf ca. 80 °C erwärmt und der Brauwasserreserve zugeführt wird. Beim nächsten Sud kann das heiße Brauwasser zum Einmaischen und Läutern verwendet werden (Hackensellner und Bühler, 2008). Nach der Würzekühlung verlässt die Würze das Sudhaus und gelangt in den Gär- und Lagerkeller.

3.1.2. 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 mit Hefe versetzt werden. Dieser Vorgang wird als **Anstellen** bezeichnet.

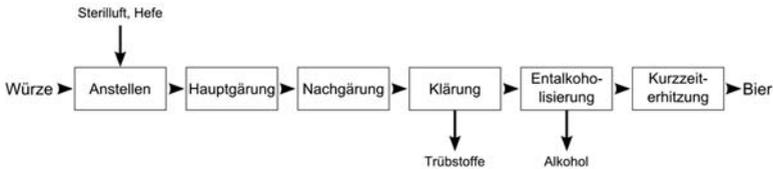


Abbildung 3-3: Produktionsablauf im Gär- und Lagerkeller.

Die **Hauptgärung** kann in offenen oder geschlossenen Gärbottichen oder Gärtanks erfolgen. Die Temperatur während der Gärung beträgt etwa 5..15 °C und dauert 6..10 Tage. Um das Bier während der Gärung auf einer konstant niedrigen Temperatur zu halten, haben die Gärbehältnisse in der Regel einen Mantel, durch den ein Kühlmittel gepumpt wird. Die anschließende **Nachgärung** dauert 2..16 Wochen bei Temperaturen um 0 °C.

Bevor das fertige Bier in Transportgebinde, Fässer, Flaschen oder Dosen gefüllt werden kann, wird das Bier „geklärt“ und „haltbar gemacht“. Bei der **Klärung** werden Trübstoffe (Eiweißgerbstoffe, Hopfenharze, Hefe oder bierverderbende Bakterien) abgeschieden. Die Klärung dient der 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 Membranrennverfahren erfolgen. Es besteht auch die Möglichkeit, die Alkoholbildung während der Gärung zu unterbrechen oder ganz zu unterbinden.

Die **Haltbarmachung** des Bieres kann sowohl im Gär- und Lagerkeller als auch in der Abfüllhalle angesiedelt sein. Im Gär- und Lagerkeller wird hauptsächlich die Kurzzeiterhitzung zur Haltbarmachung verwendet. Dabei 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).

3.1.3. Abfüllhalle

In der Abfüllhalle wird das Bier in unterschiedliche Gebinde gefüllt, die zuvor gereinigt werden müssen. In Deutschland werden dazu am häufigsten Mehrwegglasflaschen 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.



Abbildung 3-4: Produktionsablauf in der Abfüllhalle.

Zur **Reinigung** von Glasflaschen werden Flaschenwaschmaschinen verwendet, die über unterschiedliche Laugenbäder und Spritzungen (Wasser und Lauge) verfügen, die die Flaschen durchlaufen. Nach dem Reinigungsvorgang werden die Flaschen befüllt und bei Bedarf anschließend pasteurisiert. Zur Reinigung und Befüllung durchläuft das Keg eine Linie. Es erfolgt zunächst die Außenreinigung und Restentleerung, anschließend die Innenreinigung mit Wasser, Lauge, Säure und Dampf und abschließend die Kontrolle und Befüllung der Kegs.

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 arbeitende Tunnelpasteure eingesetzt – bei kleineren Leistungen wird das abgefüllte Bier chargenweise in Kammerpasteuren behandelt (Narziß, 2005).

3.1.4. Nebeneinrichtungen

Die Nebeneinrichtungen einer Brauerei umfassen alle zur Aufrechterhaltung der Produktion relevanten Bereiche. Hauptsächlich sind dies die 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 den Nebeneinrichtungen. Da sich diese Einrichtungen auch in anderen Branchen wiederfinden, werden die wichtigsten Bereiche nachfolgend erläutert.

Bereitstellung von Wärme

Brauereien verfügen in der Regel über ein zentrales Kesselhaus, in dem mittels Erdgas, Heizöl oder biogener Brennstoffe Heißwasser oder Dampf erzeugt und ausgehend vom Kesselhaus zu den jeweiligen Verbrauchern geleitet wird. In der Vergangenheit haben sich im Brauwesen Dampfsysteme gegenüber den Heißwassersystemen durchgesetzt (Krones, 2005). Häufig wird der im Kesselhaus bereitgestellte Dampf nicht nur für Prozesswärme, sondern auch für die Gebäudeheizung und Warmwasserbereitstellung verwendet. Die einzelnen Verbraucher werden meist indirekt über Wärmeübertrager beheizt (Spirax, 2006). Das entstehende Kondensat wird zum Kesselhaus zurückgeführt. Da 90 % aller Kondensatsysteme bei Umgebungsdruck betrieben werden und das Kondensat dadurch in Kontakt mit der Atmosphäre kommt, muss es vor der erneuten Nutzung im Dampferzeuger entgast werden. Offene Kondensatsysteme verzeichnen zudem einen kontinuierlichen Massenverlust von 5..15 %, der aus Entspannungsvorgängen in verschiedenen Teilen des Dampfnetzes resultiert. Zusätzliche Kondensatverluste können durch Prozesse entstehen, in denen Dampf stofflich genutzt wird (Sattler und Schibel, 2011). Die entstehenden Kondensatverluste werden durch Zusatzwasser ausgeglichen, das zunächst entsalzt und anschließend genau wie das Kondensat entgast wird. Alternativ zu dem beschriebenen offenen Kondensatsystem kann die Kondensatrückführung 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).

Bereitstellung von Kälte

An verschiedenen Stellen des Produktionsprozesses wird Kälte benötigt, u. a. zur Würzekühlung, Gärung, Drucktank- 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 über mehrere Kältekreisläufe, die mit unterschiedlichen Temperaturen die jeweiligen Verbraucher der Brauerei mit Kälte versorgen. Aufgrund der unterschiedlichen Temperaturanforderungen verfügen moderne Kälteanlagen häufig über mehrere Verdampfer (Kunze, 2007).

Bereitstellung von Druckluft

Prinzipiell finden sich in Brauereien zwei Arten von Druckluft mit unterschiedlichen Qualitätsanforderungen: 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. Als Richtwert kann ein Verbrauch von 4..10 m³/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 einen Luftfilter, Verdichter, Kühler und Trockner sowie einen Druckbehälter der als Puffer dient (Kunze, 2007).

Wasseraufbereitung

Wasser wird in einer Brauerei als Rohstoff, Arbeits- und Hilfsmittel genutzt 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, das die höchsten Qualitätsanforderungen erfüllt 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 vielerorts 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, erfolgt in den meisten Fällen eine Enthärtung und Entgasung des Wassers (Petersen, 1993; Walter, 2005).

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. Dies kann automatisiert oder manuell erfolgen. Bei der automatisierten Reinigung (bezeichnet als CIP - Cleaning in Place) werden im Anschluss an einen Produktionszyklus alle Anlagenteile (Tanks, Sudkessel, Wärmeübertrager, Rohrleitungen, Füller, etc.) mit einer Reinigungslösung gespült, ohne dass die Anlage zerlegt werden muss. Grundsätzlich kann eine zentrale CIP-Anlage für alle Anlagenteile der Brauerei verwendet werden. Es können jedoch auch mehrere CIP-Anlagen für unterschiedliche Bereiche vorhanden sein (EIPPCB, 2006; Bamforth, 2006).

3.2. Analyse des Wärmeverbrauchs

Im Jahr 2009 lag der Endenergieverbrauch aller deutschen Brauereien bei etwa 3,8 TWh. Die Aufteilung des Energieverbrauchs auf die einzelnen Energieträger in Abbildung 3-5 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).

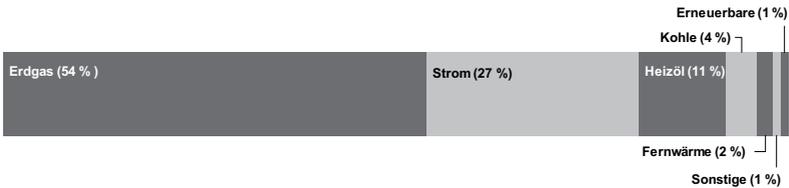


Abbildung 3-5: Anteil der im Brauwesen verwendeten Energieträger (DeStatis, 2010).

Nach Thiemann und Bohm (2009) werden durchschnittlich rund drei Viertel der in Brauereien verbrauchten Endenergie zur Bereitstellung von Prozesswärme, Raumwärme und Warmwasser aufgewendet. Aufgrund der Preisstruktur der einzelnen Energieträger nehmen Strom und Wärme hinsichtlich der Energiekosten jedoch in etwa den gleichen Stellenwert ein. In Abhängigkeit von Betriebsgröße, Effizienzstandard, Produktionsweise, etc. beträgt der Anteil der Energiekosten an den Produktionskosten etwa 5..10 % (BKWK, 2010).

Neben dem gesamten Wärmeverbrauch einer Brauerei sind die Anteile der einzelnen Produktionsabschnitte von Interesse. Das Sudhaus hat dabei den größten Anteil, gefolgt von der Abfüllhalle. Für den tatsächlichen Anteil finden sich in der Literatur unterschiedliche Werte. Eine mögliche Verteilung des Wärmeverbrauchs zeigt Abbildung 3-6.



Abbildung 3-6: Anteil der Produktionseinrichtungen am Wärmeverbrauch nach Kunze (2007).

Als Grundlage dienen die Durchschnittswerte für Brauereien mit einem Ausstoß von 250.000 hl pro Jahr nach Kunze (2007). Vergleicht man diese Anteile mit den Werten von Aidonis et al. (2005), Blümelhuber (2008) oder Petersen (1993) zeigen sich auch in Ab-

hängigkeit der Betriebsgröße nur geringfügige Abweichungen. Lediglich Lewis und Bamforth (2006) geben einen durchschnittlichen Verbrauch für die Gebäudeheizung mit 10 % an und veranschlagen zusätzliche 20 % für die Nebeneinrichtungen.

Bei dieser Art der Aufteilung wird deutlich, dass unter den Punkt „restlicher Betrieb“ eine Vielzahl von Verbrauchern wie Raum- und Lagerhallenheizung, CIP-Reinigung sowie die möglicherweise vorhandene Entalkoholisierung, Kurzzeiterhitzung oder Wasseraufbereitung zusammengefasst werden. Demnach beinhaltet dieser Abschnitt die größte Unsicherheit bei der Aufteilung des Wärmeverbrauchs. Gerade bei kleinen Brauereien kann der Anteil des restlichen Betriebs signifikant höher ausfallen. So zeigte beispielsweise die erstellte Energiebilanz bei Brauerei D, dass lediglich knapp 40 % des Wärmeverbrauchs den Produktionsbereichen Sudhaus und Abfüllhalle zugeordnet werden konnten. Hier hatte bereits die Gebäude- und Lagerhallenheizung einen Anteil von 20 % am gesamten Wärmeverbrauch.

Um den Wärmebedarf unterschiedlicher Brauereien vergleichen zu können, wird der Gesamtwärmeverbrauch auf die Ausstoßmenge in Hektoliter (hl) bezogen. Diese spezifischen Wärmeverbräuche erlauben einen Vergleich mit Benchmarks aus der Literatur. Dadurch kann die Höhe des Wärmeverbrauchs eingeordnet und ggf. Produktionsbereiche mit Handlungsbedarf identifiziert werden. Bei der Verwendung von Benchmarks ist zu beachten, auf welche Brauereigröße sie sich beziehen und unter welchen Rahmenbedingungen sie ermittelt wurden (Fallstudien, Befragung, etc.). Basierend auf Art und Zeitpunkt der Datenerfassung, Anzahl, Größe und Struktur der befragten Unternehmen sowie der Exaktheit der von den Brauereien angegebenen Daten können Benchmarks aus unterschiedlichen Quellen deutlich voneinander abweichen.

Bei der Analyse verfügbarer Benchmarks für Brauereien zeigte sich, dass der spezifische Wärmebedarf mit steigendem Ausstoß signifikant sinkt. Gründe hierfür sind der bei kleinen Brauereien häufiger anzutreffende diskontinuierliche Braubetrieb und ein damit verbundener schlechterer Nutzungsgrad der Wärmerückgewinnung sowie historisch gewachsene Strukturen, ein geringerer Automationsgrad und weniger Transparenz im Wärmeverbrauch. Bei Quellen, die Benchmarks über einen längeren Zeitraum beinhalten, zeigt sich ein Rückgang des spezifischen Wärmebedarfs in Brauereien. Dies liegt hauptsächlich an der Nutzung neuer, energiesparender Verfahren und zusätzlichen Maßnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz. Die Analyse der Werte zum spezifischen Wärmeverbrauch in Brauereien zeigt, dass den unterschiedlichen Brauereigrößen nur sehr schwer feste Benchmarks zugeordnet werden können. Da sich vor allem kleinere Brauereien sehr stark voneinander unterscheiden können, werden immer mehr oder weniger große Abweichungen zu den gelisteten Verbrauchswerten auftreten können. Diese sind in der technischen Ausstattung, den umgesetzten Effizienzmaßnahmen, der verwendeten Wärme-

rückgewinnung, der Produktpalette, dem Ausstoß und dem Anteil an alkoholfreien Getränken sowie dem Anteil der unterschiedlichen Gebinde begründet.

Tabelle 3-2 beinhaltet einige der erhobenen Benchmarks und zeigt sowohl die deutliche Abnahme des spezifischen Wärmeverbrauchs mit steigender Betriebsgröße als auch die großen Abweichungen der einzelnen Quellen untereinander. Die Werte der einzelnen Kategorien sind die Durchschnittswerte der jeweiligen Erhebung. Die Spalte „Ø“ beinhaltet größenunabhängige Angaben, die in den Quellen keiner Brauereigröße zugeordnet wurden.

Tabelle 3-2: Spezifische Wärmeverbrauchswerte von Brauereien nach Betriebsgröße in kWh/hl aus unterschiedlichen Quellen.

Quelle	Ausstoß in 1.000 hl pro Jahr					
	bis 20	20..50	50..100	100..500	über 500	Ø
(Petersen, 1993)	-	85,2	60,9	64,0	56,5	69,4..98,6
(Sattler, 2000)	56,0	52,0	47,0	33,0	25,0	16,7..74,7
(Schu et al., 2001)	62,8	58,7	53,0	42,9	28,5	48,8
(EIPPCB, 2006)	-	-	-	-	24..34	27,8..55,6
(Kunze, 2007)	75,1	-	-	57,6	-	-
(Thiemann u. Bohm, 2009)	-	-	46,1	-	27,3	-

Die durchgeführten Fallstudien bestätigen sowohl die Abnahme des spezifischen Energiebedarfs mit steigendem Produktionsvolumen als auch die möglichen Abweichungen vom jeweiligen Benchmark nach oben und unten. Die im Rahmen der Fallstudien untersuchte Brauerei B lag beispielsweise mit einem Wert von ca. 53 kWh/hl im Durchschnitt der entsprechenden Kategorie von 20.000..50.000 hl/Jahr. Der spezifische Wärmeverbrauch von Brauerei D lag mit 65,5 kWh/hl über den durchschnittlichen Verbrauchswerten der Kategorie 50.000..100.000 hl/Jahr. Sollten die im Rahmen der Fallstudien identifizierten unnötig hohen Wärmeverbräuche der Nebeneinrichtungen minimiert werden, würde sich allerdings ein überdurchschnittlich guter Benchmark für diese Brauerei ergeben.

Zwei positive Beispiele sind die Brauereien E und G. Brauerei E liegt mit einem spezifischen Verbrauch von etwa 24 kWh/hl eher im Bereich der nächst größeren Kategorie (über 500.000 hl/Jahr). Brauerei G liegt mit einem Wert von 21,4 kWh/hl bereits unter dem Durchschnitt ihrer Kategorie. Berücksichtigt man zusätzlich, dass 3,5 kWh/hl durch Biogas aus der Vorklärung anfallender Abwässer und 2,2 kWh/hl durch den bei der Entalkoholisierung gewonnenen Alkohol bereitgestellt werden, reduziert sich der fossil bereitgestellte Teil auf 15,6 kWh/hl.

3.3. Wärmerückgewinnungsmöglichkeiten

In der Regel verfügt jede Brauerei im Sudhaus über zwei Einrichtungen zur Wärmerückgewinnung. Die Abkühlung der Würze nach dem Kochen wird gewährleistet, indem sie in einem Plattenwärmeübertrager im Gegenstrom zu kaltem Brauwasser geführt wird, das 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.

3.3.1. Würzekochung

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

Warmwasserbereitstellung

Prinzipiell beinhalten alle Varianten der Wärmerückgewinnung während der Würzekochung die Möglichkeit der Bereitstellung von Warmwasser, da immer Brüdenkondensat anfällt, das mit Hilfe eines Wärmeübertragers 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. Abschnitt 3.1.4) 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 durch die Rohre des liegenden Rohrbündels. In Folge der Kondensation des Brüdens im Mantelraum erwärmt sich das Wasser in Abhängigkeit der Effizienz des Wärmeübertragers auf ca. 80..98 °C. Die absolute Menge des erwärmten Brauwassers hängt dabei von der Gesamtverdampfung ab. Das entstehende Brüdenkondensat kann anschließend einem weiteren Plattenwärmeübertrager zugeführt werden, wo es im Gegenstrom zu kaltem Brauwasser auf etwa 30 °C abgekühlt und in die Kanalisation eingeleitet wird. Das dabei erwärmte Brauwasser wird ebenfalls der Warmwasserreserve zugeführt (Lenz und Burlein, 2000).

Energiespeicher

Die Verwendung eines sogenannten Energiespeichers zur Wärmerückgewinnung hat das Ziel, die beim Kochen entstehende Abwärme auf einem möglichst hohen Temperaturniveau zu nutzen. Die gespeicherte Energie wird meist beim nächsten Sud zur Aufheizung der Läuterwürze verwendet. Eine Beheizung der Maischepfanne ist ebenfalls möglich, wenn die Pfanne über eine ausreichend große Wärmeübertragerfläche verfügt (Tokos et al., 2010). Während des Kochens wird Wasser aus dem unteren Teil des Energiespeichers mit ca. 78 °C in den PfaDuKo 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 Plattenwärmeübertragers während des Umpumpens in die Würzepfanne aufzuheizen. Bereits ab einer Gesamtverdampfung von 4,5 % (bezogen auf die Ausschlagwürze) reicht die rückgewonnene Energie aus, um die gesamte Würze auf fast 100 °C vorzuwärmen (Scheller et al., 2008). Die restliche Erwärmung auf Kochtemperatur erfolgt über die konventionelle Anlagentechnik der Würzekochung. 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.

Brüdenverdichtung

Das seit den 80er Jahren eingesetzte Verfahren der Brüdenverdichtung geht auf den Grundgedanken zurück, thermische Energie mit Hilfe eines thermodynamischen Kreisprozesses von einem niedrigen Temperaturniveau auf ein höheres zu bringen. Damit sollen die bei der Kochung entstehenden Brüden zur Beheizung der Pfanne genutzt werden. Die Verdichtung kann thermisch oder mechanisch erfolgen, wobei heute fast ausschließlich thermische Verdichter zum Einsatz kommen. Bei der thermischen Brüdenverdichtung wird zu Beginn des Kochvorgangs ein Außenkocher mit herkömmlichem Frischdampf beheizt. Sobald die Verdampfung der Würze einsetzt, werden die entstehenden Brüden von einem 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 kann die verbleibende sensible Wärme rückgewonnen werden, bevor das Brüdenkondensat dem Abwasser zugeführt wird (Hackensellner und Bühler, 2008; Ziemann, 2008).

Gegenüberstellung

Jede Brauerei sollte über eine der zuvor genannten Möglichkeiten der Wärmerückgewinnung während der Würzekochung verfügen. Häufig wird ein PfaDuKo zur Warmwasserbereitstellung eingesetzt. 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 höchstmöglichen Temperaturniveau stattfindet. Zur Bereitstellung von Brauwasser können auch Abwärmequellen mit einem niedrigeren Temperaturniveau (Flaschenwaschmaschine, Kompressoren, etc.) oder regenerative Quellen wie Solarenergie genutzt werden.

3.3.2. Würzekühlung

Die zweite standardmäßige Wärmerückgewinnung in Brauereien ist die Würzekühlung. Die Würze muss nach der Heißtrubabscheidung von etwa 90..98 °C auf Anstelltemperatur (5..18 °C) herabgekühlt werden. Dazu werden ein- oder zweistufige Plattenwärmeübertrager verwendet. Bei der einstufigen Würzekühlung wird die Würze mit Brauwasser gekühlt, das zuvor über eine Kälteanlage von Kaltwassertemperatur auf 2..5 °C herabgekühlt 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 Kältemittel gekühlt. Auch hierbei wird warmes Brauwasser mit min. 80 °C bereitgestellt. In der Regel wird der Warmwasserbedarf für Einmaischen und Läutern durch die Würzekühlung gedeckt (Hackensellner und Bühler, 2008). Die Würzekühlung lässt sich zudem mit dem zuvor erläuterten Energiespeicher kombinieren. Dabei wird während der Kochung zunächst die Verdampfungswärme des Brüdens in den Energiespeicher eingespeist. Zusätzlich entzieht der Würzekühler der heißen Würze in der ersten Stufe Wärme auf hohem Temperaturniveau, die 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 Wärmeübertragers wird die Würze konventionell über gekühltes Brauwasser abgekühlt (Krones, 2011).

3.3.3. Nebeneinrichtungen

Auch bei den Nebeneinrichtungen können Maßnahmen zur Wärmerückgewinnung umgesetzt werden. Heißwasser- und Dampfkessel sollten prinzipiell über einen Economiser verfügen, der das Speisewasser vor dem Eintritt in den Kessel erwärmt. Durch das Abkühlen des Abgases im Gegenstrom zum Speisewasser lassen sich Effizienzgewinne von 4..5 Prozentpunkten erzielen (Sattler und Schibel, 2011).

Bei der Bereitstellung von Kälte und Druckluft kann ebenfalls Abwärme genutzt werden. Bei der Kälteerzeugung liegen die nutzbaren Temperaturen oft bei über 60 °C am Verdichter und etwa 25..30 °C am Kondensator (EA NRW, 2010). Bei der Bereitstellung von Druckluft kann unter optimalen Bedingungen bis zu 90 % der Kompressorleistung in Form von Abwärme rückgewonnen werden. Abhängig von der Kompressorbauart liegt das nutzbare Temperaturniveau bei 50..90 °C (Atlas Copco, 2009).

3.4. Geeignete Prozesse zur Einbindung von Solarwärme

Nachfolgend werden die Prozesse der Bierproduktion, die sich für die Einbindung thermischer Solarenergie prinzipiell eignen, detailliert beschrieben und Integrationskonzepte zur solaren Beheizung vorgestellt. Dabei liegt der Fokus auf der Einbindung der Solarwärme in den vorhandenen Produktionsprozess unter Berücksichtigung der konventionellen Beheizung. Dabei werden keine detaillierten Angaben zur Konfiguration und Auslegung einer Solaranlage gemacht, da dies von den jeweiligen Gegebenheiten vor Ort (Strahlungsangebot, Wärmebedarf, Lastprofil, geeignete Dachflächen, etc.) abhängt. Die Schnittstelle für die nachfolgenden Ausführungen ist daher der Wärmeübertrager, der die Solarwärme in den Prozess einspeist. 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. Einmaischen, Läutern, Filtersterilisation oder manuelle Reinigung), sind in Abschnitt 3.4.2 zusammengefasst.

3.4.1. Wasserentgasung

In Abhängigkeit der Qualität des zur Verfügung stehenden Wassers (Stadt-, Grund- oder Brunnenwasser) kann eine Aufbereitung erforderlich sein, um die Qualitätsanforderungen des Brauwassers einzuhalten. In der Regel werden Wasserentgasungsanlagen verwendet, um gelöste Gase wie Sauerstoff und Stickstoff zu entfernen. In der Praxis erfolgt dies häufig mit Kolonnen. Dabei wird das Wasser vor dem Entgasungsprozess auf 70..95 °C erwärmt, wozu meist Mehrzonen-Wärmeübertrager verwendet werden (vgl. Integrationskonzept in Abbildung 3-7). Die erste Beheizungsstufe erfolgt rekuperativ durch das bereits entgaste Wasser. Danach wird das Wasser üblicherweise durch Dampf oder Heißwasser auf die Entgasungstemperatur gebracht. Anschließend wird das Wasser von oben in eine Kolonne gegeben. Diese enthält eine Füllkörperpackung, die die Oberfläche des durchrieselnden Wassers um ein Vielfaches erhöht. Ein Strippgas, meist CO₂, wird im Gegenstrom von unten nach oben durch die Kolonne geleitet und nimmt die gelösten Gase auf. Das entgaste Wasser gelangt vom Kolonnenunterteil zurück in den Mehrzonen-Wärmeübertrager und durchläuft nach dem rekuperativen Teil ggf. auch eine Kühlstufe (Corosys, 2011).

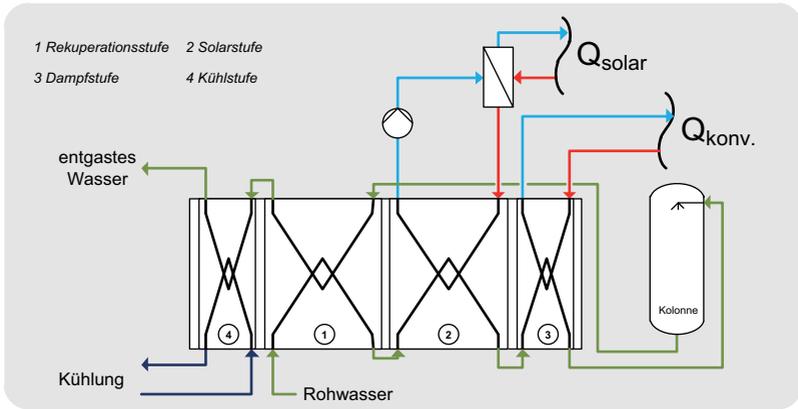


Abbildung 3-7: Integrationskonzept zur solaren Beheizung einer Wasserentgasung mit Mehrzonen-Wärmeübertrager und interner Heizstufe.

Zur Einbindung von Solarwärme in den Entgasungsprozess muss in dem Mehrzonen-Wärmeübertrager gemäß Abbildung 3-7 eine zusätzliche Heizstufe (2) zwischen der rekuperativen (1) und dampfbeheizten (3) Zone integriert werden. Prinzipiell handelt es sich bei den verwendeten Mehrzonen-Wärmeübertragern um geschraubte Modelle, deren Gestelle eine Plattenerweiterung zulassen. Dazu kann ein Teil der gedichteten Platten des Mehrzonen-Wärmeübertragers entfernt und nach Einbringung der zusätzlichen solaren Heizstufe wieder eingesetzt werden. Ist eine zusätzliche Plattenaufnahme nicht möglich, ist die Einbringung einer Anschlussplatte zu prüfen (vgl. Kurzzeiterhitzung in Abschnitt 3.4.5). Die Anschlussplatte bietet die Möglichkeit einen externen solarbeheizten Wärmeübertrager an den Mehrzonen-Wärmeübertrager anzuschließen. Der Anschluss eines externen Wärmeübertragers ohne eine zusätzliche Anschlussplatte ist nicht möglich, da die benötigten Anschlüsse des Mehrzonen-Wärmeübertragers nicht zugänglich sind.

Für den Fall, dass eine Entgasungsstation über eine externe Heizstufe verfügt, kann die Einbindung von Solarwärme verhältnismäßig einfach an der zugänglichen Rohrleitung zwischen rekuperativer Vorwärmstufe und konventioneller Heizstufe erfolgen.

3.4.2. Warmwasserbereitstellung

Zusätzlich zum Warmwasser, das für die Prozesse Maischen und Läutern benötigt wird (die Menge wird i.d.R. durch Wärmerückgewinnung beim Würzekühlen bereitgestellt), verbraucht eine Brauerei zusätzliches Warmwasser für Sterilisations- und Reinigungsaufgaben. Dieser sogenannte Betriebswarmwasserbedarf schwankt sehr stark (zwischen

0,2..1,5 hl/hl Ausschlagwürze). Die Gründe hierfür liegen hauptsächlich in der Art der Wärmerückgewinnung während der Würzekochung (Warmwasserbereitstellung, Energiespeicher oder Brüdenverdichtung). Die Bereitstellung von Warmwasser erfolgt häufig zentral. Das ggf. aus der Wasseraufbereitung kommende Wasser wird auf die benötigte Temperatur erwärmt (meist 80..90 °C) und gespeichert. Bei den jeweiligen Verbrauchern wird die Temperatur durch die Beimischung von kaltem Wasser reduziert. 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 nach Heyse (2000) in der Regel über eine konventionelle Nachheizung, einen Kaltwasseranschluss und je nach Konfiguration auch über einen Warmwasserzulauf von der Würzekühlung und die Möglichkeit der Aufheizung über den Pfannendunstkondensator. Da Warmwasserreserven unterschiedliche Konfigurationen aufweisen können, enthalten die nachfolgenden Konzepte zur Einbindung von Solarwärme in die Warmwasserreserve zur Vereinfachung nur einen Speicher. Besteht die Reserve 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 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 3-8). Diese Art der 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 Wärmeübertrager ausschließlich zur Aufheizung des eingespeisten Kaltwassers zu nutzen, kann zusätzlich auch eine Beheizung des Speichers erfolgen (rechte Variante in Abbildung 3-8). Dabei ist jedoch zu beachten, dass die Solaranlage in diesem Fall auf einem deutlich höheren Temperaturniveau arbeitet, da die Speicher meist mit Warmwasser aus der Wärmerückgewinnung gespeist werden.

Da Abnahmen und Einspeisungen in verhältnismäßig kurzer Zeit und mit sehr großen Volumenströmen erfolgen, stellt sich keine oder nur eine sehr geringe Temperaturschichtung ein. Durch die speicherinterne Vermischung von Kalt- und Warmwasser aus der Wärmerückgewinnung (ca. 70..80 °C) resultiert eine ausschließliche solare Nachheizung des Speichers in einem geringeren Solarertrag.

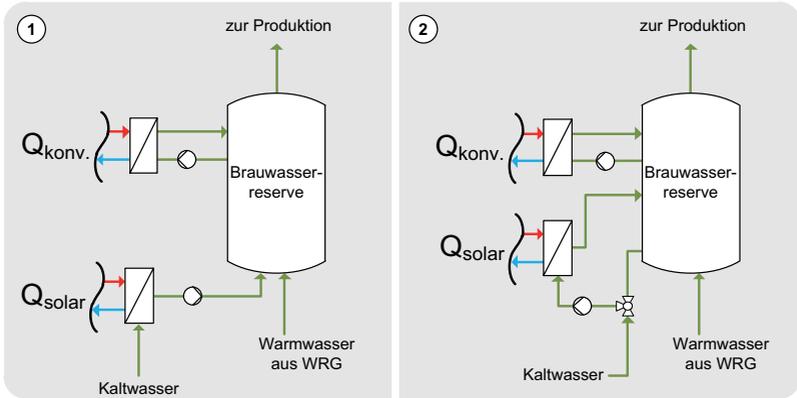


Abbildung 3-8: Integrationskonzept zur Einbindung solarer Prozesswärme in die Warmwasserversorgung.

Der Aufwand des Umbaus für Variante 1 ist relativ gering, da der solare Wärmeübertrager lediglich in den vorhandenen Zulauf eingebunden wird und darüber hinaus keine Veränderung der bestehenden Warmwasserreserve erfolgen muss. Variante 2 ist im Vergleich etwas aufwendiger zu realisieren.

3.4.3. Maischen

Beim Maischen wird Malzschrot mit Brauwasser vermischt und anschließend erhitzt. Das Brauwasser hat zu Beginn eine Temperatur von 35..63 °C und wird normalerweise durch die Wärmerückgewinnung beim Würzekühlen bereitgestellt. Beim Maischen unterscheidet man zwei unterschiedliche Prinzipien der Temperaturerhöhung: das Infusionsverfahren und das Dekoktionsverfahren. Beim Infusionsverfahren wird die gesamte Maische unter Einhaltung bestimmter Pausen erwärmt. Beim Dekoktionsverfahren erreicht man die Temperaturerhöhung der Gesamtmaische, indem man einen Teil der Maische (Kochmaische) abtrennt, kocht und anschließend zur Restmaische zurückpumpt. Daher benötigt man für das Dekoktionsverfahren zwei beheizbare Gefäße und für das Infusionsverfahren nur eins. Die maximale Temperatur beim Maischen liegt bei etwa 78 °C (Kunze, 2007).

Die Beheizung der Maischpfannen erfolgt häufig mittels Dampf über angeschweißte Halbröhre an der Seite und am Pfannenboden. Eine weitere, jedoch selten praktizierte Möglichkeit ist die Beheizung durch direkte Dampfinjektion (Kunze, 2007). Für die Beheizung werden nach Bamforth (2003) typischerweise Aufheizraten von mindestens 1 K/min

gefordert. 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 kleinere Aufheizraten akzeptabel.

Häufig ist die wärmeübertragende Fläche bestehender Maischpfannen für die Beheizung mit Dampf oder Heißwasser ausgelegt, was für die Einbindung von Solarwärme nachteilig ist. Um Maischpfannen mit Heizmedien betreiben zu können, die eine niedrigere Vorlauf-temperatur haben, können konventionelle Pfannen ohne Umbaumaßnahmen nicht verwendet werden. In diesem Fall müssen zusätzliche Heizflächen im Innenraum der Pfanne angebracht werden. Dazu werden sogenannte Dimple Plates verwendet, die über eine Struktur verfügen, die einem Golfball ähnelt. Dadurch kann Warmwasser mit 95 °C, z. B. aus dem Energiespeicher, einem BHKW oder einer Solaranlage zur Beheizung der Maischpfanne verwendet werden (Scheller, 2011).

Mittlerweile sind Maischpfannen erhältlich, deren komplette Gehäusewandung aus dieser Struktur besteht (Wasmuth, 2005). Die geforderte Vorlauf-temperatur des Heizmediums liegt bei diesen Pfannen in der Regel bei 95 °C. Da die Maische allerdings bei höchstens 78 °C gehalten wird und gerade zu Beginn des Maischprozesses eine deutlich niedrigere Temperatur aufweist, können zu Beginn des Maischens Rücklauf-temperaturen deutlich unterhalb von 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 3-9 zeigt eine Möglichkeit der solarthermischen Einbindung bei einer geeigneten Maischpfanne.

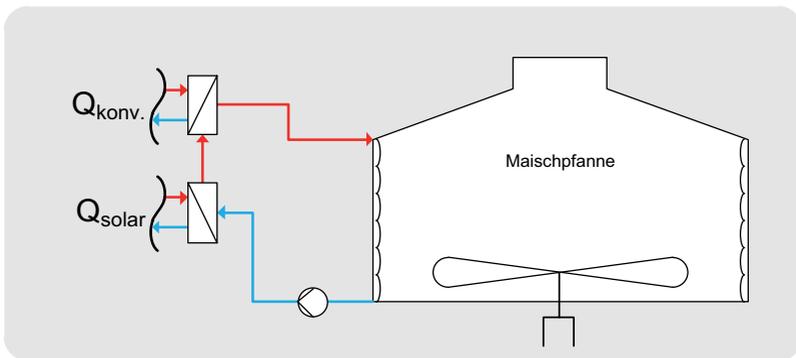


Abbildung 3-9: Integrationskonzept zur Einbindung von Solarwärme in den Rücklauf einer mittels Heißwasser beheizten Maischpfanne.

Die Pfanne wird mit einem Warmwasserkreis beheizt, der über zwei seriell verschaltete Wärmeübertrager zunächst mit Solarwärme und anschließend konventionell auf die notwendige Temperatur gebracht wird. Durch die Reihenschaltung wird gewährleistet, dass auch bei unzureichender solarer Erwärmung die geforderten Temperaturen erreicht werden.

3.4.4. Kochen

Zur Würzekochung haben sich in der Vergangenheit verschiedene System am Markt etabliert. Basierend auf den jeweiligen Anforderungen, die an die Würzekochung gestellt werden, hat jeder Anlagenbauer seine bevorzugte Lösung. Dies sind hauptsächlich klassische Innen- oder Außenkocher, dynamische Niederdruckkochung, Dünnpfilm- oder Vakuumverdampfung (Hertel et al., 2008).

Ein **Innenkocher** ist ein stehendes Rohrbündel in einem zylindrischen Mantel, das in der Mitte der Sudpfanne angebracht ist. Die sich in den Rohren aufheizende Würze strömt nach oben, durchläuft einen Staukonuns und wird über einen Verteilschirm gleichmäßig in der Sudpfanne verteilt. Der dabei entstehende Brüden wird abgezogen und kondensiert oder verdichtet (Hackensellner, 1998). Bei der Verwendung eines **Außenkochers** wird die Würze aus der Pfanne abgezogen, in dem außenliegenden Rohrbündel erwärmt und wieder in die Pfanne gepumpt. Dabei wird der Pfanneninhalt 6..8 Mal pro Stunde durch den Außenkocher geführt. Die Verwendung von Außenkochern ermöglicht die abwechselnde Beheizung von mehreren Sudpfannen (Hertel et al., 2008). Bei der **Niederdruckkochung** wird die Würzepfanne bei leichtem Überdruck betrieben, sodass die Würze bei ca. 102..104 °C kocht. Bei der daraus entwickelten dynamischen Niederdruckkochung erfolgt nach einer ersten Kochphase unter Normaldruck ein periodischer Druckaufbau und -abbau. Für dieses Kochverfahren werden meistens Innenkocher verwendet (Priest und Stewart, 2006). Bei der **Dünnpfilmverdampfung** wird die Würze nach dem Abläutern in einen Behälter mit einer konischen Heizfläche gepumpt. Auch hierbei wird die gesamte Würze mehrfach während des Kochvorgangs umgewälzt (Mezger, 2006). Die **Vakuumverdampfung** hat den Hintergrund, dass die Würze lediglich zum Entfernen des überschüssigen Wassers und zum Austreiben unerwünschter Aromastoffe sieden muss. Dazu gibt es mehrere Systeme, bei denen die Würze während der ganzen Zeit, gegen Ende des Kochvorgangs oder nach der Heißtrubabscheidung über einen Entspannungsverdampfer geführt wird (Mezger, 2006).

Zur Beheizung der verschiedenen Kochverfahren werden Satttdampf mit 125..145 °C, verdichteter Brüdenndampf mit 107..110 °C oder Heißwasser mit 130..150 °C verwendet (Hackensellner und Bühler, 2008).

Die verschiedenen Kochverfahren unterscheiden sich neben ihrem spezifischen Energieverbrauch vor allem in der verwendeten Anlagentechnik und der möglichen Abwärmennutzung, was bedeutende Auswirkungen auf die Einbindung von Solarwärme haben kann. Die unterschiedlichen Möglichkeiten der Abwärmennutzung während der Würzekochung können dazu führen, dass der Warmwasserhaushalt von Brauerei zu Brauerei stark variiert und die Integrationsmöglichkeit zur solaren Brauwasserbereitstellung nicht immer umgesetzt werden kann. Die verwendete Systemtechnik zur Würzekochung hingegen hat Auswirkungen auf die Nutzung von Solarwärme für den Kochprozess. Für die Einbindung von Solarwärme eignen sich prinzipiell lediglich Systeme mit Außenkochern, da bei diesen Systemen die Würze aus der Sudpfanne abgezogen wird und sich dadurch die Möglichkeit ergibt, einen solarbeheizten Wärmeübertrager vorzuschalten. Abbildung 3-10 zeigt die Integration von Solarwärme bei der Würzekochung am Beispiel eines Vakuumkochverfahrens.

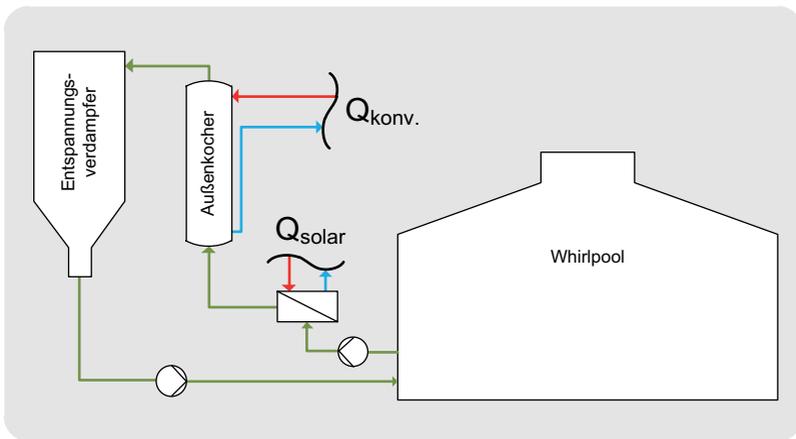


Abbildung 3-10: Integrationskonzept zur Nutzung solarer Prozesswärme bei einem Vakuumkochverfahren mit Außenkocher.

Vor Beginn der Kochung wird die Würze in den Whirlpool gepumpt, der während des Kochens als Puffer dient. In der ersten Phase der Würzekochung wird konventionell über den Außenkocher gekocht. Dabei wird die Würze aus dem Whirlpool abgezogen, über den vorgeschalteten Solarwärmeübertrager aufgeheizt und bei Bedarf im Außenkocher mittels Dampf nachgeheizt. Anschließend gelangt die Würze in den Entspannungsverdampfer und von dort aus erneut in den Whirlpool.

3.4.5. Kurzzeiterhitzung

Die im Gär- und Lagerkeller angesiedelte Kurzzeiterhitzung (KZE) ähnelt hinsichtlich der Integration von Solarwärme sehr stark der zuvor beschriebenen Wasserentgasung, da auch für die Kurzzeiterhitzung üblicherweise Mehrzonen-Wärmeübertrager verwendet werden. Dabei wird das eintretende Bier in der ersten Zone rekuperativ vorgewärmt (vgl. Integrationskonzept in Abbildung 3-11). In der zweiten Zone wird das Bier durch einen Warmwasserzwischenkreis auf Pasteurisationstemperatur erwärmt. Dieser Warmwasserzwischenkreis dient der schonenden Bieraufheizung und wird mit Dampf oder Heißwasser beheizt. Der zur Aufheizung des Wassers erforderliche Wärmeübertrager ist in Abhängigkeit des Herstellers als zusätzliches Plattenpaket in den Mehrzonen-Wärmeübertrager integriert oder extern angeordnet. Nach der Aufheizung auf Pasteurisationstemperatur wird das Bier für eine gewisse Zeit heiß gehalten. Dies geschieht in einem eigenen Plattenpaket oder mit einer extern angeordneten Rohrschlange. Nach der Heißhaltestrecke wärmt das pasteurisierte Bier in der Rekuperationsstufe das eintretende Bier auf und kühlt sich dabei selbst ab. In der letzten Zone wird das Bier auf die gewünschte Abfülltemperatur abgekühlt. Die Zieltemperaturen einer KZE liegen üblicherweise bei 68..75 °C. Aufgrund der guten Wärmeübertragung mit der verwendeten Anlagentechnik, erweist sich die Haltbarmachung mittels KZE als deutlich effizienter und kostengünstiger im Vergleich zur Tunnelpasteurisation. Treiber (2007) beziffert die Kosten auf 0,13 €/hl für KZE im Vergleich zu 1,5 €/hl bei der Tunnelpasteurisation.

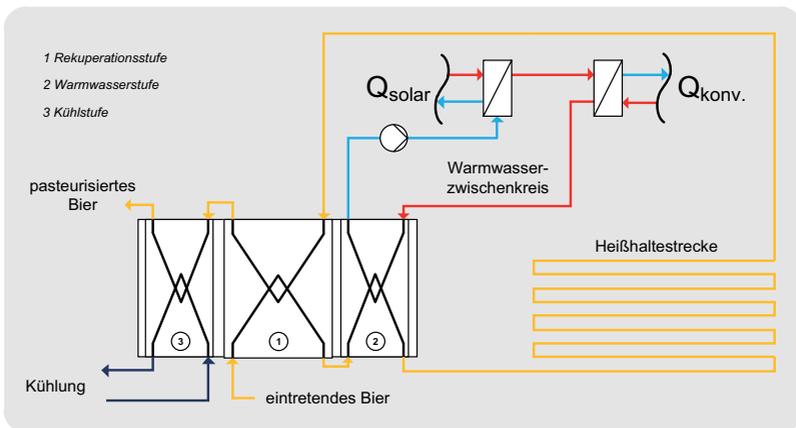


Abbildung 3-11: Integrationskonzept zur Einbindung solarer Prozesswärme bei der KZE mit Mehrzonen-Wärmeübertrager und externer Heizstufe.

Wenn für die KZE Solarwärme genutzt werden soll, muss diese dem Warmwasserkreis vor dem konventionell beheizten Wärmeübertrager zugeführt werden, da hier die niedrigste Temperatur vorliegt. KZE-Anlagen mit einer externen Heizstufe können durch die Vorschaltung eines zusätzlichen Wärmeübertragers mit solarer Wärme versorgt werden. Hierzu zeigt Abbildung 3-11 ein KZE-System bestehend aus einem Mehrzonen-Wärmeübertrager mit Rekuperations- (1), Warmwasser- (2) und Kühlstufe (3). Heizstufe und Heißhaltestrecke sind extern angeordnet. Die Heizstufe besteht in diesem Fall aus einem solargespeisten Wärmeübertrager, der mit dem konventionellen Wärmeübertrager in Reihe geschaltet ist. Im Betrieb tritt das Warmwasser mit etwa $70..75\text{ }^{\circ}\text{C}$ aus der Warmwasserstufe aus und wird durch Solarwärme und bei Bedarf mit Dampf oder Heißwasser in der konventionellen Heizstufe um $3..4\text{ K}$ erwärmt.

Etwas aufwendiger ist die Integration von Solarwärme bei einem Mehrzonen-Wärmeübertrager mit interner Heizstufe. Dieser verfügt über fünf Zonen (Rekuperations- und Heißhaltestufe, Warmwasserbereiter, Warmwasser- und Kühlstufe). Bei einem ausreichend großem Gestell kann der Mehrzonen-Wärmeübertrager wie bei der in Abschnitt 3.4.1 erläuterten Wasserentgasung mit einem zusätzlichen Plattenpaket zur solaren Vorwärmung erweitert werden. Ist dies nicht der Fall, besteht die Möglichkeit, vor der Stufe des konventionell beheizten Warmwasserbereiters eine zusätzliche Anschlussplatte zu installieren. Diese Möglichkeit ist in Abbildung 3-12 dargestellt.

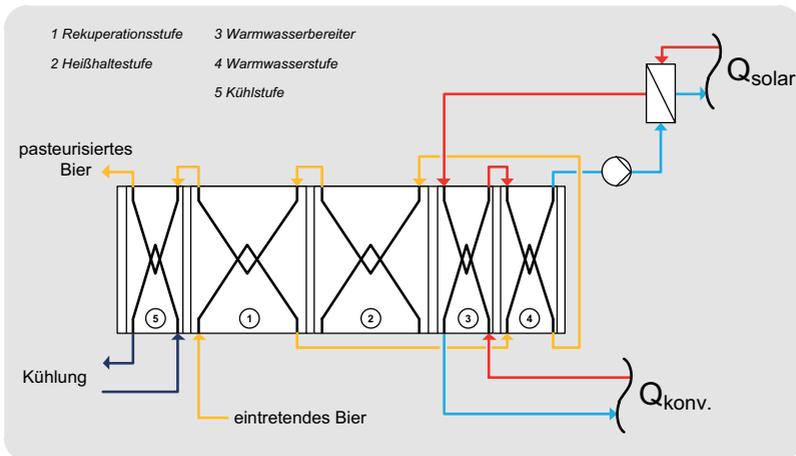


Abbildung 3-12: Integrationskonzept zur solaren Beheizung der KZE mit Mehrzonen-Wärmeübertrager und interner Heizstufe.

Eine Anschlussplatte ist deutlich schmaler als das gesamte Plattenpaket, sodass auch bei wenig Platz im Gestell ein externer, solarbeheizter Wärmeübertrager an den Mehrzonen-Wärmeübertrager angeschlossen werden kann. Bei beiden Integrationskonzepten müssen die vorhandenen Platten aus dem Gestell genommen werden. Dies kann unter Umständen in Verbindung mit Wartungsarbeiten oder Plattenerneuerungen erfolgen. Bei Neuanlagen kann eine entsprechende Konfiguration mit den erforderlichen Anschlüssen oder einem integrierten solarbeheizten Plattenpaket im Vorhinein bereits vorgesehen werden.

3.4.6. Entalkoholisierung

Die Entalkoholisierung ist notwendig, um den wachsenden Markt für alkoholfreie Biere bedienen zu können. Neben dem vorzeitigen Abbruch der Gärung und der Umkehrosmose existieren auch thermische Verfahren zur Herstellung alkoholfreier Biere (Back, 2005). Bei der thermischen Entalkoholisierung macht man sich zunutze, dass die Siedetemperatur von Alkohol deutlich unterhalb der von Wasser liegt (78,3 °C bei atmosphärischem Druck). Das fertige Bier auf eine solche Temperatur zu erwärmen, hätte allerdings Beeinträchtigungen der geschmacklichen Eigenschaften zur Folge, weshalb der Prozess mit Unterdruck abläuft. Eine Abgrenzung der Verfahren wird hinsichtlich der Bauart des Verdampfers getroffen. Narziß (2005) unterscheidet Rektifikationskolonnen, Dünnsfilm- und Fallstromverdampfer.

Bei der Fallstromverdampfung wird das Bier nach einer rekuperativen Vorwärmung von oben in einen stehenden, mit Sattampf beheizten Rohrbündelwärmeübertrager geführt und läuft in einem dünnen Film auf der Innenseite der senkrechten Rohre nach unten. Die entstehenden Brüden werden durch das im Gleichstrom nach unten laufende Bier mitgerissen. Im unteren Teil des Verdampfers erfolgt die Trennung von entalkoholisierendem Bier und Brüden. Häufig verfügen Verdampfungsanlagen über mehrere Stufen, sodass der in einer Stufe entstehende Brüden in der darauffolgenden Stufe als Heizmedium verwendet werden kann. Der Verdampfer wird sowohl produktseitig als auch heizseitig im Unterdruckbereich betrieben, um die thermische Belastung des Bieres zu reduzieren (Narziß, 2005). Bei der Rektifikation werden die Brüden zunächst in einem separaten Wärmeübertrager erzeugt und im Gegenstrom zum rekuperativ erwärmten Bier durch die Rektifikationskolonne geführt. Die Kolonne enthält eine Packung, um die Oberfläche des Bieres zu erhöhen. Auch hierbei wird der Verdampfer produktseitig und heizseitig mit Unterdruck betrieben (Narziß, 2005). Da die Verfahren zur Entalkoholisierung mit Unterdruck ablaufen, liegt die Prozesstemperatur in der Regel bei ca. 40..60 °C. Da das Temperaturniveau des benötigten Dampfes verhältnismäßig niedrig ist, ergibt sich die Möglichkeit zur Einbindung von Solarwärme. Hierzu zeigt Abbildung 3-13 das Integrationskonzept zur Bereitstellung von Dampf mit Unterdruck zur Beheizung von Verdampfern bei der Entalkoholisierung.

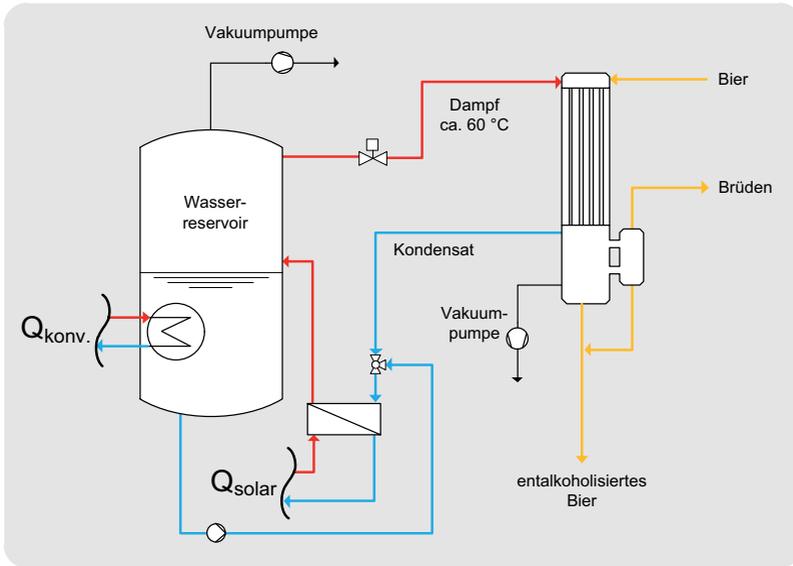


Abbildung 3-13: Integrationskonzept zur solaren Bereitstellung von Unterdruckdampf zur energetischen Versorgung der Entalkoholisierung.

Für dieses Integrationskonzept wird ein Speicher, dem ein solarbeheizter Wärmeübertrager vorgeschaltet ist, durch eine Vakuumpumpe evakuiert. Bevor das Kondensat in den Speicher gelangt, wird es durch Solarwärme aufgewärmt. Zur Sicherstellung der Solltemperatur verfügt der Speicher über eine konventionelle Nachheizung. Wenn der Dampfdruck im Speicher den Sollwert erreicht, kann der Entalkoholisierungsprozess mit Dampf versorgt werden. Um auch zum Anfahren des Prozesses Solarwärme nutzen zu können, ist am Behälterboden eine Bypass-Leitung vorgesehen, mit der der Speicherinhalt im Kreislaufbetrieb aufgeheizt werden kann.

3.4.7. Flaschenreinigung

Flaschenwaschmaschinen reinigen Mehrwegflaschen bevor sie mit dem gewünschten Bierprodukt gefüllt werden. In den Maschinen durchlaufen die Flaschen über ein Endlosförderband mehrere Stufen der Reinigung. Diese Stufen lassen sich dem Vorwärm-, Lauge- oder Abkühlbereich zuordnen und können herstelllerspezifisch variieren. Grundsätzlich haben jedoch alle Maschinen gemein, dass ausschließlich im Hauptlaugebad thermische Energie und bei der letzten Spritzung Frischwasser eingebracht werden müssen. Alle anderen Zonen werden über den Flaschenumlauf, den Flüssigkeitsüberlauf

oder rekuperative Maßnahmen versorgt. Die Temperatur des Laugenbads für Glasflaschen liegt bei etwa 80 °C, für PET-Flaschen bei maximal 60 °C (Bevcomp, 2005; Kunze, 2007).

Zur Beheizung von Flaschenwaschmaschinen können interne oder externe Wärmeübertrager verwendet werden, die in der Regel mit Dampf versorgt werden. In den meisten Bestandsanlagen sind interne Rohrbündelwärmeübertrager zu finden. Grund hierfür ist die hohe Belastung der Lauge mit Schmutzstoffen und festen Bestandteilen. Neuere Anlagen werden teilweise auch mit externen Plattenwärmeübertragern ausgerüstet. Bei der Beheizung von Flaschenwaschmaschinen gibt es drei Modi. Zunächst fällt beim Aufheizen des Laugenbads auf Betriebstemperatur die höchste Leistung an. Beim darauffolgenden Anfahren werden die einzelnen Zonen über den Umlauf des leeren Flaschenbandes erwärmt, wozu eine etwas geringere Leistung bereitgestellt werden muss. Während des eigentlichen Reinigungsbetriebes fällt die niedrigste Leistung an.

Konzepte zur Integration thermischer Solaranlagen bei Flaschenwaschmaschinen hängen von der Art und Einbringung des konventionellen Wärmeübertragers ab. Externe Wärmeübertrager bieten die Möglichkeit, mit verhältnismäßig geringem Aufwand einen zusätzlichen Wärmeübertrager vorzuschalten. Typischerweise erfolgt die Beheizung des Laugenbades allerdings durch interne Rohrbündel. Abbildung 3-14 zeigt zwei Möglichkeiten zur Einbindung von Solarwärme für zwei Bauarten interner Rohrbündel.

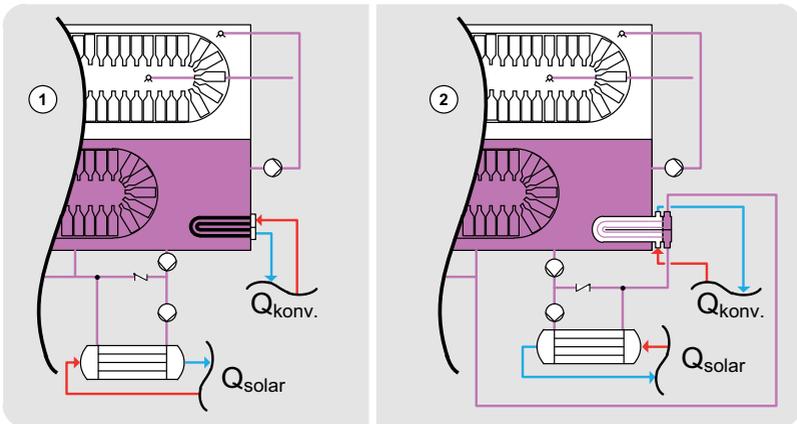


Abbildung 3-14: Zwei Integrationskonzepte zur Nutzung von Solarwärme bei der Flaschenreinigung.

Variante 1 (links) stellt eine Anlage dar, bei der das Laugebad durch ein internes Rohrbündel ohne Mantel beheizt wird, das lediglich über zwei Anschlüsse für Vor- und Rücklauf des Heizmediums verfügt. Die Lauge wird mit Umwälzpumpen aus dem Bereich des Rohrbündels abgezogen und in verschiedene Bereiche der Maschine eingespritzt (Flascheneintritt in Hauptlaugenbad, Laugenspritzung, etc.). Von dort fließt die abgekühlte Lauge zurück zum Bereich des Rohrbündels. Da beim Eintauchen der kühleren Flaschen in das Hauptlaugenbad (abgeschnittener Bereich in der Abbildung) der größte Wärmebedarf besteht, wird das Laugebad mit dem Rohrbündel häufig um etwa 3..4 Kelvin zur eigentlichen Betriebstemperatur von 80 °C überhitzt, sodass dem Eintauchbereich Lauge mit erhöhter Temperatur zugeführt werden kann. Das dargestellte Integrationskonzept sieht vor, die abgezogene Lauge mittels Solarwärme um die erforderliche Temperaturdifferenz zu überhitzen, sodass die Badtemperatur auf 80 °C herabgesetzt werden kann. Die niedrigere Badtemperatur wirkt sich positiv auf die letzte Laugenspritzung (im oberen weißen Bereich) aus und reduziert zudem die Wärmeverluste des Bads. Sollte der solar-beheizte Wärmeübertrager nicht genügend Wärme bereitstellen, kann die Solltemperatur des Bads wieder konventionell erhöht werden. Neben der Beheizung im Betrieb kann auch das Aufheizen der Maschine solar unterstützt werden.

Eine andere Möglichkeit zur Einbindung von Solarwärme kann umgesetzt werden, wenn Rohrbündelwärmeübertrager mit Schwimmkopf (vgl. Variante 2 in Abbildung 3-14) zur konventionellen Beheizung eingesetzt werden. Dieses Rohrbündel verfügt über einen Mantel, der zum einen das Laugenbad beheizt und zum anderen einen Laugenstrom, der aus dem Bad abgezogen und durch die Rohre des Bündels geführt wird. Dadurch kann die Einbindung von Solarwärme, wie in Abbildung 3-14 rechts dargestellt, seriell erfolgen. Dabei wird der aus dem Hauptlaugenbad abgezogen Laugenstrom vor dem konventionellen Rohrbündel solar erwärmt.

Auch wenn sich Flaschenwaschmaschinen grundsätzlich zur Einbindung von Solarwärme eignen, kann die Umsetzung in Abhängigkeit der jeweiligen Anlage kompliziert sein. Neben der Beheizungsart liegt dies auch an der kompakten Bauweise der Anlagen und den meist nur schwer zugänglichen Rohrleitungen. Maschinen mit externen Wärmeübertragern bieten demnach die besten Möglichkeiten zur Nutzung von Solarwärme. Da Neuanlagen allerdings von den Anlagenbauern brauereispezifisch geplant werden, lassen sich im Vorhinein individuelle Wünsche hinsichtlich der Beheizung relativ einfach umsetzen.

3.4.8. Kastenreinigung

Im Kastenwascher werden die Bierkästen durch Hochdruckspritzdüsen mit Reinigungsmedien wie Lauge und Warmwasser besprüht. Danach werden alle Seiten mit Kaltwasser abgesprüht. Die Warmwasser- oder Laugenbäder werden typischerweise auf ca. 60 °C temperiert. Für die konventionelle Beheizung gibt es unterschiedliche Möglichkeiten. Es

gibt Anlagen mit separater Dampfversorgung und Anlagen, die mit Abwärme der Flaschenwaschmaschine beheizt werden. Die Beheizung mit Abwärme kann indirekt über einen Wärmeübertrager oder durch direkte Einspeisung der Flüssigkeit von der Flaschenwaschmaschine in den Kastenwascher erfolgen. Aufgrund der parallelen Betriebszeit und der überschüssigen Niedertemperaturabwärme ist die energetische Versorgung durch die Flaschenwaschmaschine die sinnvollste Lösung, bei der eine solarthermische Integration unzweckmäßig ist (Kunze, 2007).

Anlagen mit separater Dampfversorgung werden meist über interne Heizschlangen beheizt. In diesem Fall ist die Einbindung von Solarwärme meist schwierig, da in der Regel kein ausreichender Platz für einen zusätzlichen internen Wärmeübertrager in dem Kastenwascher vorhanden ist.

3.4.9. Tunnelpasteurisation

Die Pasteurisation in der Abfüllhalle erfolgt meist durch Tunnelpasteure. Diese verfügen über mehrere Temperaturzonen, die die Flaschen oder Dosen über Förderbänder durchlaufen. Die Flaschen werden in verschiedenen Zonen mittels Spritz- oder Berieselungsdüsen vorgewärmt, auf Pasteurisationstemperatur gebracht, eine definierte Zeit auf dieser Temperatur gehalten und anschließend wieder abgekühlt. Der Querschnitt eines Tunnelpasteurs ist in Abbildung 3-15 dargestellt. Prinzipiell verfügen Tunnelpasteure über eine interne Wärmerückgewinnung, bei der das Wasser aus den Kühlzonen den Heizzonen zum Anwärmen der Flaschen zugeführt wird. Der Großteil der benötigten Wärme wird demnach in die Überhitzungszone eingebracht. Die Pasteurisationstemperatur liegt etwa bei 60 °C, sodass die Temperatur des Heizmediums für die Nachheizung um etwa 5 Kelvin höher sein muss (Briggs et al., 2004; DRET, 2002).

Tunnelpasteure können mit unterschiedlich vielen Wärmeübertragern ausgestattet sein. Die Bandbreite reicht von einem separaten Wärmeübertrager für jede einzelne Zone bis hin zu einem einzigen Wärmeübertrager für die gesamte Anlage. Meist sind die Wärmeübertrager extern angeordnet. Interne Heizschlangen werden nur sehr selten verwendet.

Ähnlich wie bei der Flaschenreinigung teilt sich der Leistungsbedarf bei der Tunnelpasteurisation in drei Bereiche auf. Zunächst erfolgt das Aufheizen der Bäder bei Betriebsbeginn. Anschließend liegt die maximale Leistung beim Anfahren an, da hier noch keine Wärmerückgewinnung zwischen den jeweiligen Zonen erfolgt. Im stationären Betrieb ist die Leistung am geringsten, da lediglich Wärme zum Aufheizen von der regenerativ erreichten auf die gewünschte Pasteurisationstemperatur benötigt wird (Esmarch, 1999).

Abbildung 3-15 zeigt das Konzept zur Integration von Solarwärme bei der Tunnelpasteurisation. Wird wie dargestellt ein externer Wärmeübertrager zur konventionellen

Beheizung verwendet, kann ein solarbeheizter Wärmeerübertrager vorgeschaltet werden. Es besteht auch die Möglichkeit den konventionellen Wärmeerübertrager durch einen Neuen zu ersetzen (hier nicht dargestellt), der über zwei Abteilungen verfügt und den Tunnelpasteur demnach mit Solarwärme und konventionellen Heizmedium beheizen kann.

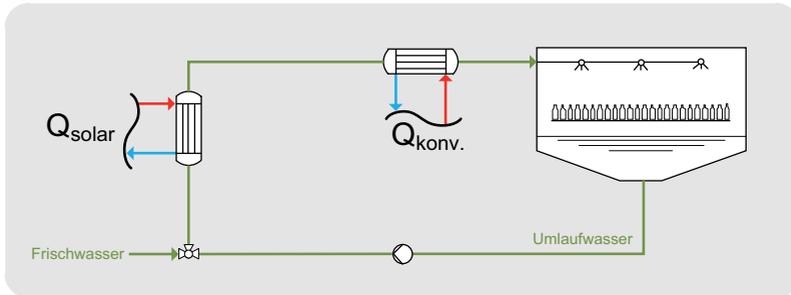


Abbildung 3-15: Integrationskonzept zur solaren Beheizung eines Tunnelpasteurs.

Neben der Beheizung des Umlaufwassers kann unter Umständen ein zusätzlicher Integrationspunkt genutzt werden. Durch Verdampfung und Wasserverschleppung muss das fehlende Wasser dem Pasteur wieder zugeführt werden. In Abhängigkeit von Anlagengröße, Flaschengröße und -form kann dieser Wasserverlust bis zu 20 ml pro Flasche betragen (Hasenbeck, 2012). Sollte dem Tunnelpasteur ein konstanter Frischwasserstrom zugeführt werden, kann dieser wie in Abbildung 3-15 angedeutet ebenfalls solar erwärmt werden. Die beschriebenen Konzepte gelten äquivalent für Anlagen zur Dosenpasteurisation.

3.4.10. Kegreinigung

Fässer, in die Bier abgefüllt wird, können aus Holz, Aluminium oder Edelstahl sein, wobei sich sogenannte Kegs (zylindrische Metallfässer) durchgesetzt haben. Die Reinigung und Befüllung von Kegs verläuft in der Regel automatisiert. Dazu verfügt eine entsprechende Anlage über mehrere Stationen zur Außen- und Innenreinigung sowie der anschließenden Befüllung. Für die Innenreinigung durchläuft das Keg unterschiedliche Behandlungsstufen, wofür Lauge, Säure, (Warm-)wasser und Dampf verwendet werden. Eine Keg-Anlage verfügt über mehrere Tanks für Mischwasser, Säure und Lauge, in denen die verwendeten Medien zwischengespeichert und beheizt werden. Im Mischwassertank wird das Vorspülwasser der Innereinigung gespeichert und für die Außenreinigung der folgenden Kegs verwendet. Die Tanks mit den Reinigungsmedien werden typischerweise durch interne Heizschlangen auf der benötigten Temperatur gehalten. Diese liegen in der Regel bei 70 °C für

Säure, bei etwa 85 °C für Lauge und bei 80 °C für Mischwasser. Während der Reinigung werden die Medien über Pumpen der Keg-Anlage zugeführt und nach dem jeweiligen Reinigungsschritt mit Sterildampf zurück in die Tanks gedrückt und bei Bedarf nachdosiert (Malek, 2012).

Die Einbindung von Solarwärme für die Kegreinigung zeigt Abbildung 3-16 am Beispiel des Mischwassertanks. Da die konventionelle Beheizung in der Regel über eine interne Heizschlange erfolgt, ist nur begrenzt Platz für zusätzliche Einbauten vorhanden. Daher ist für das Integrationskonzept ein externer Wärmeübertrager vorgesehen.

Bei dem dargestellten Integrationskonzept ist vorgesehen, dass das Mischwasser, das von der Innenreinigung stammt, zunächst solar vorgewärmt wird, bevor es in den Mischwassertank gelangt. An diesem Punkt wäre die bereitzustellende Temperatur einer Solaranlage niedriger im Vergleich zur direkten Beheizung des Tanks mit einem internen oder externen, solarbeheizten Wärmeübertrager. Zudem kann auch zusätzlich benötigtes Kaltwasser über den externen Wärmeübertrager aufgeheizt werden, bevor dieses in den Mischwassertank gepumpt wird. Für einen diskontinuierlichen Reinigungsbetrieb kann in der Ablaufleitung ein Dreiwege-Ventil vorgesehen werden, sodass der Inhalt des Mischwassertanks im Kreislauf über den solaren Wärmeübertrager aufgeheizt werden kann.

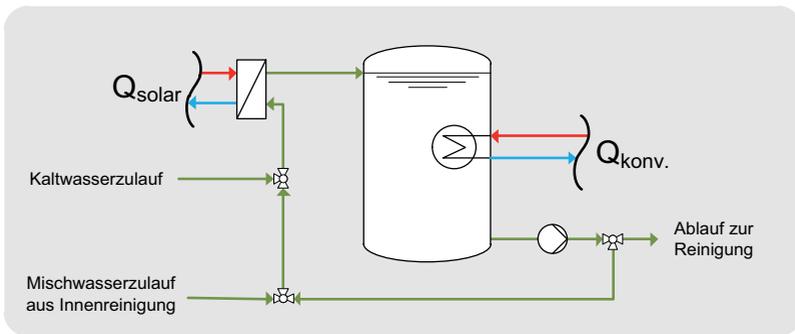


Abbildung 3-16: Integrationskonzept zur Einbindung solarer Prozesswärme bei der Kegreinigung.

Dieses Integrationskonzept ist analog auf andere Tanks übertragbar, wobei jedoch der dargestellte Frischwasserzulauf bei Säure und Lauge nicht gegeben ist. Falls die vorhandenen Rohrleitungen zugänglich sind und keine Installationsarbeiten direkt am Behälter stattfinden müssen, lässt sich das Integrationskonzept verhältnismäßig einfach umsetzen.

3.4.11. CIP-Reinigung

Die Cleaning-in-Place-Methode (kurz: CIP) ist ein automatisiertes Verfahren zur Reinigung verfahrenstechnischer Anlagen. Die wichtigsten Komponenten von CIP-Anlagen sind Stapelbehälter für Frischwasser, Desinfektionslösung oder Heißwasser, Säure, Lauge und Stapelwasser, Umwälz- und Dosierpumpen sowie ein oder mehrere Wärmeübertrager. Aus den Stapelbehältern werden unterschiedliche Ströme mit definierten Temperaturen, Konzentrationen und Mengen durch das angeschlossene System gepumpt. Zwischen den einzelnen Spülschritten mit Lauge, Säure oder Desinfektionsmittel wird in der Regel mit Wasser nachgespült (Kunze, 2007).

Bei der CIP-Reinigung gibt es zwei Verfahren: Für die Stapelreinigung werden die Reinigungsmedien im Stapelbehälter angesetzt, den jeweiligen Anlagenteilen zur Reinigung zugeführt und anschließend wieder möglichst vollständig in den Stapelbehälter gepumpt. Verbrauchte Chemikalien und Wasser können dann nachgespeist werden. Für die verlorene Reinigung erfolgt die Dosierung der Chemikalien direkt in den Wasserkreislauf. Das Gemisch wird nach der Reinigung verworfen (Manger H.-J., 2006).

Die zur Reinigung benötigten Medien (Lauge, Säure, Heißwasser) werden in der Regel über einen externen Wärmeübertrager gepumpt und auf die Solltemperatur erwärmt. Hierzu kann gemäß Abbildung 3-17 ein solarbeheizter Wärmeübertrager vorgeschaltet werden.

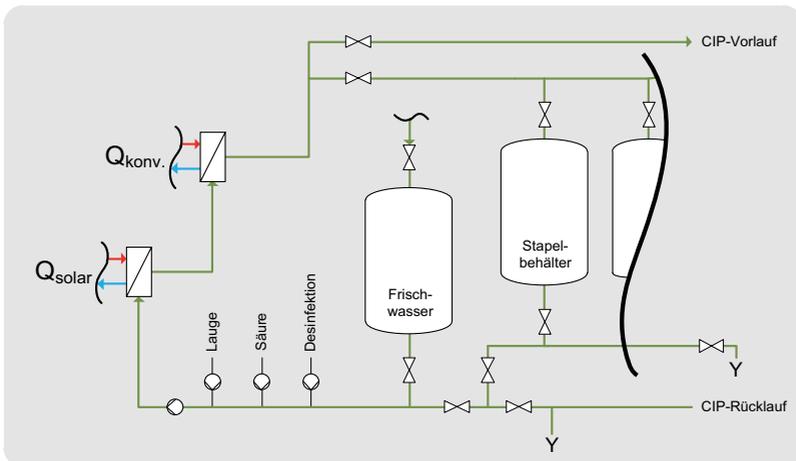


Abbildung 3-17: Integrationskonzept zur solaren Unterstützung der CIP-Reinigung.

Dieses Integrationskonzept sollte in der Regel mit einem relativ geringen Aufwand einhergehen, da die notwendigen Rohrleitungen zugänglich sind. Bei der Stapelreinigung werden die Reinigungsmedien vor dem Start des CIP-Programms im Kreislaufbetrieb aufgeheizt, sodass auch Solarwärme auf einem niedrigen Temperaturniveau genutzt werden kann. Bei der verlorenen Reinigung werden die Reinigungsmedien aus einem Ansatzbehälter durch den Wärmeübertrager geleitet, aufgeheizt und direkt dem CIP-Kreislauf zugeführt.

In Abhängigkeit des Produktionsablaufs und der dadurch zu reinigenden Bereiche können sich unterschiedliche Intervalle der CIP-Reinigung ergeben. Bei längeren Pausen zwischen den einzelnen Reinigungszyklen besteht die Möglichkeit, die Stapelbehälter solar aufzuheizen bzw. deren Temperatur zu halten.

3.5.Abschließende Betrachtung der Integrationspunkte

Die prinzipiell zur Einbindung von Solarwärme geeigneten Prozesse, die im Rahmen der Analyse des Brauwesens identifiziert wurden, werden nachfolgend gegenübergestellt und verglichen. Hierzu beinhaltet Tabelle 3-3 alle zuvor erläuterten Prozesse und zeigt neben der jeweiligen Prozesstemperatur auch eine Bewertung anhand dreier Kriterien.

Grundsätzlich lässt sich jeder Integrationspunkt hinsichtlich der zu erwartenden solaren Rücklaufftemperatur im Falle einer Einbindung (großer Balken = niedrige Temperatur), des Aufwands zur Einbindung der Solarwärme (großer Balken = geringer Aufwand) sowie der Laufzeit des Prozesses (großer Balken = häufige und lange Laufzeit) bewerten. Während zur Prozesstemperatur und der daraus resultierenden Rücklaufftemperatur einer Solaranlage allgemeingültige Aussagen getroffen werden können, trifft dies auf die anderen beiden Kriterien nur bedingt zu.

Für den Aufwand zur Integration der Solarwärme in einen bestehenden Prozess kann eine allgemeingültige Bewertung nur schwer erfolgen, da es für die dargestellten Prozesse unter Umständen verschiedene Anlagen gibt, mit denen eine möglicherweise einfachere oder kompliziertere Einbindung der Solarwärme einhergeht. So ist beispielsweise die Integration von Solarwärme bei der Kurzzeiterhitzung mittels Mehrzonen-Wärmeübertrager mit interner Heizstufe bedeutend aufwendiger als bei einer Anlage mit externer Heizstufe.

Die Bewertung zur Laufzeit beinhaltet die größte Unsicherheit, weshalb die Balken eine andere Farbe aufweisen. Während beispielsweise die Prozesse Maischen und Kochen in den meisten Brauereien die angedeutete häufige Laufzeit aufweisen sollten, kann dies bei anderen Prozessen deutlich von den dargestellten Werten abweichen. Bei Prozessen wie beispielsweise der Flaschenreinigung oder Kurzzeiterhitzung wird die Laufzeit maßgeblich durch brauereispezifische Randbedingungen wie verwendete Gebinde oder das Produkt-

3. Systematische Untersuchung des Brauwesens

spektrum bestimmt. Hinzu kommt, dass nicht jede Brauerei über alle der in dieser Arbeit gelisteten Prozesse verfügt. So kann man in der Regel bei kleineren Brauereien davon ausgehen, dass keine Entalkoholisierung und Tunnelpasteurisation stattfindet.

Tabelle 3-3: Übersicht und Bewertung der Integrationsmöglichkeiten in Brauereien.

Bewertung: Solare Rücklauftemperatur im Falle einer Einbindung (großer Balken = niedrige Temperatur), Aufwand zur Einbindung der Solarwärme (großer Balken = geringer Aufwand), Laufzeit des Prozesses (großer Balken = häufige und lange Laufzeit).

Prozess bzw. Anlage	Temp sol RL	Bewertung			Bemerkung
		Integration	Laufzeit		
Wasserentgasung	70..95 °C				Notwendigkeit der Wasseraufbereitung hängt von der Qualität des vorhandenen Wassers ab (Stadtwasser oder eigener Brunnen).
Warmwasserbereitstellung	15..85 °C				Zusätzlicher Warmwasserbedarf wird stark durch WRG beim Kochen sowie WRG aus Kälte- und Druckluftkompressoren beeinflusst. Spez. Energiebedarf: 1,7..7 kWh/hl VB
Maischen	35..78 °C				Einbindung von Solarwärme vor allem bei neuen Maischepfannen sinnvoll. Spez. Energiebedarf: 2,4..2,5 kWh/hl VB Aufheizen Gesamtmaische (50 °C → 76 °C)
Kochen	90..104 °C				Einbindung von Solarwärme nur bei Kochverfahren mit Außenkocher sinnvoll Spez. Energiebedarf: 3,4..3,6 kWh/hl VB bei 5 % Gesamtverdampfung
Kurzzeiterhitzung	68..75 °C				Anteil des Wärmebedarfs abhängig von Menge des Bieres, das mittels KZE pasteurisiert wird. Spez. Energiebedarf: 1,7..1,8 kWh/hl VB
Entalkoholisierung	40..55 °C				Nicht in jeder Brauerei vorhanden, Laufzeit abhängig vom Produktspektrum.
Flaschenreinigung	60..85 °C				Laufzeiten abhängig von Unternehmensgröße. Bei kleineren Brauereien ggf. abwechselnd mit Kegreinigung in Betrieb. Spez. Energiebedarf: 7 ..14 kWh/1.000 Fl.
Kastenreinigung	50..60 °C				Die Einbindung von Solarwärme zur Kastenreinigung erscheint nicht sinnvoll, da dies über Abwärme der FlaWaMa realisiert werden kann.
Tunnelpasteurisation	60..65 °C				Laufzeit abhängig vom Produktspektrum (Anteil Einweggebinde, alkoholfreie- und Biermischgetränke). Spez. Energiebedarf: 19 ..23 kWh/1.000 Fl.
Kegreinigung	70..95 °C				Laufzeiten siehe Flaschenreinigung.
CIP-Reinigung	70..90 °C				Wärmebedarf stark abhängig von Produktionsprofil und den damit verbundenen Reinigungszyklen.

Die durchgeführten Fallstudien zeigen, dass das Brauwesen sehr heterogen ist, weshalb die in Tabelle 3-3 dargestellte Bewertung nur als Orientierung dienen kann. Nachfolgend werden die Erfahrungen aus den Fallstudien hinsichtlich Laufzeit einzelner Prozesse und Möglichkeit zur Einbindung von Solarwärme den Angaben aus Tabelle 3-3 gegenübergestellt. Hinsichtlich der Laufzeit einzelner Prozesse zeigte sich beispielsweise bei der untersuchten Brauerei A, dass neben der Entalkoholisierung und Tunnelpasteurisation auch keine Kurzzeiterhitzung des Bieres durchgeführt wird, da eine Pasteurisation aufgrund des Produktspektrums (keine Mischgetränke) und der Vertriebsstruktur (kleiner regionaler Radius) nicht zwingend erforderlich ist. In anderen Brauereien schwankten die Anteile des pasteurisierten Bieres und damit die Laufzeiten der Kurzzeiterhitzung. Die Fallstudien zeigten zudem, dass bei kleineren Brauereien unter Umständen einzelne Prozesse oder Produktionsbereiche alternierend betrieben werden. So wurde zum Beispiel das Sudhaus von Brauerei C wöchentlich abwechselnd mit der Abfüllhalle betrieben. In einem solchen Fall muss auf der Bewertung der einzelnen Laufzeiten ein anderer Fokus liegen, da für eine halbwegs konstante Abnahme der Solarwärme sowohl im Sudhaus als auch in der Abfüllhalle eine geeignete Wärmesenke gefunden werden muss.

Hinsichtlich der Einbindung von Solarwärme zeigten die Fallstudien, dass nicht immer alle Integrationsmöglichkeiten umgesetzt werden können. So verfügt beispielsweise die analysierte Brauerei D über einen eigenen Brunnen mit ausreichend hoher Wasserqualität, sodass keine Wasseraufbereitung vorgenommen werden muss. Die untersuchte Brauerei E hingegen ist lediglich an das Stadtwassernetz angeschlossen, sodass eine Einbindung von Solarwärme für diesen Prozess prinzipiell möglich ist. In Abhängigkeit der jeweiligen Wasserqualität fanden sich in den untersuchten Brauereien sowohl getrennte als auch kombinierte Warmwasserreserven für Brau- und Brauchwasser.

Die Einbindung von Solarwärme in die Warmwasserreserve einer Brauerei erscheint aufgrund der Bewertung aus Tabelle 3-3 als besonders geeignet. Dieser Integrationspunkt hat grundsätzlich den Vorteil, dass auch eine solare Vorwärmung des Wassers möglich ist, wenn die Einstrahlung nicht für die gewünschte Solltemperatur von bspw. 85 °C ausreicht.

Die Fallstudien zeigten jedoch, dass nicht in jeder Brauerei die Möglichkeit gegeben ist dieses Konzept umzusetzen, da mit den Wärmerückgewinnungsmaßnahmen im Sudhaus (vgl. Abschnitt 3.3) unter Umständen der gesamte Warmwasserbedarf gedeckt werden kann. Ähnliche Erfahrungen gehen aus den Untersuchungen von (Muster-Slawitsch et al., 2011) hervor. Die von den Autoren beschriebenen Fallstudien bei mehreren Brauereien zeigen, dass eine solare Bereitstellung von Warmwasser nur dann sinnvoll ist, wenn die vorhandene Abwärme im Sudhaus zur Prozessintegration (Maischepfannenbeheizung oder Läuterwürzeaufheizung) und nicht zur Bereitstellung von Warmwasser genutzt wird. Grundsätzlich lassen die im Rahmen der Dissertation durchgeführten Fallstudien den

Schluss zu, dass kleinere Brauereien häufig einen höheren spezifischen Wasserbedarf als große Brauereien aufweisen. Damit ist bei kleineren Brauereien die Wahrscheinlichkeit höher, dass Solarwärme, bei entsprechender Wärmerückgewinnung im Sudhaus, in die Warmwasserbereitstellung eingebunden werden kann.

Der Einfluss der jeweiligen Wärmerückgewinnung beim Kochen auf die Einbindung von Solarwärme in die Warmwasserreserve wurde ebenfalls im Rahmen der Fallstudien deutlich. So muss beispielsweise durch die Nutzung eines Brüdenverdichters beim Würzekochen in Brauerei E zusätzliches Warmwasser bereitgestellt werden, da die verfügbare Menge aus der Würzekühlung den Bedarf nicht vollständig decken kann. Auch bei Brauerei G wurde ein sehr hoher zusätzlicher Warmwasserbedarf detektiert, der auf die Nutzung eines Brüdenverdichters zurückzuführen ist. Bei Brauerei D hätte das Integrationskonzept zur Warmwasserbereitstellung zu Beginn der Fallstudie nicht umgesetzt werden können, da ein Pfannendunstkondensator zur Warmwasserbereitstellung genutzt wurde. Erst nach Umstellung der Wärmerückgewinnung im Verlauf der Untersuchungen ergab sich die Möglichkeit Solarwärme für die Warmwasserbereitstellung zu nutzen.

Hinsichtlich der möglichen Integration von Solarwärme bei der Tunnelpasteurisation zeigten die Untersuchungen bei Brauerei G, dass signifikante Mengen Zusatzwasser für den Pasteur benötigt werden, die solar vorgewärmt werden können. Die Wasserverluste aufgrund von Austrag, Schwaden und wöchentlicher Entleerung zur Reinigung beliefen sich auf etwa 15.000 m³ pro Jahr. Bei dieser Menge wäre auch denkbar, Solarwärme entgegen dem in Abbildung 3-15 dargestellten Integrationskonzept lediglich zur Aufheizung des Zusatzwassers einzubinden.

Entgegen der typischerweise zur Beheizung einer CIP-Anlage verwendeten externen Wärmeübertrager (vgl. Integrationskonzept in Abbildung 3-17) werden die Stapelbehälter bei Brauerei D mit internen Heizschlangen beheizt. In diesem Fall wäre der Aufwand zur Einbindung von Solarwärme deutlich höher als die Bewertung aus Tabelle 3-3 dies angibt. Bei der Beheizung mit internen Heizschlangen könnte die Integration lediglich ähnlich dem für die Keg-Reinigung beschriebenen Konzept erfolgen, was mit einem erhöhten Aufwand einhergehen würde.

Neben den vorgestellten Integrationspunkten für Solarwärme in Brauereien kann auch die Gebäude- und Lagerhallenheizung für eine solare Versorgung in Betracht gezogen werden. Falls die benötigte Temperatur für die Gebäude- oder Lagerhallenheizung unterhalb der eines solar zu versorgenden Prozesses ist, stellt die halbjährig wechselnde Kombination dieser beiden Integrationspunkte möglicherweise eine gute Möglichkeit dar, um den Jahresnutzungsgrad einer Solaranlage zu verbessern. Die durchgeführten Fallstudien zeigten, dass der Wärmebedarf für Gebäude und Lagerhallen bis zu 20 % des Gesamtwärmebedarfs ausmachen kann.

4. Untersuchung der Übertragbarkeit auf andere Branchen

Die detaillierte Untersuchung des Brauwesens zeigte, dass für viele Prozesse mit thermischem Energiebedarf unterschiedliche Verfahren und Anlagentechnik verwendet werden können. Um allgemeingültige Aussagen hinsichtlich der erarbeiteten Integrationsmöglichkeiten solarer Prozesswärme zu treffen, wurden zusätzliche Branchen der Ernährungsindustrie in die Untersuchung einbezogen. Neben den dort angewandten Prozessen lag der Fokus dieser Untersuchung auf der verwendeten Anlagentechnik und Beheizung. Gemäß Tscheuschner (2004) werden thermische Grundprozesse wie in Abbildung 4-1 dargestellt nach Wärme- und Stoffübertragung unterschieden.

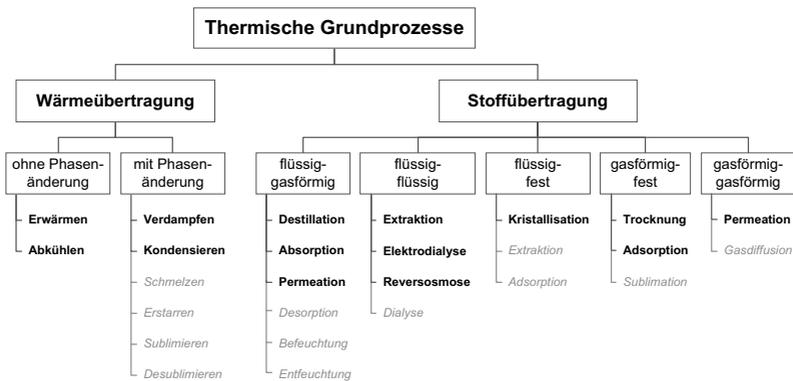


Abbildung 4-1: Unterteilung der thermischen Grundprozesse nach Tscheuschner (2004).

Die bei der Produktion von Lebensmitteln industriell angewendeten thermischen Grundprozesse beschränken sich auf die hervorgehobenen Operationen. Dies sind das Erwärmen und Abkühlen von Produkten (z.B. Pasteurisation), Verdampfung und Kondensation (z.B. Konzentratherstellung), die Destillation zur Trennung unterschiedlicher Komponenten, Absorptions- und Extraktionsprozesse sowie das Trocknen, Adsorbieren und Kristallisieren. Eine weitere wichtige Gruppe ist das Membrantrennen, das die Reversosmose, Elektrodialyse und Permeation umfasst. Je nach herzustellendem Produkt werden für die genannten Grundprozesse unterschiedliche Verfahren angewendet. Hierzu können

verschiedene Anlagen genutzt werden, die sich in ihrer Beheizung signifikant voneinander unterscheiden können. Daher werden die innerhalb dieses Kapitels analysierten Prozessketten ausgewählter Branchen der Ernährungsindustrie auch hinsichtlich der verwendeten Anlagentechnik untersucht. Basierend auf den gewonnenen Erkenntnissen werden abschließend branchenübergreifend die konventionellen Beheizungsmethoden in der Industrie untersucht, was als Grundlagen zur Entwicklung der allgemeingültigen Klassifizierung zur Einbindung solarer Prozesswärme in industrielle Prozesse und Wärmeverorgungsstrukturen benötigt wird.

4.1. Analyse ausgewählter Branchen der Ernährungsindustrie

Um einschätzen zu können, wie übertragbar die Ergebnisse der detaillierten Untersuchung der Brauereibranche hinsichtlich der Einbindung solarer Wärme sind, wurden die Prozessketten ausgewählter Branchen der Ernährungsindustrie untersucht. Die Auswahl der untersuchten Branchen orientierte sich an den Ergebnissen der Potentialberechnung zur solaren Prozesswärme in Deutschland.

4.1.1. Milchverarbeitung

In Betrieben zur Milchverarbeitung wird Rohmilch in geeignete flüssige und feste Milchprodukte aufbereitet. Je nach gewünschtem Endprodukt sind dabei unterschiedliche Prozessschritte notwendig. Die einzelnen Prozessketten zur Herstellung der wichtigsten Milcherzeugnisse sind Abbildung 4-2 zu entnehmen.

Prinzipiell finden sich vor allem zu Beginn der Prozessketten immer wieder die Prozessschritte Separieren, Standardisieren, Homogenisieren und Pasteurisieren. Häufig gehen den dargestellten Prozessschritten Aufheiz- oder Abkühlvorgänge voraus, um das Medium auf die optimale Verarbeitungstemperatur zu bringen. Dies erfolgt in der Regel rekuperativ innerhalb der gleichen Prozesslinie mit Hilfe geeigneter Wärmeübertrager.

Bei der Herstellung von **Konsummilch** (pasteurisierte oder UHT Milch) folgt nach der Standardisierung (Einstellung des gewünschten Fettgehalts durch Beimischung von Rahm) die Homogenisierung. Dabei werden die in der Milch enthaltenen Fettpartikel verkleinert, um die vorliegende Fettemulsion zu stabilisieren. Dadurch soll ein Aufrahmen der Milch verhindert werden. Gängige Homogenisierungstemperaturen liegen bei rund 60..70 °C (Kessler, 1996). Zum anschließenden Haltbarmachen der Milchprodukte stehen unterschiedliche Wärmebehandlungsverfahren zur Verfügung. Nach Spreer (2011) grenzen sich diese Verfahren durch unterschiedliche Temperatur-Zeit-Kombinationen voneinander ab. Dies sind Thermisierung (57..68 °C, ≤ 30 s), Dauererhitzung (62..65 °C, 30 min), Kurzzeiterhitzung (72..75 °C, 15..30 s), Hoherhitzung (85..127 °C, 8..15 s) und Ultra-Hoherhitzung (135..150 °C, 2..8 s) sowie die Sterilisation verpackter Produkte. Die bei der Milchver-

arbeitung am häufigsten eingesetzten Verfahren sind Kurzzeiterhitzung und Ultra-Hocherhitzung – die Dauererhitzung wird aufgrund des apparativen Aufwands und der diskontinuierlichen Betriebsweise lediglich in Kleinbetrieben oder Hofkäsereien eingesetzt.

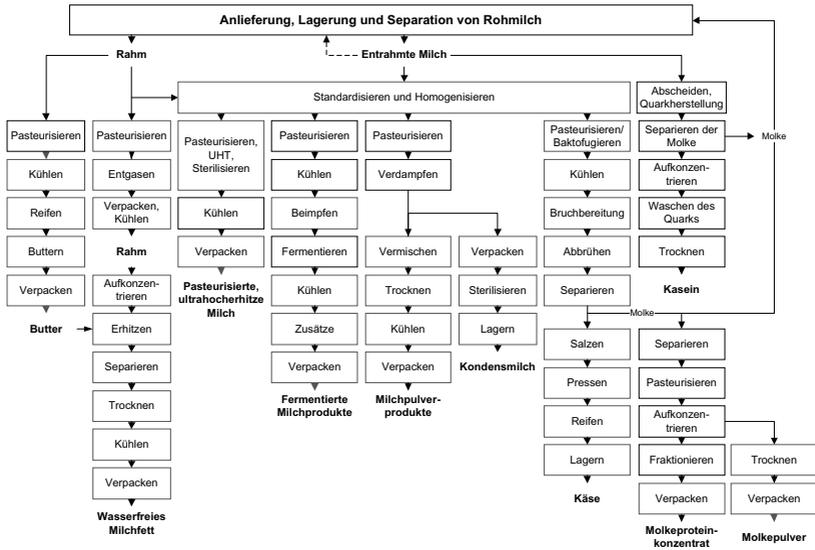


Abbildung 4-2: Grundfließbild der Milchverarbeitung nach Ramirez et al. (2006).

Das Pasteurisieren erfolgt am häufigsten durch Kurzzeiterhitzung mit geeigneten Plattenwärmeübertragern. Diese entsprechen den in Kapitel 3 vorgestellten Mehrzonen-Wärmeübertragern. Für die erforderliche Heißhaltung der Milch können entweder Heißhalteabteilungen, die in den Mehrzonen-Wärmeübertragern integriert sind, oder externe Rohrheizhalter verwendet werden (Spreer, 2011). Die Aufheizung der Milch auf Pasteurisierungstemperatur erfolgt aus Gründen der Produktschonung mit Warmwasser. Das Warmwasser wird in einem separaten Plattenpaket, das unter Umständen auch extern angeordnet sein kann, meist mit Dampf auf die benötigte Temperatur (1..2 °K über Pasteurisationstemperatur) aufgeheizt (Bake, 2003).

Zum Sterilisieren von Milchprodukten bestehen prinzipiell zwei Möglichkeiten. Die Sterilisation des flüssigen Produktes mit anschließender aseptischer Abfüllung in geeignete Behälter oder die Sterilisation des verpackten Produktes (Bake, 2003). Das als UHT-Verfahren (ultra high temperature) bekannte Sterilisieren des flüssigen Produktes wird kontinuierlich bei 135..150 °C durchgeführt – die Beheizung kann direkt oder indirekt

erfolgen. Bei der direkten Beheizung wird die Milch mit entsprechend aufbereitetem Wasserdampf in Verbindung gebracht und somit auf Sterilisationstemperatur aufgeheizt. Dabei unterscheidet man Injektionssysteme, bei denen der Dampf in die Milch injiziert wird von Infusionssystemen, bei denen die Milch in den Dampf injiziert wird. Unabhängig davon gelangt die mittels Dampf auf Sterilisationstemperatur aufgeheizte Milch anschließend in einen unter Vakuum stehenden Expansionsbehälter. Bei der Entspannung des Gemisches wird exakt die Menge Wasser verdampft, die dem Produkt zuvor zugeführt wurde (Cross et al., 1988). Neben der Anlagentechnik zur Infusion bzw. Injektion des Dampfes und der anschließenden Expansion verfügen direkte UHT-Anlagen über Wärmeübertrager, die den Produktstrom vor der Sterilisation rekuperativ mittels des sterilisierten Produkts aufheizen. Dabei werden je nach Produkt Platten-, Rohrbündel- oder Schabewärmeübertrager eingesetzt. Bei der indirekten Beheizung werden diese Wärmeübertrager ebenfalls eingesetzt. Plattenwärmeübertrager verfügen dabei über ein zusätzliches Plattenpaket, in dem Heißwasser das Produkt auf Sterilisationstemperatur aufheizt. Bei Rohrbündel- oder Schabewärmeübertragern wird ein zusätzliches Aggregat benötigt (Bake, 2003). Aufgrund des hohen thermischen Wirkungsgrades von bis zu 90 % haben sich die indirekten Sterilisationsverfahren in der Vergangenheit immer mehr durchgesetzt. Die dabei notwendige Restaufheizung des Produkts liegt bei etwa 13 K (Kessler, 1996).

Bei der Sterilisation verpackter Produkte werden stehende oder liegende Druckkessel verwendet, die Flaschen oder Dosen mittels Gestellen, Käfigen oder Wagen durchlaufen. Die Beheizung erfolgt meist mit Dampf, die geforderten Temperaturen liegen bei 115..120 °C. Sterilisatoren verfügen über mehrere Vorwärmzonen, eine Sterilisationszone und nachgeschaltete Kühlzonen. In der Sterilisationszone befindet sich typischerweise gesättigter Dampf, der die Dosen oder Flaschen nach der rekuperativen Vorwärmung auf Sterilisationstemperatur aufheizt (Schuchmann und Schuchmann, 2005).

Bei der Herstellung von **Käse** ist das Baktofugieren ein wichtiger Schritt bei der Milchvorbehandlung. Dies ist eine spezielle Form der Separation, bei der Mikroorganismen aus der Milch entfernt und anschließend abgetötet werden. Die Milch weist bei diesem Trennprozess typischerweise Temperaturen von 55..75 °C auf (Spreer, 2011). Das bei der Separation gewonnene Baktofugat wird in der Regel mittels direkter Dampfinjektion (140 °C) sterilisiert und anschließend der baktofugierten Milch zugeführt oder anderweitig verarbeitet (Rosenthal, 1991). Im Käsefertiger werden der Milch unterschiedliche Zusatzstoffe wie z.B. Kulturen, Lab oder Farbstoffe beigemischt. Die dadurch entstehende Gelmasse muss zur weiteren Verarbeitung zerkleinert werden. Für diese sogenannte Bruchbereitung wird das Bruch-Molke-Gemisch erwärmt. Dieser Prozessschritt wird auch als Brennen bezeichnet. Die Temperatur ist abhängig von der produzierten Käsesorte und liegt für Schnittkäse bei 35..39 °C, für Hartkäse nach Chesterart bei 40..42 °C und für weitere Hartkäsearten bei 48..54 °C (Kessler, 1996). Die Erwärmung des Gemisches kann

indirekt über einen Heizmantel erfolgen, der mit Dampf oder Heißwasser beheizt wird, oder direkt durch die Zugabe von entsprechend aufbereitetem Warmwasser in das Gemisch. Auch Mischformen der direkten und indirekten Beheizung sind möglich (Bake, 2003). Bei italienischen Käsesorten wie Mozzarella wird beispielsweise dem Bruch Warmwasser mit 80..85 °C zugeführt bei gleichzeitiger Entnahme des entsprechenden Molkenvolumens (Kessler, 1996).

Bei der Herstellung von **Milchpulver** folgt der Homogenisierung das Eindicken der Milch in der Regel durch Verdampfung. Die Verdampfung wird meist mehrstufig mit dampfbeheizten Platten- oder Rohrbündel-Fallfilmeindampfern ausgeführt. Die Produkttemperatur liegt bei maximal 70 °C in der ersten und 40 °C in der letzten Eindampfstufe (Bake, 2003). Das resultierende Konzentrat wird anschließend getrocknet. Die Trocknung erfolgt typischerweise mit Walzen-, Sprüh- oder Zerstäubungstrocknern. Walzentrockner werden mit Dampf betrieben, dessen Temperatur im Bereich von 120..165 °C liegt (Kessler, 1996). Bei der Sprühtrocknung liegen die benötigten Lufttemperaturen bei 150..210 °C (Bake, 2003). Bei Zerstäubungstrocknern liegt der Temperaturbereich mit 180..230 °C etwas höher (Kessler, 1996).

Die Herstellung von **Joghurt** (zählt zu fermentierten Milchprodukten) beinhaltet neben den bereits erläuterten Prozessschritten das Beimpfen mit speziellen Kulturen sowie die sogenannte Bebrütung und ggf. eine Aromatisierung. Der tatsächliche Ablauf der Produktion nach dem Beimpfen hängt vom gewünschten Zielprodukt ab.

Neben den einzelnen Prozessen zur Herstellung der jeweiligen Milchprodukte ist das **Reinigen** der Produktionseinrichtungen ein sehr wichtiger und immer wiederkehrender Prozess. Neben der Einhaltung hygienischer Standards ist dies vor allem zur Vermeidung von Belägen innerhalb der Behälter, Rohrleitungen und Wärmeübertrager notwendig. Vor allem Anlagen zur Verdampfung und Trocknung sind hierfür besonders anfällig, weshalb der spezifische Energiebedarf zur Reinigung hier besonders hoch ist. Typische CIP-Temperaturen bei der Milchverarbeitung liegen bei 65..75 °C (Ramirez et al., 2006).

Die Analyse der Prozesse zur Milchverarbeitung zeigt sowohl Gemeinsamkeiten als auch Unterschiede zum Brauwesen. Auch bei der Milchverarbeitung wird die prozessbedingt anfallende Abwärme, meist in der gleichen Verarbeitungslinie, genutzt. Grundsätzlich ist die Herstellung von Milcherzeugnissen durch sehr viele Aufheiz- und Abkühlvorgänge geprägt, sodass ein hohes Potential vorhanden ist, den Großteil der benötigten Wärme unterhalb von 60 °C rekuperativ zu decken. Anders als beim Brauwesen werden bei der Milchverarbeitung signifikante Wärmemengen auch oberhalb von 100 °C für Trocknungs- und Sterilisationsprozesse verbraucht. Hinsichtlich der verwendeten Anlagentechnik finden sich viele Gemeinsamkeiten zum Brauwesen. Die zur Kurzeiterhitzung von Bier verwendeten Mehrzonen-Wärmeübertrager (vgl. Abschnitt 3.4.5) werden bei der Milchver-

arbeitung ebenfalls genutzt. Auch zur Verdampfung, die ebenfalls aus Gründen der Produktschonung unterhalb von 100 °C erfolgt, findet sich die gleiche Anlagentechnik. Ähnlich wie bei Brauereien ist die CIP-Reinigung ein wichtiger und energieintensiver Prozess innerhalb der milchverarbeitenden Industrie.

Da Milchprodukte temperaturempfindlich sind und zum Anbacken an heißen Oberflächen neigen, werden bei der Verarbeitung häufig Warmwasserzwischenkreise verwendet. Dabei heizt das konventionelle Heizmedium den Zwischenkreis auf eine Temperatur wenige Kelvin oberhalb der Solltemperatur des Produktes vor. Auch in Molkereien wird häufig Dampf als Heizmedium verwendet. Vor allem für Sterilisationsprozesse wird dieser jedoch im Gegensatz zum Brauwesen direkt in das Produkt (vgl. UHT Verfahren) oder in ein Wasserbad (vgl. Sterilisatoren) injiziert.

4.1.2. Schlachten und Fleischverarbeitung

Die fleischverarbeitende Industrie gliedert sich in die beiden Bereiche Schlachtbetriebe und Fleischereien, in denen die Weiterverarbeitung und Veredelung des Fleisches stattfindet. Abbildung 4-3 zeigt die Grundfließbilder für das Schlachten von Rindern, Schweinen und Geflügel. Im Vergleich zu den unterschiedlichen Erhitzungsverfahren bei der Fleischverarbeitung finden sich bei der Schlachtung nur vereinzelt Prozesse die einen Wärmebedarf aufweisen.

Beim **Schlachten** von Schweinen und Geflügel müssen die Tierkörper abgebrüht werden, um das Entfernen der Haare bzw. Federn zu erleichtern (Cross et al., 1988). Hierzu werden unterschiedliche Verfahren angewendet. Sielaff (1996) unterscheidet bei der Schweineschlachtung das Ganzbrühverfahren und das Teilbrühverfahren. Während beim Teilbrühen nur die untere Hälfte der Schlachtkörper kontinuierlich durch ein Brühbad mit 61..63 °C transportiert werden, wird beim Ganzbrühverfahren entsprechend der gesamte Körper dem Brühmedium ausgesetzt. Zum vollständigen Brühen der Schlachtkörper werden neben Brühbottichen auch Brühltunnel verwendet, bei denen die Schlachtkörper mit temperiertem Wasser besprüht werden. Der Heißwasserverbrauch liegt bei 5..30 l pro Tierkörper. Eine Alternative stellt die Kondensationsbrüfung dar, bei der die Schlachtkörper mit erhitzter feuchter Luft beaufschlagt werden (Mintzlaff et al., 1998). Bereits bei kleineren Schlachtdurchsätzen von 100 Schweinen pro Stunde beinhaltet ein typischer Brühbottich 5,5 m³ Wasser. Diesem Tank muss kontinuierlich Wasser zugeführt werden, um die Verluste durch Verschleppung auszugleichen (EIPPCB, 2005). Die Beheizung der Brühprozesse erfolgt in der Regel durch Dampfinjektion.

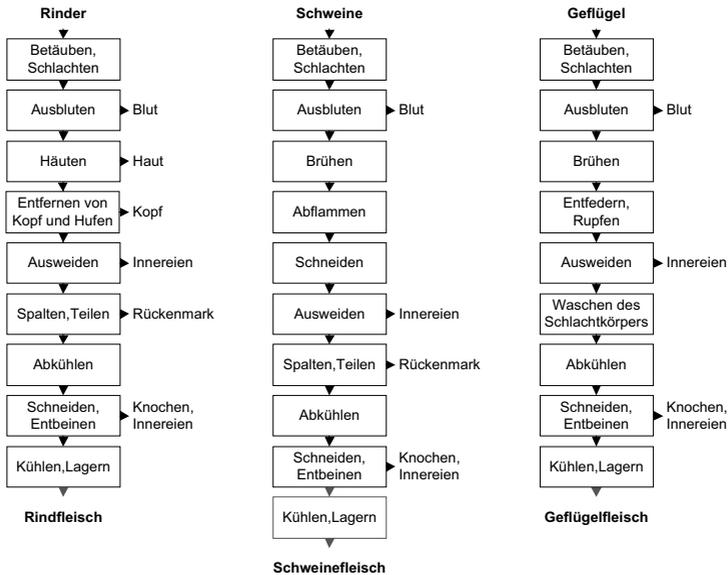


Abbildung 4-3: Grundfließbild der Rinder-, Schweine- und Geflügelschlachtung nach Ramirez et al. (2006).

Die Brühtemperatur liegt bei der Schlachtung von Geflügel im Vergleich zu Schweinen etwas niedriger. Nach Jensen et al. (2004) erfolgt das Brühen von Geflügel bei 50..51 °C für etwa 3,5 Minuten, wenn die Tiere anschließend gekühlt werden. Bei der Herstellung von gefrorenem Geflügel liegt die Temperatur mit 56..58 °C etwas höher. Das Brühen erfolgt in der Regel mit Wasser gefüllten Tanks, durch die das Geflügel kontinuierlich hindurchgezogen wird. Zur Verringerung der Schmutzlast im Brühwasser können mehrere Tanks hintereinander geschaltet werden (Grabowski, 2008). Das Wasser der Brüh tanks muss nach Fries et al. (2001) täglich ausgewechselt werden. Zudem wird im Betrieb ein konstanter Wasserzulauf zum Ausgleich der Verschleppungsverluste von 0,2..0,3 l pro Tier benötigt.

Beim Schlachten von Rindern und Schafen werden die erläuterten Brühprozesse nicht angewendet. Hier reduziert sich der Wärmebedarf lediglich auf das Reinigen der Produktionseinrichtungen. Die Auswertung der Produktionszahlen europäischer Schlachtbetriebe durch Ramirez et al. (2006) zeigt folgende Aufteilung des thermischen Energiebedarfs:

4. Untersuchung der Übertragbarkeit auf andere Branchen

- Schweineschlachtung: 15 % Brühen, 18..20 % für Reinigung/Desinfektion
- Rinderschlachtung: 80..90 % für Reinigung/Desinfektion
- Geflügelschlachtung: 60 % für Brühen, 30 % für Reinigung/Desinfektion

Der verbleibende Wärmebedarf wird für Gebäudebeheizung und im Falle der Schweineschlachtung für das Abflämmen benötigt.

Wie Abbildung 4-4 zeigt, finden sich bei der **Fleischverarbeitung** im Vergleich zu Schlachtbetrieben deutlich mehr Prozesse, die Wärme benötigen. Prändl et al. (1988) unterscheiden die verschiedenen Erhitzungsprozesse bei der Fleischverarbeitung nach Verfahren zum Zwecke der Zubereitung, als Teil des Herstellungsverfahrens oder zum Haltbarmachen der Produkte. Für die ersten beiden Kategorien wird zusätzlich zwischen trockenen (Braten, Grillen, Backen) und feuchten (Kochen, Dämpfen, Brühen) Erhitzungsverfahren differenziert. Hinsichtlich der potentiellen Einbindung von Solarwärme sind die feuchten Erhitzungsverfahren von besonderem Interesse.

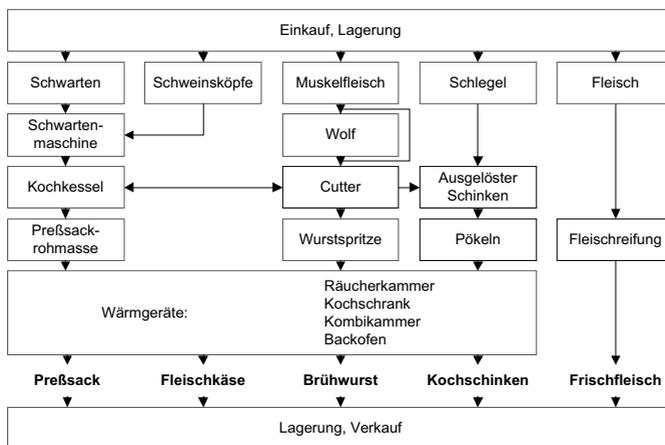


Abbildung 4-4: Grundfließbild der Fleischverarbeitung nach Stempel (2005).

Die wichtigsten Prozesse als Teil des Herstellungsverfahrens von Fleischwaren sind Kochen, Brühen und Räuchern. Gebrüht werden hauptsächlich Wurstwaren bei Temperaturen um 75 °C. Abhängig von der zu behandelnden Fleischsorte kann das Brühen auch bei niedrigeren Temperaturen stattfinden (z.B. Geflügel bei 48..65 °C). Gekocht werden Kasseler, Kochschinken sowie einige Wurstsorten bei einer Temperatur von 100 °C. Beim Räuchern unterscheidet man drei Temperaturniveaus. Bei Kalträuchern mit Temperaturen

von 15..20 °C besteht kein Bedarf an Prozesswärme. Warmröchern erfolgt bei 25..50 °C und Heißröchern bei 50..80 °C. Die jeweiligen Behandlungszeiten variieren stark und liegen für das Brühen im Bereich von 1..10 h und das Kochen bei bis zu drei Stunden. Beim Röchern können sogar Behandlungszeiten von mehreren Tagen auftreten (BMWfJ, 2009; Stempel, 2005; Tscheuschner, 2004; Wieting und Wigbert, 2009).

Die am häufigsten verwendeten Anlagen zur thermischen Behandlung sind Wasserbadkessel, Durchlaufkochanlagen und Dämpfanlagen. Wasserbad- bzw. Kochkessel dienen zur Herstellung von Kochwurst und Garfleischwaren. Die meist quaderförmigen Kessel mit einem Inhalt von 150..1500 l werden einzeln, in Reihen- oder Gruppenaufstellung verwendet. Die Beheizung kann sowohl über direkte Dampfinjektion als auch indirekt über einen Mantel erfolgen. Durchlaufkochanlagen verfügen über Schnecken, Transportbänder oder Körbe, die das Produkt durch die Maschine fördern. Auch hier wird im Wasserbad gegart. In Dämpfanlagen oder Luftkochschränken werden feuchtigkeitsgesättigte Heißluft oder Frischdampf als Garmedium verwendet. Die Kammern werden meist mit Wagen beschickt und diskontinuierlich betrieben (Sielaff, 1996). Zudem nehmen Autoklaven zur Herstellung von Konserven einen wichtigen Stellenwert bei der Fleischverarbeitung ein. Hierbei gibt es eine Vielzahl von Anlagen – angefangen von einfachen Druckkesseln für diskontinuierliche Arbeitsweise bis hin zu hydrostatischen Autoklaven, in denen eine kontinuierliche Sterilisation der Konserven stattfindet (Prändl et al., 1988). Während bei den diskontinuierlichen Anlagen Vollwasserautoklaven weit verbreitet sind, erfolgt die kontinuierliche Sterilisation mittels Drehtrommel- oder hydrostatischen Autoklaven (Saravacos und Kostaropoulos, 2002). Diese Anlagen haben gemein, dass als Wärmeträgermedium häufig Dampf verwendet wird, der direkt in eine Dampfatmosphäre oder in ein Wasserbad injiziert wird.

Ähnlich wie beim Brauwesen und der zuvor erläuterten Milchindustrie nimmt auch bei der Herstellung von Fleisch und Fleischwaren die CIP-Reinigung einen hohen Stellenwert ein. Der tatsächliche Anteil der Reinigung am gesamten Wärmebedarf wird durch das zu verarbeitende Produkt bestimmt. Hinsichtlich der verwendeten Anlagentechnik wird deutlich, dass bei der Fleischverarbeitung, anders als im Brauwesen oder bei der Milchverarbeitung, häufig mit Wasser gefüllte Kessel oder Becken eingesetzt werden. Diese Behälter werden häufig durch Dampfinjektion oder mittels Heizmänteln beheizt. Seltener werden externe Wärmeträger eingesetzt. Zudem finden sich in dieser Branche Prozesse, die zur Verarbeitung des Produkts eine Atmosphäre aus gesättigter Heißluft oder Dampf nutzen, die in der Regel durch direkte Dampfinjektion erzeugt wird.

4.1.3. Back- und Teigwaren

Die Branche *Herstellung von Back- und Teigwaren* unterteilt sich in die drei Bereiche: Herstellung von Backwaren (Brot, Brötchen und feine Backwaren wie Kuchen, Torten,

Waffeln, etc.), Herstellung von Dauerbackwaren (Knäckebrötchen, Zwieback, Spritzgebäck, Kräcker, Bretzeln, etc.) und Herstellung von Teigwaren (hauptsächlich Nudeln, aber auch Couscous und gefrorene Teigwaren). Der energetisch bedeutendste Bereich – die Herstellung von Backwaren – erscheint aus solarthermischer Sicht eher uninteressant. Zwar ist ein großer Warmwasserbedarf für Teigbereitung und Reinigungsprozesse vorhanden, dieser sollte allerdings durch Wärmerückgewinnungsmaßnahmen der Ofenabluft und Kältebereitstellung gedeckt werden. Die Teigwarenherstellung ist hauptsächlich durch die Produktion von Nudeln geprägt. Deren Produktion verläuft in den drei Schritten Dosieren/Mischen, Ausformen und Trocknen (vgl. hierzu das Grundfließbild der Spaghettiherstellung in Abbildung 8-1 im Anhang). Bei der Trocknung wird die Teigfeuchtigkeit von etwa 30 % auf 12 % reduziert (Heiss, 2004). Hierzu werden Schüttel-, Band- und Trommeltrockner verwendet. Das Temperaturniveau liegt bei 55..85 °C für die Hochtemperaturtrocknung oder der bei 75..130 °C für die Ultrahochtemperaturtrocknung. Bei der Herstellung von Spätzle ist auch der Ausformungsprozess durch einen hohen thermischen Energiebedarf gekennzeichnet, da dieser Prozessschritt durch Blanchieren erfolgt (Werner, 2010). Bei der Produktion von Frischeipasta muss diese zusätzlich pasteurisiert werden. Hierzu werden Bandpasteure direkt nach der Ausformung oder Kammerpasteure nach der Verpackung verwendet (Alamprese et al., 2008).

Der aus solarthermischer Sicht relevante Teil dieser Branche (*Herstellung von Teigwaren*) wird maßgeblich von Trocknungsprozessen bestimmt und unterscheidet sich damit ganz wesentlich vom Brauwesen. Vereinzelt Prozesse wie das Pasteurisieren oder Blanchieren spezieller Nudelsorten ähneln hingegen in der verwendeten Anlagentechnik und der konventionellen Beheizung einigen im Brauwesen angewandten Prozessen.

4.1.4. Obst- und Gemüseverarbeitung

Das jährliche Produktionsvolumen der obst- und gemüseverarbeitenden Industrie in Deutschland beträgt gut 3,5 Mio. Tonnen (NGG, 2013). Die Obst- und Gemüseverarbeitung dient der Bereitstellung haltbar gemachter Fertiggüter. Je nachdem ob Sterilkonserven, Obst- und Gemüsesäfte, Gefrier-, Trocken- oder Rohkonserven, streichfähige Obsterzeugnisse oder Kindernahrung produziert werden, sind unterschiedliche Verfahrensabläufe notwendig. Immer wiederkehrende Prozessschritte sind Reinigen, Sortieren, Schälen, Entstielen bzw. Entsteinen, Zerkleinern, Blanchieren, Abfüllen, Pasteurisieren und Sterilisieren. Aus thermischer Sicht sind Schälen, Blanchieren, Pasteurisieren und Sterilisieren besonders relevant (Tscheuschner, 2004).

Zum **Schälen** von Obst oder Gemüse wird nach Heiss (2004) am häufigsten Dampf-, Lauge- oder mechanisches Schälen verwendet. Während beim Dampfschälen das Produkt direkt mit Dampf beaufschlagt wird, wird beim Laugeschälen das Produkt durch ein

Laugenbad mit 50..70 °C oder 90..100 °C geführt. Das Laugeschälen wird nach Sinha und Sidhu (2012) vor allem bei Pfirsichen und Aprikosen sehr häufig angewendet.

Blanchieren ist ein in der Obst- und Gemüseverarbeitung sehr weit verbreiteter Prozess und findet häufig vor dem Gefrieren, Eindosen oder Trocknen statt. Dabei unterscheidet man Wasser- und Dampfblanchieren (Heldman und Moraru, 2011). Wasserblanchieren erfolgt bei 70..100 °C in zylindrischen Behältern mit einer Förderschnecke oder Anlagen die ähnlich aufgebaut sind wie die in Abschnitt 3.4.9 beschriebenen Tunnelpasteure (Sharma et al., 2000). In Dampfblanchieranlagen wird das Produkt mittels Förderband oder Kette durch eine Dampfatmosfera geführt. Am Ende des Blanchierprozesses wird das Produkt mittels Luft oder Wasser abgekühlt (Saravacos und Maroulis, 2011). Dampfblanchieren wird nach Heldman und Moraru (2011) hauptsächlich für kleine Produkte eingesetzt, da bei größeren Produkten die Gefahr einer ungleichmäßigen Temperatureinwirkung besteht. Blanchieranlagen werden direkt durch Einblasen von Wasserdampf oder indirekt mittels Wärmeübertrager beheizt. Je nach Produkt nimmt entweder das Blanchieren oder das Pasteurisieren bzw. Sterilisieren den Großteil der verbrauchten thermischen Energie ein (Tscheuschner, 2004).

Die Haltbarmachung mittels **Pasteurisation** wird in der Regel bei Säften angewendet. Für Flüssigkeiten mit niedriger Viskosität und ohne Partikel werden Plattenwärmeübertrager eingesetzt. Für Fruchtsäfte mit Fruchtfleisch gibt es spezielle Platten mit größeren Kanälen. Bei größeren Stücken in der Flüssigkeit werden Röhrenwärmeübertrager verwendet (Tucker und Featherstone, 2011). Für Medien wie passierte Tomaten werden die in Abschnitt 4.2.1 vorgestellten konzentrischen Rohrwärmeübertrager genutzt, die nur einen Produktkanal haben, der innen und außen über einen Heizkanal verfügt (Bolmstedt, 2000).

Bei der Herstellung von Konserven erfolgt die Haltbarmachung hingegen häufig durch **Sterilisation** (vgl. Grundfließbild der Sterilkonservenherstellung in Abbildung 8-2 im Anhang). Hierfür werden ähnlich wie bei der Milch- und Fleischverarbeitung unterschiedliche Autoklaven verwendet. Die meisten Verfahren wie hydrostatischer-, Vollwasser-, Dampf-Luft- oder Rotationsautoklav werden durch Dampfinjektion beheizt, Berieselungs- und Sprühautoklaven mittels externen Wärmeübertrager (Tucker und Featherstone, 2011).

Bei der Herstellung von Fruchtsaft (vgl. Grundfließbild in Abbildung 8-3 im Anhang) ist die **Konzentration** ein wichtiger Prozess. Hierzu werden die Früchte zunächst gewaschen (zum Teil bei 50..60 °C) und gepresst. Bei Beerenfrüchten wie Himbeeren oder Holunder kann eine thermische Behandlung vor dem Pressen (schnelles Aufheizen auf 80..85 °C und anschließendes Abkühlen) die Saftausbeute erhöhen. Die Konzentration des gepressten Safts erfolgt durch Verdampfung. Ähnlich wie bei der Milchverarbeitung findet die Verdampfung unter Vakuum statt. Das Heizmedium liegt typischerweise 15 K über der

Verdampfungstemperatur des Produkts, sollte allerdings 105 °C nicht übersteigen, um eine Verbrennung des Produkts auszuschließen (Sinha und Sidhu, 2012).

Auch bei der Obst- und Gemüseverarbeitung finden sich in Abhängigkeit des produzierten Produkts Ähnlichkeiten der Prozesstechnik zu den zuvor erläuterten Branchen. Bei der Herstellung und Verarbeitung von Säften erfolgen vergleichbare Pasteurisations- und Konzentrationsprozesse wie bei der Herstellung von Bier und Milcherzeugnissen. Ein sehr wichtiger Prozessschritt in dieser Branche ist das Blanchieren. Die hierfür verwendete Anlagentechnik ähnelt sehr stark den bereits im Brauwesen vorgestellten Tunnelpasteuren (vgl. Abschnitt 3.4.9). Die Beheizung dieser Blancheure erfolgt allerdings häufig auch durch direkte Dampfinjektion anstelle von externen Wärmeübertragern. Zusätzlich finden sich häufig Sterilisationsprozesse ähnlich der Fleischverarbeitung, die in Abhängigkeit der verwendeten Autoklaven mittels Dampfinjektion oder externen Wärmeübertragern beheizt werden.

4.1.5. Süßwaren

Die Branche *Herstellung von Süßwaren* unterteilt sich in die drei Bereiche Schokoladenerzeugnisse, Zuckerwaren und Knabberartikel (DeStatis, 2011b). Während die Herstellung von Schokoladenerzeugnissen größtenteils von relativ niedrigen Prozesstemperaturen geprägt ist, weisen die Prozesse der Zuckerwarenherstellung deutlich höhere Temperaturen auf. Der energetisch relevanteste Prozess ist dabei das Eindampfen, was teilweise auch als Kochen bezeichnet wird (AKMAS, 2009). Bei der Herstellung von Bonbons werden beispielsweise die Hauptbestandteile Saccharose und Glukosesirup bei 120..160 °C eingedampft (vgl. Grundfließbild in Abbildung 8-4 im Anhang). Hierzu können Kochmaschinen mit Rührwerk im Batchbetrieb oder Schlangenkochmaschinen zum kontinuierlichen Kochen verwendet werden. Der Prozess läuft bei Umgebungsdruck oder Vakuum ab. Bei Weichkaramellen liegt die Kochtemperatur mit 120..130 °C etwas niedriger. Hierbei werden allerdings ausschließlich Apparate mit Rührelementen oder Schabern verwendet (Hoffmann et al., 2002).

Ein Fließschema zur Herstellung von Schokoladenerzeugnissen zeigt Abbildung 4-5. Man unterscheidet die Verarbeitung von Rohkakao zu Kakaopulver, -butter und -masse von der eigentlichen Herstellung unterschiedlicher Schokoladenerzeugnisse. Zunächst werden die Kakaobohnen gewaschen und anschließend geröstet. Das Rösten erfolgt in drei Schritten. Bei einer thermischen Vorbehandlung mittels Heißluft, Dampf oder Infrarot werden Bakterien abgetötet und die Schalen vom Kern gelöst. Das anschließende eigentliche Rösten bei 120..130 °C dient der Aromabildung und dem Wasserentzug. Abschließend erfolgt eine thermische Nachbehandlung zur Debakterisierung und Geschmacksverbesserung.

und Abfüllen in Formen (Minifie, 1989; Tscheuschner, 2004). Häufig finden die Herstellung der Schokoladenmasse und der Schokoladenerzeugnissen in unterschiedlichen Produktionsstätten statt. In diesem Falle wird die warme Schokoladenmasse (40..50 °C) in Tanklastern zu den weiterverarbeitenden Fabriken gebracht. Dort wird die Schokoladenmasse in entsprechend beheizten Behältern ebenfalls bei 40..50 °C gelagert. Neben diesen Tanks müssen auch alle Rohrleitungen, die die Schokoladenmasse zu den jeweiligen Verarbeitungsmaschinen führen, auf der entsprechenden Temperatur gehalten werden.

Die verwendete Anlagentechnik bei der Herstellung von Süßwaren variiert stark mit den produzierten Gütern. Bei Zuckerwaren dominieren Produktionsprozesse mit dampfbeheizten Behältern mit Temperaturanforderungen oberhalb von 120 °C. Die Prozesse bei der Herstellung von Schokoladenerzeugnissen hingegen sind von Temperaturen deutlich unter 100 °C geprägt und werden hauptsächlich durch Warmwasser energetisch versorgt. Damit weist die Herstellung von Süßwaren die wenigsten Gemeinsamkeiten mit den zuvor erläuterten Branchen auf.

4.1.6. Mineralwasser und Erfrischungsgetränke

Mineralwässer und Erfrischungsgetränke sind neben Bier die absatzstärksten Produkte der Getränkeindustrie. Unter Erfrischungsgetränke fallen Fruchtsaftgetränke, Fruchtschorlen, Limonaden, Brausen und Energy Drinks. Neben dem Hauptbestandteil Wasser sind die wichtigsten Rohstoffe für die Herstellung von Erfrischungsgetränken Zucker, Säure, Aroma- und Farbstoffe. Je nach Getränk können bis zu 20 Zutaten miteinander vermischt werden. Bei der Herstellung können die unterschiedlichen Zutaten einzeln oder als Grundstoff (Mischung verschiedener Zutaten) verarbeitet werden. Die Prozesskette beginnt gemäß Abbildung 4-6 mit dem Dosieren und Mischen der einzelnen Zutaten. Anschließend erfolgt das Lösen bzw. Dispergieren und Homogenisieren. Danach werden die Getränke haltbargemacht, ggf. karbonisiert und abgefüllt (Haug, 2012).

Der Wärmebedarf bei der Herstellung von Mineralwasser und Erfrischungsgetränken beschränkt sich auf die Prozesse Pasteurisieren, Flaschenwaschen, CIP und Warmwasserbereitstellung. Für die Haltbarmachung wird hauptsächlich die Kurzzeiterhitzung in entsprechenden Mehrzonen-Wärmeübertragern (vgl. Abschnitt 3.4.5) verwendet. Für den Fall, dass hochviskose oder faserhaltige Produkte behandelt werden, kommen rohrförmige Wärmeübertrager zum Einsatz. Werden die Getränke in Mehrwegflaschen gefüllt, müssen diese zuvor gereinigt werden. Hierzu werden die bereits in Kapitel 3.4.7 beschriebenen Flaschenwaschmaschinen verwendet. Innerhalb dieser Branche werden jedoch häufig PET-Flaschen verwendet, sodass die Temperatur der Flaschenreinigung in der Regel bei 60 °C liegt. Zur Beheizung der Flaschenwaschmaschinen werden meist interne oder externe Rohrbündelwärmeübertrager verwendet.

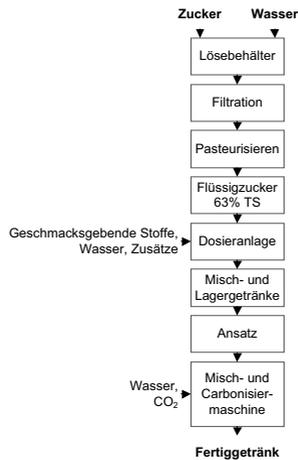


Abbildung 4-6: Grundfließbild der Herstellung alkoholfreier Getränke nach Tscheuschner (2004).

Diese Branche weist die größten Parallelen zum Brauwesen auf. Die zur Pasteurisation, Flaschenreinigung und CIP-Reinigung verwendete Anlagentechnik und Beheizungsarten entspricht den Ausführungen in Abschnitt 3.4, sodass die für das Brauwesen erarbeiteten Konzepte zur Einbindung von Solarwärme direkt übertragen werden können.

4.1.7. Fazit

Die Analyse zusätzlicher Branchen der Ernährungsindustrie zeigte, dass in Abhängigkeit des erzeugten oder weiterverarbeitenden Produkts sowohl Gemeinsamkeiten als auch Unterschiede bei der verwendeten Anlagentechnik und Beheizungsart zu den Prozessen des Brauwesens bestehen. Vor allem bei der Herstellung von Konsummilch, Fruchtsäften und Erfrischungsgetränken sind die Gemeinsamkeiten besonders deutlich. Da in diesen Branchen jeweils flüssige Produkte verarbeitet werden, ähnelt sich die verwendete Anlagentechnik in Funktion und Beheizung für Pasteurisations- oder Konzentrationsprozesse sehr stark. Doch auch bei der Verarbeitung fester Produkte finden sich Gemeinsamkeiten zum Brauwesen. So gibt es beispielsweise Blanchieranlagen für Gemüse, die in Konstruktion, Betriebsweise und Beheizung sehr stark Tunnelpasteuren für Flaschen ähneln.

Vergleicht man die innerhalb der Branchen vorherrschenden Beheizungsarten, wird deutlich, dass die im Brauwesen verwendeten Technologien wie interne und externe Wärmeübertrager oder beheizte Gefäße auch in den anderen Branchen weit verbreitet sind. Neben diesen Beheizungsarten werden in den anderen Branchen allerdings häufig auch

Prozesse mittels direkter Dampfinjektion beheizt. Dabei wird der Dampf sowohl in das Produkt selbst (z.B. Milch) als auch in ein Prozessmedium (z.B. Wasserbad) injiziert. Weiterhin zeigten die Untersuchungen die Relevanz von Trocknungs- und Verdampfungsprozessen, für die unterschiedliche Anlagenkonzepte verwendet werden. Vor allem bei den Verdampfern ähnelt sich die verwendete Anlagentechnik innerhalb der betrachteten Branchen.

Generell zeigt die Untersuchung der einzelnen Branchen, dass für vergleichbare Prozesse mit ähnlicher Anlagentechnik teils unterschiedliche Technologien zur Beheizung verwendet werden. Dies sind beispielsweise Autoklaven (Beheizung mittels externen Wärmeübertragern oder Dampfinjektion), Wasserbadkessel oder andere Behälter (Beheizung mittels Heizmäntel, Rohrschlangen oder Dampfinjektion) sowie Blanchieranlagen (Beheizung mittels Dampfinjektion, externen oder internen Wärmeübertragern). Basierend auf diesen Erkenntnisse und den in Abschnitt 3.4 erarbeiteten Integrationskonzepten für Solarwärme in Brauereien wird deutlich, dass die Einbindung von Solarwärme in einen bestehenden Prozess maßgeblich von der konventionellen Beheizung beeinflusst wird. Da somit ein wesentliches Kriterium für die zu entwickelnde Klassifizierung zur Integration thermischer Solarenergie in industrielle Prozesse identifiziert wurde, erfolgt im weiteren Verlauf dieses Kapitels eine branchenunabhängige Betrachtung der konventionellen Beheizungstechnologien der Industrie.

4.2. Thermische Energieversorgung industrieller Prozesse

Nicht nur in der Ernährungsindustrie, auch in anderen Branchen muss für eine Vielzahl von chemischen und verfahrenstechnischen Vorgängen Wärme zwischen zwei Medien übertragen werden, wozu es grundlegend unterschiedliche Möglichkeiten gibt. Vauck und Müller (1988) unterscheiden die Möglichkeiten zur Beheizung nach der unmittelbaren Energiezufuhr mittels Brennstoff-, Elektro- oder Strahlungsheizung von stofflichen Wärmeträgern wie Gasen, Dämpfen, Flüssigkeiten oder Feststoffen (vgl. Abbildung 4-7).

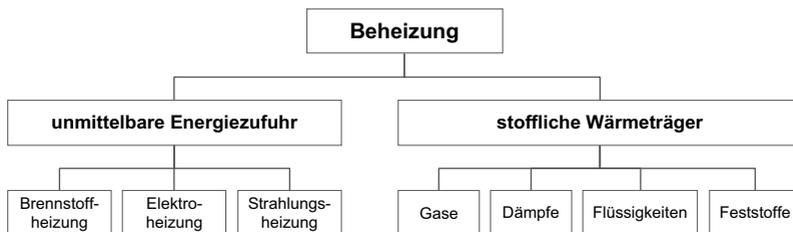


Abbildung 4-7: Unterteilung möglicher Beheizungsarten nach (Vauck und Müller, 1988).

Das maximale Temperaturniveau zur Verwendung stofflicher Wärmeträger liegt bei etwa 350.400 °C. Darüber ist die unmittelbare Energiezufuhr notwendig. Aufgrund dieser Grenzen nimmt die unmittelbare Beheizung von Prozessen bei der Substitution konventioneller Energieträger durch thermische Solarenergie eine untergeordnete Rolle ein. Die Ausführungen zur thermischen Energieversorgung innerhalb dieses Abschnitts beschränken sich daher auf die Beheizung mittels stofflicher Wärmeträger. Zwar werden in einem solarthermisch relevanten Temperaturbereich bis 150 °C vereinzelt auch unmittelbare Beheizungsverfahren (z.B. elektrische Widerstandsheizungen oder direkt angeschlossene Gasbrenner) verwendet, ein Großteil der Prozesse wird allerdings mittels Wärmeträgern beheizt.

In den aus solarthermischer Sicht relevanten Branchen erfolgt die Beheizung der jeweiligen Prozesse sehr häufig über ein zentrales Kesselhaus, das Dampf als Wärmeträgermedium bereitstellt, der in unterschiedlichen Wärmeübertragern oder direkt zur Beheizung der jeweiligen Prozesse genutzt wird. Neben diesen Dampfnetzen werden auch Heißwassernetze mit einem vergleichbaren Temperaturniveau (bis etwa 250 °C) für die energetische Versorgung unterschiedlicher Prozesse verwendet. Für die Beheizung von Prozessen mit Temperaturen zwischen 250 und 400 °C, bei denen die Verwendung von Dampf nicht möglich und eine direkte Beheizung nicht erwünscht ist, können Wärmeträger auf Mineralölbasis, synthetische Wärmeträger oder Salzschnmelzen verwendet werden (VDI GVC, 2006). Die Verwendung dieser Wärmeträger ist allerdings bei weitem nicht so verbreitet wie die Nutzung von Dampf oder Heißwasser.

Hinsichtlich der Substitution fossiler Energieträger durch thermische Solarenergie nehmen vor allem die Beheizung mittels externer und interner Wärmeübertrager sowie die direkte Dampfinjektion einen wichtigen Stellenwert ein. Neben diesen Wärmeübertragern sind auch Verdampfer sehr weit verbreitet und haben damit eine hohe Relevanz. Zwar wird ein Großteil der verwendeten Verdampfer mittels Rohrbündeln beheizt und ähnelt damit einem externen Wärmeübertrager, allerdings sind diese häufig in dem Verdampfer integriert, sodass eine separate Betrachtung dieser Technologie sinnvoll erscheint. Gleiches gilt für thermisch betriebene Trocknungsverfahren, die sich quasi in jeder Branche der Industrie wiederfinden. Nachfolgend werden die genannten Möglichkeiten der thermischen Energieversorgung industrieller Prozesse näher erläutert.

4.2.1. Externe Wärmeübertrager

Es gibt unterschiedliche Bauarten von Wärmeübertragern, die zur energetischen Versorgung industrieller Prozesse verwendet werden. In Abhängigkeit von Betriebstemperatur und -druck, benötigter Temperaturdifferenz zwischen den Medien, Korrosions-, Leckage- und Sicherheitsaspekten, Phasenänderung, Wirtschaftlichkeit und Platzbedarf kann ein geeigneter Typ gewählt werden (VDI GVC, 2006). Die wichtigsten Bauarten sind nach

Shah und Sekulić (2003) rohrförmige- und Kompaktwärmeübertrager sowie solche mit einseitig vergrößerter Oberfläche.

Abbildung 4-8 zeigt drei Beispiele zur Beheizung industrieller Prozesse mit externen Wärmeübertragern. Im linken Schaubild dargestellt ist die Pasteurisation von Joghurt mittels Schabewärmeübertragern. Dabei durchläuft das Produkt den ersten WÜT, wird aufgeheizt und gelangt danach in eine Heißhaltestrecke. Anschließend wird es in einem zweiten WÜT abgekühlt. Die mittlere Darstellung zeigt die Beheizung eines Tunnelpasteurs. Dabei wird das Wasser aus der Pasteurisationsstufe der Anlage abgezogen, mit einem extern angeordneten Rohrbündel aufgeheizt und über die durchlaufenden Flaschen gesprüht. Schließlich zeigt die rechte Abbildung die Wärmebehandlung von Fruchtsaft in einem Doppelrohrwärmeübertrager. Es wird deutlich, dass ein externer Wärmeübertrager Teil eines komplexeren Prozesses oder aber der Prozess selbst sein kann. Je nach Anwendungsfall kann der Wärmeübertrager zur Beheizung eines Produktes oder Prozessmediums verwendet werden.

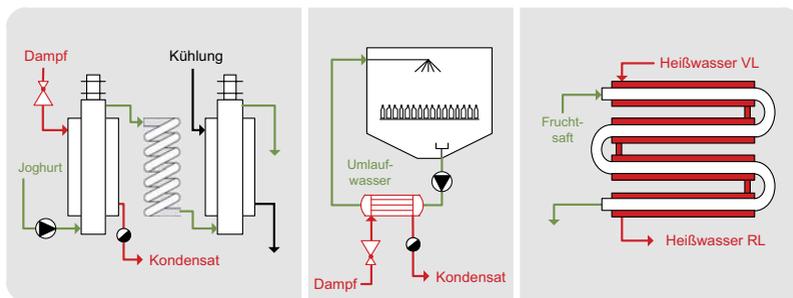


Abbildung 4-8: Beispiele zur Prozessbeheizung mit externen Wärmeübertragern.

Rohrförmige Wärmeübertrager

Die Gruppe der rohrförmigen Wärmeübertrager umfasst Rohrbündel- und Doppelrohr-Wärmeübertrager. Rohrbündel-WÜT bestehen aus einem abgeschlossenen Mantelrohr, das ein an Rohrböden befestigtes Bündel umschließt (zwei verschiedene Typen sind in Abbildung 4-9 dargestellt). Dadurch entsteht ein Mantelraum, der von einem Medium umflossen wird. Das andere Medium fließt durch das Rohrbündel, das aus glatten oder gerippten Rohren besteht.

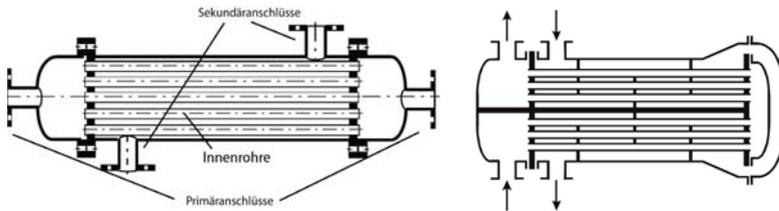


Abbildung 4-9: Rohrbandelwärmeübertrager mit zwei festen Böden (links) (Scholz, 2012) und Schwimmkopf (Christen, 2005).

Häufig wird Satteldampf durch den Mantelraum geleitet und Kühlflüssigkeiten durch das Rohrbandel. Zur besseren Flüssigkeits- bzw. Dampfführung, zur Erhöhung des Wärmeübertragungskoeffizienten und Verbesserung der mechanischen Stabilität befinden sich Leitbleche im Mantelraum (angedeutet beim rechten Typ in Abbildung 4-9). Gängige Durchmesser des Mantels liegen bei 0,2..4 m – die Rohre können Längen von bis 8 m aufweisen und Drücke von bis zu 40 bar aushalten (Vauck und Müller, 1988). Rohrbandel werden aufgrund ihres flexiblen Designs und der Möglichkeit zur Realisierung hoher Drücke und Druckdifferenzen zwischen den Fluiden am häufigsten in der Industrie eingesetzt. Diese Bauart wird sowohl für flüssige Medien auf Primär- und Sekundärseite als auch zur Verdampfung oder Kondensation verwendet.

Bei **Rohrbandel-WÜT** gibt es verschiedene Varianten, die nach TEMA (Tubular Exchanger Manufacturers Association) durch einen Buchstabencode zugeordnet werden können (vgl. Tabelle 8-1 im Anhang 8.1). Dabei steht der erste Buchstabe für den Vorkopf, der bei den meisten Modellen die Anschlüsse für das Heizmedium beinhaltet. Der zweite Buchstabe definiert den Mantel und der Dritte den Hinterkopf. Die drei am häufigsten verwendeten Konfigurationen sind neben den in Abbildung 4-9 dargestellten Rohrbandeln mit festen Böden (TEMA Code BEM) und Schwimmkopf (AFS) Rohrbandel-WÜT mit U-Rohren (vgl. Abbildung 4-10). Während U-Rohre vor allem für hohe Drücke und Temperaturen geeignet sind, können Schwimmköpfe die bei großen Temperaturdifferenzen zwischen den Primär- und Sekundärmedien auftretenden Spannungen kompensieren. Zudem eignen sich Schwimmköpfe für Anwendungen, bei denen die Rohraußenseite gereinigt werden muss. Schwimmköpfe oder U-Rohre können zudem zur Beheizung von Behältern oder Verdampfung genutzt werden. In diesem Fall muss das Bündel im Flüssigkeitsraum angeordnet sein (Shah und Sekulić, 2003).

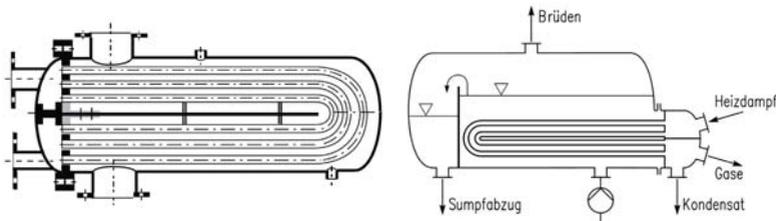


Abbildung 4-10: Rohrbandelwärmeübertrager mit U-Rohren (links) (Scholz, 2012) und K-Typ Rohrbandel (Aufkocher) (Mersmann et al., 2005).

Zur Verdampfung wird häufig der rechts in Abbildung 4-10 dargestellte Aufkocher eingesetzt. Dieses Rohrbandel verfügt über ein besonders großes Gehäuse, da hier die Trennung der gasförmigen und flüssigen Phase stattfinden muss und wird auch als Kettle-Typ bezeichnet. Der Mantel ist typischerweise 1,6..2 Mal größer als das Rohrbandel ausgeführt. Neben dieser Mantelkonfiguration werden häufig auch der in Tabelle 8-1 im Anhang gezeigte E- und F-Typ verwendet. Die einzelnen Mantelkonfigurationen unterscheiden sich hauptsächlich in den Anschlüssen des aufzuheizenden oder abzukühlenden Mediums, wodurch sich Gleich- und Gegenstrombetriebe der jeweiligen WÜT realisieren lassen (Kutz, 2006).

Doppelrohr-WÜT bestehen aus zwei koaxial angeordneten Rohren, die im Gleich- oder Gegenstrom durchflossen werden können (vgl. Abbildung 8-5 im Anhang). Aufgrund der relativ geringen Strömungsgeschwindigkeit werden in der Regel lange Rohrstrecken benötigt, sodass die Rohre bei dieser Bauart häufig in einem Register angeordnet sind. Dabei werden lediglich die geraden Rohrstücke als Doppelrohr ausgeführt, das innere Rohr wird als Verbindungsradius ausgeführt. Diese Bauart eignet sich vor allem für hohe Drücke im Innenrohr oder sehr viskose Medien (Vauck und Müller, 1988; VDI GVC, 2006). Eine weitere Bauart von Doppelrohr-WÜT ist der Schabewärmeübertrager. Dieser ähnelt in seinem Aufbau dem erläuterten Doppelrohr-WÜT mit dem Zusatz, dass im inneren Rohr eine rotierende Welle mit Schabern angeordnet ist (vgl. Abbildung 8-6 im Anhang). Durch das permanente Rühren wird verhindert, dass sehr viskose Produkte wie beispielsweise Frischkäse oder Eiscreme an der Rohrwand anhaften. Das Heiz- oder Kühlmedium strömt durch den Ringspalt zwischen den beiden Rohren (Wang, 2009).

Kompaktwärmeübertrager

Wärmeübertrager, in denen die Medien ein Kanalsystem mit hohen Turbulenzen durchströmen, werden nach VDI GVC (2006) als Kompaktwärmeübertrager bezeichnet. Die bekannteste Bauform hiervon ist der **Plattenwärmeübertrager**. Im Bereich der

Ernährungsindustrie werden häufig gedichtete Plattenwärmeübertrager verwendet (siehe Abbildung 8-7 im Anhang). Die Platten weisen typischerweise starke Profilierungen auf und werden durch Spanschrauben und Gestell zusammengehalten. In Abhängigkeit des Anwendungsgebiets (Produkt, Heizmedium oder ggf. Phasenwechsel) werden geeignete Platten mit entsprechenden Profilierungen verwendet. Mit Platten-WÜT können sehr große Übertragungsleistungen bei geringem Platzbedarf realisiert werden. Die Demontierbarkeit ermöglicht Reinigung und bei Bedarf auch das Anpassen der Leistung durch Entnahme oder Hinzufügen einzelner Platten. Diese Wärmeübertrager werden typischerweise bei Drücken bis 25 bar und Temperaturen bis 150 °C eingesetzt. Hierbei ist die Dichtung der limitierende Faktor. Je nach Prägung der Platte können Feststoffanteil, Zähigkeit und Druckverlust gesteuert werden. In der Lebensmittelindustrie werden gedichtete Platten-WÜT häufig zur Pasteurisation verwendet. Hierzu kommen meist sogenannte Mehrzonen-Wärmeübertrager zum Einsatz. Hierbei sind in einem Gestell mehrere Zonen untergebracht, die intern verbunden sind. Im Bereich der Heizungstechnik werden häufiger gelötete Platten-WÜT eingesetzt. Diese sind wartungsfrei und nicht mechanisch zu reinigen. Schließlich finden sich auch geschweißte Platten-WÜT. Hierbei werden entweder profilierte Platten an den Rändern verschweißt oder ebene Platten durch Punktschweißen miteinander verbunden und anschließend hydraulisch geweitet (VDI GVC, 2006). Die realisierbare Wärmeübertragungsfläche von Platten-WÜT liegt nach Shah und Sekulić (2003) im Bereich von 120..660 m²/m³.

Eine weitere relevante Bauform ist der **Spiralwärmeübertrager**. Dieser besteht aus zwei gleich breiten Stahlbändern, die spiralförmig mit gleichem Abstand um eine Achse aufgewickelt werden. Die dadurch entstehenden Kanäle werden beidseitig durch abnehmbare Deckel mit Dichtungen verschlossen. Stahlstifte dienen dabei als Abstandhalter und zur Gewährleistung der Stabilität. Die Ein- und Austrittskanäle liegen an der Peripherie und auf der Achse des Wärmeübertragers (siehe Abbildung 8-8 im Anhang). Bei dieser Bauart ist eine mechanische Reinigung der Strömungswege möglich, weshalb dieser Wärmeübertrager vorzugsweise für stark verschmutzte und hochviskose Medien, die zu Fouling neigen, verwendet wird. Der Betrieb kann im Gegenstrom oder Kreuzstrom erfolgen. Die Fertigung dieser Wärmeübertrager ist bis zu einem Durchmesser von zwei Metern und einer Breite von ebenfalls zwei Metern möglich (Christen, 2005; VDI GVC, 2006). Spiral-WÜT verfügen über eine höhere Wärmeübertragungsrate als Rohrbündel bei gleichzeitig 20 % weniger Fläche. Sie werden hauptsächlich für flüssig-flüssig Anwendungen, Kondensation oder Gaskühlung verwendet. Maximale Betriebsdrücke und -temperaturen liegen bei 25 bar und 500 °C (Shah und Sekulić, 2003).

Wärmeübertrager mit einseitig vergrößerter Oberfläche

Für Anwendungen, bei denen ein Medium eine deutlich niedrigere Wärmekapazität aufweist (beispielsweise Wasser-Luft), werden Wärmeübertrager mit einseitig vergrößerter

Oberfläche verwendet. Eine der bekanntesten Anwendungen hierfür ist der Autokühler. Die Vergrößerung der WÜT-Fläche erfolgt durch Rippen oder Lamellen, wobei sich unterschiedlichste Geometrien finden. Es können sowohl Rohre als auch Platten mit Rippen bzw. Lamellen versehen werden. Bei Rohren unterscheidet man Rippenrohre von Lamellenrohren. Bei Rippenrohr-WÜT sind die Rippen einzeln an den Rohren befestigt. Bei Lamellen-WÜT sind mehrere Rohre durch die Rippen miteinander verbunden (siehe Abbildung 8-9 im Anhang). Beim Erhitzen oder Abkühlen von Luft bzw. Gasen strömen diese in der Regel quer zu den Rohren, um möglichst tief in die Rippen einzudringen.

Rippenplatten (auch Matrix-WÜT genannt) können typischerweise bis 7 bar betrieben werden und weisen eine Wärmeübertragungsfläche von bis zu $5900 \text{ m}^2/\text{m}^3$ und 120..700 Rippen/m auf. Rippenrohre eignen sich für deutlich höhere Betriebsdrücke, verfügen allerdings über eine etwas geringere Wärmeübertragungsfläche von bis zu $3300 \text{ m}^2/\text{m}^3$ bei 250..800 Rippen/m. Sehr häufig wird diese Bauart als Kondensator oder Verdampfer bei der Klimatisierung verwendet (Shah und Sekulić, 2003; Vauck und Müller, 1988).

4.2.2. Interne Wärmeübertrager

Neben der Verwendung externer Wärmeübertrager können Bäder, Maschinen oder Tanks auch mit internen Wärmeübertragern beheizt werden. Hierunter fallen Heizmäntel, Rohrschlangen, Platecoils und Rohrbündel. Zusätzlich werden Bäder, Maschinen oder Tanks auch mittels elektrischen Heizelementen und direkter Befuerung beheizt.

Abbildung 4-11 zeigt drei mögliche Bauformen und Anwendungen von internen Wärmeübertragern. Links dargestellt ist die Bruchbereitung bei der Käsesherstellung. Der hierfür benötigte Behälter verfügt über angeschweißte Halbrohre, die mit Dampf beheizt werden.

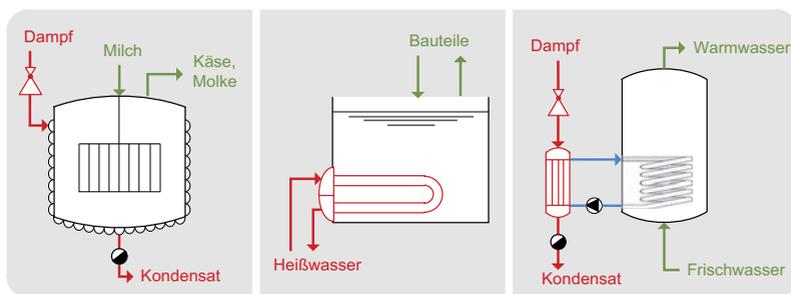


Abbildung 4-11: Beispiele zur Prozessbeheizung mittels internen Wärmeübertragern.

Das zweite Schaubild zeigt die Beheizung eines Bades zur Oberflächenbehandlung von Bauteilen. Hierbei ist ein internes Rohrbündel ohne Mantel in den Behälter eingebracht, das mit Heißwasser beheizt wird. Schließlich zeigt die rechte Darstellung die Bereitstellung von Warmwasser mit einer Kombination aus internen und externen Wärmeübertragern. Der Warmwasserspeicher verfügt über eine interne Heizschlange, die durch einen Heißwasserzwischenkreis beheizt wird, der wiederum von einem externen Rohrbündel mittels Dampf mit Wärme versorgt wird.

Heizmäntel existieren in unterschiedlichen Ausführungen (vgl. Abbildung 8-10 im Anhang). Dies sind Vollmäntel, angeschweißte Halbrohre oder Winkelprofile und sogenannte Dimple Jackets. Vollmäntel sind bis zu einem Druck des Heizmediums von 6 bar und einer Behältergröße von $0,1..10 \text{ m}^3$ anwendbar. Wird ein Heizmedium mit höherem Druck verwendet, müssen an die Behälterwand angeschweißte Rohrschlangen, Halbrohre oder Winkelprofile zur Beheizung verwendet werden. Diese können bei Drücken von bis zu 60 bar verwendet werden. Dimple Jackets sind ähnlich wie Vollmäntel, verfügen allerdings in regelmäßigen Abständen über Schweißpunkte, aus denen Heitzaschen resultieren (Sinnott et al., 2005; Vauck und Müller, 1988).

Rohrschlangen sind die einfachste und günstigste Wärmeübertragerbauart. Dazu wird ein Rohr schraubenförmig um einen Zylinder gewickelt und mit Stützen für Zu- und Ablauf des Heizmediums in zylindrischen Behältern montiert (vgl. Abbildung 8-11 im Anhang). Die spezifische Übertragungsleistung ist aufgrund der niedrigen Strömungsgeschwindigkeit auf der Rohraußenseite eher gering (VDI GVC, 2006). Die Leistung von Rohrschlangen-WÜT kann über Steigung und Durchmesser des Rohrs beeinflusst werden. Typische Rohrdurchmesser liegen bei einem Dreißigstel des Behälterdurchmessers, die Steigung liegt bei dem Zweifachen des Rohrdurchmessers (Sinnott et al., 2005). Der zulässige Innendruck dieser Bauart liegt bei 6 bar. Bei der Verwendung von Sattldampf als Wärmeträgermedium werden Rohrschlangen-WÜT häufig in mehrere Heizzonen unterteilt, um das anfallende Kondensat besser abzuleiten (Vauck und Müller, 1988).

Obwohl sogenannte Panel- oder **Platecoils** nach Shah und Sekulić (2003) zu den Kompaktwärmeübertragern zählen, entspricht ihr hauptsächliches Einsatzgebiet eher internen Wärmeübertragern. Panel- oder Platecoils ähneln in ihrer Konstruktionsweise einem Solarabsorber (siehe Abbildung 8-12 im Anhang). Die Herstellung dieser Bauart kann mittels Prägen, Schweißen oder Rollbond-Verfahren erfolgen. Dadurch ist eine Vielfalt von Geometrien realisierbar. Panel- bzw. Platecoils werden häufig für die Behälterbeheizung in Form eines Heizmantels oder als internes Heizelement verwendet. In Abhängigkeit des verwendeten Materials und der Prägung sind Betriebsdrücke von $7..18 \text{ bar}$ möglich. Aufgrund des einfachen Herstellungsprozesses ist diese Wärmeübertragerbauart sehr günstig (Shah und Sekulić, 2003).

Als interne Wärmeübertrager können einige der in Abschnitt 4.2.1 vorgestellten **Rohrbündel** verwendet werden. Dies sind hauptsächlich Schwimmkopf- oder U-Rohr-Wärmeübertrager. Dazu werden die Rohrbündel mit oder ohne Mantel in dem zu beheizenden Behälter bzw. Tank derart angeordnet, dass lediglich die Anschlussstutzen zugänglich sind.

Elektrische Heizelemente eignen sich grundsätzlich zur Bereitstellung sehr hoher Temperaturen, werden allerdings aus verfahrenstechnischen Gründen auch für niedrigere Temperaturbereiche eingesetzt. Sogenannte Stab- oder Rohrheizelemente können in Flüssigkeiten eingehängt werden und erwärmen diese bei Anlegen einer Spannung aufgrund des hohen spezifischen Widerstands (Vauck und Müller, 1988; Wagner, 2005).

Bei der **direkten Befeuerung** sind Flammraum und Rauchgaszüge eines Öl- oder Gasbrenners in der zu beheizenden Anlage angeordnet und geben dort die Wärme an das Produkt oder Prozessmedium ab.

4.2.3. Dampfinjektion

Die direkte Wasserdampfheizung von Behältern erfolgt durch Einleiten von Wasserdampf am Behälterboden über gelochte Rohre, Bodenschlangen oder Düsen. Während der Dampf aus gelochten Rohren oder Bodenschlangen in den Behälterinhalt strömt, wird bei der Verwendung von Düsen die Behälterflüssigkeit angesaugt, mit Dampf vermischt und wieder in den Behälter geblasen (Vauck und Müller, 1988).

Neben dieser Art der Dampfinjektion besteht auch die Möglichkeit einen Fluid-Strom durch Dampfinjektion mit Hilfe einer geeigneten Armatur aufzuheizen sowie ein Luft-Dampf-Gemisch zu erzeugen, das in einem Prozess (z.B. Garen) benötigt wird. In Abhängigkeit des zu erwärmenden Produkts oder Prozessmediums können hohe Anforderungen an den Dampf gestellt werden.

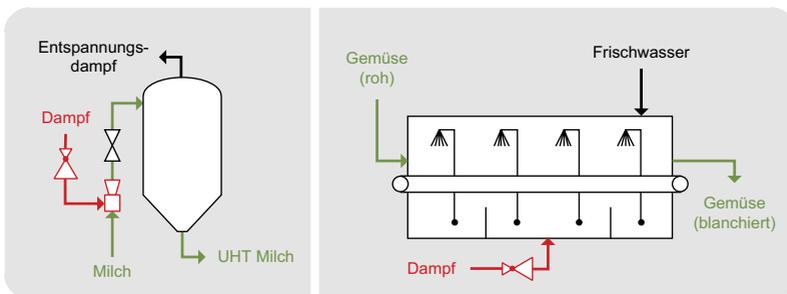


Abbildung 4-12: Prozessbeheizung mittels Dampfinjektion.

Abbildung 4-12 zeigt zwei Beispiele zur Beheizung mittels direkter Dampf injektion. Links dargestellt ist ein UHT-Verfahren zur Sterilisation von Milch. Dabei wird die Milch in einer geeigneten Apparatur mit aufbereitetem Dampf vermischt und anschließend in einen Expansionsbehälter geführt. Rechts dargestellt ist ein Wasserbadblancheur, in dessen Bad Dampf eingeblasen wird. Eine weitere Möglichkeit ist das Einblasen von Dampf in einen Luftstrom. Die daraus resultierende feuchte Atmosphäre kann beispielsweise zum Garen verwendet werden.

4.2.4. Verdampfer

Es gibt verschiedene Verdampferbauarten, deren Konstruktion maßgeblich von der Beheizungart und Betriebsweise beeinflusst wird. In der Literatur finden sich unterschiedliche Klassifizierungen der einzelnen Technologien. So unterscheidet Christen (2005) beispielsweise Rührkessel-, Platten-, Dünnschicht- und Rohrbündelverdampfer. Ähnlich verhält sich auch die Aufteilung von Vauck und Müller (1988) auf die drei Gruppen Rohr-, Platten- und Dünnschichtverdampfer. Bei den Rohrverdampfern unterscheiden Vauck und Müller (1988) zusätzlich zwischen innen- und außenliegender Heizkammer, bei den Dünnschichtverdampfern zwischen solchen mit festen oder rotierenden Einbauten. Titze et al. (1992) hingegen differenzieren zunächst lediglich zwischen Umlauf- und Filmverdampfern. Bei Apparaten, die nach dem Umlaufverfahren arbeiten, unterscheiden die Autoren zusätzlich zwischen Rührwerks- und Rohrbündelverdampfern sowie Sonderbauarten (z.B. Platten- oder Entspannungsverdampfer). Die Filmverdampfer werden nach physikalischer (Kletter- und Fallfilmverdampfer) und mechanischer Flüssigkeitsverteilung (Dünnschichtverdampfer) unterschieden. Gänzlich anders ist die Unterscheidung von Hemming und Wagner (2011) nach direkter und indirekter Beheizung, kontinuierlichem und diskontinuierlichem Betrieb sowie Ein- bzw. Mehrkörperverdampfern.

Unter der Berücksichtigung einer Klassifizierung der Verdampferbauarten hinsichtlich einer möglichen Einbindung von Solarwärme erscheint die Aufteilung von Goedecke (2006) nach den ablaufenden Verdampfungsmechanismen als besonders geeignet. Der Autor gibt vier vorherrschende Verdampfungsarten an: Behälter- und Strömungssieden sowie Entspannungs- und Filmverdampfung. Unter Behältersieden fallen die Aufkocher (K-Typ), die bereits in Abschnitt 4.2.1 erläutert wurden. Die Verdampfungsart Strömungssieden umfasst Natur- und Zwangsumlaufverdampfer sowie Kletterfilmverdampfer (Goedecke, 2006). Abbildung 4-13 zeigt die wichtigsten Verdampfer der Kategorie Strömungssieden. Bei den **Naturumlaufverdampfern** tritt in Folge des Dichteunterschieds eine Zirkulation der Lösung ein. Die verdampfte Lösung steigt in den engen Rohren nach oben, während der flüssig gebliebene Teil wieder hinunterfließt. Ob das Rohrbündel im Verdampfer integriert (linkes Bild) oder separat ausgeführt wird (mittleres Bild), hängt maßgeblich von der Verschmutzungsneigung des Produkts ab.

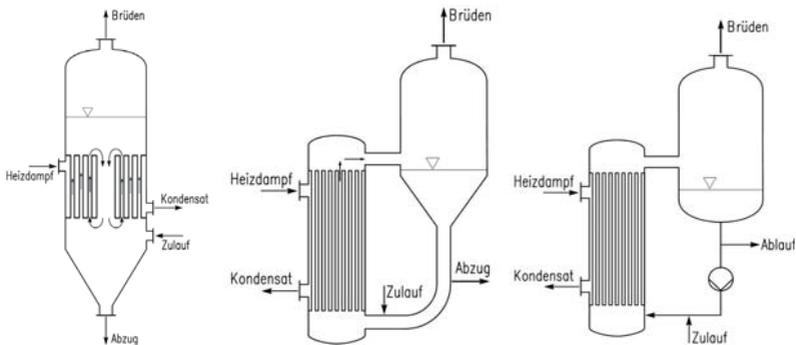


Abbildung 4-13: Verdampfer der Kategorie Strömungsieden. Robertverdampfer (links), Naturumlaufverdampfer mit außenliegender Heizkammer (Mitte) und Zwangsumlaufverdampfer mit außenliegender Heizkammer (rechts) (Mersmann et al., 2005).

Da Naturumlaufverdampfer nur für kleine Lastbereiche ausgeführt werden können und zudem eine Mindesttemperaturdifferenz für den Umlauf benötigt wird, besteht die Möglichkeit des Zwangsumlaufs mit einer geeigneten Pumpe. **Zwangsumlaufverdampfer** (rechtes Bild) können bei gleicher Heizleistung mit einer geringeren Temperaturdifferenz oder einer kleineren Heizfläche betrieben werden (Mersmann et al., 2005). Bei **Kletterfilmverdampfern** tritt das Produkt ebenfalls am unteren Ende in die beheizten Rohre ein, allerdings entsteht hier eine Zweiphasenströmung, die in den Kopf des Verdampfers gelangt. Erst dort erfolgt die Trennung von flüssigem und dampfförmigem Produkt. Kletterfilmverdampfer sind derart konstruiert, dass die gewünschte Verdampfung bei nahezu einem Durchlauf erfolgt. Daraus resultiert eine sehr kurze Verweilzeit des Produkts im Verdampfer, weshalb sich diese Bauform für thermisch sensible Produkte eignet.

Entspannungsverdampfer werden eingesetzt, wenn die Bildung der Dampfphase an der heißen Wärmeübertragungsfläche nicht erwünscht ist (z.B. aufgrund einer Belagbildung). Dabei wird das Produkt einphasig flüssig erwärmt und gelangt anschließend in einen Brüdenabscheider, der bei geringerem Druck betrieben wird. Dadurch kommt es erst hier zur Ausdampfung. Diese Verdampfungsart wurde anhand des Integrationskonzepts zur Solarwärmenutzung für die Würzekochung in Brauereien erläutert (vgl. Abschnitt 3.4.4). In Abhängigkeit des Produkts werden neben Rohrbündeln auch Platten- und Spiralwärmeübertrager sowie andere Sonderbauformen zum Aufheizen verwendet.

Bei der Filmverdampfung werden die in Abbildung 4-14 dargestellten Fallfilm- und Dünn-schichtverdampfer unterschieden. Bei einem **Fallfilmverdampfer** wird das Produkt von oben in das Bündel geführt. Die beheizten Rohre werden von innen mit einem Flüssigkeitsfilm benetzt, der im Gleichstrom mit dem entstehenden Dampf nach unten strömt.

Aufgrund der guten Wärmeübertragung in dem Flüssigkeitsfilm, der nach unten strömt, werden Fallstromverdampfer häufig für temperaturempfindliche Produkte eingesetzt.

Für Produkte, die eine hohe Viskosität oder Feststoffe aufweisen und kurzer Verweilzeiten im Verdampfer bedürfen, werden **Dünnschichtverdampfer** eingesetzt. Diese bestehen aus einem beheizten Rohr, an dessen Innenseite das Produkt als Film hinunterströmt. Dabei erfolgt eine Verteilung und Förderung des Produkts durch ein Wischorgan. Auch diese Verdampferbauart ist nach Goedecke (2006) üblicherweise für einmalige Produktdurchläufe konstruiert.

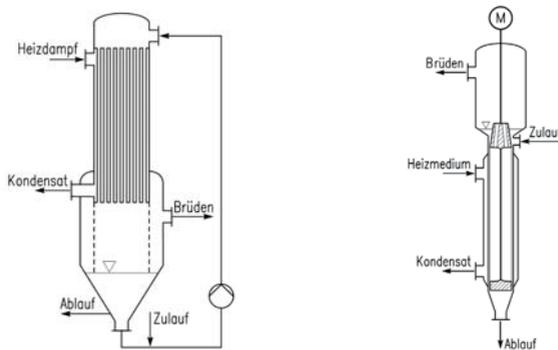


Abbildung 4-14: Verdampfer der Kategorie Filmverdampfung. Fallfilmverdampfer (links) und Dünnschichtverdampfer mit Wischersystem (rechts) (Mersmann et al., 2005).

Überwiegend werden in der Industrie indirekt mit Dampf beheizte, kontinuierlich arbeitende Rohrverdampfer eingesetzt. Lediglich Plattenverdampfer bieten die Möglichkeit einer Heißwasserbeheizung (GEA Wiegand, 2009). Häufig sollen Verdampfer möglichst große Wärmeübergangskoeffizienten aufweisen, um die benötigten Heizflächen klein zu halten. Neben dieser Anforderung können aber auch stoffspezifische Eigenschaften, wie z.B. das Vermeiden von Verkrustungen oder Zersetzung bestimmter Produktbestandteile, die Auswahl eines geeigneten Verdampfers beeinflussen (Mersmann et al., 2005).

Da die Verdampfung im Vergleich zu anderen verfahrenstechnischen Prozessen sehr energieintensiv ist, bedient man sich zur effizienten Prozessführung in der Regel der Brüdenverdichtung oder Mehrstufenverdampfung. Bei einem einstufigen Verdampfungsprozess kann der entstehende Brüden zunächst nicht in demselben Verdampfer als Heizmedium genutzt werden, da für einen wirtschaftlichen Betrieb ein treibendes Temperaturgefälle von mindestens 10..15 K zur Verfügung stehen muss. Um dies zu erzielen, kann der Brüden mechanisch oder thermisch verdichtet werden. Da der Wirkungsgrad der Ver-

dichtung allerdings beschränkt ist, bietet sich bei Prozessen, die mehrstufig ausgeführt werden können, eine Nutzung des Brüdens ohne Verdichtung an. Dabei wird nur der Verdampfer mit dem höchsten Temperaturniveau mit Frischdampf versorgt. Die nachgeschalteten Verdampferstufen werden mit dem Brüden der jeweils vorhergehenden Stufen auf einem entsprechend reduzierten Temperaturniveau betrieben (Christen, 2005).

4.2.5. Trockner

In der Industrie kommen vielfältige Trocknerbauarten zum Einsatz, die sich maßgeblich in Aufbau und Funktion unterscheiden können. Eine gängige Einteilung der Trocknertypen erfolgt nach Vauck und Müller (1988) in Abhängigkeit der Wärmeübertragung auf das zu trocknende Produkt. Daraus resultieren Konvektions- und Kontaktrockner sowie Strahlungs-, Dielektro- und Gefriertrockner. Aufgrund der Relevanz hinsichtlich der Einbindung von Solarwärme beschränken sich die nachfolgenden Ausführungen auf Konvektions- und Kontaktrockner, die die am häufigsten verwendeten Trocknertypen sind. Die Wahl eines geeigneten Trocknungsverfahrens wird maßgeblich vom Produkt und der Durchsatzmenge beeinflusst. Nach Hirschberg (1999) sind dabei die wichtigsten Kriterien die zulässige Höchsttemperatur, die maximale Verweilzeit, die angestrebte Restfeuchte sowie eine mögliche Oxidationsempfindlichkeit des Trockenguts.

Bei Konvektionstrocknern wird ein Trockenmittel (meist Luft) aufgewärmt und über das Trockengut geführt. Je nach Bauart können sich unterschiedliche Stromführungen ergeben: Das Trockenmittel strömt an der Guts Oberfläche entlang oder durch das Gut hindurch, das Gut wird aufgewirbelt, fortgerissen oder sinkt im Luftstrom nach unten (Grassmann et al., 1997). Die wichtigsten Bauformen werden nachfolgend kurz erläutert.

Kammer- bzw. Hordentrockner (vgl. Abbildung 8-13 im Anhang) sind weit verbreitete Batch-Trockner, bei denen das Trockengut zum Trocknen auf Horden in einem Umluftschrank gestellt wird. Die Zuluft wird durch einen Wärmeübertrager erwärmt und durchströmt die Horden. Der ebenfalls in dieser Abbildung dargestellte Tellerrockner kann aufgrund der rotierenden Teller kontinuierlich betrieben werden. Eine weitere Bauart, bei der das Trockenmittel an der Guts Oberfläche entlangströmt, ist der links in Abbildung 4-15 skizzierte Bandrockner. Auch hier wird Frischluft beheizt und durch den Trockner geführt, der über ein einzelnes oder mehrere Bänder verfügen kann.

Bei dem rechts in Abbildung 4-15 dargestellten Sprührockner wird das flüssige Produkt zerstäubt und anschließend mit der aufgeheizten Luft vermischt. Da aus der Zerstäubung eine sehr große spezifische Oberfläche resultiert, erfolgt die Trocknung sehr schnell. Dieses Verfahren kommt beispielsweise bei Milch- und Kaffeepulver oder Waschmittel zum Einsatz.

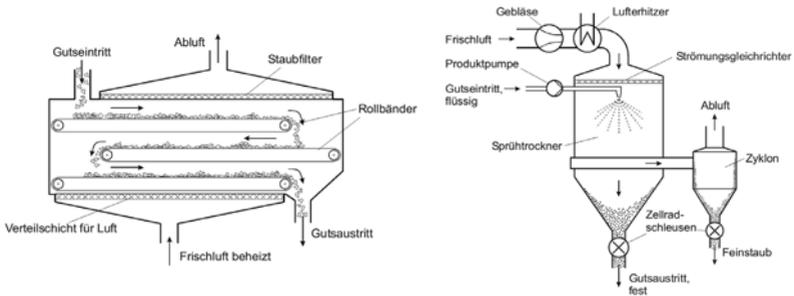


Abbildung 4-15: Bandrockner (links) und Sprühtrockner (rechts) (Christen, 2005).

Bei der in Abbildung 4-16 skizzierten Wirbelschichttrocknung schwebt das Trocknungsgut im Luftstrom. Aufgrund des guten Wärme- und Stoffübergangs in der Wirbelschicht können rieselfähige Produkte sehr schnell mit diesem Verfahren getrocknet werden. Eine weitere Bauart, bei der sich das Trockengut im Luftstrom bewegt, ist der Stromtrockner. Allerdings wird dabei das Trockengut pneumatisch durch den erwärmten Luftstrom gefördert und gleichzeitig getrocknet. Da die Trockenzeit bei diesem Verfahren sogar unter einer Sekunde liegen kann, eignen sich Stromtrockner für pulvrige, kristalline oder feinkörnige Güter, die temperaturempfindlich sind.

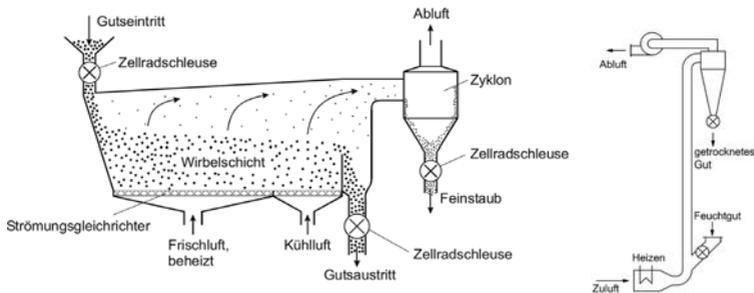


Abbildung 4-16: Wirbelschichttrockner (links) (Christen, 2005) und Durchlauf-Stromtrockner (rechts) (Mersmann et al., 2005).

Die letzte, weit verbreitete Bauform von Konvektionstrocknern ist der in Abbildung 4-17 dargestellte Trommeltrockner. Bei dieser Bauart wird das Trockengut durch die Neigung und Drehbewegung durch die Trommel befördert, durch Rohreinbauten umgeschichtet und mittels Heißluft getrocknet. Diese Bauform kann auch als Kontaktrockner ausgeführt

werden. In diesem Fall erfolgt die Trocknung nicht wie bei den Konvektionstrocknern mit erwärmter Luft, sondern über beheizte Flächen. Bei Trommeltrocknern dieser Kategorie wird in der Regel der Mantel mit Dampf beheizt. Auch bei (Doppel-)Schneckentrocknern (rechts abgebildet) wird der Außenmantel beheizt. Zusätzlich können auch die Schnecken selbst beheizt werden. Diese Bauart eignet sich vor allem für pastöse und teigartige Produkte.

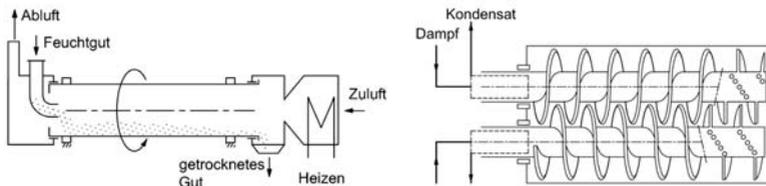


Abbildung 4-17: Gegenstrom-Trommeltrockner (links) und Doppelschnecken-Trockner (rechts) (Mersmann et al., 2005).

Eine weitere wichtige Bauform ist der in Abbildung 4-18 dargestellte walzenförmige Kontaktrockner. Bei dieser Bauform wird ein dünner Film des Trockenguts auf eine vorwiegend mit Wasserdampf beheizte Walze aufgebracht. Das getrocknete Gut wird anschließend von der Walze abgeschabt. Weitere Bauformen sind der in Abbildung 4-18 dargestellte Schaufeltrockner sowie die im Anhang in Abbildung 8-14 und Abbildung 8-15 dargestellten Heitzeller- und Taumeltrockner, bei denen ebenfalls Mantel und/oder Einbauten mit Dampf beheizt und damit die zum Trocknen benötigte Wärme auf das Gut übertragen werden (Grassmann et al., 1997; Hirschberg, 1999; Vauck und Müller, 1988).

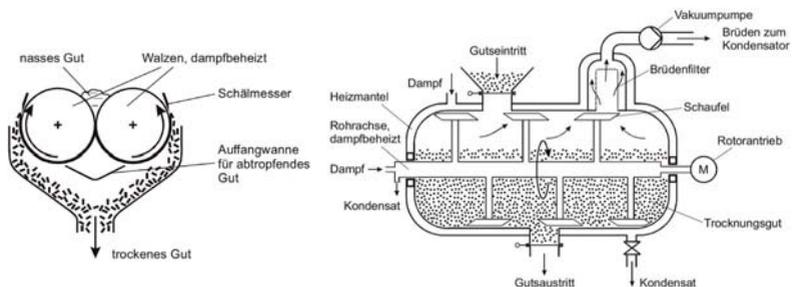


Abbildung 4-18: Walzentrockner (links) und Schaufeltrockner (rechts) (Christen, 2005).

5. Klassifizierung möglicher Integrationspunkte

Basierend auf den Erkenntnissen der innerhalb der Ernährungsindustrie verwendeten Anlagentechnik sowie den branchenübergreifenden Technologien zur Beheizung industrieller Prozesse wird in diesem Kapitel die Entwicklung einer allgemeingültigen Klassifizierung zur Integration thermischer Solarenergie in bestehende industrielle Prozesse und Wärmeversorgungsstrukturen beschrieben. Hierzu beinhaltet das Kapitel zunächst einen Überblick bisheriger Ansätze, mit denen in der Vergangenheit versucht wurde, die Einbindung von thermischen Solaranlagen in industrielle Prozesse zu verallgemeinern. Anschließend wird die entwickelte Klassifizierung vorgestellt, die eine branchenübergreifende Zuordnung des Großteils aller in der Industrie angewandten Prozesse und Verfahren ermöglicht. Die für die jeweiligen Integrationsmöglichkeiten erarbeiteten Konzepte zur Einbindung von Solarwärme werden vorgestellt und teilweise anhand von Beispielen aus unterschiedlichen Branchen erläutert. Abschließend wird ein Vorgehen zur Auswahl geeigneter Integrationspunkte vorgestellt.

5.1. Bewertung bisheriger Ansätze zur Systemintegration

Die Forschungsschwerpunkte zur solaren Prozesswärme lagen in den letzten Jahren hauptsächlich in der Potentialermittlung, Identifikation geeigneter Branchen und Prozesse sowie der Durchführung von Fallstudien zur Initiierung von Pilot- und Demonstrationsanlagen. Arbeiten zur Verallgemeinerung der vielfältigen Integrationsmöglichkeiten solarer Prozesswärme bilden in diesem Forschungsfeld die Ausnahme. Die nachfolgend vorgestellten Ansätze dienen hauptsächlich dazu, geeignete Integrationspunkte für Solarwärme zu identifizieren anstatt die eigentliche Integration der Solarwärme zu vereinfachen.

5.1.1. Identifikation typischer Niedertemperaturprozesse

Im Rahmen der Arbeiten des Task 33/IV der Internationalen Energieagentur identifizierten Schnitzer et al. (2006) in vielen Branchen immer wiederkehrende verfahrenstechnische Grundoperationen, die sich aufgrund ihres Niedertemperaturwärmebedarfs prinzipiell für die Nutzung von Solarwärme eignen. Diese Grundoperationen sind im Einzelnen (Schnitzer et al., 2007):

- **Bereitstellung von Heißwasser oder Dampf**

Heißwasser und Dampf finden sowohl als Wärmeträgermedium als auch direkt als Prozessmedium Verwendung (z.B. Sterildampf oder Heißwasser zum Waschen). Das Temperaturniveau reicht dabei von 50..180 °C. Wenn diese Medien zur Beheizung von Prozessen verwendet werden, befinden sie sich in der Regel auf einem recht hohen Temperaturniveau, auch wenn der eigentliche Prozess zum Beispiel nur 60 °C bedarf. Dies hat den Vorteil, dass Verteilnetze, Wärmeübertrager und sonstige Einbauten kleinere Dimensionen haben können und oft nur ein Verteilnetz für mehrere Prozesse mit unterschiedlichen Temperaturniveaus benötigt wird. Der Nachteil liegt in einem für solarthermische Anwendungen ungünstigen, hohen Temperaturniveau.

- **Trocknungs- und Entwässerungsverfahren**

Diese Verfahren umfassen die Reduktion des Wassergehalts von Produkten und Werkstoffen oder das Austreiben von Lösungsmitteln aus Lacken. Die meisten dieser Prozesse verlaufen unter 100 °C, da viele zu trocknende Produkte, wie beispielsweise Lebensmittel, sensibel auf zu hohe Temperaturen reagieren. Potentielle Trocknungsgüter sind u. a. Textilien, Pflanzen, Früchte, Holz, Malz, Klärschlamm oder Leder sowie Kunststoff- und Metallteile. Auch wenn das Prozessmedium zur Trocknung meist Luft ist, erfolgt deren Beheizung in der Regel über Luft-Wasser-Wärmeübertrager.

- **Einsatzstoff- und Materialvorwärmung**

Diese Gruppe erscheint für die Nutzung von thermischer Solarenergie besonders attraktiv, da die Aufheizung bei niedrigen Temperaturen beginnt. Neben gekühlten Rohstoffen fallen auch aufzuheizendes Kaltwasser für verschiedene Produktionsprozesse oder Kesselspeisewasser zur Dampferzeugung in diese Kategorie. Die notwendigen Temperaturen sind zum Teil sehr niedrig, weshalb auch ggf. vorhandene Abwärme für diese Zwecke genutzt werden kann.

- **Konzentrationsprozesse**

Das Ziel dieser Prozesse ist die Aufkonzentration eines Produkts durch Austreibung eines flüchtigen Inhaltsstoffes (meist Wasser). Aus technischer Sicht können sich Konzentrations- und Trocknungsprozesse überschneiden. Typische Anwendungen finden sich bei der Verarbeitung von Milch, Obst und Gemüsekonzentraten oder Abwässern. Grundsätzlich verlaufen diese Prozesse bei Temperaturen von 50..100 °C.

- **Pasteurisieren und Sterilisieren**

Um Lebensmittel länger haltbar zu machen werden sie häufig pasteurisiert oder sterilisiert. Während die Pasteurisation auf einem Temperaturniveau von etwa 70 °C abläuft, findet die Sterilisation bei über 100 °C statt. Bei der Behandlung von

flüssigen Medien ist der Wärmebedarf verhältnismäßig gering, da die verwendete Anlagentechnik eine hohe Wärmerückgewinnung ermöglicht. Bei der Wärmebehandlung von Konserven, Flaschen oder anderen nicht-flüssigen Medien ist eine direkte Wärmeübertragung nicht möglich, weshalb ein höherer Energiebedarf entsteht.

- **Waschen und Reinigen**

Waschen und Reinigen benötigen große Mengen warmen Wassers und finden sich in nahezu allen Branchen. In Abhängigkeit des behandelten Gutes ergeben sich vielfältige Wasch- und Reinigungsprozesse. Typische Anwendungen finden sich in der Lebensmittel- und Textilindustrie sowie der Metallbearbeitung.

- **Chemische Reaktionen**

Ablauf und Geschwindigkeit von chemischen Reaktionen werden von der Temperatur bestimmt. Die Reaktionen benötigen oder erzeugen Wärme, die dementsprechend zu- oder abgeführt werden muss. Rohmaterialien werden in der Regel getrocknet und auf die Reaktionstemperatur vorgewärmt. Typische Anwendungsfälle sind zum Beispiel Polymerisationsprozesse oder biochemische Reaktionen.

- **Beheizung von Industriehallen**

Schließlich müssen auch branchenunabhängig Produktions- und Lagerhallen beheizt werden. Häufig werden Raumtemperaturen von maximal 20 °C gefordert, was den Einsatz von Solarenergie begünstigt.

Die Identifikation und Zusammenfassung typischer Niedertemperaturprozesse durch Schnitzer et al. (2007) dient in erster Linie dazu, die möglichen Anwendungsgebiete für solare Prozesswärme aufzuzeigen. Die von den Autoren identifizierten Prozesse konnten auch im Rahmen der Untersuchung der Prozessketten der Ernährungsindustrie bestätigt werden. Dieser Ansatz ist demnach sehr gut zur Identifikation potentieller Anwendungen und Suche eines Integrationspunktes geeignet. Hinsichtlich der Einbindung solarer Wärme lassen sich allerdings keine allgemeingültigen Aussagen treffen. Dies zeigt sich beispielsweise bei der Kategorie Reinigen und Waschen. Die Untersuchungen des Brauwesens und zusätzlicher Branchen der Ernährungsindustrie zeigen, dass es eine große Vielfalt an Wasch- und Reinigungsprozessen gibt. Die hierfür verwendete Anlagentechnik kann nicht nur mit dem zu reinigenden Produkt, sondern auch mit dem verwendeten Verfahren variieren. So wird zum Waschen von Bierkisten beispielsweise ein komplett anderes Verfahren eingesetzt als für das Waschen von Mehrwegflaschen, sodass sich im Falle der Einbindung von Solarwärme für beide Anwendungen unterschiedliche Integrationskonzepte ergeben würden. Demnach lassen sich mit diesem Ansatz keine Aussagen hinsichtlich der eigentlichen Integration von Solarwärme machen.

5.1.2. Unterscheidung zwischen Versorgungs- und Prozessebene

Bei der Einbindung von Solarwärme lässt sich grundsätzlich die Versorgungs- von der Prozessebene unterscheiden. Viele Industriebetriebe haben ein zentrales Kesselhaus zur Bereitstellung und Verteilung der Wärme. Hauptsächlich wird Erdgas oder Heizöl verwendet, um Dampf oder Heißwasser bereitzustellen. Die jeweiligen Wärmeverbraucher werden über ein zentrales Verteilnetz mit der erzeugten Wärme versorgt. Am häufigsten wird Dampf als Wärmeträgermedium verwendet, der die Prozesse über verschiedene Wärmeübertrager beheizt. Abbildung 5-1 stellt beispielhaft den Unterschied zwischen Versorgungs- und Prozessebene dar. Dabei werden alle Prozesse von einem Dampfkreislauf mit 165 °C (entspricht 7 bar) versorgt. Meist wird hierzu ein Wärmeübertrager verwendet. Das anfallende Kondensat wird mit durchschnittlich 90 °C zurück ins Kesselhaus geführt. Wie bei Prozess A angedeutet, kann die Beheizung auch ohne Wärmeübertrager erfolgen. So kann beispielsweise bei Waschprozessen der Dampf direkt in kaltes Wasser injiziert werden, um die Solltemperatur zu erreichen.

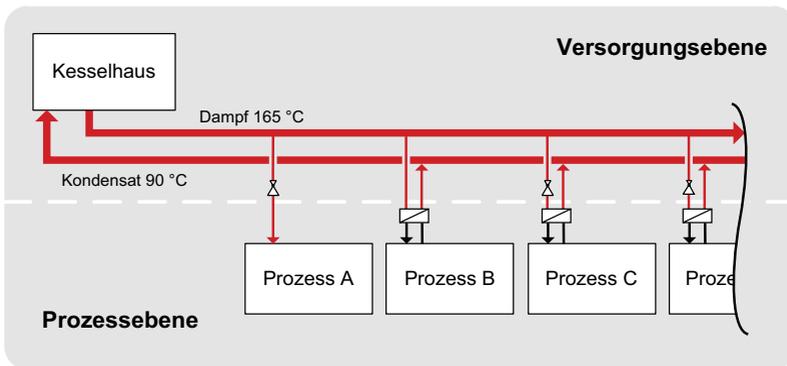


Abbildung 5-1: Unterscheidung zwischen Versorgungs- und Prozessebene.

Die Einbindung von Solaranlagen auf Versorgungsebene unterscheidet sich in Abhängigkeit des konventionellen Wärmeträgermediums. Druckheißwassersysteme sind häufig geschlossen und verfügen über einen Kessel, der diesen Kreislauf beheizt. Eine Solaranlage kann seriell zur Rücklaufanhebung oder parallel zur Bereitstellung der Vorlauftemperatur in dieses System eingebunden werden. Wird hingegen Dampf als Wärmeträgermedium verwendet, ergibt sich eine dritte Möglichkeit. Abbildung 5-2 zeigt die drei Integrationsmöglichkeiten bei der Wärmeversorgung mittels Satttdampf. Neben der parallelen Einbindung zur solaren Dampferzeugung (1) und der seriellen Einbindung zur Aufheizung des Kesselpeisewassers (2) kann möglicherweise auch Kesselzusatzwasser solar aufgeheizt

werden (3). Während die Aufheizung von Kesselspeisewasser bei 100 °C beginnt und in Abhängigkeit des gewünschten Dampfdruckes über 150 °C hinausgehen kann, wird Kesselzusatzwasser von Umgebungstemperatur auf 95..105 °C erwärmt. Prinzipiell können allerdings im Kesselhaus für beide seriellen Einbindungspunkte Möglichkeiten zur Abwärmenutzung gegeben sein, die das Potential zur Einbindung von Solarwärme reduzieren.

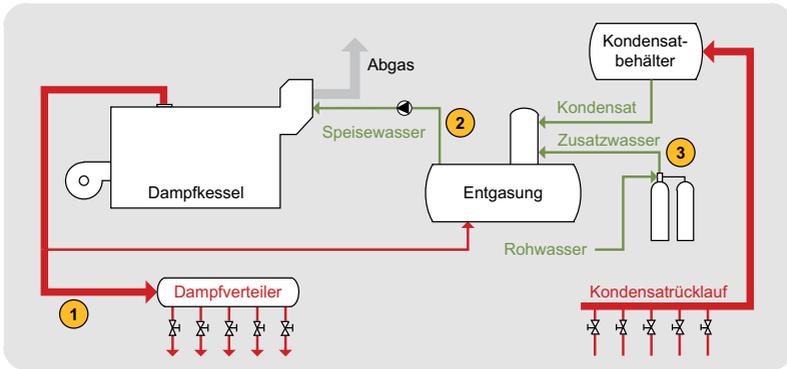


Abbildung 5-2: Wichtigste Komponenten eines Kesselhauses nach Sattler und Schibel (2011) und Möglichkeiten zur Einbindung von Solarwärme.

Bei der Integration auf Prozessebene wird die Solarwärme direkt für einen oder mehrere Prozesse genutzt. Dies kann den Vorteil haben, dass die Prozessstemperatur zum Teil deutlich unterhalb der Temperatur der konventionellen Wärmeversorgung liegt, was sich positiv auf den Ertrag der Solaranlage auswirkt. Dafür gibt es auf Prozessebene eine Vielzahl von Prozessen mit unterschiedlicher Anlagentechnik und verschiedenen Solltemperaturen, was eine Verallgemeinerung zur Einbindung von Solarwärme erschwert.

Eine grundsätzliche Unterscheidung zwischen der Versorgungs- und Prozessebene erscheint zur Vereinfachung der Integrationsmöglichkeiten solarer Wärme sinnvoll, da sich hiermit beispielsweise Verallgemeinerungen hinsichtlich des bereitzustellenden Temperaturniveaus machen lassen und damit möglicherweise auf die erforderliche Kolleorttechnologie geschlossen werden kann. Zudem können sich durch die unterschiedlichen Wärmeträgermedien bereits Ansätze für die Integration ergeben. Demnach ist diese Unterteilung jedoch nur auf Versorgungsebene aussagekräftig, da hier – in Abhängigkeit des verwendeten Wärmeträgermediums (z.B. Dampf oder Heißwasser) – nur wenige Möglichkeiten zur Einbindung von Solarwärme gegeben sind. Auf Prozessebene hingegen ist diese Unterteilung aufgrund der bereits erläuterten vielfältigen Wärmeverbraucher nicht zielführend.

5.1.3. Zusammenfassung vielversprechender Anwendungen

Basierend auf branchenübergreifenden Screenings in Industriebetrieben stellen Heß et al. (2011) häufig wiederkehrende und vielversprechende Anwendungen zur Nutzung solarer Prozesswärme vor. Diesen Anwendungen wird aufgrund der weiten Verbreitung, dem signifikanten Energiebedarf und niedrigen Temperaturniveau ein besonders hohes Potential zur Einbindung thermischer Solarenergie zugesprochen. Nachfolgende Anwendungen zur Einbindung solarer Prozesswärme wurden von den Autoren als besonders vielversprechend identifiziert:

- **Erhitzen von Frischwasser für Reinigungsprozesse**
Reinigen und Waschen sind weit verbreitet und finden sich in fast allen Branchen. Neben dem Waschen von Produkten oder Behältern müssen auch Produktionseinrichtungen in festgelegten Intervallen gereinigt werden. Hierfür wird Warmwasser mit 30..80 °C benötigt. Die jeweiligen Prozesse verlaufen kontinuierlich oder diskontinuierlich, können offen oder geschlossen ausgeführt sein und über eine Wärmerückgewinnung verfügen (Puente Salve, 2011).
- **Vorwärmung von Kesselzusatzwasser für Dampfnetze**
Der zur Wärmeversorgung in der Industrie verwendete Dampf kann neben der indirekten Nutzung in Wärmeübertragern auch direkt, also stofflich genutzt werden. In diesem Fall muss dem Dampfkreislauf neues Wasser zugeführt werden. Hierzu wird Frischwasser entsalzt und gelangt in die thermische Entgasung. Dort wird es mit Dampf auf knapp 100 °C erhitzt. Falls die Erwärmung des sogenannten Kesselzusatzwassers nicht über Wärmerückgewinnung erfolgen kann, bietet sich hier eine vielversprechende Möglichkeit zur Nutzung von Solarwärme (Heß et al., 2011).
- **Beheizen industrieller Bäder**
In der Industrie finden sich eine Vielzahl von Bädern, Behältern und Maschinen die zentral oder dezentral beheizt werden. Hierfür bietet sich die Nutzung von Solarthermie an. Häufig weisen die Behälter eine große Kapazität auf und werden unter Umständen täglich aufgeheizt. Die Nutzung von Solarwärme für diese Anwendung kann die Möglichkeit bieten, Pufferspeicherkapazitäten einzusparen (Puente Salve, 2011).
- **Konvektives Trocknen mit Heißluft in offenen Systemen**
Trocknen ist typischerweise der letzte Schritt in einer thermischen Prozesskette und sehr energieintensiv. Vor allem in der Lebensmittelindustrie finden sich Trocknungsprozesse, die aus Gründen der Produktschonung niedrige Temperaturen benötigen (teilweise deutlich unterhalb 100 °C). Trockner verfügen häufig über konstante Laufzeiten, weshalb sie attraktiv für die Nutzung von thermischer Solarenergie erscheinen (Puente Salve, 2011).

Hinsichtlich des Temperaturniveaus, Energiebedarfs und Verbreitungsgrades erscheint diese Klassifizierung sinnvoll, da hiermit eine große Menge industrieller Prozesse zusammengefasst wird. Mit Ausnahme der Vorwärmung von Kesselzusatzwasser für Dampfnetze kann unter die identifizierten Anwendungen allerdings eine Vielzahl von möglichen Verfahren und Anlagen fallen. Die Bereitstellung von Warmwasser für Reinigungszwecke kann beispielsweise im Durchlaufverfahren mit einem geeigneten Wärmeübertrager oder mittels beheizten Speichern erfolgen. Bei der Beheizung von industriellen Bädern ergeben sich noch viel mehr Möglichkeiten. Damit ist auch dieser Ansatz – wie die zuvor Erläuterten – hinsichtlich der Systemintegration nur wenig aussagekräftig.

Die grundsätzliche Unterscheidung von Erhitzen von Frischwasser und Beheizen industrieller Bäder beinhaltet allerdings einen hilfreichen Ansatz. Im Rahmen der Analyse industrieller Wärmeverbraucher zur Ermittlung des Potentials solarer Prozesswärme in Deutschland wurde festgestellt, dass praktisch alle Prozesse, wenn sie auf das Wesentlichste reduziert werden, einer der beiden folgenden Kategorien zugeordnet werden können: „Aufheizen eines Fluidstroms“ oder „Beheizen von Bädern, Maschinen oder Tanks“ (vgl. hierzu auch Lauterbach et al., 2011a). Diese Unterteilung kann losgelöst von dem eigentlichen Prozess und Produkt erfolgen und ist damit branchenunabhängig.

5.2. Ableiten einer allgemeingültigen Klassifizierung

Um eine allgemeingültige Klassifizierung zur Integration solarer Prozesswärme abzuleiten, müssen alle Randbedingungen berücksichtigt werden, die einen maßgeblichen Einfluss auf die Einbindung von Solarwärme in ein bestehendes System haben. Im Rahmen der Bewertung bisheriger Ansätze zur Systemintegration wurden bereits die Unterscheidung zwischen Versorgungs- und Prozessebene sowie die verwendeten Wärmeträgermedien als wichtige Randbedingungen identifiziert. Um vor allem auf der Prozessebene eine weitere Untergliederung der vielfältigen Prozesse zu ermöglichen, erscheint die Zuordnung des Wärmeverbrauchers in die Kategorie „Aufheizen eines Fluidstroms“ oder „Beheizen von Bädern, Maschinen oder Tanks“ sinnvoll. Die detaillierte Untersuchung der Prozessketten des Ernährungsgewerbes zeigte zudem, dass vor allem die konventionelle Beheizung eines Prozesses eine wesentliche Randbedingung bei der Einbindung von Solarwärme darstellt. Dies soll exemplarisch anhand der Pasteurisation gezeigt werden. Gemäß Abbildung 5-3 gibt es unterschiedliche Verfahren zur Pasteurisation von Lebensmitteln, für die wiederum unterschiedliche Anlagen verwendet werden können. Während die Kurzzeiterhitzung der Kategorie „Aufheizen eines Fluidstroms“ zugeordnet werden kann, fallen Dauererhitzung und Berieselungspasteurisation in die zweite Kategorie. Es ist offensichtlich, dass für diese beiden Prozesse unterschiedliche Integrationskonzepte für Solarwärme in Frage kommen. Doch auch innerhalb einer Kategorie können sich in Abhängigkeit der konventionellen Beheizung unterschiedliche Möglichkeiten zur Einbindung der Solarwärme ergeben. So

lässt sich beispielsweise die solare Beheizung bei der Dauererhitzung mit beheiztem Mantel deutlich schwieriger realisieren als bei einem Tunnelpasteur, der mit einem externen Wärmeübertrager beheizt wird. Dies zeigt, dass die Einbindung von Solarwärme sowohl von der Kategorie des Wärmeverbrauchers als auch von der konventionellen Beheizung bestimmt wird.

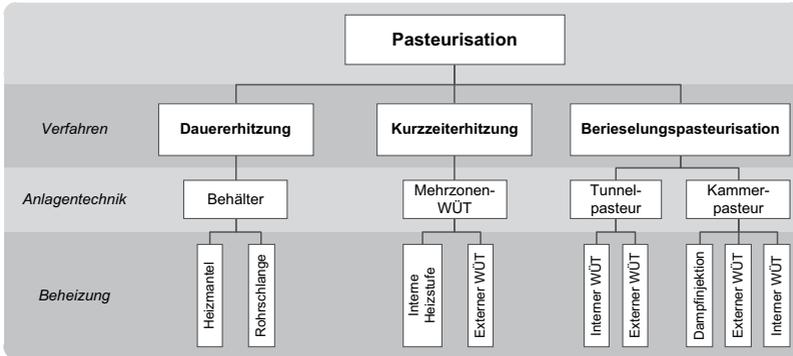


Abbildung 5-3: Unterschiedliche Verfahren und Anlagen zur Pasteurisation von Lebensmitteln.

Die Auflistung der unterschiedlichen Pasteurisationsmöglichkeiten verdeutlicht erneut, dass eine Unterteilung nach Prozessen hinsichtlich der Einbindung von Solarwärme nicht zielführend ist. Prinzipiell erscheint es eher zweitrangig, ob ein internes Rohrbündel zur konventionellen Beheizung eines Tunnelpasteurs oder einer Flaschenwaschmaschine verwendet wird. Zusammenfassend ergeben sich folgende Randbedingungen, die für eine allgemeingültige Klassifizierung zur Einbindung von Solarwärme berücksichtigt werden müssen:

- Versorgungs- oder Prozessebene
- Verwendetes Wärmeträgermedium
- Kategorie des Wärmeverbrauchers (Aufheizen oder Beheizen)
- Konventionelle Beheizung des Prozesses

Für sich genommen ist jeder dieser Punkte noch nicht hinreichend aussagekräftig. Nach gemeinsamer Berücksichtigung einzelner Punkte können sich allerdings Klassen zur Einbindung von Solarwärme ergeben. Während auf Versorgungsebene das verwendete Wärmeträgermedium direkt in den potentiellen Anwendungen und damit auch in einem bzw. zwei geeigneten Integrationskonzepten resultiert, spielt das Wärmeträgermedium auf Prozessebene eine untergeordnete Rolle.

Auf Prozessebene muss zunächst eine Zuordnung nach der Kategorie des Wärmeverbrauchs erfolgen, um die vielfältigen Prozesse möglichst übersichtlich zusammenzufassen. Dies sind zunächst die beiden zuvor genannten Kategorien „Aufheizen eines Fluidstroms“ (dies kann sich sowohl auf ein Produkt – P als auch auf ein Prozessmedium – PM beziehen) und „Beheizen von Bädern, Maschinen oder Tanks“. Basierend auf den in Kapitel 4 analysierten Branchen erscheint es sinnvoll, mit „Thermischen Trennprozessen“ eine dritte Kategorie aufzunehmen. Diese Kategorie umfasst eine der wichtigsten, verfahrenstechnischen Grundoperationen, bei der Stoffgemische durch Einstellen eines thermodynamischen Gleichgewichts getrennt werden. Hinsichtlich der Relevanz zur Einbindung von Solarwärme werden in dieser Kategorie jedoch nur Trennprozesse berücksichtigt, bei denen die Stofftrennung aufgrund von Verdampfung abläuft. Unter diese Kategorie fallen demnach Trocknen, Verdampfen, Destillieren und Rektifizieren. Nach der Unterscheidung zwischen diesen drei Kategorien muss die bisherige konventionelle Prozessbeheizung berücksichtigt werden. So macht es hinsichtlich der Integration von Solarwärme einen Unterschied, ob ein Prozess mit einem externen Wärmeübertrager, einem Heizmantel oder gar mittels Dampfinjektion beheizt wird. Aus diesen zu beachtenden Randbedingungen ergibt sich die in Abbildung 5-4 dargestellte Klassifizierung, die allgemeingültig auf einen Großteil der industriellen Prozesse angewendet werden kann.

Gemäß Abbildung 5-4 wird bei der Integration thermischer Solaranlagen zur Bereitstellung von Prozesswärme zunächst nach Versorgungs- und Prozessebene unterschieden. Auf Versorgungsebene erfolgt eine weitere Unterteilung nach dem verwendeten Wärmeträgermedium. Dabei wird zwischen Dampf und flüssigen Wärmeträgermedien unterschieden. Die Integrationskonzepte für flüssige Wärmeträgermedien gelten neben den am häufigsten verwendeten Medien Heiß- und Warmwasser auch für synthetische Wärmeträger oder solche auf Mineralölbasis. Hierbei können sich lediglich bei der Auswahl eines geeigneten Wärmeübertragers fluidspezifische Unterschiede ergeben. Ähnliches gilt für den Fall, dass ein Wärmenetz mit Luft als Wärmeträgermedium vorliegt. Auch hierfür gelten prinzipiell die gleichen Integrationskonzepte. Lediglich die benötigten Wärmeübertrager würden variieren.

Bei der Verwendung von Dampf als Wärmeträger werden drei mögliche Anwendungen zur Einbindung von Solarwärme unterschieden. Dies sind die Bereitstellung von Dampf, also die Einbindung in den Vorlauf der konventionellen Wärmebereitstellung sowie die Aufheizung von Kesselspeisewasser und Kesselzusatzwasser, was einer Einbindung in den Rücklauf entspricht. Bei der parallelen Einbindung in den Vorlauf können mit der direkten (VE_D_PD) und indirekten solaren Dampferzeugung (VE_D_PI) zwei Integrationskonzepte unterschieden werden. Die Einbindung von Solarwärme in den Rücklauf des Dampfsystems zur Aufheizung des Kesselspeisewassers (VE_D_sw) oder Kesselzusatzwassers (VE_D_zw) unterscheiden sich im Wesentlichen im Temperaturniveau und in den Möglichkeiten zur kesselhausinternen Wärmerückgewinnung, die hierbei berücksichtigt werden müssen. Bei der Verwendung von flüssigen Wärmeträgern ergibt sich neben der parallelen Einbindung in den Vorlauf (VE_F_P) und der seriellen Einbindung in den Rücklauf (VE_F_R) auch die Möglichkeit der Beheizung von Speichern oder Heißwasserkaskaden (VE_F_SK). Bei der parallelen Integration sind ähnlich wie bei Dampf zwei Konzepte (direkt und indirekt) möglich. Das Integrationskonzept VE_F_SK zur Beheizung von Speichern oder Kaskaden würde bei der Verwendung von Luft als Wärmeträgermedium entfallen.

Auf Prozessebene erfolgt eine erste Unterscheidung anhand der Kategorie des Wärmeverbrauchers. Ein Prozess, der als besonders geeignet für die Nutzung von Solarwärme identifiziert wurde (z.B. aufgrund seines Temperaturniveaus und Lastprofils), sollte demnach einer der drei Kategorien „Aufheizen eines Fluidstroms“, „Beheizen von Bädern, Maschinen oder Tanks“ oder „Thermisches Trennen“ zugeordnet werden. Anschließend erfolgt eine weitere Unterteilung anhand der konventionellen Beheizung des identifizierten Prozesses. Bei der Kategorie „Aufheizen eines Fluidstroms“ werden zwei Möglichkeiten zur konventionellen Beheizung unterschieden: Externe Wärmeübertrager und Dampf-injektion. Bei Prozessen der zweiten Kategorie „Beheizen von Bädern, Maschinen oder Tanks“ werden neben Dampf-injektion und externen Wärmeübertragern auch interne zur konventionellen Beheizung verwendet. Interne Wärmeübertrager beinhalten an dieser Stelle Rohrbündel und -schlangen, elektrische Heizelemente, Heizmäntel, Platecoils und Dimple Plates sowie direkt befeuerte Prozesse. Bei der dritten Kategorie wird zwischen Konvektions- und Kontakttrocknern sowie Verdampfern unterschieden. Während die beiden Trocknertypen den Großteil aller thermischen Trocknungsverfahren umfassen, werden Verdampfer häufig auch zur Destillation und Rektifikation benötigt und decken damit auch diese beiden Trennprozesse ab.

Jeder der genannten Möglichkeiten zur konventionellen Beheizung können in Abhängigkeit der Kategorie des Wärmeverbrauchers ein oder mehrere Integrationskonzepte zugeordnet werden. Auf Prozessebene ergeben sich demnach vier Klassen zur Einbindung von Solarwärme, die teils mehrere Varianten umfassen. Zunächst besteht die Möglichkeit zur

Einbindung der Solarwärme mittels externen Wärmeübertragern (PE_E). Hierbei sind vier Varianten möglich. Es kann ein zusätzlicher, solarbeheizter externer Wärmeübertrager seriell zur konventionellen Beheizung eingebunden werden (PE_E_PM), um ein Produkt (P) oder Prozessmedium (PM) aufzuheizen. Vom Grundprinzip ähnlich ist die zweite Möglichkeit zur Einbindung von Solarwärme bei einem Warmwasserzwischenkreis (PE_E_ZK). Daneben bestehen die Möglichkeiten zur Einbindung eines solarbeheizten Wärmeübertragers zur externen Beheizung von Behältern (PE_E_BB) sowie zur Aufheizung eines Inputstromes (Produkt oder Prozessmedium), der kontinuierlich dem Prozess zugegeben wird (PE_E_IS). Die zweite Klasse zur Einbindung von Solarwärme umfasst die Verwendung einer zusätzlichen internen Wärmeübertragungsfläche im Inneren von Bädern, Maschinen oder Tanks (PE_I). Die dritte Klasse umfasst die Einbindung von Solarwärme bei Mehrzonen-Wärmeübertragern mittels Erweiterung um eine solare Heizzone (PE_MZ_HZ) oder mit Hilfe einer Anschlussplatte (PE_MZ_AP). Die letzte Klasse beinhaltet die solare Bereitstellung von Dampf auf reduziertem Temperaturniveau. Dabei wird zwischen der Dampfbereitstellung mit Unterdruck (PE_D_UD) und Niederdruck (PE_D_ND) unterschieden.

5.3. Integrationskonzepte für klassifizierte Anwendungen

In diesem Abschnitt werden die zuvor erläuterten und in Abbildung 5-4 dargestellten Integrationskonzepte beschrieben. Neben den jeweiligen Eigenschaften der Integrationskonzepte beinhaltet die Beschreibung Verfahrensfleßbilder zur Visualisierung der Einbindung – teilweise auch anhand realer Beispiele aus verschiedenen Branchen.

Auf Versorgungsebene wurden insgesamt sechs unterschiedliche Möglichkeiten zur Integration von Solarwärme identifiziert. Diese variieren in Abhängigkeit des verwendeten Wärmeträgermediums. Daraus resultieren jeweils drei Integrationskonzepte für dampfförmige und flüssige Wärmeträgermedien. Auf Prozessebene wurden in Abhängigkeit der konventionellen Beheizung des Prozesses vier grundlegende Klassen zur Einbindung von Solarwärme identifiziert. Dies sind die Einbindung eines externen Wärmeübertragers, einer zusätzlichen internen Wärmeübertragungsfläche in Bädern, Maschinen oder Tanks, die Erweiterung bestehender Mehrzonen-Wärmeübertrager und die Bereitstellung von Dampf auf reduziertem Druckniveau. Abbildung 5-5 bezeichnet die wichtigsten Symbole der nachfolgenden Integrationskonzepte zur Einbindung solarer Wärme in industrielle Prozesse und Wärmeversorgungsstrukturen.

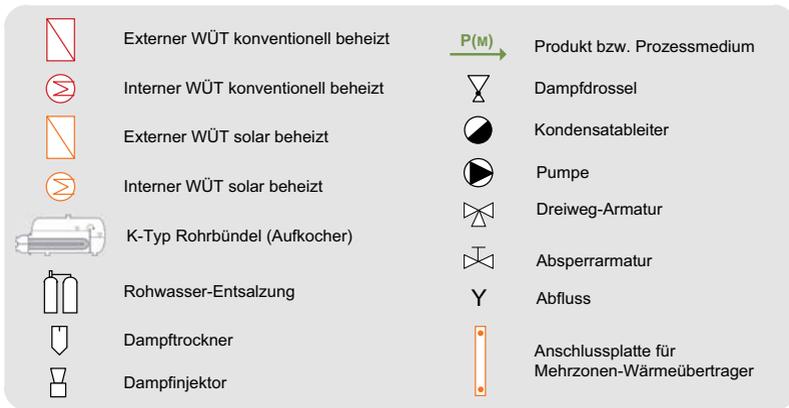


Abbildung 5-5: Wichtige Symbol der entwickelten Integrationskonzepte.

5.3.1. Versorgungsebene Dampf (VE_D)

Bei der Verwendung von Dampf als Wärmeträgermedium ergeben sich zur Einbindung von Solarwärme auf Versorgungsebene drei Möglichkeiten, wobei man bei einer Möglichkeit zwei Varianten unterscheiden kann. Bei Standorten mit ausreichend hoher Direktstrahlung besteht die Möglichkeit der solaren Dampferzeugung und Einspeisung in das vorhandene Netz. Die solare Dampferzeugung kann direkt (VE_D_PD) oder indirekt (VE_D_PI) erfolgen. Neben dieser parallelen Einbindung kann die Solarwärme auch seriell in die konventionelle Wärmebereitstellung eingebunden werden. Hierbei kann Solarwärme unter Berücksichtigung möglicher Maßnahmen zur Wärmerückgewinnung, zur Aufheizung von Kesselspeisewasser (VE_D_SW) oder zur Vorwärmung von Kesselzusatzwasser (VE_D_ZW) genutzt werden.

VE_D_PD – direkte solare Dampferzeugung

Bei der direkten solaren Dampferzeugung wird neben einem geeigneten Kollektor (beispielsweise Parabolrinne oder Fresnelkollektor) eine Dampftrommel benötigt. Bei diesem System wird Kesselspeisewasser durch den Kollektor geführt und verdampft dort teilweise. Das Wasser-Dampf-Gemisch gelangt anschließend in die Dampftrommel und wird dort getrennt. Das verbleibende Wasser wird erneut dem Kollektor zugeführt. Wenn der Dampf in der Dampftrommel das Druckniveau der konventionellen Dampfversorgung erreicht, wird er in das bestehende Dampfnetz eingespeist (vgl. Abbildung 5-6).

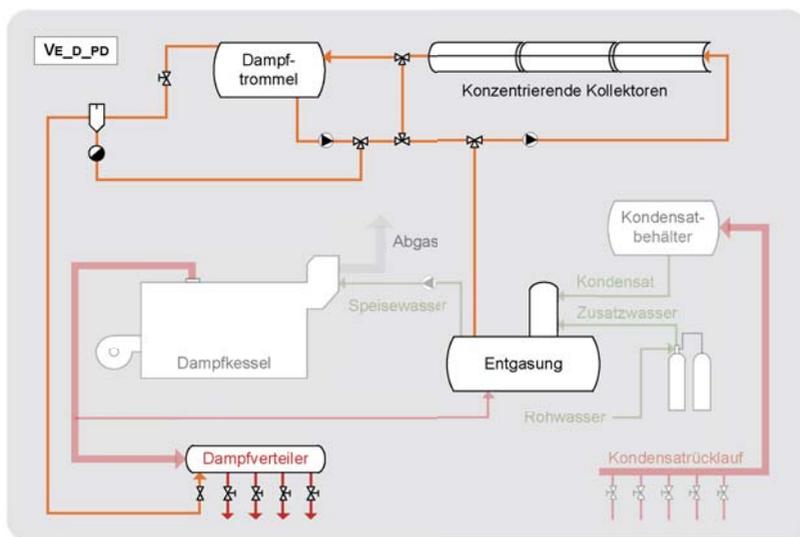


Abbildung 5-6: Integrationskonzept zur direkten solaren Dampferzeugung (VE_D_PD).

Bei der Einspeisung von solar erzeugtem Dampf verhält sich der konventionelle Dampferzeuger wie bei einer reduzierten Last und produziert weniger Dampf. Bis zu welchem Grad dies ohne große Wirkungsgradeinbußen zu realisieren ist, hängt von dem Verhältnis der installierten Leistungen von Solaranlage und Dampferzeuger sowie der typischerweise anliegenden Last und dem Modulationsverhalten des Dampferzeugers ab. Diese Art der Einbindung wurde beispielsweise im Rahmen eines Forschungsvorhabens in Deutschland realisiert (Krüger et al., 2011).

VE_D_PI – indirekte solare Dampferzeugung

Dieses Integrationskonzept ähnelt hinsichtlich der Wechselwirkung mit dem konventionellen Wärmebereitstellungssystem der zuvor erläuterten direkten Dampferzeugung. Der Unterschied liegt in der indirekten solaren Erzeugung von Dampf. Hierbei werden ebenfalls konzentrierende Kollektoren benötigt, die jedoch Druckwasser oder Thermoöl als Wärmeträgermedium verwenden. Die Dampferzeugung erfolgt dann indirekt mit dem Wärmeträgermedium und einem geeigneten Wärmeübertrager. Hierfür können die in Abschnitt 4.2.1 erläuterten Aufkocher verwendet werden. Das Rohrbündel des Wärmeübertragers ist permanent mit Kesselspeisewasser bedeckt und wird durch die solar bereitgestellte Wärme verdampft. Der WÜT wird in demselben Druckbereich wie das Dampfnetz betrieben, sodass der erzeugte Dampf direkt in das Netz eingespeist werden

kann. Bei der indirekten Einbindung sollte das Wärmeträgermedium des Kollektors zumindest 20 K oberhalb der geforderten Dampftemperatur liegen, um einen reibungslosen Betrieb des Verdampfers gewährleisten zu können.

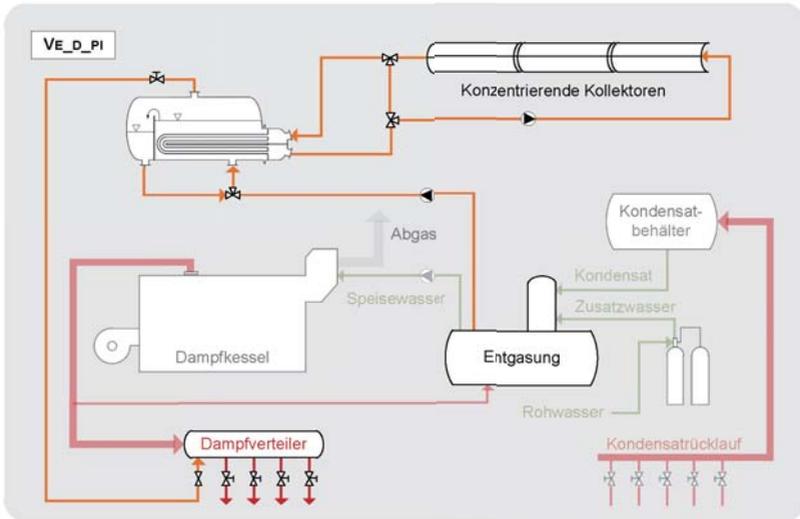


Abbildung 5-7: Integrationskonzept zur indirekten solaren Dampferzeugung (VE_D_PI).

Dieses Integrationskonzept wurde bei der schweizerischen Molkerei Lalaria Engiadinaisa SA realisiert. Eine Parabolrinnenkollektoranlage mit 115 m² betreibt mit Thermoöl als Wärmeträgermedium (ca. 180 °C) einen Rohrbündeldampferzeuger. Der damit erzeugte Dampf wird mit ca. 145 °C in das vorhandene Dampfnetz eingespeist.

VE_D_SW – solare Speisewasseraufheizung

Dieses Integrationskonzept entspricht einer seriellen Einbindung der Solaranlage. Dabei ist vorgesehen, die Solarwärme zur Aufheizung des Kesselspeisewassers nach der Entgasung zu nutzen. Die Entgasung erfolgt häufig bei 105 °C (Vollentgasung), seltener bei 95 °C (Teilentgasung). Die Zieltemperatur, auf die das Kesselspeisewasser aufgeheizt werden muss, hängt vom Dampfdruck des Kessels ab. Häufig werden Dampfkessel im Bereich von 160..220 °C betrieben, was einem Dampfdruck von 6..23 bar entspricht.

Normalerweise sollte das Kesselspeisewasser nach der Entgasung durch einen Abgaswärmeübertrager (Economiser) vorgewärmt werden, bevor es in den Kessel gelangt. Dabei wird das Kesselspeisewasser durch das Abgas typischerweise um 30 K erwärmt. Die

verbleibende Temperaturdifferenz kann solar bereitgestellt werden. Aus solarthermischer Sicht sollte die solare Aufheizung des Kesselspeisewassers vor dem Economiser erfolgen, um mit dem dadurch niedrigerem Temperaturniveau etwas höhere Erträge erzielen zu können. Allerdings ist hierbei zu beachten, dass nach Sattler und Schibel (2011) die Auslegung eines Economisers typischerweise auf eine Eintrittstemperatur erfolgt, die der Entgasungstemperatur entspricht. Aus diesem Grunde ist bei der Einbindung mit vorhandenem Economiser zu prüfen, ob eine Vorschaltung und damit Anhebung der Eintrittstemperatur des Kesselspeisewassers in den Economiser möglich ist. Das Kesselspeisewasser wird normalerweise kontinuierlich in den Kessel gepumpt. Lediglich bei Dampferzeugern ohne Economiser bis 2 MW Feuerungsleistung (entspricht einer Dampfleistung von 3 t/h) kann eine diskontinuierliche Einspeisung erfolgen.

Abbildung 5-8 zeigt das Integrationskonzept zur seriellen Einbindung einer Solaranlage bei der Dampferzeugung. Der solarbeheizte Wärmeübertrager ist nach der Entgasung angebracht und ermöglicht die Aufheizung des Kesselspeisewassers vor Eintritt in den Economiser. Eine Anordnung des Solarwärmeübertragers nach dem Economiser wird in der Regel nicht möglich sein, da dieser entweder in den Kessel integriert oder derart angeordnet ist, dass die Austrittsleitung nicht zugänglich ist.

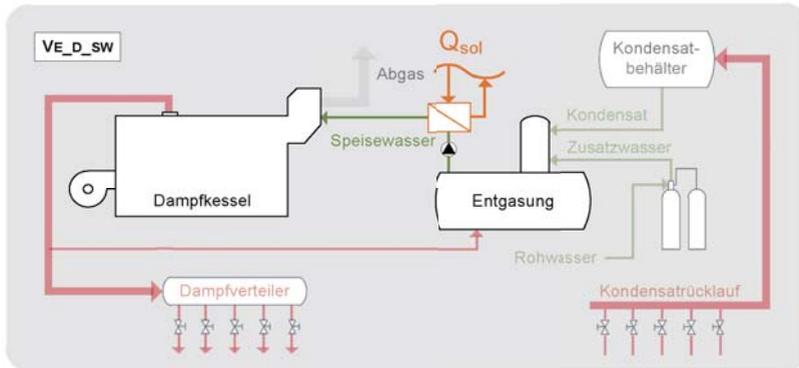


Abbildung 5-8: Integrationskonzept zur solaren Aufheizung des Kesselspeisewassers (VE_D_SW).

VE_D_ZW – solare Zusatzwasseraufheizung

Bei dem letzten Integrationskonzept für Dampfkreisläufe erfolgt ebenfalls eine serielle Einbindung. Hierbei wird das Kesselzusatzwasser solarbeheizt. Zusatzwasser wird benötigt, um die Kondensatverluste auszugleichen, die bei offener Rückführung (Entspannungsvorgänge), direktem Dampfverbrauch oder Absalzung des Kessels entstehen.

Die benötigte Menge Wasser durchläuft zunächst eine Entsalzung (Ionentauscher oder Osmose) und gelangt anschließend in die thermische Entgasung. Das Integrationskonzept VE_D_ZW sieht vor, das Zusatzwasser nach der Entsalzung möglichst auf die Entgasungstemperatur solar vorzuwärmen (vgl. Abbildung 5-9). Dazu wird das Zusatzwasser nach der Entsalzung über einen Wärmeübertrager mittels Solarwärme aufgeheizt und in den Entgaser geführt. Ob dies kontinuierlich oder diskontinuierlich geschieht hängt von der Menge des direkt verbrauchten Dampfes ab. In der Regel erfolgt die Einspeisung in den Entgasungsbehälter diskontinuierlich.

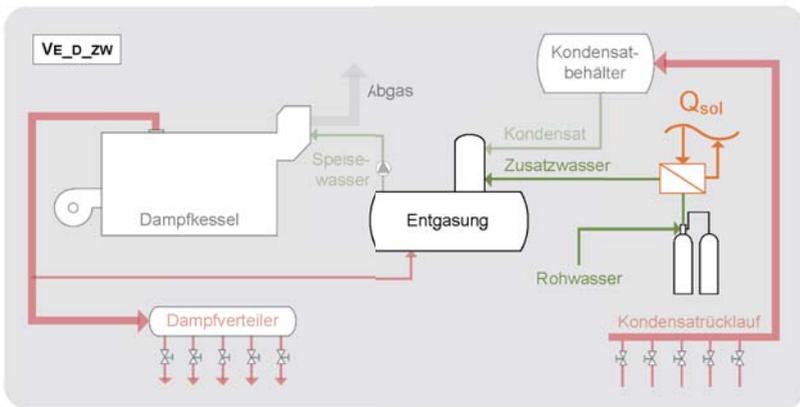


Abbildung 5-9: Integrationskonzept zur solaren Vorwärmung des Kesselzusatzwassers (VE_D_ZW).

Bei der Umsetzung dieses Integrationskonzeptes ist die Konkurrenz zur Abwärmenutzung zu beachten. So ist grundsätzlich die Vorwärmung des Rohwassers durch kesselhausinterne Wärmerückgewinnungsmaßnahmen Stand der Technik. Hierfür stehen unterschiedliche Wärmequellen zur Verfügung.

Zunächst kann die bei der Absatzung entstehende Abwärme genutzt werden. Im Laufe der Kesselbetriebszeit erhöht sich im Bereich der Wasseroberfläche die Salzkonzentration des Kesselwassers, weshalb eine kontinuierliche Absatzung erfolgt. Das bedeutet, dass Kesselwasser mit der Siedetemperatur des entsprechenden Druckes abgeleitet wird. Dieses Wasser wird zunächst auf atmosphärischen Druck entspannt (der dabei entstehende Dampf wird typischerweise in den Entgaser geleitet) und anschließend im sogenannten Laugenkühler abgekühlt. Dabei kann im Gegenzug das enthärtete Rohwasser aufgeheizt werden (Ernst, 2009). Des Weiteren kann der bei der Entgasung entstehende Brüden durch das enthärtete Rohwasser kondensiert und abgekühlt werden. Zudem besteht auch die

Möglichkeit, das Kesselspeisewasser nach der Entgasung mit dem enthärteten Rohwasser um etwa 10 K abzukühlen, um mit einem entsprechend erweiterten Economiser die Ausnutzung der Abgaswärme zu verbessern (Sattler und Schibel, 2011).

Unter Berücksichtigung der erläuterten Wärmerückgewinnungsmaßnahmen kann die Integration einer Solaranlage zur Zusatzwasseraufheizung in Abhängigkeit von Feuerungsleistung und Zusatzwasserbedarf überflüssig sein. Um die Größenordnung der Wärmerückgewinnung und die Möglichkeiten zur Einbindung von Solarwärme zu quantifizieren, wurden überschlägige Berechnungen durchgeführt (vgl. Abschnitt 8.3 im Anhang). Demnach kann der Brüden, der bei einer thermischen Entgasung entsteht, überschlägig mit 0,8 % des Frischdampfmassenstroms des Kessels angenommen werden (bei durchschnittlichen Kondensat- und Absatzungsverlusten). Daraus resultiert eine bei der Brüdenkondensation zur Verfügung stehende Leistung von etwa 5,6 kW pro Tonne produzierten Frischdampfes. Durch einen bei der Absatzung verwendeten Laugenkühler können zusätzlich knapp 4,4 kW pro Tonne Frischdampf bereitgestellt werden. Die durch den Speisewasserkühler zur Verfügung stehende Leistung liegt bei rund 13,4 kW pro Tonne Frischdampf.

Überträgt man diese Werte auf einen Dampfkessel mit 10 MW Dampfleistung (entspricht einer Dampfleistung von 15,4 t/h) so ergibt sich eine nutzbare Leistung der Wärmerückgewinnung von etwa 360 kW. Unterstellt man neben den bereits genannten Kondensat- und Absatzungsverlusten von insgesamt 15 % einen zusätzlichen direkten Dampfverbrauch von 20 %, so könnten noch knapp 170 kW durch eine Solaranlage bereitgestellt werden. Hierzu zeigt Tabelle 5-1 die zusätzlich benötigte Leistung zur Aufheizung von Zusatzwasser unter Berücksichtigung der erläuterten Wärmerückgewinnungsmaßnahmen in Abhängigkeit unterschiedlicher Feuerungsleistungen und Zusatzwassermengen.

Tabelle 5-1: Verbleibende Leistung zur Aufheizung von Zusatzwasser in Abhängigkeit der Feuerungsleistung und des direkten Dampfverbrauchs.

Leistung Dampfkessel	Leistung Wärmerückgewinnung [kW]	zusätzlich benötigte Leistung zur Zusatzwasseraufheizung in kW bei einem direktem Dampfverbrauch von				
		0 %	10 %	20 %	30 %	40 %
1 MW	36	-13	2	17	32	47
5 MW	180	-67	9	85	161	237
10 MW	361	-133	18	170	322	474
20 MW	722	-266	37	340	664	947

Randbedingungen der Berechnung: 5 % Absatzrate, 10 % Kondensatverluste durch atmosphärischen Kondensatrücklauf, Mindestmengenfaktor 0,0075, Eintrittstemperatur Zusatzwasser 15 °C. Überschlägige Berechnungen beziehen sich auf 100 % Kessellast mit Erdgas als Brennstoff und entsprechend ausgelegtem Economizer.

Die wichtigsten Randbedingungen dieser Berechnungen sind ein offenes Kondensatsystem mit 10 % Verlusten und einer Absalzrate von 5 %. Die Tabelle zeigt, dass die zusätzlich benötigte Leistung zur Aufheizung des Zusatzwassers erst ab einem direkten Dampfverbrauch von 20..30 % eine nennenswerte Größe erreicht. Im Verhältnis zur Feuerungsleistung ist die resultierende Leistung einer möglichen Solaranlage allerdings marginal. Unterhalb von 5 MW Feuerungsleistung erscheint die Nutzung von Solarwärme als wenig sinnvoll, da der Aufwand zur Einbindung einer sehr kleinen Solaranlage gegenübersteht.

Da neben den kesselhausinternen Maßnahmen zur Wärmerückgewinnung häufig auch Abwärme von Druckluftkompressoren oder Kältemaschinen zur Vorwärmung des Zusatzwassers genutzt werden kann, zeigt Tabelle 5-2 die verbleibende Leistung für eine mögliche solare Zusatzwasseraufheizung für einen 5 MW Kessel in Abhängigkeit der Eintrittstemperatur des Zusatzwassers.

Tabelle 5-2: Verbleibende Leistung zur Aufheizung von Zusatzwasser eines 5 MW Kessels in Abhängigkeit der Zusatzwassertemperatur und des direkten Dampfverbrauchs.

Eintritts- temperatur Zusatzwasser	zusätzlich benötigte Leistung zur Zusatzwasseraufheizung in kW bei einem 5 MW Kessel und direktem Dampfverbrauch von				
	0 %	10 %	20 %	30 %	40 %
15 °C	-67	9	85	161	237
30 °C	-87	-24	38	101	163
45 °C	-107	-58	-9	40	90
60 °C	-127	-91	-55	-20	16

Randbedingungen der Berechnung: 5 % Absalzrate, 10 % Kondensatverluste durch atmosphärischen Kondensatrücklauf, Mindestmengenfaktor 0,0075. Überschlägige Berechnungen beziehen sich auf 100 % Kessellast mit Erdgas als Brennstoff und entsprechend ausgelegtem Economizer.

Beide Tabellen lassen zunächst den Schluss zu, dass vor allem für Dampfkreisläufe mit sehr hohen direkten Dampfverbräuchern (> 50 %) eine Solareinbindung sinnvoll erscheint, da lediglich hier sinnvolle Solaranlagengrößen realisiert werden können. Allerdings muss bei den daraus resultierenden hohen Zusatzwassermengen berücksichtigt werden, dass auch bei Dampferzeugern auf die Nutzung von Brennwertechnik zurückgegriffen werden kann, die in der Regel eine Niedertemperaturwärmesenke erfordert. Unter Berücksichtigung der Amortisationszeiten erscheint die Brennwertechnik derzeit als die sinnvollere Alternative bei sehr hohen Zusatzwassermengen. Im Einzelfall sollte zur Entscheidungsfindung eine Gegenüberstellung der beiden Technologien erfolgen.

Fazit

Die Auswahl des sinnvollsten Integrationskonzepts auf Versorgungsebene bei der Verwendung von Dampf als Wärmeträgermedium hängt von den jeweiligen Randbedingungen ab. Auch wenn die solare Dampferzeugung in Deutschland (bzw. Ländern mit vergleichbarer Einstrahlung) technisch möglich ist, sollte dieses Integrationskonzept aus wirtschaftlichen Gründen nur bei Standorten mit hohen Direktstrahlungsanteilen gewählt werden. Die Umsetzung der beiden anderen Integrationskonzepte zur seriellen Einbindung in den Rücklauf des Dampfkreislaufs wird stark von Maßnahmen zur Wärmerückgewinnung beeinflusst. Aktuell, und wohl auch in naher Zukunft, liegen die Investitionskosten für die Abwärmenutzung in Form eines Economisers, Laugenkühlers und Brüdenkondensators deutlich unterhalb derer einer thermischen Solaranlage. Daraus resultiert ein reduziertes Potential zur Einbindung von Solarwärme an dieser Stelle. Vor der Realisierung eines solchen Konzeptes sollten daher die erläuterten Wärmerückgewinnungsmaßnahmen geprüft werden. Die solare Deckung des verbleibenden Wärmebedarfs sollte stets nach Ausschöpfen der vorhandenen Abwärmequellen erfolgen.

5.3.2. Versorgungsebene flüssige Wärmeträger (VE_F)

Wird anstelle eines dampfförmigen Wärmeträgermediums ein flüssiges verwendet, ergeben sich andere Integrationskonzepte. Aufgrund der Relevanz innerhalb des betrachteten Temperaturniveaus beziehen sich die folgenden Ausführungen auf die Verwendung von Heißwasser als Wärmeträgermedium. Dabei wird, ähnlich wie bei Dampf, die parallele und serielle Einbindung unterschieden. Zusätzlich besteht die Möglichkeit der solaren Beheizung eines Speichers bzw. einer Heißwasserkaskade, die in die konventionelle Wärmebereitstellung eingebunden sein können. Unter Umständen finden sich auch Wärmeträger auf Mineralölbasis oder synthetische Wärmeträger auf Versorgungsebene wieder, allerdings werden diese in der Regel für einen Temperaturbereich zwischen 300 und 400 °C verwendet, da Heißwasser oder Dampf unter diesen Randbedingungen sehr hohe Drücke aufweisen würden. Zwar würde bei der Verwendung dieser Wärmeträgermedien möglicherweise ein anderer Wärmeübertrager im Vergleich zu Heißwasser benötigt – das grundsätzliche Konzept zur Einbindung wäre jedoch gleich wie bei Heißwasser, da es sich hier ebenfalls um ein Fluid handelt. Grundsätzlich sind die vorgestellten Integrationskonzepte auch für die Beheizung einzelner Prozesslinien gültig, falls diese über einen separat beheizten Heißwasserkreis gespeist werden. In diesem Fall verschwimmen die Grenzen von Versorgungs- und Prozessebene.

VE_F_P – parallele Einbindung

Bei der parallelen Einbindung von Solarwärme in ein Heißwassernetz wird der Rücklauf sowohl über den konventionellen Wärmeerzeuger als auch über die Solaranlage geführt. Die Regelung der Solaranlage muss dabei gewährleisten, dass der Rücklauf auf die Soll-

temperatur aufgeheizt wird und in den Vorlauf eingespeist werden kann. Bei dieser Integrationsmöglichkeit kann zwischen der direkten und indirekten Einbindung unterschieden werden. Bei der direkten Einbindung wird das Wasser des Heizkreises durch die Kollektoren geführt. Für diese Art der Einbindung wird, wie in Abbildung 5-10 dargestellt, zumindest eine hydraulische Weiche benötigt.

Ein Teil des Rücklaufs des Heißwasserkreislaufs wird in der hydraulischen Weiche abgezogen und direkt durch die Kollektoren geführt. Je nach Solltemperatur des Netzes können hierfür abweichend zur Darstellung auch Vakuumröhren- oder CPC-Kollektoren verwendet werden. Der Rücklauf wird solar auf die Solltemperatur erwärmt und wieder in die hydraulische Weiche eingespeist. Für den Fall einer reduzierten Einstrahlung muss die Regelung der Solaranlage gewährleisten, dass die Solltemperatur erreicht wird. Dies kann mittels variablen Volumenströmen im Solarkreis oder durch eine „stop-and-go“-Regelung erfolgen. Dabei steht das Fluid bis zum Erreichen der Solltemperatur im Kollektorfeld.

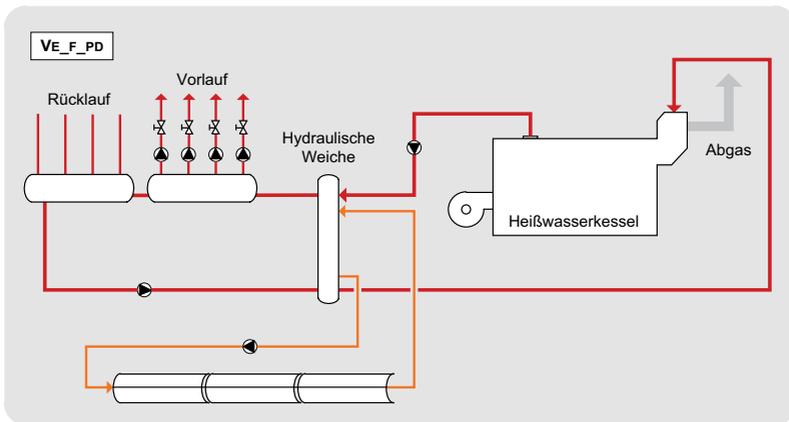


Abbildung 5-10: Integrationskonzept zur parallelen Einbindung von Solarwärme in Heißwassernetze (VE_F_PD).

Für den Fall, dass das Heizmedium nicht direkt durch den Kollektor geführt werden kann, wird ein zusätzlicher Wärmeübertrager benötigt (VE_F_PI). Dabei wird ein Teilstrom des Rücklaufs abgezweigt, über den solarbetriebenen Wärmeübertrager aufgeheizt und dem Vorlauf zugeführt. Hierzu muss sowohl die Primärseite als auch die Sekundärseite entsprechend geregelt werden.

Grundsätzlich finden sich in der Industrie auch kombinierte Wärmenetze. Dabei wird als primäres Wärmeträgermedium Dampf verwendet, der teilweise dazu genutzt wird, mittels

Wärmeübertrager oder Kaskade Heißwasser bereitzustellen. Die Einbindung bei Heißwasserkaskaden wird in VE_F_SK beschrieben.

VE_F_R – solare Rücklaufanhebung

Die serielle Einbindung einer Solaranlage in ein Heißwassernetz (vgl. Abbildung 5-11) ähnelt der zuvor erläuterten Variante (VE_F_PI) mit dem Unterschied, dass der solarbeheizte Teil des Rücklaufs nicht unbedingt auf Solltemperatur aufgeheizt werden muss und vor dem konventionellen Wärmeerzeuger mit dem restlichen Rücklauf vermischt wird. Ähnlich wie bei der parallelen Einbindung gilt es, das Verhältnis der Leistungen von Solaranlage und konventioneller Wärmebereitstellung sowie die mögliche Modulation des Wärmeerzeugers zu berücksichtigen. Hierbei kann grundsätzlich ebenfalls zwischen der direkten Einbindung ohne und der indirekten Einbindung mit Wärmeübertrager unterschieden werden.

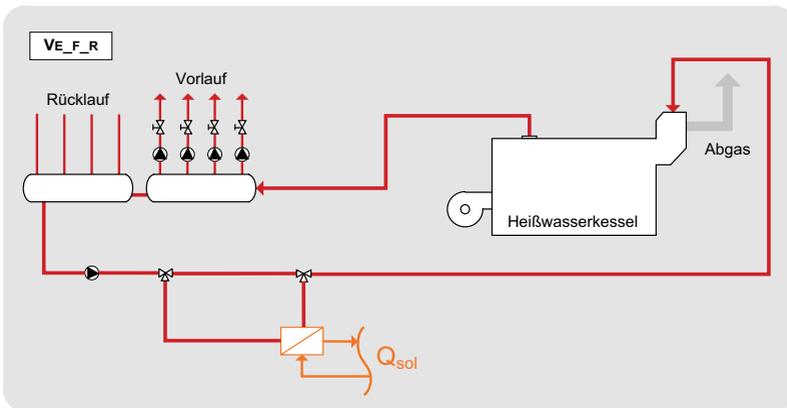


Abbildung 5-11: Integrationskonzept für die solare Rücklaufanhebung bei Heißwassernetzen (VE_F_R).

VE_F_SK – solare Beheizung von Speichern oder Kaskaden

Häufig verfügen Industriebetriebe über Heiß- oder Warmwasserspeicher, die sich ebenfalls für die Einbindung von Solarwärme eignen können. Diese Speicher können unterschiedlich ausgeführt werden. Neben Speichern mit variablem oder fixem Volumen, aus denen nach Bedarf das gespeicherte Wasser abgezogen wird, gibt es auch Pufferspeicher, die lediglich energetisch be- und entladen werden. Zudem können unterschiedlich viele Speicher seriell oder parallel verschaltet sein. Die Speicher können mit internen oder externen Wärmeüber-

tragern beheizt werden und über Kaltwasseranschlüsse verfügen. Ebenso finden sich Speicher ohne Nachheizung, denen lediglich Heiß- bzw. Warmwasser zugeführt wird.

Je nachdem, welche Speicherkonfiguration verwendet wird, können sich unterschiedliche Möglichkeiten zur Einbindung von Solarwärme ergeben. Dabei lassen sich die in Kapitel 3.4.2 vorgestellten Varianten zur Nachheizung des Speichers oder Vorwärmung der Inputströme umsetzen. In Abhängigkeit von der Temperatur und Menge der Inputströme kann eine alleinige Aufheizung dieser Ströme sinnvoll sein. In Abhängigkeit von der jeweiligen Speicherkonfiguration kann die Solarwärme demnach wie in Abbildung 5-12 links dargestellt über einen internen Wärmeerübertrager zur Beheizung oder einen externen Wärmeerübertrager zur Aufheizung der Inputströme eingebunden werden.

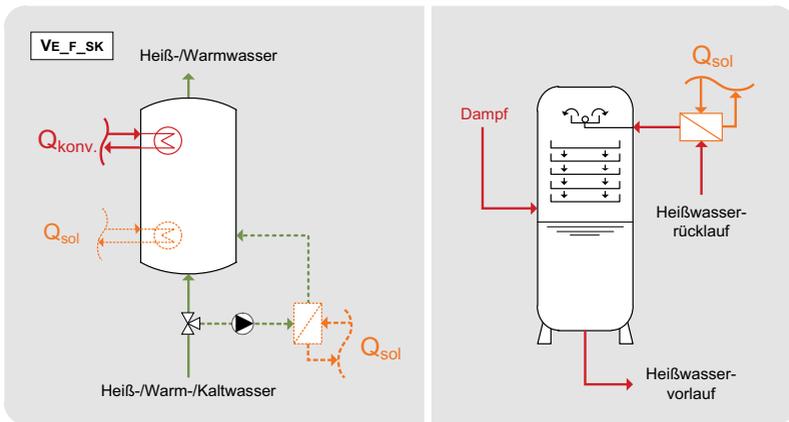


Abbildung 5-12: Integrationskonzept für die solare Beheizung von Heiß- und Warmwasserspeichern (links) sowie Heißwasserkaskaden (VE_F_SK).

Eine weitere Möglichkeit besteht in der Einbindung von Solarwärme für Heißwasserkaskaden. Dies sind im Grunde Wärmeerübertrager zur Bereitstellung von Heißwasser durch die stoffliche Nutzung von Dampf. Eine Heißwasserkaskade ist in der Regel ein stehender Speicher, in dem im oberen Bereich der Heißwasserrücklauf eingespeist wird. Der Rücklauf rieselt über Lochbleche nach unten und wird durch den im Gegenstrom geführten Dampf aufgeheizt. Im unteren Bereich der Kaskade wird der Heißwasservorlauf abgezogen. Eine mögliche Einbindung von Solarwärme entspricht dem Integrationskonzept VE_F_R. Ein Solarwärmeerübertrager würde den Rücklauf vor Eintritt in die Kaskade vorwärmen.

5.3.3. Prozessebene externer Wärmeübertrager (PE_E)

Auf Prozessebene werden vier grundsätzliche Klassen zur Integration von Solarwärme unterschieden. Die erste Klasse stellt die Einbindung eines externen Wärmeübertragers dar. Hierbei werden vier Varianten unterschieden. Dies ist zunächst die serielle Einbindung eines externen Wärmeübertragers zur Aufheizung eines Produkts oder Prozessmediums vor der konventionellen Beheizung. Die zweite Variante ist hierzu fast identisch, mit der Ausnahme, dass hier nicht ein Produkt oder Prozessmedium beheizt wird, sondern ein Warmwasserzwischenkreis. Die dritte Variante ist die Einbindung eines externen Wärmeübertragers zur Beheizung von Bädern, Maschinen oder Tanks. Schließlich besteht auch die Möglichkeit, einen externen Wärmeübertrager einzubinden, der lediglich Inputströme für einen Prozess (Produkt oder Prozessmedium) aufheizt. Nachfolgend werden diese Varianten vorgestellt.

PE_E_PM – externer WÜT zur Aufheizung von Produkt oder Prozessmedium

Das Integrationskonzept PE_E_PM sieht vor, dass ein solarbeheizter Wärmeübertrager seriell vor dem konventionellen eingebunden wird, um das Produkt oder Prozessmedium solar vorzuwärmen. Hierbei nutzt man vor allem die niedrige Rücklauftemperatur des aufzuheizenden Stroms, die in der Regel deutlich unterhalb der Rücklauftemperatur des konventionellen Wärmeträgermediums liegt. Abbildung 5-13 zeigt das allgemeingültige Integrationskonzept. Dabei ist vorgesehen, dass ein Teilstrom des Produkts oder Prozessmediums über den solarbeheizten Wärmeübertrager geführt wird. Je nach Anwendungsfall kann auch der gesamte Strom über den Wärmeübertrager geführt werden.

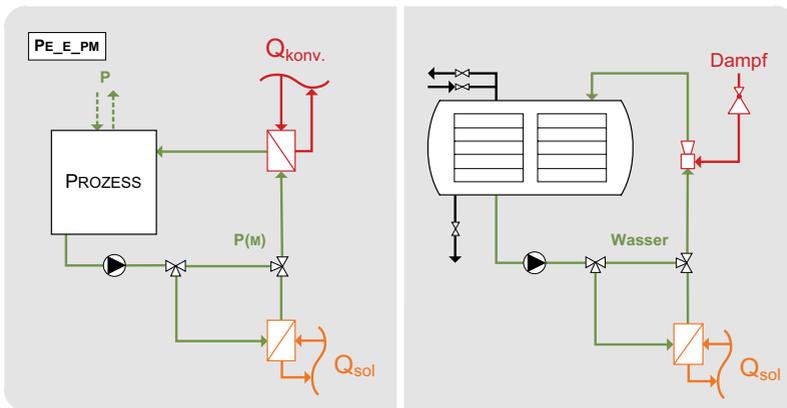


Abbildung 5-13: Integrationskonzept zur seriellen Einbindung eines externen Wärmeübertragers zur Beheizung eines Produkts oder Prozessmediums (PE_E_PM). Allgemeines Schema (links) und Beispiel anhand eines Vollwasserautoklavs (rechts).

Zusätzlich beinhaltet die Abbildung ein Beispiel für diese Integrationsvariante. Dabei wird ein Vollwasserautoklav solar unterstützt. Bei diesem Autoklav wird das Wasser abgezogen und durch die Injektion von Dampf aufgeheizt. Ein Teilstrom des aufzuheizenden Wassers wird vor dieser konventionellen Beheizung mit einem Solarwärmeübertrager erwärmt, wodurch der Dampfverbrauch reduziert wird. Dieses Integrationskonzept stellt die einfachste bzw. im Vergleich aufwandsärmste Möglichkeit dar und findet sich in jeder der drei Kategorien Aufheizen, Beheizen und thermisches Trennen wieder.

PE_E_ZK – externer WÜT zur Beheizung von Warmwasserzwischenkreisen

Vom Grundprinzip ähnelt das Integrationskonzept PE_E_ZK dem zuvor erläuterten. Allerdings wird hierbei nicht ein Produkt oder Prozessmedium aufgeheizt, sondern ein Warmwasserzwischenkreis. Diese Ausgangssituation ist häufig in der Ernährungsindustrie anzutreffen. Aus Gründen der Produktschonung ist dabei zwischen dem zu behandelnden Produkt (z.B. Milch) und den primären Wärmeträgermedium (z.B. Dampf) ein Warmwasserzwischenkreis geschaltet. Dieser wird in einem Temperaturbereich von einigen wenigen Kelvin oberhalb der zu erzielenden Produkttemperatur betrieben.

Hinsichtlich der Einbindung von Solarwärme ergibt sich damit ein wesentlicher Unterschied zu PE_E_PM. Es kann davon ausgegangen werden, dass ausschließlich Plattenwärmeübertrager zur solaren Beheizung eingesetzt werden können. Bei dem Integrationskonzept PE_E_PM hingegen kommen in Abhängigkeit des Produkts oder Prozessmediums auch andere Bauformen in Frage, die ggf. Auswirkungen auf das solar bereitzustellende Temperaturniveau und die resultierende Rücklauftemperatur haben. Außerdem können etwaige zusätzliche Auflagen, wie beispielsweise die ausschließliche Verwendung von Edelstahl aus hygienischen Gründen, entfallen.

Abbildung 5-14 verdeutlicht das Integrationsschema anhand eines Pasteurisationsprozesses. Bei der Kurzzeiterhitzung von flüssigen Lebensmitteln werden typischerweise Mehrzonen-Wärmeübertrager mit unterschiedlichen Ausführungen verwendet. Das Produkt wird in einer rekuperativen Abteilung (1) vorerwärmt und gelangt in die Pasteurisationsstufe (2). Dort wird das Produkt von Warmwasser auf die erforderliche Temperatur erwärmt. Der Rücklauf des Warmwassers wird zunächst solar erwärmt und anschließend bei Bedarf konventionell nachgeheizt, bevor es erneut in die Pasteurisationsstufe geführt wird. Das Produkt durchläuft nach der Pasteurisation eine Heißhaltestrecke, erwärmt in der rekuperativen Zone das eintretende Produkt und wird abschließend auf die Zieltemperatur abgekühlt.

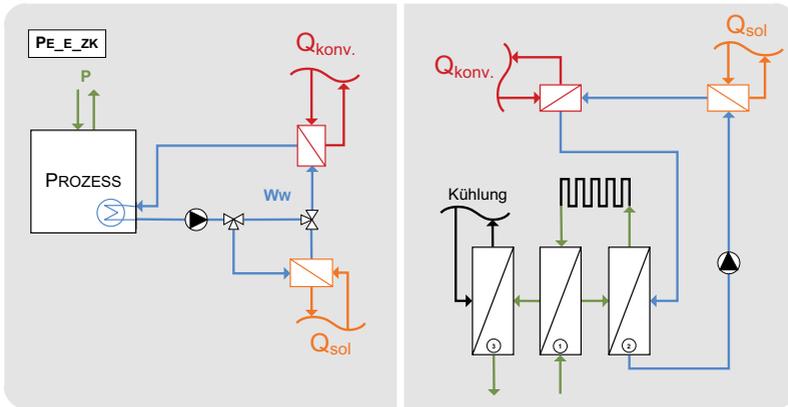


Abbildung 5-14: Integrationskonzept zur Einbindung eines externen Wärmeübertragers bei Warmwasserzwischenkreis (PE_E_ZK). Allgemeines Schema (links) und Beispiel anhand eines Pasteurisationsprozesses mit Mehrzonen-Wärmeübertrager und externer Heizstufe (rechts).

Sollte ein Prozess nicht über einen Warmwasserzwischenkreis, sondern über ein konventionelles Heiß- oder Warmwassernetz beheizt werden, kann eine Mischform der beiden Integrationskonzepte PE_E_ZK und VE_F_R sinnvoll sein. Dabei wird der Rücklauf des Heizkreises direkt nach dem Prozess solar erwärmt und nicht erst die zentrale Rücklaufleitung in der Nähe des Kesselhauses. Häufig liegen im Rücklauf direkt nach einem Niedertemperaturprozess deutlich niedrigere Temperaturen an als in der zentralen Sammelleitung, in der sich eine Mischtemperatur aus allen Prozessen und ggf. auch dem Vorlauf einstellt. Dies trifft beispielsweise auf das in Kapitel 3.4.3 vorgestellte Integrationskonzept zur solaren Beheizung der Maischepfanne zu.

PE_E_BB – externer WÜT für Beheizung von Bädern, Maschinen oder Tanks

Das Integrationskonzept PE_E_BB sieht vor, für Bäder, Maschinen oder Tanks, die konventionell mittels internen Wärmeübertrager oder Dampfinjektion beheizt werden, einen externen Wärmeübertrager zur Beheizung von Produkt oder Prozessmedium einzubinden. Wie in Abbildung 5-15 dargestellt, wird das Produkt oder Prozessmedium aus dem Prozess abgezogen, solar erwärmt und anschließend wieder eingespeist. Eine Möglichkeit zeigt das Beispiel zur Beheizung von Galvanikbecken. Diese werden konventionell mittels dampfbeheizten internen Wärmeübertragern (Platecoil) auf Solltemperatur gebracht und gehalten.

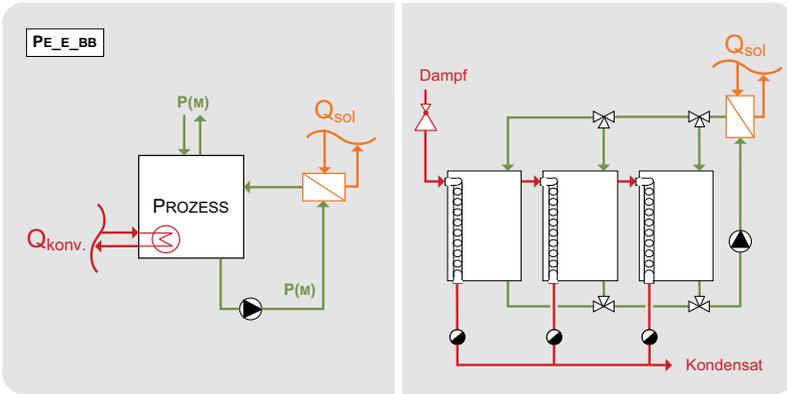


Abbildung 5-15: Integrationskonzept zur Einbindung eines externen Wärmeübertragers zur Beheizung von Bädern (PE_E_BB). Allgemeines Schema (links) und Beispiel anhand eines, mittels internen Platecoils beheizten, Galvanikbeckens (rechts).

Bei dieser Art der Einbindung ist es besonders wichtig, eine geeignete Stelle innerhalb des Prozesses zu finden, an der das Produkt oder Prozessmedium eine möglichst niedrige Temperatur aufweist. Sollte sich in einem Bad eine mehr oder weniger konstante Temperatur über das gesamte Volumen einstellen – wie dies in dem dargestellten Beispiel des Galvanikbeckens zu erwarten ist – würde sich für den Solarwärmeübertrager lediglich eine sehr geringe aufzuheizende Temperaturdifferenz ergeben. Demnach kann sich je nach Anwendungsfall eine Parallel- oder Reihenschaltung von konventionellem und solarem Wärmeübertrager ergeben.

PE_E_IS – externer WÜT zur Aufheizung von Inputströmen

Die letzte Variante zur Einbindung eines externen Wärmeübertragers auf Prozessebene dient zur Aufheizung von Inputströmen. Viele Prozesse werden kontinuierlich oder stoßweise mit einem Produkt- oder Prozessmediumstrom gespeist. Sei es Frischwasser für Durchlaufwaschanlagen zum Ausgleich von Verdunstungs- und Verschleppungsverlusten oder Frischluft bei Trocknungsprozessen. Je nach Prozess kann es sinnvoll sein, diese Inputströme solar vorzuwärmen. Abbildung 5-16 zeigt das zugehörige Integrationsschema. Dabei ist vorgesehen, einen Teil des Inputstromes solar vorzuwärmen. Die gestrichelten Linien deuten die Möglichkeit der konventionellen Beheizung des Prozesses an. Als Beispiel dient hierbei das Brühen von Geflügel während der Schlachtung. Das Brühab wird konventionell mittels direkter Dampf-injektion beheizt. Aufgrund der Wasserverschleppung durch die Schlachtkörper sowie Verdunstungsverlusten und der Notwendigkeit einer kontinuierlichen Zugabe von Frischwasser zur Verringerung der Schmutzfracht

besteht die Möglichkeit der solaren Vorwärmung des Inputstroms. Unter Umständen kann dieses Integrationskonzept sinnvoll mit den Möglichkeiten PE_E_PM oder PE_E_BB kombiniert werden.

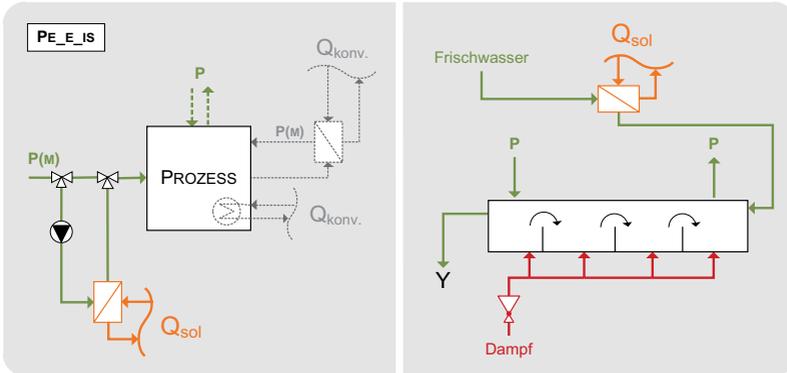


Abbildung 5-16: Integrationskonzept zur Einbindung eines externen Wärmeübertragers zur Aufheizung von Inputströmen (PE_E_IS). Allgemeines Schema (links) und Beispiel anhand eines direkt mit Dampf beheizten Geflügelbrühbads mit kontinuierlichem Frischwassereintrag (rechts).

5.3.4. Prozessebene interner Wärmeübertrager (PE_I)

Die zweite Klasse zur Einbindung von Solarwärme auf Prozessebene ist die Integration eines internen Wärmeübertragers. Dies findet bei der zweiten Kategorie „Beheizen von Bädern, Maschinen oder Tanks“ Anwendung. Dabei wird eine konventionell, mittels internen Wärmeübertrager oder direkter Dampfinjektion beheizte Anlage mit einem solarbeheizten internen Wärmeübertrager erweitert. Abbildung 5-17 beinhaltet ein Beispiel für dieses Integrationskonzept. Dabei wird ein Käsefertiger mit Mantelheizung um interne Dimple Plates erweitert, die solarbeheizt werden.

Bei diesem Integrationskonzept ist zu beachten, dass quasi immer eine Parallelschaltung des konventionellen und solarbetriebenen Wärmeübertragers vorliegt. Häufig sind die Möglichkeiten der Einbringung einer zusätzlichen internen Wärmeübertragungsfläche begrenzt, da der Platz in Behältern oder Maschinen für das Produkt oder anderweitige Einbauten (z.B. Transportkörbe, Rührer, etc.) benötigt wird. Zudem kann das Einbringen eines zusätzlichen internen Wärmeübertragers mit einem erhöhten finanziellen und verfahrenstechnischen Aufwand einhergehen.

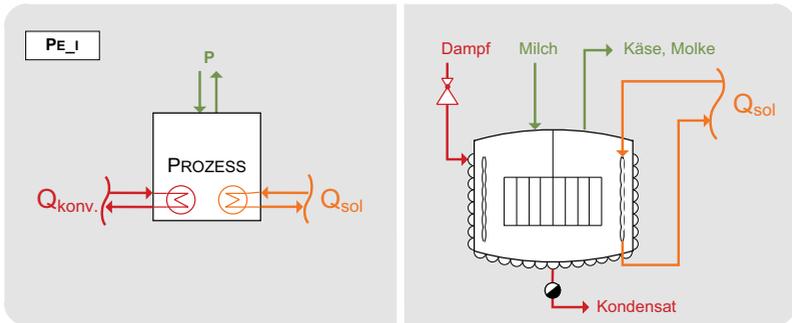


Abbildung 5-17: Integrationskonzept zur Einbindung einer zusätzlichen internen Wärmeübertragungsfläche zum Beheizen von Bädern, Maschinen oder Tanks (PE_I). Allgemeines Schema (links) und Beispiel anhand eines Käsefertigers mit Mantelheizung und zusätzlichen internen Dimple Plates (rechts).

5.3.5. Prozessebene Mehrzonen-Wärmeübertrager (PE_MZ)

Eine Sonderform stellt das Integrationskonzept für Mehrzonen-Wärmeübertrager dar. Zwar ließen sich die beiden aufgeführten Möglichkeiten prinzipiell auch den Konzepten PE_E und PE_I zuordnen – aufgrund der Relevanz in der Ernährungsindustrie werden diese allerdings gesondert aufgeführt. Mehrzonen-Wärmeübertrager sind im Grunde mehrere seriell verschaltete Plattenwärmeübertrager die sich auf einem Gestell befinden. Daraus resultieren mehrere Zonen für Vorwärmung, Beheizung, Kühlung, etc. Die einzelnen Zonen sind teilweise intern und teilweise über externe Anschlüsse verbunden. In der Regel sind die Produktströme allerdings nicht zugänglich. Die Möglichkeit zur Einbindung von Solarwärme wird von der jeweiligen Ausführung des Mehrzonen-Wärmeübertragers bestimmt. Falls die Gestellgröße eines Mehrzonen-Wärmeübertragers eine Erweiterung erlaubt, kann eine zusätzliche, solarbeheizte Zone integriert werden (PE_MZ_HZ). In diesem Falle würde man wie in Abbildung 5-18 dargestellt das Produkt oder Warmwasser im Falle eines Zwischenkreises nach der rekuperativen Zone solar erwärmen. Anschließend würde der aufgewärmte Strom in die konventionelle Heizstufe gelangen, die bei Bedarf auf die Solltemperatur nachheizt.

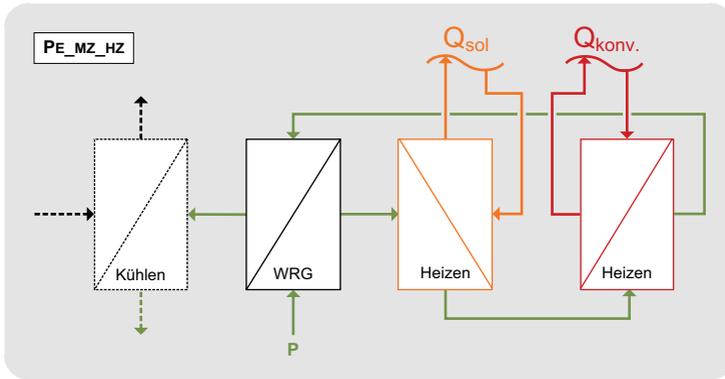


Abbildung 5-18: Integrationskonzept zur Einbindung einer zusätzlichen, solarbetriebenen Heizzone bei Mehrzonenwärmeübertragern (PE_MZ_HZ).

Für den Fall, dass die Integration einer zusätzlichen Heizzone aus Platzgründen nicht möglich ist, kann gemäß Abbildung 5-19 eine Anschlussplatte eingebunden werden (PE_MZ_AP). Diese hat nur sehr geringe Abmaße und sollte sich in das Gestell einpassen lassen. Eine Anschlussplatte ermöglicht es, das Produkt bzw. Warmwasser vor der konventionellen Beheizung abzuziehen und einen externen Solarwärmeübertrager einzubinden.

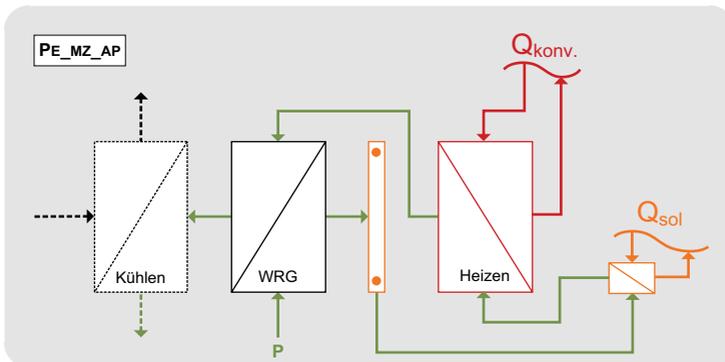


Abbildung 5-19: Integrationskonzept zur Einbindung eines externen Wärmeübertragers mittels Anschlussplatte bei Mehrzonenwärmeübertragern (PE_MZ_AP).

5.3.6. Prozessebene Dampfbereitstellung (PE_D)

Die letzte Klasse zur Einbindung von Solarwärme auf Prozessebene umfasst die solare Bereitstellung von Dampf auf reduziertem Druckniveau. Dabei besteht zum einen die Möglichkeit, Dampf im Unterdruckbereich, also unterhalb von 100 °C , bereitzustellen, wie er beispielsweise für eine Vielzahl von Verdampfungsprozessen in der Lebensmittelindustrie verwendet wird (PE_D_UD). Zum anderen besteht die Möglichkeit, Dampf auf einem Temperaturniveau von $110..135\text{ °C}$ bereitzustellen, der für Prozesse verwendet werden kann, die konventionell mittels direkter Dampfinjektion beheizt werden (PE_D_ND). Damit unterscheidet sich zumindest das Integrationskonzept PE_D_ND zunächst nicht von der Einbindung auf Versorgungsebene (VE_D_PI). Einzige Ausnahme bildet das bereitzustellende Temperaturniveau, was in diesem Fall deutlich unterhalb der Temperaturen typischer Dampfkreisläufe in der Industrie liegt. Damit ergibt sich die Möglichkeit, auch in gemäßigten Klimazonen, wie beispielsweise in Deutschland, Prozesse, die mittels Dampfinjektion beheizt werden, solarthermisch zu unterstützen, da hierfür auch nicht-konzentrierende Kollektoren verwendet werden können.

Abbildung 5-20 zeigt das Integrationskonzept zur Bereitstellung von Dampf im Unterdruckbereich (PE_D_UD). Zunächst wird ein geeigneter Speicher benötigt, der über eine konventionelle Nachheizung verfügt. Das Volumen des Speichers muss so groß gewählt werden, dass er mehr Flüssigkeit aufnehmen kann, als sich im gesamten Kreislauf befindet. Die ist erforderlich, da eine Vakuumpumpe an den Speicher angeschlossen ist, die den Unterdruck gewährleistet.

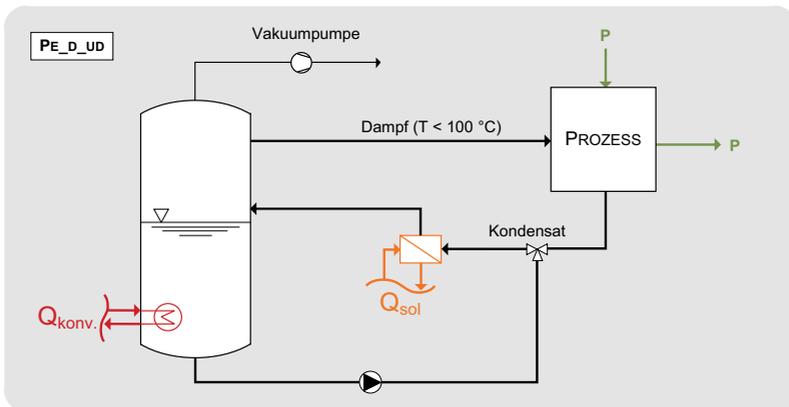


Abbildung 5-20: Integrationskonzept zur solaren Bereitstellung von Dampf mit Unterdruck zur Beheizung von Verdampfungsanlagen (PE_D_UD).

Das aus dem Prozess kommende Kondensat wird über einen Solarwärmeübertrager aufgeheizt und in den evakuierten Speicher geführt. Dort kann bei Bedarf eine Nachheizung erfolgen. Der entstehende Dampf wird dann zum Prozess geführt und der Kreislauf startet erneut. Um auch zum Anfahren des jeweiligen Prozesses Solarwärme nutzen zu können, ist eine Rückführung aus dem Speicher vorgesehen. Damit kann ein Kreislaufbetrieb gefahren werden, bei dem die Solarwärme den kompletten Speicher auf Betriebstemperatur aufheizen kann.

Bei der Bereitstellung von Dampf im Niederdruckbereich von 1,5..3 bar (entspricht etwa 110..135 °C) wird ein geeigneter Dampferzeuger mit Solarwärme betrieben, wie dies bereits bei dem Integrationskonzept VE_D_PI auf Versorgungsebene erläutert wurde. Dem Rohrbündelwärmeübertrager wird, wie in Abbildung 5-21 dargestellt, geeignetes Speisewasser zugeführt, das unter Zufuhr von Solarwärme auf dem geforderten Druckniveau verdampft wird. Für den Fall, dass in dem zu versorgenden Prozess wiederverwendbares Kondensat anfällt, kann dieses dem Wärmeübertrager erneut zugeführt werden.

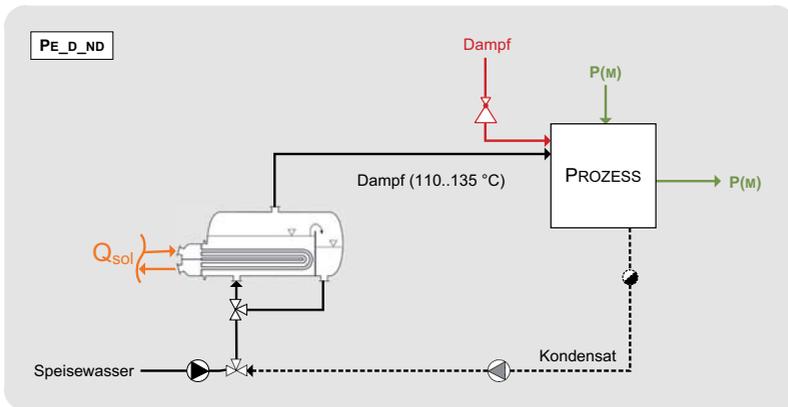


Abbildung 5-21: Integrationskonzept zur solaren Bereitstellung von Dampf auf niedrigem Druckniveau für Prozesse mit direkter Dampfinjektion (PE_D_ND).

5.4. Vorgehen zur Auswahl geeigneter Integrationspunkte

In Abhängigkeit des jeweiligen Unternehmens, das hinsichtlich der Nutzung solarer Prozesswärme untersucht werden soll, können sich unterschiedlich viele Möglichkeiten zur Einbindung von Solarwärme finden lassen. Um die Identifikation eines geeigneten Integrationspunktes zu vereinfachen, wird nachfolgend ein Vorgehen mit mehreren Schritten

vorgestellt. Wie in Abbildung 5-22 dargestellt, sollte zu Beginn eine erste Machbarkeitsabschätzung erfolgen, mit der anhand erster Indikatoren geklärt werden soll, ob bei dem betrachteten Unternehmen überhaupt die Möglichkeit zur Einbindung von Solarwärme gegeben ist. Ist dies der Fall, wird ein Audit vorbereitet und durchgeführt. Mit Hilfe der erfassten und analysierten Daten werden relevante Wärmeverbraucher identifiziert und untersucht. Bereits im Rahmen der Schritte 2 bis 4 kann die entwickelte Klassifizierung eine wichtige Hilfestellung bieten.

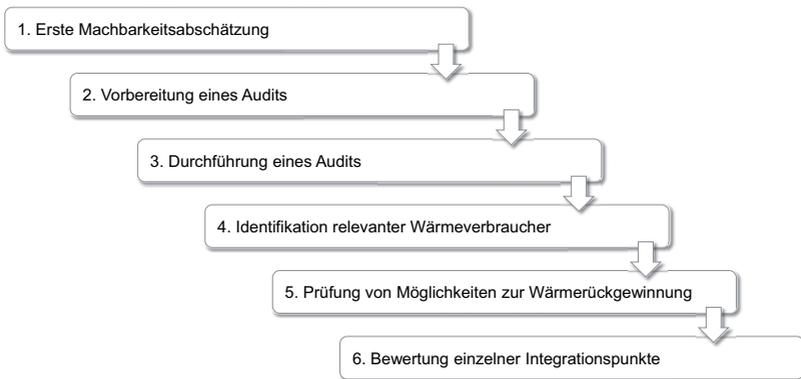


Abbildung 5-22: Wichtige Schritte bei der Identifikation geeigneter Integrationspunkte für solare Prozesswärme.

Nach der Identifikation relevanter Wärmeverbraucher erfolgt eine Prüfung von Wärmerückgewinnungsmöglichkeiten innerhalb des Unternehmens. Schließlich werden die resultierenden Integrationspunkte bewertet. Damit soll ein Ranking der Einbindungspunkte realisiert werden, das letztendlich für die Auswahl einer Möglichkeit genutzt werden kann. Nach Auswahl des Integrationspunktes kann die vorgestellte Klassifizierung dazu genutzt werden, ein geeignetes Integrationskonzept auszuwählen. Basierend auf der jeweiligen Einbindung von Solarwärme kann schließlich die erforderliche solare Systemtechnik (Kollektortyp, Speicher und geeigneter Wärmeübertrager) bestimmt werden. Damit sind alle relevanten Randbedingungen gegeben, um eine erste Ertrags- und Kostenabschätzung durchzuführen, die als Entscheidungsgrundlage für das Unternehmen dienen. Nachfolgend werden die wichtigsten Aspekte der einzelnen Schritte sowie die Anwendung der Klassifizierung erläutert.

5.4.1. Notwendige Schritte zur Identifikation möglicher Integrationspunkte

Zu Beginn sollte eine **erste Machbarkeitsabschätzung** erfolgen, um mit Hilfe einiger Informationen herauszufinden, ob etwaige Randbedingungen (technische, infrastrukturelle und betriebliche) gegen eine Nutzung thermischer Solarenergie sprechen. Die wichtigsten technischen Randbedingungen betreffen das Temperaturniveau des Prozesswärmebedarfs. Hierbei soll abgeschätzt werden, wie viel Wärme auf unterschiedlichen Temperaturniveaus anfällt. Sollte ein nennenswerter Anteil der verbrauchten Wärme unter 120 °C anfallen, lohnt sich grundsätzlich eine genauere Betrachtung des Unternehmens. Die verfügbaren Flächen für die Installation thermischer Solaranlagen sind wichtige infrastrukturelle Randbedingungen. Unter diesem Gesichtspunkt sollten Dachflächen erfasst werden, die unverschattet und angemessen ausgerichtet sind. Ebenso sollen auf dem Betriebsgelände liegende oder in unmittelbarer Nähe nutzbare Freiflächen berücksichtigt werden. Die wichtigsten betrieblichen Randbedingungen betreffen die Produktionszeiten und das Investitionsverhalten des Unternehmens. Neben der Erfassung typischer Produktionszeiten pro Tag und Woche, sollten auch längere Produktionsunterbrechungen wie Urlaubs- oder Instandsetzungszeiten abgefragt werden. In Hinblick auf eine mögliche Umsetzung ist es wichtig, ob das Unternehmen Investitionsentscheidungen auf Basis von Amortisationszeit oder Rendite trifft und was hierbei die angestrebten Zielgrößen sind. Sollten, wie häufig üblich, maximale Amortisationszeiten von 2..5 Jahren gefordert werden, sollte geklärt werden, ob ein Contractingmodell als Alternative für das Unternehmen in Frage kommt.

Für den Fall, dass die erste Machbarkeitsabschätzung zu einem positiven Ergebnis führt, ist der nächste Schritt die **Vorbereitung eines Audits**. Dabei gilt es, die wichtigsten Informationen zu Branche, Produktionsablauf, relevanten Prozessen, typischen Maßnahmen zur Energieeffizienz und Wärmerückgewinnung sowie mögliche Erfahrungen bei der Einbindung regenerativer Energiequellen einzuholen. Hierzu können branchenspezifische Fachliteratur, BVTs (beste verfügbare Techniken zur Vermeidung und Verminderung von Umweltauswirkungen) oder Studien zur Effizienzsteigerung und Abwärmenutzung sowie Berichte über durchgeführte Forschungsvorhaben oder Fallstudien genutzt werden. Zusätzlich sollte während der Vorbereitung des Audits eine Liste mit erforderlichen Informationen für das Unternehmen zusammengestellt werden. So ist gewährleistet, dass zum Vor-Ort-Termin die wichtigsten Informationen vorliegen und diskutiert werden können. Die relevanten Informationen betreffen Allgemeines (Produktionsmengen, Anzahl Mitarbeiter und Umsatz), die Energiebereitstellung (Energieträger, -verbrauch und -kosten sowie technische Daten der Anlagentechnik), wichtige Produktionsprozesse (Temperaturniveau, Beheizungsart, Laufzeiten und Anfall von Abwärme) sowie Gebäude (Statik von Dachflächen, Lageplan, Speicherkapazitäten und Gebäudeheizung). Die entwickelte Klassifizierung dient im Rahmen der Vorbereitung eines Audits vor allem dazu, den Überblick über die industriellen Wärmeversorgungsstrukturen zu vereinfachen.

Die **Durchführung eines Audits** umfasst einen Vor-Ort-Termin und die Auswertung der gesammelten und ggf. recherchierten Daten. Informationen zur grundsätzlichen Konzeption und Durchführung solcher Audits finden sich unter anderen in (Abbi und Jain, 2006; Thumann et al., 2010; Turner und Doty, 2007) sowie in der DIN EN 16247-1 (DIN, 2012). Im Rahmen des Vor-Ort-Termins sollte das zuständige Personal den Produktionsablauf und die wesentlichen Hintergründe zu Funktion und Betriebsweise der aus thermischer Sicht relevanten Prozesse erläutern. Zudem gilt es zu erfassen, welche Daten im Vorhinein bereits durch das Unternehmen übermittelt wurden und welche wichtigen Daten noch ausstehen. Bei einer anschließenden Betriebsbegehung sollten die zuvor besprochenen Prozesse sowie die Wärme-, Kälte- und Druckluftbereitstellung begutachtet werden. Basierend auf den zur Verfügung stehenden Daten und dem Vor-Ort-Termin wird der Produktionsstandort bilanziert. Aus der Bilanzierung sollte hervorgehen, wie sich der Wärmeverbrauch des Unternehmens auf einzelne Produktionsbereiche oder Prozesse verteilt. Da Unternehmen häufig nicht über detaillierte Verbrauchsdaten einzelner Prozesse verfügen, können zusätzliche Wärmemengenmessungen nötig sein, um den Verbrauch auf einzelne Bereiche oder Prozesse herunterzubrechen. Aufgrund des Aufwands empfiehlt sich dies jedoch nur für Bereiche oder Prozesse, bei denen zumindest auf Basis der bereits zur Verfügung stehenden Informationen eine Nutzung thermischer Solarenergie sinnvoll erscheint. Schließlich sollten im Rahmen der Erfassung des Ist-Zustandes auch die nutzbaren Dach- und/oder Freiflächen hinsichtlich ihrer Entfernung zu relevanten Prozessen, dem Kesselhaus, anderen relevanten Wärmeverteilpunkten innerhalb des Unternehmens oder möglicherweise nutzbaren Speichern untersucht werden. Die entwickelte Klassifizierung bietet die Möglichkeit, bereits im Rahmen des Audits gezielt auf die konventionelle Beheizungsart einzelner Wärmeverbraucher zu achten. Damit können ggf. schon im Rahmen des Vor-Ort-Termins potentielle Integrationspunkte identifiziert werden.

Auf Basis der Bilanzierung werden anschließend **relevante Wärmeverbraucher identifiziert**. Inwieweit ein Wärmeverbraucher als relevant eingestuft wird, kann von verschiedenen Randbedingungen abhängen. Wichtigster Indikator ist meist die jeweilige Höhe des Wärmebedarfs sowie der Anteil am gesamten Wärmeverbrauch des Unternehmens. Beides sollte aus der Bilanzierung hervorgehen. Dabei ist jedoch zu beachten, dass aufgrund der in der Regel unzureichend vorhandenen Dachflächen der absolute Wärmebedarf eines Prozesses aus solarthermischer Sicht häufig eine untergeordnete Rolle spielt. Aus Sicht des Unternehmens können einzelne Produktionsbereiche oder Prozesse (z.B. aus Marketingaspekten) als besonders relevant eingestuft werden. Für die als relevant eingestuften Prozesse sollten das jeweilige Temperaturniveau, die entsprechende Laufzeit sowie besondere Eigenschaften in der Betriebsweise (Anfahrts- und Stillstandszeiten, Lastspitzen) erfasst werden. Außerdem sind Angaben zur konventionellen Prozessbeheizung (Technik und Regelung) von Bedeutung. Abschließend sollte auch die generelle Anlagen-

technik des Prozesses begutachtet und in Abhängigkeit des innerhalb der jeweiligen Branche gültigen Stands der Technik eine Abschätzung hinsichtlich der Effizienz getroffen werden. Mit diesen Informationen soll die Wahrscheinlichkeit einer mittelfristigen Erneuerung der Anlagentechnik abgeschätzt werden, da dies unter Umständen signifikante Auswirkungen auf eine eingebunden Solaranlage haben kann.

Grundsätzlich sollte vor der Einbindung einer thermischen Solaranlage oder anderer Wärmequellen zur Bereitstellung von Prozesswärme eine **Prüfung der Möglichkeiten zur Wärmerückgewinnung** durchgeführt werden. Prinzipiell bietet es sich an, die für die jeweilige Branche typischen Wärmerückgewinnungsmöglichkeiten innerhalb der Produktion zu erfassen, wie dies in Kapitel 3.3 für das Brauwesen vorgestellt wurde. Für den Fall das bisher ungenutzte Abwärme anfällt, sollte die jeweilige Menge quantifiziert und Angaben zum zeitlichen Anfall gemacht werden. Neben den Produktionsprozessen sollten auch die wesentlichen Nebeneinrichtungen (Wärme, Kälte und Druckluft) hinsichtlich ungenutzter Abwärme überprüft werden (vgl. Abschnitt 3.3.3 und 5.3.1).

Nachdem die fünf beschriebenen Schritte durchlaufen wurden, sollten einige potentielle Einbindungspunkte für Solarwärme identifiziert worden sein. Um schließlich eine Auswahl des Geeignetesten zu treffen, müssen die möglichen Integrationspunkte bewertet werden.

5.4.2. Kriterien zur Auswahl eines Integrationspunktes

Normalerweise finden sich bereits während eines Audits mehrere Integrationspunkte, die sich prinzipiell für die Einbindung von Solarwärme eignen. Dies wird maßgeblich von der Komplexität des Unternehmens und der Erfahrung des Auditors bestimmt. In diesem Falle müssen die resultierenden Möglichkeiten gegenübergestellt und bewertet werden, um den sinnvollsten Punkt zur Einbindung der Solarwärme auszuwählen. Dazu können die drei Kriterien Temperaturniveau, Lastprofil und Aufwand zur Integration verwendet werden.

Temperatur

Aufgrund der Konstruktion und Funktionsweise eines Kollektors gilt im Allgemeinen, dass mit steigender mittlerer Kollektortemperatur der Wirkungsgrad des Kollektors sinkt und sich damit auch der Ertrag reduziert. Aus diesem Grund ist das Temperaturniveau, das eine thermische Solaranlage bereitstellen muss, in Deutschland und Ländern mit vergleichbaren klimatischen Bedingungen das wohl wichtigste Kriterium bei einer Entscheidung für einen Integrationspunkt. Daher sollten für eine solare Unterstützung vornehmlich Anwendungen mit niedriger Prozesstemperatur oder Prozesse, bei denen eine Vorwärmung möglich ist, bevorzugt werden. Allerdings ist zu beachten, dass von der Prozesstemperatur nicht automatisch auf die Temperatur geschlossen werden kann, die eine Solaranlage bereitstellen muss. Dies kann in Abhängigkeit der Art und Weise, wie die Solarwärme in den Prozess eingebracht wird, variieren. Wird beispielsweise ein bei 60 °C betriebenes Reinigungsbad

für Metallteile mit Hilfe eines zusätzlichen solarbetriebenen externen Wärmeübertragers beheizt, würde die solar bereitzustellende Temperatur wahrscheinlich maximal 10 K über der eigentlichen Prozesstemperatur liegen. Würde stattdessen eine Mantelheizung verwendet werden, kann davon ausgegangen werden, dass die Solaranlage deutlich höhere Temperaturen als 70 °C bereitstellen muss.

Da aus energetischer und damit meist auch aus wirtschaftlicher Sicht die Einbindung von Solarwärme auf einem niedrigen Temperaturniveau besonders sinnvoll ist, nimmt die Prüfung nutzbarer Abwärmequellen einen besonderen Stellenwert ein. Gerade in einem Temperaturbereich bis 60 °C, der mit günstigen solaren Standardkomponenten bereitgestellt werden kann, findet sich häufig Abwärme, beispielsweise von Kompressoren.

Lastprofil

Das zweite wichtige Kriterium bei der Auswahl eines Integrationspunktes ist das Lastprofil. Grundsätzlich sollten Prozesse bevorzugt werden, die möglichst lange und konstante Laufzeiten aufweisen. Da sehr viele Industriebetriebe zumindest sonntags, häufig aber auch schon samstags nicht produzieren, sollte der Pufferspeicher einer Solaranlage derart ausgelegt werden, dass zumindest der solare Energieeintrag eines Tages gespeichert werden kann. In diesem Falle verfügt der Pufferspeicher über ausreichende Kapazitäten, um etwaige Schwankungen der Last innerhalb eines Tages zu kompensieren. Aus diesem Grund ist das tägliche Lastprofil (außer bei Produktion an sieben Tagen pro Woche) für die Auswahl eines geeigneten Integrationspunktes von untergeordnetem Stellenwert. Wichtiger ist die Laufzeit innerhalb einer Woche. Hier sollte der ausgewählte Prozess an möglichst allen Produktionstagen betrieben werden. Prinzipiell besteht auch die Möglichkeit, einen Prozess mit weniger Betriebstagen solar zu unterstützen.

Eine exakte Aussage bezüglich der Mindestlaufzeit eines Prozesses innerhalb einer Woche lässt sich allerdings nur schwer treffen. 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. Dies ist in der bereits erläuterten Speicherdimensionierung begründet. Möglicherweise kann die Nutzung von Solarwärme für mehrere Prozesse vorteilhaft sein, wenn dies zu einer Vergleichmäßigung der Last führt. Im Laufe eines Jahres sollte der solarunterstützte Prozess zumindest in den Sommermonaten keine nennenswerten Unterbrechungen aufweisen. Schon zwei Wochen Produktionsunterbrechung in der einstrahlungsreichen Zeit können unter Umständen zu signifikanten Ertragseinbußen führen und eine Umsetzung in Frage stellen. Produktionsunterbrechungen im Winter haben hingegen keinen nennenswerten Einfluss auf den Jahresertrag einer Solaranlage. Detaillierte Untersuchungen zum Einfluss unterschiedlicher

Lastprofile auf die Dimensionierung und den erzielbaren Ertrag thermischer Solaranlagen sind in (Lauterbach 2014) beschrieben.

Hinsichtlich des Lastprofils bietet vor allem die Einbindung von Solarwärme auf Versorgungsebene deutliche Vorteile gegenüber der Versorgung eines einzelnen Prozesses. Aufgrund der Vielzahl an Wärmeverbrauchern, die an das Netz angeschlossen sind, sollte sich in der Regel ein konstantes Lastprofil innerhalb der Produktionszeit ergeben. Zusätzlich besteht die Möglichkeit, Solarwärme auch außerhalb der Produktionszeiten zu nutzen. So kann beispielsweise an Wochenenden Solarwärme dazu genutzt werden, um Stand-by-Verluste der Wärmebereitstellung zu kompensieren. Um Solarwärme auf einem für die Versorgungsebene geeigneten Temperaturniveau bereitstellen zu können, ist jedoch häufig ein hoher Direktstrahlungsanteil erforderlich.

Integrationsaufwand

Das letzte wichtige Kriterium bei der Auswahl eines geeigneten Integrationspunktes ist der Aufwand zur Einbindung der Solarwärme in das bestehende System. Dieser kann in Abhängigkeit des jeweiligen Prozesses stark variieren. Während beispielsweise bei der Warmwasserbereitstellung für Reinigungszwecke im besten Fall lediglich ein Wärmeübertrager und etwas Peripherie für die Einbindung benötigt werden, kann dies bei der Beheizung von Bädern oder Maschinen unter Umständen deutlich komplizierter ausfallen. Möglicherweise muss hier eine aufwendige Nachrüstung mit speziellen internen Wärmeübertragern erfolgen. In den meisten Fällen ist die Integration bei Prozessen, die mit externen Wärmeübertragern betrieben werden, aufgrund der Zugänglichkeit und Möglichkeit einer seriellen Vorschaltung eines solarbeheizten Wärmeübertragers einfacher zu realisieren als bei Prozessen mit interner Beheizung. Neben der benötigten Hardware zur Einbindung der Solarwärme kann sich allerdings auch die Regelung der zusätzlichen Wärmequelle als unterschiedlich komplex erweisen.

Gegenüberstellung der Kriterien

Grundsätzlich ist es notwendig, alle drei erläuterten Kriterien für die Entscheidung hinsichtlich eines geeigneten Integrationspunktes zusammenhängend zu betrachten. Vergleicht man beispielsweise einen Prozess mit hoher Solltemperatur und konstanter Laufzeit mit einem Prozess mit niedriger Solltemperatur und kürzerer Laufzeit, können die Nachteile des ungünstigeren Lastprofils möglicherweise durch die Vorteile der niedrigeren Prozesstemperatur kompensiert werden. Häufig können exakte Aussagen diesbezüglich nur mit Hilfe von Simulationen getroffen werden. Wenn mehrere Optionen vorhanden sind, die sich aufgrund ihrer Temperatur und des Lastprofils in dem zu erwartenden Ertrag ähneln, wird der Aufwand zur Einbindung der Solarwärme meist derjenige Faktor sein, der den Ausschlag für eine Entscheidung gibt. Andere Kriterien, die unter Umständen eine Machbarkeit der Einbindung von Solarwärme beeinflussen können, sind der Anteil des

Wärmebedarfs eines Prozesses am gesamten Wärmeverbrauch des Unternehmens und die Entfernung des möglichen Aufstellortes von Solaranlage und Pufferspeicher zu dem Ort, wo die Wärme benötigt wird.

5.4.3. Anwendung der Klassifizierung

Nachdem anhand der Kriterien ein Integrationspunkt ausgewählt wurde, kann die entwickelte Klassifizierung dazu genutzt werden, ein geeignetes Integrationskonzept für den Integrationspunkt auszuwählen.

Bei der Einbindung solarer Prozesswärme auf Versorgungsebene ist die Auswahl eines geeigneten Integrationskonzeptes verhältnismäßig einfach. Zunächst ergeben sich durch das verwendete Wärmeträgermedium drei grundsätzliche Integrationspunkte, die sich in Abhängigkeit der jeweiligen Randbedingungen in der Regel reduzieren lassen. Die Wahl zwischen der Einbindung in den Vor- oder Rücklauf wird meist durch die am Standort verfügbare Einstrahlung bestimmt. Bei der Einbindung bei Dampfnetzen können zudem kesselhausinterne Wärmerückgewinnungsmaßnahmen zu einem Ausschluss der Einbindung in den Rücklauf führen. Auf Prozessebene gibt die vorgestellte Klassifizierung in Abhängigkeit der Kategorie des Wärmeverbrauchers und der konventionellen Prozessbeheizung unter Umständen mehrere Integrationsmöglichkeiten vor. Auch hierbei führen die tatsächlichen Randbedingungen in der Regel zu einer Reduzierung der Möglichkeiten. Unter Umständen können aber auch zwei Integrationskonzepte kombiniert werden.

Als Beispiel zur Verdeutlichung dieser Tatsache dient ein norddeutscher Schlachtbetrieb für Geflügel. Im Rahmen einer Machbarkeitsabschätzung wurde das Brühen der Schlachtkörper als potentieller Integrationspunkt für Solarwärme identifiziert, da dieser Prozess kontinuierlich betrieben wird und mit knapp 60 °C ein moderates Temperaturniveau aufweist. Der Prozess wird konventionell mittels Dampf-injektion beheizt (vgl. hierzu Abbildung 4-12 in Abschnitt 4.2.3). Die Klassifizierung gibt für die Kategorie „Beheizen von Bädern, Maschinen oder Tanks“ in Verbindung mit der Beheizung durch Dampf-injektion vier mögliche Integrationskonzepte vor: externe Badbeheizung (PE_E_BB), Aufheizung eines Inputstromes (PE_E_IS), Einbindung eines zusätzlichen internen Wärmeübertragers (PE_I) und Bereitstellung von Dampf im Niederdruckbereich (PE_D_ND).

Eine grundsätzliche Empfehlung zum Umgang mit mehreren Integrationskonzepten liegt darin, die Machbarkeit beginnend bei dem Konzept mit der niedrigsten solar bereitzustellenden Temperatur zu prüfen. In Falle des Brühprozesses wäre dies PE_E_IS. Für den Fall, dass dem Brühbad größere Frischwassermengen zugeführt werden, bietet dieses Integrationskonzept die Möglichkeit, Solarwärme auf dem niedrigsten Temperaturniveau einzubinden. Sollte das Frischwasser aus verfahrenstechnischen Gründen kalt in das Bad eingespeist werden müssen, kann dieses Integrationskonzept ausgeschlossen werden. In

Anbetracht des Temperaturniveaus wären als nächstes die beiden Integrationskonzepte PE_E_BB und PE_I zu prüfen. Die Machbarkeit dieser beiden Möglichkeiten wird maßgeblich dadurch bestimmt, ob das Prozessmedium zur Aufheizung mittels externem Wärmeübertrager abgezogen werden kann, oder ob das Bad ausreichend Platz für einen zusätzlichen internen Wärmeübertrager hat. Die vierte Möglichkeit, die solare Bereitstellung von Dampf mit reduziertem Druck (PE_D_ND), ist hinsichtlich der Einbindung die einfachste Variante, da der Eingriff in den bestehenden Prozess am geringsten ist. Allerdings ist hierbei das Temperaturniveau im Vergleich zu den anderen Integrationsmöglichkeiten am höchsten.

Falls beispielsweise der Frischwasserstrom diskontinuierlich zugeführt wird, besteht die Möglichkeit das Integrationskonzept PE_E_IS mit PE_E_BB zu kombinieren. Somit kann zu der Zeit ohne Frischwassereinspeisung das Bad mittels externem Wärmeübertrager beheizt werden. Sollte nach Berücksichtigung der jeweiligen Randbedingungen noch immer mehr als ein Integrationskonzept verbleiben, muss die Auswahl unter Berücksichtigung des Aufwands zur Einbindung der Solarwärme und dem zu erwartenden Solarertrag erfolgen. Falls damit keine eindeutigen Aussagen getroffen werden können, müssen die tatsächlichen Kosten der jeweiligen Integrationspunkte und der benötigten Solarsysteme den zu erwartenden Erträgen gegenübergestellt werden.

Eine wesentliche Vorgabe bei der Entwicklung der Klassifizierung zur Einbindung von Solarwärme war die allgemeingültige Anwendbarkeit auf einen Großteil der industriellen Wärmeverbraucher. Dies hat zur Folge, dass die Integrationskonzepte lediglich die Schnittstelle aufzeigen, an der Solarwärme in die konventionelle Anlagentechnik eingebracht werden sollte. Detailliertere Angaben, wie beispielsweise zu den notwendigen Wärmeübertragertypen, können nicht gemacht werden, da diese maßgeblich von dem zu beheizenden Produkt oder Prozessmedium abhängen. Demnach muss nach Auswahl eines Integrationskonzeptes der erforderliche Wärmeübertrager in Abhängigkeit der Eigenschaften des aufzuheizenden Mediums (Viskosität, Betriebstemperatur, mögliche Phasenänderung, etc.) ausgewählt werden.

Darüber hinaus beinhalten die jeweiligen Integrationskonzepte keine Aussagen hinsichtlich der Konfiguration einer einzubindenden Solaranlage. Die Auswahl eines geeigneten Kollektortyps und Einbindung eines Speichers sowie die Dimensionierung dieser Komponenten wird maßgeblich durch das Temperaturniveau des solar zu unterstützenden Prozesses, dem jeweiligen Lastprofil sowie dem Standort bestimmt. Daher können hierfür keine allgemeingültigen Angaben gemacht werden.

5.4.4. Weiteres Vorgehen

Nachdem ein Integrationspunkt und das zugehörige Integrationskonzept ausgewählt wurden, muss ein hierfür geeigneter Kollektortyp ausgewählt und die benötigte Kollektorfläche sowie das Speichervolumen dimensioniert werden. Für die Einbindung auf Versorgungsebene können in Abhängigkeit der bereitzustellenden Temperatur unterschiedliche Kollektortypen verwendet werden. Dabei sind aufgrund des hohen Temperaturniveaus konzentrierende Kollektoren von besonderer Bedeutung. Bei Temperaturen oberhalb 150 °C sind diese Kollektoren die einzig sinnvolle Möglichkeit zur Bereitstellung solarer Prozesswärme. Die geläufigsten Typen sind kleine Parabolrinnen und Fresnelkollektoren (Weiss und Rommel, 2008). Die Einbindung auf Versorgungsebene sollte daher, zumindest auf einem Temperaturniveau oberhalb von 120..150 °C, ausschließlich in Regionen mit hohem Direktstrahlungsanteil erfolgen. Auf Prozessebene hingegen können auch herkömmliche stationäre Kollektortypen wie Flach- oder Vakuumröhrenkollektoren verwendet werden, da häufig auch Temperaturen deutlich unterhalb von 100 °C bereitgestellt werden müssen.

Die Auswahl eines geeigneten Kollektortyps kann zunächst anhand des bereitzustellenden Temperaturniveaus erfolgen. In Abhängigkeit der typischen Kollektorkennwerte kann beispielsweise der Ertrag eines Flachkollektors für eine bestimmte Anwendung mit dem zu erwartenden Ertrag eines Vakuumröhrenkollektors verglichen werden. Sollten die resultierenden Größen in einem ähnlichen Bereich liegen, müssen die spezifischen Investitionskosten berücksichtigt werden, sodass eine Auswahl der geeignetsten Technologie anhand der zu erwartenden solaren Wärmepreise getroffen werden kann. Nach Auswahl eines geeigneten Kollektors müssen die Dimensionierung von Kollektorfläche und Speichervolumen sowie eine Abschätzung des erzielbaren Solarertrages erfolgen. Damit kann eine grobe Wirtschaftlichkeitsabschätzung erfolgen, die die Grundlage für die Entscheidungsfindung eines Unternehmens ist. Detaillierte Untersuchungen zur Vorauslegung von Kollektorfläche und Speichervolumen sowie der Ertragsabschätzung gehen aus einer parallel angefertigten Dissertation (Lauterbach 2014) hervor und können für das weitere Vorgehen genutzt werden.

6. Zusammenfassung und Ausblick

Die Bereitstellung solarer Prozesswärme ist ein neues Anwendungsgebiet für thermische Solarenergie und derzeit noch relativ wenig verbreitet. Aufgrund des sehr hohen industriellen Wärmebedarfs, der über das Jahr zumeist konstant anfällt, wird die solare Prozesswärme als eines der wichtigsten Anwendungsfelder thermischer Solarenergie angesehen. Daher wurde im Rahmen von Untersuchungen für diese Dissertation zunächst der industrielle Wärmebedarf in Deutschland hinsichtlich der Verteilung auf einzelnen Branchen und unterschiedliche Temperaturniveaus analysiert.

Die Untersuchung zeigte, dass insgesamt drei Viertel der verbrauchten Endenergie in der Industrie zur Bereitstellung von Prozesswärme, Gebäudeheizung und Warmwassererzeugung aufgewendet werden. Damit liegt der Wärmebedarf der Industrie sogar knapp über dem gesamtdeutschen Stromverbrauch. Gut 20 % des industriellen Wärmebedarfs werden unterhalb von 100 °C für Prozesswärme, Warmwasserbereitstellung und Raumheizung benötigt. Weitere 8 % werden zwischen 100..200 °C verbraucht. Unterhalb von 300 °C gingen die Chemische Industrie und das Ernährungsgewerbe als größte Verbraucher hervor. Basierend auf der ermittelten Verteilung des industriellen Wärmeverbrauchs erfolgte die Potentialberechnung für Deutschland. Demnach liegt das theoretische Potential zur Nutzung solarer Prozesswärme in Deutschland bei 134 TWh pro Jahr. Unter Berücksichtigung einer Reduktion des industriellen Wärmeverbrauchs durch Maßnahmen zur Wärmerückgewinnung und Steigerung der Energieeffizienz sowie den typischerweise unzureichend vorhandenen Flächen für thermische Solaranlagen, beläuft sich das technische Potential solarer Prozesswärme in Deutschland auf etwa 16 TWh pro Jahr. Die hierfür benötigte Fläche von rund 35 Mio. m² übersteigt deutlich die Ende 2012 in Deutschland insgesamt installierte Kollektorfläche von 16,5 Mio. m². Aus der abschließenden Betrachtung geeigneter Branchen gingen erneut die Chemische- und Ernährungsindustrie mit dem höchsten Potential hervor. Aufgrund der deutlich weniger komplexen Prozesse erscheint die Ernährungsindustrie allerdings als geeigneter für die Nutzung solarer Prozesswärme.

Trotz des großen Potentials und der guten Randbedingungen zur Nutzung solarer Prozesswärme in der Industrie erfolgt die Markteinführung dieser Technologie nur sehr langsam. Ein wesentlicher Grund hierfür ist der bisher noch sehr hohe Aufwand zur Machbarkeitsabschätzung und Planung solarer Prozesswärmeanlagen. Vor allem im Rahmen der Machbarkeitsabschätzung werden Hilfsmittel benötigt, die es erlauben, möglichst schnell einen

geeigneten Punkt zur Einbindung von Solarwärme zu identifizieren, den Aufwand zur Integration abzuschätzen und Angaben zu der erforderlichen solaren Systemtechnik machen zu können. Um die hierfür erforderlichen Grundlagen zu erarbeiten, wurde im Rahmen dieser Dissertation die Einbindung solarer Wärme in bestehende industrielle Prozesse untersucht.

Um ein allgemeingültiges Vorgehen zur Identifikation geeigneter Integrationspunkte und der hydraulischen Einbindung zu erarbeiten, wurde zunächst eine einzelne Branche detailliert analysiert. Aufgrund der hohen Relevanz der Ernährungsindustrie, des hohen Anteils thermischer Energie am gesamten Energiebedarf bei der Bierproduktion und vorangegangenen Untersuchungen, die der Nutzung solarer Prozesswärme in Brauereien ein hohes Potential zusprechen, wurde das Brauwesen für die Untersuchung ausgewählt. Diese erfolgte mit Hilfe gezielter Fallstudien, entsprechender Literatur und der Einbindung von Anlagenbauern. Zunächst wurden die Produktionsabläufe in Brauereien, der Wärmeverbrauch und die gängigsten Möglichkeiten zur Wärmerückgewinnung untersucht. Auf Basis dieser Informationen wurden für alle Prozesse mit thermischem Energiebedarf Konzepte zur Integration von Solarwärme erarbeitet. Dabei wurde deutlich, dass in Abhängigkeit der verwendeten Verfahren und Anlagentechnik unterschiedliche Integrationskonzepte für Solarwärme umgesetzt werden können. Zudem zeigte sich, dass auch Wärmerückgewinnungsmaßnahmen Auswirkungen auf die Einbindung von Solarwärme haben.

Um die für das Brauwesen erarbeiteten Integrationskonzepte hinsichtlich der Übertragbarkeit auf andere Branchen zu untersuchen, wurden im weiteren Verlauf der Arbeit zusätzliche Branchen der Ernährungsindustrie analysiert. Dabei wurde deutlich, dass neben externen und internen Wärmeübertragern auch sehr häufig direkte Dampfinjektion zur Beheizung industrieller Prozesse genutzt und auch Trockner sowie Verdampfer immer wieder eingesetzt werden. Die Untersuchung der zusätzlichen Branchen und der dort verwendeten Anlagentechnik zeigte, dass die Einbindung von Solarwärme in einen bestehenden Prozess maßgeblich von der konventionellen Beheizung beeinflusst wird. Aus diesem Grund erfolgte aufbauend auf diesen Erkenntnissen eine branchenunabhängige Betrachtung der konventionellen, in der Industrie verwendeten, Beheizungstechnologien.

Basierend auf den Erkenntnissen der innerhalb der Ernährungsindustrie verwendeten Anlagentechnik sowie den branchenübergreifenden Technologien zur Beheizung industrieller Prozesse erfolgte abschließend die Entwicklung einer Klassifizierung zur Integration thermischer Solarenergie in bestehende industrielle Prozesse und Wärmeversorgungsstrukturen. Die Klassifizierung unterscheidet zunächst zwischen der Einbindung auf Versorgungs- und Prozessebene. Auf Versorgungsebene erfolgt eine weitere Unterteilung zwischen dem verwendeten Wärmeträgermedium (dampfförmig oder flüssig). Für jede dieser beiden Gruppen ergeben sich drei unterschiedliche Einbindungspunkte, für die ein geeignetes Integrationskonzept für Solarwärme vorgestellt wurde.

Auf Prozessebene wird zunächst die Kategorie des Wärmeverbrauchers unterschieden, um die vielfältigen Prozesse zu untergliedern. Dabei stehen die folgenden Kategorien zur Auswahl: „Aufheizen eines Fluidstroms“, „Beheizen von Bädern, Maschinen oder Tanks“ und „Thermisches Trennen“. Anschließend erfolgt eine weitere Unterteilung anhand der konventionellen Beheizung des Prozesses, da dies im Verlauf der Untersuchung als wesentliches Kriterium zur Einbindung von Solarwärme identifiziert wurde. Prozesse der Kategorie „Aufheizen eines Fluidstroms“ werden typischerweise mittels externen Wärmeübertragern oder Dampfinjektion beheizt. Die Kategorie „Beheizen von Bädern, Maschinen oder Tanks“ beinhaltet zusätzlich noch die Nutzung interner Wärmeübertrager. Bei der Kategorie „Thermisches Trennen“ wird zwischen Konvektions- und Kontaktrocknern sowie Verdampfern unterschieden. Damit berücksichtigt diese Kategorie den Großteil aller thermischen Trocknungsverfahren sowie Verdampfung, Destillation und Rektifikation.

Für die einzelnen Kategorien und Beheizungsarten gibt die Klassifizierung ein oder mehrere Integrationskonzepte für Solarwärme vor, die in Frage kommen. Prinzipiell werden dabei vier Klassen unterschieden: Die Einbindung eines externen solarbeheizten Wärmeübertragers, die Einbindung eines zusätzlichen internen Wärmeübertragers, die Erweiterung von Mehrzonen-Wärmeübertragern und die solare Bereitstellung von Dampf auf reduziertem Druckniveau. Bei der Einbindung eines externen Wärmeübertragers gibt es vier mögliche Varianten, bei Mehrzonen-Wärmeübertragern zwei und bei der solaren Bereitstellung von Dampf auf Prozessebene gibt es ebenfalls zwei Varianten.

Die Klassifizierung zur Einbindung von Solarwärme zeigt grundsätzlich nur die Schnittstelle auf, an der die Solarwärme in die konventionelle Anlagentechnik eingebracht werden sollte. Die jeweiligen Integrationskonzepte beinhalten keine Aussagen hinsichtlich der Konfiguration einer einzubindenden Solaranlage, da dies sowohl durch das Temperaturniveau des solar zu unterstützenden Prozesses als auch durch das jeweilige Lastprofil und den Standort bestimmt wird.

Da es in Abhängigkeit des jeweiligen Unternehmens, das hinsichtlich der Nutzung solarer Prozesswärme untersucht werden soll, unterschiedlich viele Möglichkeiten zur Einbindung von Solarwärme geben kann, wurde abschließend ein Vorgehen vorgestellt, das die Auswahl geeigneter Integrationspunkte vereinfachen soll. Hierzu erfolgt zunächst die Vorbereitung und Durchführung eines Audits sowie die anschließende Analyse relevanter Wärmeverbraucher. Die dadurch identifizierten Integrationspunkte für Solarwärme werden daraufhin anhand von drei Kriterien bewertet (Temperatur, Lastprofil und Aufwand zur Integration), um einen geeigneten Integrationspunkt auszuwählen. Bei diesen Schritten kann die entwickelte Klassifizierung bereits eine Hilfestellung bieten, da sie den Überblick industrieller Wärmerversorgungsstrukturen vereinfacht und dem Nutzer die Relevanz der konventionellen Beheizung industrieller Prozess verdeutlicht. Damit ermöglicht die

Klassifizierung unter Umständen bereits im Rahmen des Vor-Ort-Termins die Identifikation potentieller Integrationspunkte. Nach Auswahl des Integrationspunktes kann die vorgestellte Klassifizierung dazu genutzt werden, ein geeignetes Integrationskonzept für diesen Punkt auszuwählen. Basierend auf der jeweiligen Einbindung von Solarwärme kann schließlich die erforderliche solare Systemtechnik (Kollektortyp, Speicher und geeigneter Wärmeübertrager) bestimmt werden. Damit sind alle relevanten Randbedingungen gegeben, um eine erste Ertrags- und Kostenabschätzung durchzuführen, die eine wichtige Entscheidungsgrundlage für das Unternehmen sind.

Die im Rahmen dieser Dissertation entwickelte Klassifizierung zur Integration thermischer Solarenergie kann ein wichtiges Hilfsmittel für Solarfachplaner sein, um einen Überblick über die industriellen Wärmeverbraucher zu erhalten, deren thermische Energieversorgung zu verstehen und damit die Suche eines geeigneten Integrationspunktes für Solarwärme zu vereinfachen. Auch für Akteure aus der Industrie, wie beispielsweise Energiemanager oder -berater, kann die Klassifizierung hilfreich sein, da sie wichtige Randbedingungen zur Nutzung von Solarwärme wie beispielsweise die Einbindung im Rücklauf auf einem möglichst niedrigen Temperaturniveau beinhaltet.

Während die Klassifizierung für die jeweiligen Integrationskonzepte Schlüsse zum Aufwand der hydraulischen Einbindung mit den dafür benötigten Komponenten erlaubt, werden keine Aussagen hinsichtlich der regelungstechnischen Einbindung getroffen. Dies betrifft hauptsächlich die Einbindung auf Prozessebene, da die vorhandene Anlagentechnik auf Versorgungsebene häufig keiner zusätzlichen Regelung bedarf. In Abhängigkeit der zusätzlich installierten Solarleistung wird bei Betrieb der Solaranlage automatisch die konventionelle Kesselleistung reduziert, wie dies auch bei Reduktion der anliegenden Last erfolgt. Auf Prozessebene kann die Regelung jedoch eine weitaus wichtigere Rolle spielen, da durch die Einbindung von Solarwärme zwei Wärmequellen geregelt werden müssen, die parallel oder seriell verschaltet sein können. Hierzu sind weitere Untersuchungen nötig, um das Zusammenspiel der solaren und konventionellen Anlagentechnik beurteilen zu können.

Auch wenn im Rahmen der Entwicklung der vorgestellten Klassifizierung zur Einbindung von Solarwärme branchenübergreifende Beheizungstechnologien berücksichtigt wurden, basiert ein wesentlicher Teil der Entwicklung auf Fallstudien und Untersuchungen der Ernährungsindustrie. Daher sollte die Klassifizierung zukünftig vermehrt in Fallstudien anderer Branchen angewendet werden, um Anwendbarkeit und etwaige Einschränkungen zu bewerten. Hierbei ist es von besonderer Bedeutung zu erfassen, ob wirklich alle industriellen Prozesse den drei Kategorien Aufheizen, Beheizen und thermisches Trennen zugeordnet werden können und ob unter Umständen zusätzliche Integrationskonzepte berücksichtigt werden müssen.

7. Verzeichnisse

7.1. Literaturverzeichnis

- Abbi, Y.P., Jain, S.,** 2006. *Handbook on energy audit and environment management*, Energy and Resources Institute, New Delhi. 9788179930922.
- Aidonis, A., Drosou, V., Mueller, T., Staudacher, L., Fernandez-Llebrez, F., Oikonomou, A., Spencer, S.,** 2005. *PROCESOL II – Solarthermische Anlagen in Industriebetrieben - Planungs- und Wartungsrichtlinien*. AEE INTEC, ZAE Bayern.
- Alamprese, C., Casiraghi, E., Rossi, M.,** 2008. *Structural and cooking properties of fresh egg pasta as a function of pasteurization treatment intensity*. Journal of Food Engineering 89, 1–7.
- Albers, S.,** 2007. *Methodik der empirischen Forschung*. 2. Auflage, Gabler, Wiesbaden. 9783834904690.
- Arbeitskreis „Maschinen und Anlagen in der Süßwarenindustrie“ (AKMAS),** 2009. *Leitfaden Energieeffizienz in der Süßwarenindustrie*. LEBENSMITTELTECHNIK.
- Atlas Copco Kompressoren und Drucklufttechnik GmbH,** 2009. *Handbuch der Drucklufttechnik*.
- Australian Government (DRET),** 2002. *Pasteurisation Options for Breweries*. Big Energy Project Innovation Workshop Report 2002. Department of Resources Energy and Tourism, Canberra, Australien.
- Back, W.,** 2005. *Ausgewählte Kapitel der Brauereitechnologie*, Hans Carl, Nürnberg. 341800802x.
- Bake, K.,** 2003. *Handbuch der Milch- und Molkereitechnik*, Mann, Gelsenkirchen. 3786201463.
- Bamforth, C.W.,** 2003. *Beer*. Tap into the art and science of brewing. 2, Oxford University Press, New York. 0-19-515479-7.
- Bamforth, C.W.,** 2006. *Brewing*. New technologies, Woodhead Pub., Cambridge. 978-1-84569-003-8.
- Benz, N., Gut, M., Ruß, W.,** 1999. *Solare Prozesswärmeerzeugung in der Lebensmittelindustrie*. Studie zur Vorplanung von vier Anlagen zur solarthermischen Prozesswärmeerzeugung in Betrieben der Lebensmittelindustrie am Beispiel von zwei Brauereien, einer Mälzerei und einem milchverarbeitendem Betrieb, München.
- Blel, W., Legentilhomme, P., Bénézech, T., Fayolle, F.,** 2013. *Cleanability study of a Scraped Surface Heat Exchanger*. Food and Bioproducts Processing 91, 95–102.
- Blümelhuber, G.,** 2008. *Environment and Energy in German Breweries*. Doemens Brewing and Malting Academy.

- Bolmstedt, U.**, 2000. *Heat Transfer in the Food Industry*. Heat transfer and flow behaviour modelling in heat exchangers. New Food 3.
- Briggs, D.E., Boulton, C.A., Brookes, P.A., Stevens, R.**, 2004. *Brewing*. Science and practice, Woodhead Publishing Limited, Cambridge. 0-8493-2547-1.
- Bundesministerium für Wirtschaft, Familie und Jugend (BMWFJ)**, 2009. *Technische Grundlage für die Beurteilung von Einwirkungen, die beim Betrieb von Koch-, Selch-, Brat- und Backanlagen auftreten können und Abhilfemaßnahmen*.
- Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi)**, 2010. *Energiedaten - Nationale und Internationale Entwicklung*, Berlin
- Bundesverband Kraft-Wärme-Kopplung e.V. (BKWK)**, 2010. *Leitfaden zur Kostensenkung mit Kraft-Wärme-Kopplung in Brauereien*, Berlin.
- Christen, D.S.**, 2005. *Praxiswissen der chemischen Verfahrenstechnik*. Handbuch für Chemiker und Verfahreningenieure, Springer, Berlin. 9781280615597.
- Corosys Prozeßsysteme und Sensoren GmbH**, 2011. *Wasserentgasung für Brauereien*, Hofheim.
- Cross, H.R., Overby, A.J., Neimann-Sørensen, A., Tribe, D.E.**, 1988. *World animal science, B3; Meat Science, milk science and technology*, Elsevier, Amsterdam, Oxford. 0444425780.
- DIN Deutsches Institut für Normung e.V.**, 2006. *DIN EN ISO 15547-1: Erdöl-, petrochemische und Erdgasindustrie - Plattenwärmetauscher - Teil 1: Plattenwärmetauscher*, Beuth Verlag GmbH, Berlin.
- DIN Deutsches Institut für Normung e.V.**, 2007. *DIN 28183: Rohrbündel-Wärmetauscher - Benennungen*, Beuth Verlag GmbH, Berlin.
- DIN Deutsches Institut für Normung e.V.**, 2012. *DIN EN 16247-1: Energieaudits - Teil 1: Allgemeine Anforderungen*, Beuth Verlag GmbH, Berlin.
- Dittmar, M.**, 2012. *Integrationspunkte solarthermischer Anlagen in Brauereien*. Diplomarbeit, Universität Kassel, Institut für Thermische Energietechnik, Kassel.
- Eikmeier, B., Gabriel, J., Schulz, W., Krewitt, W., Nast, M.**, 2005. *Analyse des nationalen Potenzials für den Einsatz hocheffizienter KWK einschließlich hocheffizienter Kleinst-KWK unter Berücksichtigung der sich aus der EU-KWK-RL ergebenden Aspekte*. Endbericht zum Forschungsvorhaben Projekt I A 2 – 37/05 des Bundesministeriums für Wirtschaft und Arbeit. bremer energie institut; DLR, Institut für Technische Thermodynamik, Abteilung Systemanalyse und Technikbewertung, Bremen.
- Energieagentur NRW (EA NRW)**, 2010. *Drucklufttechnik - Potenziale zur Energieeinsparung*, Berlin.
- Energieverwertungsagentur (EVA)**, 2001. *Energybenchmarking at the Company Level*, Österreich.
- Ernst, H.**, 2009. *Dampferzeugungssysteme 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, 519–523.

- European IPPC Bureau (EIPPCB)**, 2005. *Reference Document on Best Available Techniques (BREF) in the Slaughterhouses and Animal By-products Industries*. European Commission, Joint Research Centre, Institute for Prospective Technological Studies, Sevilla, Spanien.
- 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, Spanien.
- Fries, R., Bergmann, V., Fehlhaber, K., Fries-Bergmann-Fehlhaber**, 2001. *Praxis der Geflügelfleischuntersuchung*. Schlüter, Hannover. 3877065910.
- GEA Wiegand GmbH**, 2009. *Eindampftechnik*, Ettlingen.
- Gewerkschaft Nahrung-Genuss-Gaststätten (NGG)**, 2013. *Branchenbericht 2012 der obst-, gemüse- und kartoffelverarbeitenden Industrie*. Hamburg.
- Goedecke, R.**, 2006. *Fluidverfahrenstechnik*, Wiley-VCH, Weinheim. 9783527311989.
- Grabowski, C.M.**, 2008. *Varianten in der Brühetechnik bei der Gewinnung von Putenfleisch*. Mikrobiologische Gegenüberstellung und molekularbiologische Verlaufsuntersuchungen (PFGE), Mbv, Berlin. 978-3-86664-444-1.
- Grassmann, P., Widmer, F., Sinn, H., Hirschberg, H.G.**, 1997. *Einführung in die thermische Verfahrenstechnik*. 3. Auflage, de Gruyter, Berlin, New York. 3110107872.
- Hackensellner, T.**, 1998. *Thermodynamik der Würzekochung*. Huppmann Post 18, 13–17.
- Hackensellner, T., Bühler, T.**, 2008. *Effizienter Energieeinsatz im Sudhaus*, Kitzingen.
- Hasenbeck, J.**, 2012. *Persönliche Kommunikation zu Tunnelpasteuren*. NIKO Nahrungsmittel-Maschinen GmbH & Co. KG.
- Haug, M.**, 2012. *Herstellung von Erfrischungsgetränken*. Rohstoffe, Halbfabrikate und Technologie. Getränkeindustrie 4, 8–10.
- Heiss, R.**, 2004. *Lebensmitteltechnologie*. Biotechnologische, chemische, mechanische und thermische Verfahren der Lebensmittelverarbeitung. 6. Auflage, Springer, Berlin, New York. 3540004769.
- Heldman, D.R., Moraru, C.I.**, 2011. *Encyclopedia of agricultural, food, and biological engineering*. 2. Auflage, CRC Press, Boca Raton. 9781439811115.
- Hemming, W., Wagner, W.**, 2011. *Verfahrenstechnik*. 11. Auflage, Vogel, Würzburg. 9783834332431.
- Hertel, M., Dauth, H., Scheuren, H., Sommer, K.**, 2008. *Wort boiling: proper evaluation of boil-off processes – Part 3*. Brauwelt International I, 22–27.
- Heß, S., Oliva, A., Hermann, M., Stryi-Hipp, G., Hanby, V.**, 2011. *Solar process heat - System design for selected low-temperature applications in the industry*. Proceedings ISES Solar World Congress Kassel, 1060–1071.
- Heyse, K.-U.**, 2000. *Praxishandbuch der Brauerei*, Behr, Hamburg. 3-86022-998-2.
- Hirschberg, H.G.**, 1999. *Handbuch Verfahrenstechnik und Anlagenbau*. Chemie, Technik und Wirtschaftlichkeit, Springer, Berlin. 3540606238.
- Hofer, R.**, 1994. *Analyse der Potentiale industrieller Kraft-Wärme-Kopplung*. 1. Auflage, Resch, Media-Mail-Verl, Gräfelfing. 3-87806-149-8.

- Hoffmann, H., Mauch, W., Untze, W.**, 2002. *Zucker und Zuckerwaren*. 2. Auflage, Behr, Hamburg. 3860229370.
- Jensen, W.K., Devine, C., Dikeman, M.**, 2004. *Encyclopedia of meat sciences*, Academic, Oxford. 978-0-12-464970-5.
- Jordan, U., Vajen, K., Schmitt, B., Bruchhäuser, P.**, 2006. *Potentialabschätzungen für die Integration solarer Prozesswärme am Beispiel von vier Industriebetrieben im Raum Kassel*. Proceedings 16. Symposium Thermische Solarenergie, Bad Staffelstein.
- Kelch, K.**, 2010. *Gravierende Veränderungen der betriebenen Braustätten von 1987 bis 2009*. Brauwelt 2010, S. 446-447.
- Kessler, H.-G.**, 1996. *Lebensmittel- und Bioverfahrenstechnik*. Molkerietechnologie; mit 109 Tabellen. 4. Auflage, Kessler, München. 3980237842.
- Kompetenzforum Getränkebehälter (Bevcomp)**, 2005. *Praxis-Handbuch für die Reinigung von Mehrwegflaschen aus Glas oder PET*. 2. Auflage, VLB Berlin. 978-3-418-00832-5.
- Kovacs, P., Quicklun, H., Pettersson, U.**, 2003. *Solenergi i industriell processvärme - En förstudie av svenska möjligheter*. SP Rapport 2003. SP Technical Research Institute of Sweden, Borås.
- KRONES AG**, 2005. *Krones Utilities - Versorgung des Getränkebetriebs*, Freising.
- KRONES AG**, 2011. *Steinecker EquiTherm*, Neutraubing.
- Krüger, D., Walder, M., Saidi, K., Anthrakidis, A., Rusack, M., Weis, F., Schenk, H., Dersch, J., Fischer, S., Hennecke, K.**, 2011. *P3 - Pilotanlage zur solaren Prozesswärmeerzeugung mit Parabolrinnenkollektoren*. Schlussbericht zum Verbundprojekt FKZ 0329609A, 0329609B, 0329609C.
- Kunze, W.**, 2007. *Technologie Brauer & Mälzer*. 9. Auflage, VLB, Berlin. 9783921690567.
- Kutz, M.**, 2006. *Mechanical Engineers' Handbook - Energy and Power*. 3. Auflage, John Wiley, Hoboken, NJ. 978-0-471-44990-4.
- Lauterbach, C.**, 2014. *Potential, system analysis, and preliminary design of low-temperature solar process heat systems*. Dissertation, Kassel University Press, Kassel.
- Lauterbach, C., Javid Rad, S., Schmitt, B., Vajen, K.**, 2011a. *Feasibility assessment of solar process heat applications*. Proceedings ISES Solar World Congress Kassel.
- Lauterbach, C., Schmitt, B., Jordan, U., Vajen, K.**, 2010. *Potential for Solar Process Heat in Germany - Suitable Industrial Sectors and Processes*. Proceedings Eurosun Graz, Österreich.
- Lauterbach, C., Schmitt, B., Jordan, U., Vajen, K.**, 2011b. *Solare Prozesswärme in Deutschland - Potential und Markterschließung*. Proceedings 21. Symposium Thermische Solarenergie, Bad Staffelstein.
- Lauterbach, C., Schmitt, B., Jordan, U., Vajen, K.**, 2012. *The potential of solar heat for industrial processes in Germany*. Renewable and Sustainable Energy Reviews 16, 5121–5130.
- Lauterbach, C., Schmitt, B., Vajen, K.**, 2011c. *Das Potential solarer Prozesswärme in Deutschland*. Teil 1 des Abschlussberichtes zum Forschungsvorhaben „SOPREN - Solare Prozesswärme und Energieeffizienz“, Förderkennzeichen: 0329601T. Universität Kassel, Institut für Thermische Energietechnik, Kassel.

- Lenz, A., Burlein, R.,** 2000. *Dynamische Niederdruckkochung - Ein energietechnisch optimiertes Würzekochverfahren*. Huppmann Post 20, 26–30.
- Lewis, M., Bamforth, C.W.,** 2006. *Essays in brewing science*, Springer, New York. 978-0387-33010-5.
- Malek, H.,** 2012. *Persönliche Kommunikation zur Keg-Reinigung*. Malek Brautech GmbH.
- Manger H.-J.,** 2006. *CIP-Anlagen: Stapelreinigung oder verlorene Reinigung?* Brauwelt, 606–611.
- Marty, H., Schmitt, B., Frank, E.,** 2010. *Audit Feldschlösschen AG*. Industry Audit im Rahmen des Forschungsprojektes "EINSTEIN goes Swiss", Rapperswil, Schweiz.
- Mauthner, F., Weiss, W.,** 2013. *Solar Heat Worldwide. Markets and contribution to the energy supply 2011*. Edition 2013. AEE INTEC, Gleisdorf, Österreich.
- McLeod, V., Annas, J., Stein, W., Hinkley, J.,** 2005. *Application of solar process heat to the commercial & industrial sectors*. Energetics Pty Ltd, Sydney, Australien.
- Mersmann, A., Kind, M., Stichlmair, J.,** 2005. *Thermische Verfahrenstechnik*. Grundlagen und Methoden. 2. Auflage, Springer, Berlin. 978-3-540-23648-1.
- Meyer, J.,** 2000. *Rationelle Energienutzung in der Ernährungsindustrie*. Leitfaden für die betriebliche Praxis ; Landesinitiative Zukunftsenergien NRW, Vieweg, Braunschweig, Wiesbaden. 978-3528031732.
- Mezger, R.,** 2006. *Betrachtung moderner Würzekochsysteme bezüglich ihres Einflusses auf technologisch und physiologisch bedeutende Würzeinhaltsstoffe*. Dissertation, München.
- Minifie, B.W.,** 1989. *Chocolate, cocoa, and confectionery*. Science and technology. 3. Auflage, Van Nostrand Reinhold, New York. 0442265212.
- Mintzloff, H.-J., Woltersdorf, W., Mintzloff, J.,** 1998. *Kondensationsbrühung beim Schwein - Ein praktikables Verfahren*. 2. Energetischer Vergleich der Kondensationsbrühung mit anderen Brühverfahren. Fleischwirtschaft, 71.
- Müller, T., Weiß, W., Schnitzer, H., Brunner, C., Begander, U., Themel, O.,** 2004. *PROMISE - Produzieren mit Sonnenenergie: Potenzialstudie zur thermischen Solarenergienutzung in österreichischen Gewerbe- und Industriebetrieben*. Studie im Auftrag des Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie. Arbeitsgemeinschaft Erneuerbare Energien – Institut für Nachhaltige Technologien, Wien.
- Mussatto, S., Dragone, G., Roberto, I.,** 2006. *Brewers' spent grain: generation, characteristics and potential applications*. Journal of Cereal Science 43, 1–14.
- Muster-Slawitsch, B., Weiss, W., Schnitzer, H., Brunner, C.,** 2011. *The green brewery concept – Energy efficiency and the use of renewable energy sources in breweries*. Applied Thermal Engineering 31, 2123–2134.
- Narziß, L.,** 2005. *Abriß der Bierbrauerei*. 7. Auflage, Wiley VCH, Weinheim. 3527310355.
- Narziß, L., Back, W., Burberg, F.,** 2009. *Die Bierbrauerei: Die Technologie der Würzebereitung*. 8. Auflage, Wiley-VCH, Weinheim. 9783527325337.
- O.Ö. Energiesparverband (OÖ ESV),** 2011. *Solar Process Heat - status reports on the regional pilot projects*. Intelligent Energy Europe Project, Linz.

- Petersen, H.**, 1993. *Brauereianlagen*. Planung, Energieversorgung, Energiewirtschaft, Betriebstechnik, Kontrolle, Kennzahlen, Hans Carl, Nürnberg. 3-418-00739-2.
- Prändl, O., Fischer, A., Schmidhofer, T., Sinell, H.-J.**, 1988. *Fleisch - Technologie und Hygiene der Gewinnung und Verarbeitung*, Ulmer, Stuttgart. 3800121352.
- Priest, F.G., Stewart, G.G.**, 2006. *Handbook of brewing*. 2. Auflage, CRC/Taylor & Francis, Boca Raton. 978-0-8247-2657-7.
- Puente Salve, F.**, 2011. *WP2 - Priority applications selection summary*. Project report.
- Ramirez, C., Patel, M., Blok, K.**, 2006. *From fluid milk to milk powder: Energy use and energy efficiency in the European dairy industry*. Energy 31, 1984–2004.
- Ramírez, C., Patel, M., Blok, K.**, 2006. *How much energy to process one pound of meat? A comparison of energy use and specific energy consumption in the meat industry of four European countries*. Energy 31, 2047–2063.
- Rosenthal, I.**, 1991. *Milk and dairy products*. Properties and processing, VCH, Weinheim, New York. 352727989x.
- Saravacos, G.D., Kostaropoulos, A.E.**, 2002. *Handbook of food processing equipment*, Kluwer Academic/Plenum, New York. 0306472767.
- Saravacos, G.D., Maroulis, Z.B.**, 2011. *Food process engineering operations*, CRC Press, Boca Raton. 9781420083538.
- Sattler, G., Schibel, T.**, 2011. *Planungshandbuch Dampfkessel*. Viessmann Werke, Allendorf (Eder).
- Sattler, P.**, 2000. *Energiekennzahlen und -sarpotenziale in Brauereien*, Linz, Österreich.
- Scheller, L.**, 2011. *Nachhaltigkeit gefordert - Konzepte zur Minderung des Energieverbrauchs*. BrauIndustrie, 27–29.
- Scheller, L., Michel, R., Funk, U.**, 2008. *Efficient use of energy in the brewhouse*. Master Brewers Association of the Americas Technical Quarterly 45, 263–267.
- Schmitt, B., Lauterbach, C., Dittmar, M., Vajen, K.**, 2012a. *Guideline for the utilization of solar heat in breweries*. Proceedings Eurosun Rijeka, Kroatien.
- Schmitt, B., Lauterbach, C., Jordan, U., Vajen, K.**, 2010. *Sustainable Beer Production by Combining Solar Process Heat and Energy Efficiency - Holistic System Concept and Preliminary Operational Experiences*. Proceedings Eurosun Graz, Österreich.
- 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.
- Schmitt, B., Lauterbach, C., Vajen, K.**, 2012b. *Branchenkonzept solare Prozesswärme in Brauereien*. Teil 2 des Abschlussberichtes zum Forschungsvorhaben „SOPREN - Solare Prozesswärme und Energieeffizienz“, Förderkennzeichen: 0329601T. Universität Kassel, Institut für Thermische Energietechnik, Kassel.
- Schmitt, B., Lauterbach, C., Vajen, K.**, 2012c. *Leitfaden zur Nutzung solarer Prozesswärme in Brauereien*. Universität Kassel, Institut für Thermische Energietechnik, Kassel.
- Schmitt, B., Lauterbach, C., Vajen, K., Jordan, U.**, 2009. *Systemintegration thermischer Solaranlagen in industrielle Prozesse am Beispiel des Brauwesens*. Proceedings 19. Symposium Thermische Solarenergie, Bad Staffelstein.

- Schmitt, B., Lauterbach, C., Vajen, K., Reinl, K.-P.**, 2012d. *Pilotanlage zur Bereitstellung solarer Prozesswärme bei der Hütt-Brauerei*. Abschlussberichtes zum Forschungsvorhaben „Thermische Solaranlage zur Prozesswärmebereitstellung in Verbindung mit der Implementierung eines neuen, energieeffizienten Kochverfahrens“, FKZ 0329609E. Universität Kassel, Institut für Thermische Energietechnik, Kassel.
- Schmitt, B., Vajen, K., Jordan, U.**, 2008. *Integration of Solar Heating Systems for Process Heat Generation in Breweries*. Proceedings Eurosun Lisbon, Portugal.
- Schnitzer, H., Brunner, C., Gwehenberger, G.**, 2007. *Minimizing greenhouse gas emissions through the application of solar thermal energy in industrial processes*. Approaching zero emissions. Journal of Cleaner Production 15, 1271–1286.
- Schnitzer, H., Brunner, C., Taferner, K., Slawitsch, B., Giannakopoulou, K.**, 2006. *Solare Prozesswärme - Österreichische Beteiligungen an der Task 33 des IEA Solar Heating and Cooling Programms*. Phase I Subtask B: Investigation of Industrial Processes, Graz, Österreich.
- Scholz, G.**, 2012. *Rohrleitungs- und Apparatebau*. Planungshandbuch für Industrie- und Fernwärmeversorgung, Springer, Heidelberg. 978-3-642-25424-6.
- Schuchmann, H., Schuchmann, H.P.**, 2005. *Lebensmittelverfahrenstechnik*. Rohstoffe, Prozesse, Produkte, Wiley-VCH, Weinheim. 9783527312306.
- Schu, G., Stolz, F., Jordan, U., Kansy, R.**, 2001. *Betriebevergleich Energie 1998*. Brauwelt, 116–120.
- Schweiger, H., Mendes, J., Schwenk, C., Hennecke, K., Barquero, C., Sarvisé, A., Carvalho, M.**, 2001. *POSHIP - The Potential of Solar Heat for Industrial Processes*. AIGUASOL Enginyeria, Inst. Nacional de Engenharia e Tecnologia, Bayr. Zentrum für angewandte Energieforschung e.V., Deutsches Zentrum für Luft und Raumfahrt, Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía, Institut Català d’Energia, Sociedade Portuguesa de Energia Solar, Barcelona, Lissabon, München, Köln, Madrid.
- Shah, R.K., Sekulić, D.P.**, 2003. *Fundamentals of heat exchanger design*, John Wiley & Sons, Hoboken, NJ. 0471321710.
- Sharma, S.K., Mulvaney, S., Rizvi, S.S.H.**, 2000. *Food processing engineering*. A laboratory manual, Wiley, New York, Chichester. 0471322415.
- Sielaff, H.**, 1996. *Fleischtechnologie*. Behr's, Hamburg. 3860221884.
- Sinha, N.K., Sidhu, J.S.**, 2012. *Handbook of fruits and fruit processing*. Second edition, Wiley-Blackwell, Ames, Iowa. 9780813808949.
- Sinnott, R.K., Coulson, J.M., Richardson, J.F.**, 2005. *Chemical engineering design*. 4. Auflage, Elsevier Butterworth-Heinemann, Oxford. 0750665386.
- Spirax Sarco GmbH**, 2006. *Grundlagen der Dampf- und Kondensattechnologie*, Konstanz.
- Spreer, E.**, 2011. *Technologie der Milchverarbeitung*. 10. Auflage, Behr, Hamburg. 9783899478419.
- Statistisches Bundesamt Deutschland (DeStatis)**, 2010. *Erhebung über die Energieverwendung der Wirtschaftszweige B und C der Bundesrepublik Deutschland für den Berichtszeitraum 2009*, Wiesbaden.

- Statistisches Bundesamt Deutschland (DeStatis)**, 2011a. *Erhebung über die Energieverwendung für 2006*. Persönliche Kommunikation, erhalten 02/2011, Wiesbaden.
- Statistisches Bundesamt Deutschland (DeStatis)**, 2011b. *Produzierendes Gewerbe 2009*. Fachserie 4, Reihe 4.2.1, Wiesbaden.
- Statistisches Bundesamt Deutschland (DeStatis)**, 2011c. *Unternehmen mit sozialversicherungspflichtig Beschäftigten für 2009*. Persönliche Kommunikation, erhalten 02/2011, Wiesbaden.
- Staudacher, L., Buttinger, F.**, 2002. *PROCESOL II – Phase 4, Part ii, Implementation of solar thermal energy in breweries & Heat recovery in industrial plants*, Garching.
- Stempel, T.**, 2005. *Erdgas in Fleischereien*. Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V. (BDEW), Bonn.
- Taibi, E., Gielen, D., Bazilian, M.**, 2012. *The potential for renewable energy in industrial applications*. Renewable and Sustainable Energy Reviews 16, 735–744.
- Thiemann, D., Bohm, B.**, 2009. *Aktueller denn je - Analyse und Optimierung der Produktions- und Energieeffizienz in mittelständischen Brauereien*. BrauIndustrie, 10–13.
- Thumann, A., Younger, W., Niehus, T.**, 2010. *Handbook of Energy Audits*. 8. Auflage, Fairmont Press. 9780881736212.
- Titze, H., Wilke, H.-P., Groß, K.**, 1992. *Elemente des Apparatebaues*. Grundlagen - Bauelemente - Apparate. 3. Auflage, Springer-Verlag, Berlin. 354055257x.
- Tokos, H., Pintarič, Z.N., Glavič, P.**, 2010. *Energy saving opportunities in heat integrated beverage plant retrofit*. Applied Thermal Engineering 30, 36–44.
- Treiber, K.**, 2007. *Kurzzeiterhitzung im Getränkebereich*. Brauwelt, 235–237.
- Tscheuschner, H.-D.**, 2004. *Grundzüge der Lebensmitteltechnik*. 3. Auflage, Behr, Hamburg. 3899470850.
- Tucker, G., Featherstone, S.**, 2011. *Essentials of thermal processing*. Wiley-Blackwell, Chichester, West Sussex, UK ; Ames, Iowa. 9781405190589.
- Turner, W.C., Doty, S.**, 2007. *Energy management handbook*. 6, Fairmont Press; Distributed by CRC Press/Taylor & Francis, Lilburn, GA, Boca Raton, FL. 0-88173-543-4.
- van de Pol, V., Wattimena, L.**, 2001. *Onderzoek naar het potentieel van zonthermische energie in de industrie*. KWA Bedrijfsadviseurs B.V.
- Vannoni, C., Battisti, R., Drigo, S.**, 2008. *Potential for Solar Heat in Industrial Processes*. Report within IEA SHC Task 33/IV. Department of Mechanics and Aeronautics - University of Rome "La Sapienza", Rome, Italien.
- Vannoni, C., Battisti, R., Drigo, S., Corrado, A.**, 2006. *SHIP Potential Studies Report*. Report within IEA SHC Task 33/IV. Department of Mechanics and Aeronautics - University of Rome "La Sapienza".
- Vauck, W.R.A., Müller, H.A.**, 1988. *Grundoperationen chemischer Verfahrenstechnik*. 7. Auflage, VCH, Weinheim, Basel, Cambridge, New York. 3527266283.
- Verein Deutscher Ingenieure VDI-Gesellschaft Verfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen (VCI)**, 2006. *VDI-Wärmeatlas*. 10. Auflage, Springer, Berlin, Heidelberg, New York. 9783540255048.

- Vogt, M., Blum, O., Hutter, A., Jung, H., Meyer, B., Kirschbaum, S., Schubert, A., Meyer, J.**, 2008. *Branchenleitfaden für die Papierindustrie*. Arbeitsgemeinschaft Branchenenergiekonzept Papier.
- Wagner, W.**, 2005. *Wärmeträgertechnik mit organischen Fluiden*. 7. Auflage, Vogel, Würzburg. 9783834330338.
- Walter, S.**, 2005. *Untersuchung verfahrenstechnischer Möglichkeiten zur Brauchwasserkreislaufführung in der Brauerei*. Dissertation.
- Wang, L.**, 2009. *Energy efficiency and management in food processing facilities*, CRC Press, Boca Raton. 9781420063387.
- Wasmuth, K.**, 2005. *Maischzeit unter zwei Stunden*. Brauwelt, 970–971.
- Weiss, W., Rommel, M.**, 2008. *Process Heat Collectors, State of the Art within Task 33/IV*. AEE INTEC, Gleisdorf.
- Werner, S.**, 2010. *Carotinoide und Vitamin E in Hartweizen und daraus hergestellten Teigwaren – analytische, technologische und ernährungsphysiologische Aspekte*. Dissertation.
- Wieting, J., Wigbert, A.**, 2009. *Leitfaden Schlachtbetriebe*.
- Willaert, R., Baron, G.**, 2004. *Applying sustainable technology for saving primary energy in the brewhouse during beer brewing*. Clean Technologies and Environmental Policy 7, 15–32.
- Yin, R.K.**, 2009. *Case study research. Design and methods*. 4. Auflage, Sage Publications, Los Angeles, Calif. 9781412960991.
- ZIEMANN Ludwigsburg GmbH**, 2008. *ZIEMANN-Energiesparsysteme*. 4 Optionen für eine wirtschaftliche Energienutzung, Ludwigsburg.

7.2. Abkürzungsverzeichnis

AT	Österreich
AU	Australien
BE	Belgien
BHKW	Blockheizkraftwerk
BVT	Beste verfügbare Techniken
CIP	Cleaning in Place
DE	Deutschland
EIPPCB	European Integrated Pollution Prevention and Control Bureau
ES	Spanien
GR	Griechenland
HW	Heißwasser
IKT	Informations- und Kommunikationstechnologie
IT	Italien
KZE	Kurzzeiterhitzung
NL	Niederlande
P	Produkt
PE	Prozessebene
PET	Polyethylenterephthalat
PfaDuKo	Pfannendunstkondensator
PM	Prozessmedium
PT	Portugal
TEMA	Tubular Exchanger Manufacturers Association
UHT	Ultra high temperature Sterilisationsverfahren
VB	Verkaufsbier
VE	Versorgungsebene
WRG	Wärmerückgewinnung
WÜT	Wärmeübertrager
WW	Warmwasser
WZ	Wirtschaftszweig

A	Absalzrate	[%]
c_p	spezifische Wärmekapazität	[kJ/(kg*K)]
$\dot{m}_{D/B}$	Massenstrom Brüden Dampf	[kg/h]
\dot{m}_{FD}	Massenstrom Frischdampf	[kg/h]
\dot{m}_{KON}	Massenstrom Kondensatrückspeisung in Entgaser	[kg/h]
\dot{m}_{Spw}	Massenstrom Speisewasser	[kg/h]
$\dot{m}_{Zu/Spw}$	Massenstrom Zusatzwasser in Entgaser	[kg/h]
\dot{Q}_B	Leistung Brüdenkondensator	[kW]
$\dot{Q}_{B/K}$	Leistung Brüdenkondensation	[kW]
$\dot{Q}_{B/U}$	Leistung Brüdenunterkühlung	[kW]
$\dot{Q}_{L/K}$	Leistung Laugenkühler	[kW]
$\dot{Q}_{Spw/K}$	Leistung Speisewasserkühler	[kW]
$\dot{Q}_{WRG/Zu/Spw}$	Leistung der Wärmerückgewinnung mittels Speisewasserkühler und Brüdenkondensator	[kW]
r_B	Kondensationswärme Brüden Dampf	[kJ/kg]
$r_{B/m}$	mittlerer Faktor für die Ermittlung der Brüden- dampfmenge	[-]
$T_{A/A}$	Temperatur Laugenwasser Austritt	[°C]
$T_{A/E}$	Temperatur Laugenwasser Eintritt	[°C]
$T_{S/B}$	Sattdampftemperatur Brüden	[°C]
$T_{S/E}$	Entgaser-Sättigungstemperatur	[°C]
$T_{Spw/A}$	Temperatur Speisewasser Austritt Brüdenkondensator	[°C]
$T_{Spw/E}$	Temperatur Speisewasser Eintritt Brüdenkondensator	[°C]
$T_{U/B}$	Temperatur Brüdenkondensat Austritt	[°C]
$T_{Zu/Spw/A-K}$	Temperatur Zusatzspeisewasser Austritt Kühler	[°C]
$T_{Zu/Spw/A-WRG}$	Temperatur Zusatzspeisewasser nach Wärmerückgewinnung	[°C]
$T_{Zu/Spw/E-K}$	Temperatur Zusatzspeisewasser Eintritt Kühler	[°C]
$T_{Zu/Spw/E-WRG}$	Temperatur Zusatzspeisewasser vor Wärmerückgewinnung	[°C]
ΔT_{klein}	Grädigkeit des Brüdenkondensators (2..5 K)	[K]
$\Delta T_{groß}$	Grädigkeit des Brüdenkondensators (> 20 K)	[K]

7.3. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1: Endenergieverbrauch in Deutschland und Aufteilung innerhalb der Industrie.....	7
Abbildung 2-2: Aufteilung des industriellen Prozesswärmebedarfs zwischen 100 und 500 °C.....	9
Abbildung 2-3: Technisches Potential zur Nutzung solarer Prozesswärme in europ. Ländern.	12
Abbildung 2-4: Technisches Potential ausgewählter Branchen unterteilt nach Temperaturniveau.	15
Abbildung 2-5: Geeignete Prozesse für die Integration solarer Wärme.....	16
Abbildung 3-1: Produktionsabschnitte in Brauereien.	19
Abbildung 3-2: Produktionsablauf im Sudhaus.	20
Abbildung 3-3: Produktionsablauf im Gär- und Lagerkeller.	22
Abbildung 3-4: Produktionsablauf in der Abfüllhalle.....	23
Abbildung 3-5: Anteil der im Brauwesen verwendeten Energieträger.	26
Abbildung 3-6: Anteil der Produktionseinrichtungen am Wärmeverbrauch.....	26
Abbildung 3-7: Integrationskonzept zur solaren Beheizung einer Wasserentgasung.	33
Abbildung 3-8: Integrationskonzept für die Warmwasserversorgung.	35
Abbildung 3-9: Integrationskonzept für mittels Heißwasser beheizte Maischpfannen.....	36
Abbildung 3-10: Integrationskonzept für Vakuumkochverfahren mit Außenkocher.	38
Abbildung 3-11: Integrationskonzept für KZE mit externer Heizstufe.....	39
Abbildung 3-12: Integrationskonzept für KZE mit interner Heizstufe.	40
Abbildung 3-13: Integrationskonzept für die Entalkoholisierung.....	42
Abbildung 3-14: Zwei Integrationskonzepte für die Flaschenreinigung.....	43
Abbildung 3-15: Integrationskonzept für die Tunnelpasteurisation.....	46
Abbildung 3-16: Integrationskonzept für die Kegreinigung.	47
Abbildung 3-17: Integrationskonzept für die CIP-Reinigung.....	48
Abbildung 4-1: Unterteilung der thermischen Grundprozesse.....	53
Abbildung 4-2: Grundfließbild der Milchverarbeitung.....	55
Abbildung 4-3: Grundfließbild der Rinder-, Schweine- und Geflügelschlachtung.....	59
Abbildung 4-4: Grundfließbild der Fleischverarbeitung.....	60
Abbildung 4-5: Grundfließbild der Herstellung von Schokolade, Kakaopulver und Kakaobutter.	65
Abbildung 4-6: Grundfließbild der Herstellung alkoholfreier Getränke.....	67
Abbildung 4-7: Unterteilung möglicher Beheizungsarten.	68
Abbildung 4-8: Beispiele zur Prozessbeheizung mit externen Wärmeübertragern.....	70
Abbildung 4-9: Rohrbündelwärmeübertrager mit zwei festen Böden und Schwimmkopf.....	71
Abbildung 4-10: Rohrbündelwärmeübertrager mit U-Rohren und K-Typ Rohrbündel.....	72
Abbildung 4-11: Beispiele zur Prozessbeheizung mittels internen Wärmeübertragern.	74
Abbildung 4-12: Prozessbeheizung mittels Dampfinjektion.....	76
Abbildung 4-13: Verdampfer der Kategorie Strömungssieden.....	78
Abbildung 4-14: Verdampfer der Kategorie Filmverdampfung.	79
Abbildung 4-15: Bandtrockner und Sprühtrockner.....	81
Abbildung 4-16: Wirbelschichttrockner und Durchlauf-Stromtrockner.	81
Abbildung 4-17: Gegenstrom-Trommeltrockner und Doppelschnecken-Trockner.	82
Abbildung 4-18: Walzentrockner und Schaufeltrockner.....	82
Abbildung 5-1: Unterscheidung zwischen Versorgungs- und Prozessebene.	86

Abbildung 5-2: Kesselhauses mit Möglichkeiten zur Einbindung von Solarwärme.	87
Abbildung 5-3: Unterschiedliche Verfahren und Anlagen zur Pasteurisation von Lebensmitteln.	90
Abbildung 5-4: Klassifizierung zur Integration thermischer Solaranlagen.....	92
Abbildung 5-5: Wichtige Symbol der entwickelten Integrationskonzepte.	95
Abbildung 5-6: Integrationskonzept zur direkten solaren Dampferzeugung.....	96
Abbildung 5-7: Integrationskonzept zur indirekten solaren Dampferzeugung.....	97
Abbildung 5-8: Integrationskonzept zur solaren Aufheizung des Kesselspeisewassers.....	98
Abbildung 5-9: Integrationskonzept zur solaren Vorwärmung des Kesselzusatzwassers.....	99
Abbildung 5-10: Integrationskonzept zur parallelen Einbindung in Heißwassernetze.....	103
Abbildung 5-11: Integrationskonzept für die solare Rücklaufanhebung bei Heißwassernetzen ..	104
Abbildung 5-12: Integrationskonzept für Heiß- und Warmwasserspeichern sowie Kaskaden.....	105
Abbildung 5-13: Integrationskonzept zur seriellen Einbindung eines ext. Wärmeübertragers.....	106
Abbildung 5-14: Integrationskonzept für ext. WÜT bei Warmwasserzwischenkreisen.....	108
Abbildung 5-15: Integrationskonzept für ext. Wärmeübertragers zur Beheizung von Bädern.....	109
Abbildung 5-16: Integrationskonzept für ext. WÜT zur Aufheizung von Inputströmen.....	110
Abbildung 5-17: Integrationskonzept für zusätzlichen interne Wärmeübertragungsflächen.....	111
Abbildung 5-18: Integrationskonzept für zusätzliche solare Heizzone bei MZ-WÜT.....	112
Abbildung 5-19: Integrationskonzept für ext. WÜT mit Anschlussplatte bei MZ-WÜT.....	112
Abbildung 5-20: Integrationskonzept zur solaren Bereitstellung von Dampf mit Unterdruck.....	113
Abbildung 5-21: Integrationskonzept zur solaren Bereitstellung von Dampf mit Niederdruck ...	114
Abbildung 5-22: Wichtige Schritte bei der Identifikation geeigneter Integrationspunkte.....	115
Abbildung 8-1: Grundfließbild der Spaghettitherstellung.....	143
Abbildung 8-2: Grundfließbild der Herstellung von Sterilkonserven.....	144
Abbildung 8-3: Grundfließbild der Herstellung von geklärtem Fruchtsaft.....	145
Abbildung 8-4: Grundfließbild der Hartkaramellenherstellung.....	146
Abbildung 8-5: Doppelrohrwärmeübertrager.....	148
Abbildung 8-6: Schematische Darstellung eines Schabewärmeübertragers.....	148
Abbildung 8-7: Aufbau eines Plattenwärmeübertragers.....	149
Abbildung 8-8: Spiralwärmeübertrager im Gegenstrom.....	149
Abbildung 8-9: Rippenrohr- und Lamellenrohrwärmeübertrager.....	150
Abbildung 8-10: Gefäßbeheizung mittels Rechteckkanälen, Dimple Jacket und Halbrohren.....	150
Abbildung 8-11: Gefäßbeheizung mittels interner Rohrschlange.....	151
Abbildung 8-12: Panel- bzw. Platecoils.....	151
Abbildung 8-13: Kammertrockner und Tellertrockner.....	151
Abbildung 8-14: Walzentrockner mit einer Walze und Heztellertrockner.....	152
Abbildung 8-15: Vakuum-Taumel-Trockner.....	152

7.4. Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1: Aufschlüsselung des industriellen Wärmebedarfs für das Jahr 2009	8
Tabelle 2-2: Aufschlüsselung des ind. Wärmebedarfs mit Unterteilung des T-Niveaus	10
Tabelle 2-3: Geeignete Branchen identifiziert im Rahmen früherer Potentialstudien	12
Tabelle 3-1: Jahresproduktion der mittels Fallstudien untersuchten Brauereien	18
Tabelle 3-2: Spezifische Wärmeverbrauchswerte von Brauereien nach Betriebsgröße	28
Tabelle 3-3: Übersicht und Bewertung der Integrationsmöglichkeiten in Brauereien	50
Tabelle 5-1: Verbleibende Leistung zur Aufheizung von Zusatzwasser	100
Tabelle 5-2: Verbleibende Leistung zur Aufheizung von Zusatzwasser eines 5 MW Kessels	101
Tabelle 8-1: Mögliche Baugruppentypen von Rohrbündelwärmeübertragern nach TEMA	147

8. Anhang

8.1. Grundfließbilder ausgewählter Prozessketten

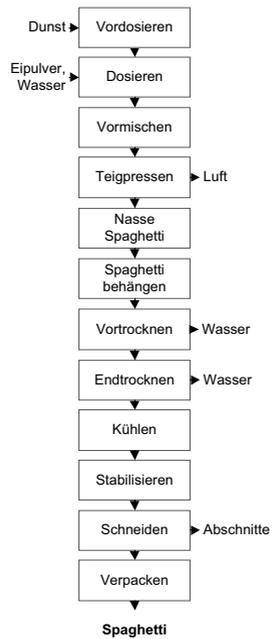


Abbildung 8-1: Grundfließbild der Spaghettierstellung nach Tscheuschner (2004)

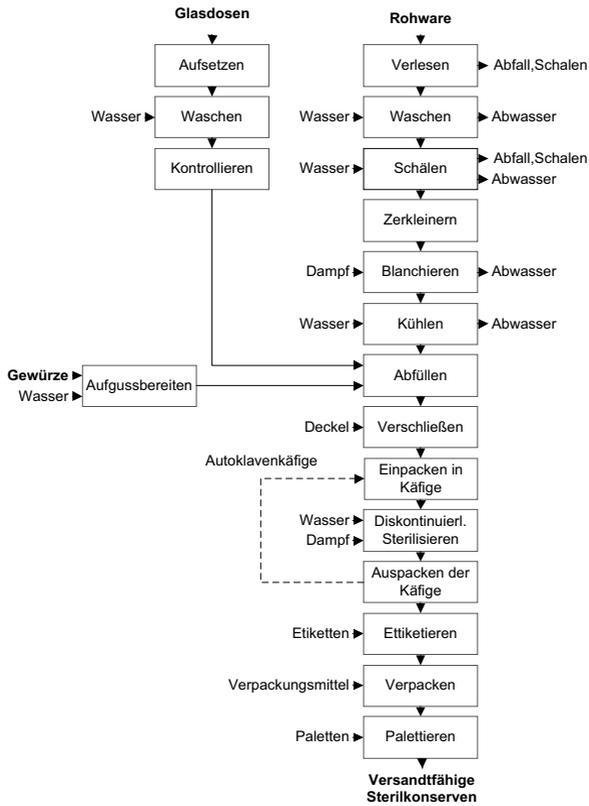


Abbildung 8-2: Grundfließbild der Herstellung von Sterilkonserven nach Tscheuschner (2004)



Abbildung 8-3: Grundfließbild der Herstellung von geklärtem Fruchtsaft nach Tschuschner (2004)

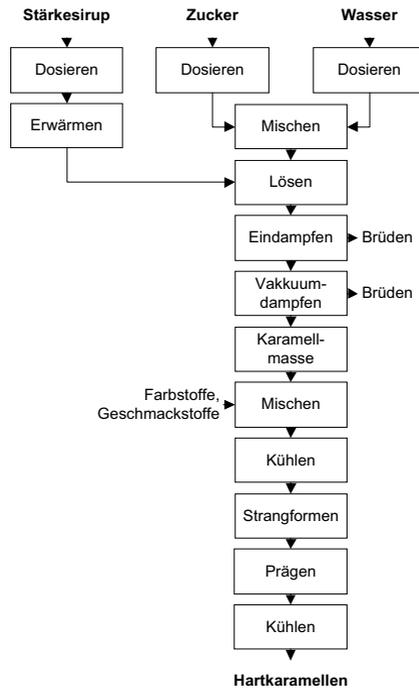
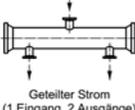
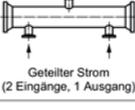
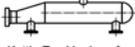
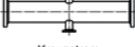
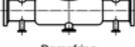


Abbildung 8-4: Grundfließbild der Hartkaramellenherstellung nach Tscheuschner (2004)

8.2. Konventionelle Prozessbeheizung

Table 8-1: Mögliche Baugruppentypen von Rohrbündelwärmeübertragern nach TEMA (DIN, 2007).

Vorkopf		Mantel		Hinterkopf	
Typ	Bild	Typ	Bild	Typ	Bild
A	 Vorkammer und abnehmbarer Vorkopf-Deckel	E	 Mantel mit einem Durchgang	L	 Ausziehbare Vorkammer mit flachem Deckel
		F	 Zwei Gänge mit Längstrennblech		
B	 Haube geschraubt oder integral mit Rohrboden	G	 Geteilter Strom — Längstrennwand	M	 Haube
		H	 Doppelt geteilter Strom	N	 Integrale Vorkammer mit flachem Deckel
C	 Integraler Rohrboden und ausziehbares Bündel	J	 Geteilter Strom (1 Eingang, 2 Ausgänge)	P	 Außen dichtgepackter Schwimmkopf
N	 Integraler Rohrboden und nicht ausziehbares Bündel	J	 Geteilter Strom (2 Eingänge, 1 Ausgang)	S	 Schwimmkopf mit Gegenhalter
		K	 Kettle-Typ-Verdampfer	T	 Durch Schwimmkopf gezogen
D	 Hochdruck-Verschluss	X	 Kreuzstrom	U	 U-Rohrbündel
		V	 Dampfring	W	 Schwimmkopf mit Laternenring

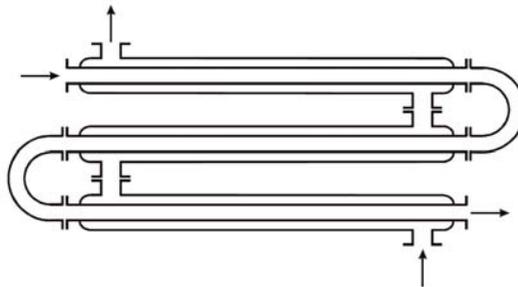


Abbildung 8-5: Doppelrohrwärmeübertrager (Christen, 2005).

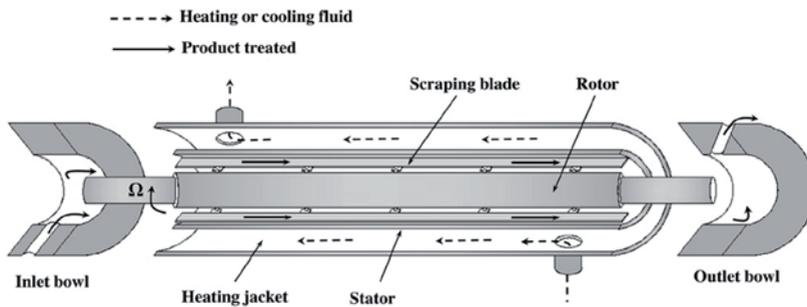


Abbildung 8-6: Schematische Darstellung eines Schabewärmeübertragers (Blél et al., 2013).

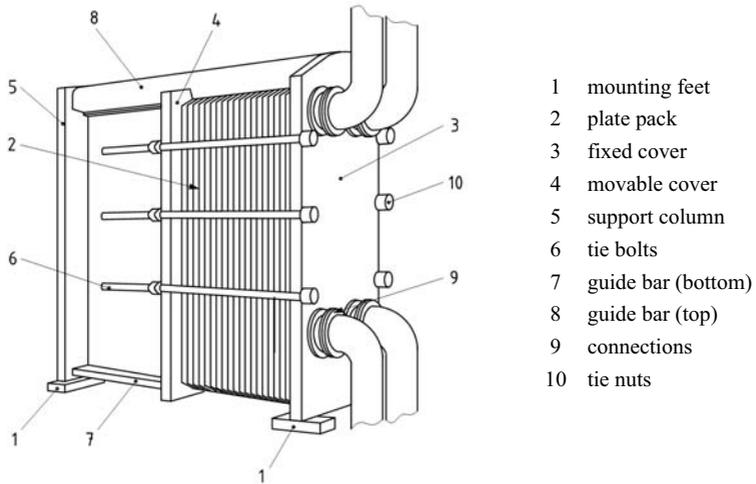


Abbildung 8-7: Aufbau eines Plattenwärmeübertragers (DIN, 2006).

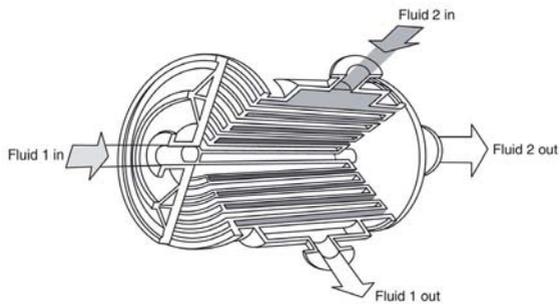


Abbildung 8-8: Spiralwärmeübertrager im Gegenstrom (Shah und Sekulić, 2003).

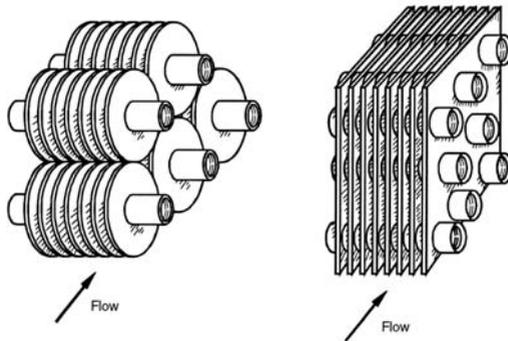


Abbildung 8-9: Rippenrohr- (li) und Lamellenrohrwärmeübertrager (re) (Shah und Sekulić, 2003).

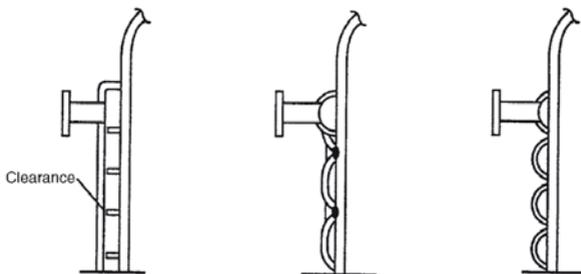


Abbildung 8-10: Gefäßbeheizung mittels Rechteckkanälen, Dimple Jacket und Halbrohren (Sinnott et al., 2005).

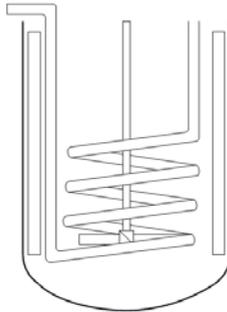


Abbildung 8-11: Gefäßbeheizung mittels interner Rohrschlange (Sinnott et al., 2005).



Abbildung 8-12: Panel- bzw. Platecoils (Shah und Sekulić, 2003).

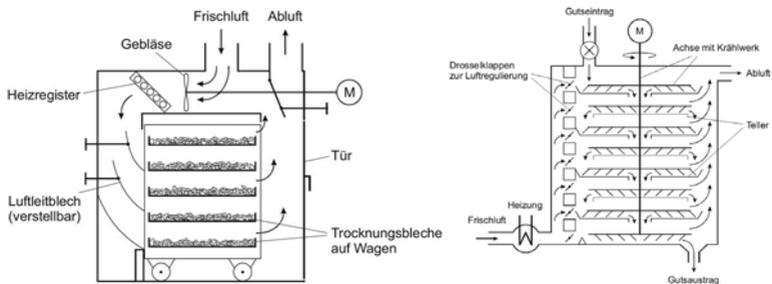


Abbildung 8-13: Kammertrockner (links) und Tellerdöckner (rechts) (Christen, 2005).

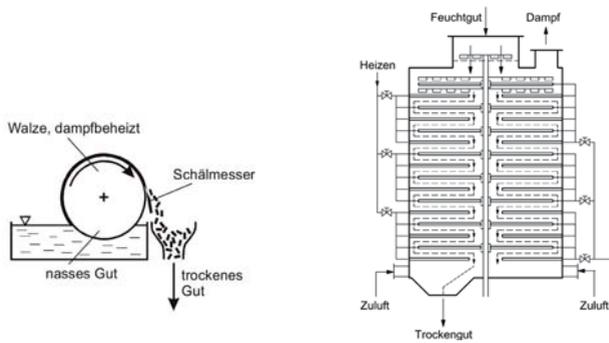


Abbildung 8-14: Walzentrockner mit einer Walze (links) (Christen, 2005) und Heiztellerrockner (rechts) (Mersmann et al., 2005).

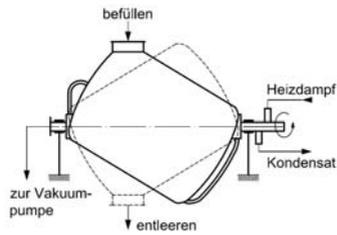


Abbildung 8-15: Vakuum-Taumel-Trockner (Mersmann et al., 2005).

8.3. Berechnungen zur Wärmerückgewinnung im Kesselhaus

Berechnung der bei der thermischen Entgasung resultierenden Brühdampfmenge nach Sattler und Schibel (2011).

Annahmen zur Berechnung:

- Vollentgasung des Speisewassers bei 105 °C
- Absalzrate des Kessels 5 % (typische Werte liegen bei 2..5 %)
- Temperatur Zusatzwasser 15 °C

Berechnung des Brühdampfmassenstroms:

$$\dot{m}_{D/B} \approx r_{B/m} * (\dot{m}_{KON} + \dot{m}_{Zu/Spw}) = r_{B/m} * \left(\dot{m}_{FD} * \left(1 + \frac{A}{100} \right) \right)$$

$$\dot{m}_{D/B} = 0,0075 * \dot{m}_{FD} \left[\frac{t}{h} \right] * 1,04 \approx 7,8 * 10^{-3} * \dot{m}_{FD} \left[\frac{t}{h} \right]$$

Berechnung der Leistung eines Brüdenkondensators:

$$\dot{Q}_B = \dot{Q}_{B/K} + \dot{Q}_{B/U} = \dot{m}_{Spw} * c_p * (T_{Spw/A} - T_{Spw/E}) = \dot{m}_{D/B} * (r_B + c_p * (T_{S/B} - T_{U/B}))$$

mit $T_{U/B} = T_{Spw/E} + \Delta T_{klein} = 15^\circ C + 3K = 18^\circ C$

und $T_{Spw/A} = T_{S/B} + \Delta T_{gro\beta} = 105^\circ C - 20K = 85^\circ C$

$$\dot{Q}_B = 7,8 * 10^{-3} * \dot{m}_{FD} \left[\frac{t}{h} \right] * \left(623 \left[\frac{kWh}{t} \right] + 1,16 \left[\frac{kWh}{t * K} \right] * (105^\circ C - 18^\circ C) \right)$$

$$\dot{Q}_B \approx 5,6 \left[\frac{kWh}{t} \right] * \dot{m}_{FD} \left[\frac{t}{h} \right]$$

Berechnung der Leistung eines Laugenkühlers:

$$\dot{Q}_{L/K} = \dot{m}_{FD} * \frac{A}{100} * c_p * (T_{A/E} - T_{A/A})$$

$$\dot{Q}_{L/K} = \dot{m}_{FD} * \frac{5}{100} * 1,16 \left[\frac{kWh}{t * K} \right] * (105^\circ C - 30^\circ C) = \dot{m}_{FD} * 4,35 \left[\frac{kWh}{t} \right]$$

Berechnung der Leistung eines Speisewasserkühlers:

Speisewassertemperatur am Eintritt Economizer normalerweise 102..105 °C. In Abhängigkeit des Economizers und Brennstoffs Abkühlung auf 94 °C möglich.

$$\begin{aligned}\dot{Q}_{Spw/K} &= \dot{m}_{Zu/Spw} * c_p * (T_{Zu/Spw/A-K} - T_{Zu/Spw/E-K}) = \dot{m}_{Spw} * c_p * (T_{S/E} - T_{Spw/A-K}) \\ &= \dot{m}_{FD} * \left(1 + \frac{A}{100}\right) * c_p * (T_{S/E} - T_{Spw/A-K})\end{aligned}$$

$$\dot{Q}_{Spw/K} = \dot{m}_{FD} \left[\frac{t}{h} \right] * 1,05 * 1,16 \left[\frac{kWh}{t * K} \right] * (105^\circ C - 94^\circ C) \approx 13,4 \left[\frac{kWh}{t} \right] * \dot{m}_{FD} \left[\frac{t}{h} \right]$$

Berechnung der zu erwartenden Temperaturerhöhung des Zusatzwassers durch den Speisewasserkühler:

$$\dot{Q}_{Spw/K} = \dot{m}_{Zu/Spw} * c_p * (T_{Zu/Spw/A-K} - T_{Zu/Spw/E-K})$$

$$\text{mit } \dot{m}_{Zu/Spw} = \dot{m}_{FD} * \left(1 + \frac{A}{100}\right) - \dot{m}_{KON}$$

$$\Delta T_{Zu/Spw} = \frac{\dot{Q}_{Spw/K}}{\left(\dot{m}_{FD} * \left(1 + \frac{A}{100}\right) - \dot{m}_{KON}\right) * c_p}$$

Berechnung der dargestellten Größen anhand eines Beispiels:

- Dampfkessel mit 10 MW (entspricht 15,4 t/h)
- Kondensatverluste 10 %
- Absalzrate 5 %
- Direkter Dampfverbrauch innerhalb der Produktion 20 %

Berechnung des Brühdampfmassenstroms:

$$\dot{m}_{FD} = 15,4 \left[\frac{t}{h} \right]$$

$$\dot{m}_{D/M} = 7,8 * 10^{-3} * 15,4 \left[\frac{t}{h} \right] = 0,12 \left[\frac{t}{h} \right]$$

Berechnung der Leistung eines Brüdenkondensators:

$$\dot{Q}_B \approx 5,6 \left[\frac{kWh}{t} \right] * \dot{m}_{FD} \left[\frac{t}{h} \right] \approx 5,6 \left[\frac{kWh}{t} \right] * 15,4 \left[\frac{t}{h} \right] \approx 86 \text{ [kW]}$$

Berechnung der Leistung eines Speisewasserkühlers:

$$\dot{Q}_{Spw/K} \approx 13,4 \left[\frac{kWh}{t} \right] * \dot{m}_{FD} \left[\frac{t}{h} \right] \approx 13,4 \left[\frac{kWh}{t} \right] * 15,4 \left[\frac{t}{h} \right] \approx 206 \text{ [kW]}$$

Berechnung der Gesamtleitung der möglichen Wärmerückgewinnung und erzielbare Temperatur des aufzuheizenden Zusatzwassers:

$$\dot{Q}_{WRG/Zu/Spw} = \dot{Q}_B + \dot{Q}_{Spw/K} \approx 86 \text{ [kW]} + 206 \text{ [kW]} \approx 292 \text{ [kW]}$$

$$T_{Zu/Spw/A-WRG} = \frac{\dot{Q}_{WRG/Zu/Spw}}{\left(\dot{m}_{FD} * \left(1 + \frac{A}{100} \right) - \dot{m}_{KON} \right) * c_p} + T_{Zu/Spw/E-WRG}$$

$$T_{Zu/Spw/A-WRG} = \frac{292 \text{ [kW]}}{\left(15,4 \left[\frac{t}{h} \right] * \left(1 + \frac{5}{100} \right) - 10,8 \left[\frac{t}{h} \right] \right) * 1,16 \left[\frac{kWh}{t * K} \right]} + 15 \text{ [}^\circ\text{C]} \approx 62 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

8.4. Eigene Publikationen

- Lauterbach, C., Schmitt, B., Vajen, K.,** 2014. *System analysis of a low-temperature solar process heat system*. Solar Energy 101, 117–130.
- Lauterbach, C., Schmitt, B., Jordan, U., Vajen, K.,** 2012. *The potential of solar heat for industrial processes in Germany*, Renewable and Sustainable Energy Reviews, **Volume 16, Issue 1, 2012** (pp. 5121 - 5130).
- Schmitt, B., Lauterbach, C., Vajen, K., Reinl, K.-P.,** 2012. *Pilotanlage zur Bereitstellung solarer Prozesswärme bei der Hütt-Brauerei*, Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben „Thermische Solaranlage zur Prozesswärmebereitstellung in Verbindung mit der Implementierung eines neuen, energieeffizienten Kochverfahrens“, Förderkennzeichen: 0329609E.
- Lauterbach, C., Schmitt, B., Vajen, K.,** 2012. *Pilotanlage zur Bereitstellung solarer Prozesswärme bei der Hütt-Brauerei*, Proceedings of Gleisdorf Solar 2012, Gleisdorf, Österreich.
- Schmitt, B., Lauterbach, C., Dittmar, M., Vajen, K.,** 2012. *Guideline for the utilization of solar heat in breweries*, Proceedings of Eurosun 2012, Rijeka, Kroatien.
- Schmitt, B., Lauterbach, C., Vajen, K.,** 2012. *Leitfaden zur Nutzung solarer Prozesswärme in Brauereien*.
- Schmitt, B., Lauterbach, C., Vajen, K.,** 2012. *Branchenkonzept solare Prozesswärme in Brauereien*, Teil 2 des Abschlussberichtes zum Forschungsvorhaben „SOPREN – Solare Prozesswärme und Energieeffizienz“, Förderkennzeichen: 0329601T.
- Lauterbach, C., Schmitt, B., Jordan, U., Vajen, K.,** 2011. *Solare Prozesswärme in Deutschland - Potential und Markterschließung*, 21. Symposium Thermische Solarenergie, Bad Staffelstein.
- Lauterbach, C., Javid Rad, S., Schmitt, B., Vajen, K.,** 2011. *Feasibility assessment of solar process heat applications*, Proc. ISES Solar World Congress.
- Schmitt, B., Lauterbach, C., Vajen, K.,** 2011. *Investigation of selected solar process heat applications regarding their technical requirements for system integration*, Proc. ISES Solar World Congress.
- Schmitt, B., Lauterbach, C., Vajen, K.,** 2011. *Solare Prozesswärme - Potential und Anwendungsbereiche*, 4. VDI-Fachtagung, Ludwigsburg.

- Lauterbach, C., Schmitt, B., Vajen, K.,** 2011. *Das Potential solarer Prozesswärme in Deutschland*, Teil 1 des Abschlussberichtes zum Forschungsvorhaben „SOPREN – Solare Prozesswärme und Energieeffizienz“; Förderkennzeichen: 0329601T.
- Schmitt, B., Lauterbach, C.,** 2011. *Sinnvolle Verknüpfung - Solare Prozesswärme für die Bierproduktion, ein Pilotprojekt aus Nordhessen*, Fachbeitrag BrauIndustrie, Ausgabe 3/2011.
- Lauterbach, C., Schmitt, B., Jordan, U., Vajen, K.,** 2010. *Potential for Solar Process Heat in Germany - Suitable Industrial Sectors and Processes* , Proc. EuroSun, Graz, Österreich.
- Schmitt, B., Lauterbach, C., Jordan, U., Vajen, K.,** 2010. *Sustainable Beer Production by Combining Solar Process Heat and Energy Efficiency - Holistic System Concept and Preliminary Operational Experiences*, Proc. EuroSun, Graz, Österreich.
- Marty, H., Schmitt, B., Frank, E.,** 2010. *Audit Felschlösschen AG*. Industry Audit im Rahmen des Forschungsprojektes "EINSTEIN goes Swiss", Rapperswil.
- Lauterbach, C., Schmitt, B., Vajen, K., Jordan, U.,** 2009. *Solar process heat in breweries -- potential and barriers of a new application area*, Proc. ISES Solar World Congress, Johannesburg, Südafrika.
- Schmitt, B., Lauterbach, C., Vajen, K., Jordan, U.,** 2009. *Systemintegration thermischer Solaranlagen in industrielle Prozesse am Beispiel des Brauwesens*, 19. Symposium Thermische Solarenergie, Bad Staffelstein.
- Schmitt, B., Vajen, K., Jordan, U.,** 2008. *Integration of Solar Heating Systems for Process Heat Generation in Breweries*, Proc. EuroSun, Lissabon, Portugal.

